



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TEK TESİRLİ YAPIŞTIRMA
BAĞLANTILARINDA EPOKSİ YAPIŞTIRICI
İÇERİSİNDE NANOPARTİKÜL
KULLANILMASININ BAĞLANTININ STATİK
VE YORULMA MUKAVEMETİNE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

İsmail SARAÇ

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat-2018
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

İsmail SARAÇ tarafından hazırlanan "TEK TESİRLİ YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA EPOKSİ YAPIŞTIRICI İÇERİSİNDE NANOPARTİKÜL KULLANILMASININ BAĞLANTININ STATİK VE YORULMA MUKAVEMETİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI" adlı tez çalışması 02/02/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and

verified by these rules and referred all material and

Jüri Üyeleri

İmza

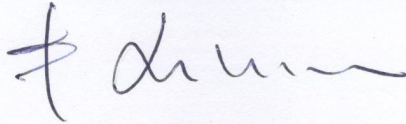
Başkan

Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ



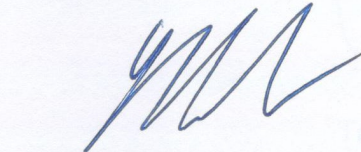
Üye

Doç. Dr. Erol KILIÇKAP



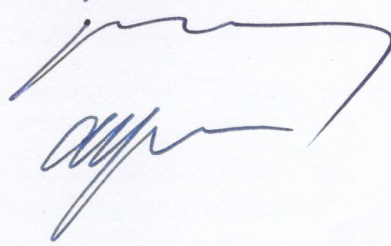
Üye

Doç. Dr. Yahya Hışman ÇELİK



Üye

Doç. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ



Üye

Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR

Yukarıdaki sonucu onaylarım.



Doç. Dr. Bahattin İŞCAN
FBE Müdürü

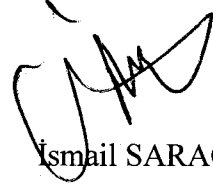
Bu tez çalışması BTÜBAP tarafından BTUBAP-2016-DOKTORA-2nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



İsmail SARAÇ

Tarih: 14.02.2018

ÖZET

DOKTORA TEZİ

TEK TESİRLİ YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA EPOKSİ YAPIŞTIRICI İÇERİSİNDE NANOPARTİKÜL KULLANILMASININ BAĞLANTININ STATİK VE YORULMA MUKAVEMETİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

İsmail SARAÇ

Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

2018, 109 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ
Doç. Dr. Erol KILIÇKAP
Doç. Dr. Yahya Hışman ÇELİK
Doç. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ
Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR

Yapıştırma bağlantılarında, yapıştırıcı içerisine katılan nanopartiküllerin, bağlantıların mekanik özelliklerine etkisi ile ilgili araştırmalar son zamanlarda dikkat çekmektedir. Bu çalışmada; epoksi yapıştırıcı içerisine farklı oranlarda Al_2O_3 , TiO_2 ve SiO_2 nanopartikülleri katılarak ve katkısız epoksi yapıştırıcı kullanılarak tek tesirli bindirme bağlantıları oluşturulmuş ve bağlantıların statik ve yorulma dayanımları 20, 25 ve 30 mm bindirme boylarında deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda yapıştırıcı olarak DP460 epoksi yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme olarak AISI 304 paslanmaz çelik plaka kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde; nanopartikül katkılı yapıştırıcıların kullanılmasıyla elde edilen bağlantılarda genel olarak ortalama hasar yükü dikkate değer şekilde artmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, en büyük ortalama hasar yükü, %4- Al_2O_3 takviyeli numunelerde elde edilmiştir. Statik testler sonucunda numunelerin yapışma yüzeyleri incelendiğinde katkısız yapıştırıcı kullanılan numunelerde hasar adhezyon ayrılması şeklinde gözlemlenirken, nanopartikül takviyesiyle hasar adhezyon ve kohezyon karışımı şeklinde gözlemlenmiştir. Yorulma deneylerinde frekans 10 Hz, yükleme oranı (R) ise 0.1 olarak sabit alınmıştır. Yorulma deneyleri sonucunda Al_2O_3 ve SiO_2 katkılı numunelerde bağlantıların yorulma dayanımı artarken TiO_2 katkılı numunelerde yorulma dayanımı azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yapıştırma bağlantıları, tek tesirli bağlantılar, nanopartikül, yorulma dayanımı

ABSTRACT

Ph.D THESIS

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE STATIC AND FATIGUE STRENGTH OF ADHESIVE JOINTS BONDED EPOXY ADHESIVE INCLUDED Al_2O_3 , TiO_2 AND SiO_2 NANOPARTICLES

İsmail SARAÇ

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ

2018, 109 Pages

Jury

Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ
Doç. Dr. Erol KILIÇKAP
Doç. Dr. Yahya Hışman ÇELİK
Doç. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ
Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR

There is a considerable interest nanoparticles added structural adhesives, recently. Because, nanoparticles improve the mechanical properties of an adhesive and its joint. In this paper, the static and fatigue strengths of single lap shear joints incorporating Al_2O_3 , TiO_2 and SiO_2 nanoparticles were compared to those adhesive joints without nanoparticles. Experiments were performed 20, 25 and 30 mm overlap lengths, respectively. DP460 epoxy adhesive, Al_2O_3 , TiO_2 and SiO_2 nanoparticles and AISI 304 stainless steel plates were used for manufacturing the single lap adhesive joints. The results of the experimental research revealed that average failure load was increased significantly nanoparticle-reinforced adhesive joints. The highest average failure load was obtained with %4- Al_2O_3 in epoxy adhesive. As the average failure load increased, the locus of failure changed from interfacial to the mixture of interfacial and cohesive. Fatigue tests were performed at 10 Hz using an R-ratio of 0.1. From the tests, fatigue strengths of the adhesive joints increased when the adhesive of the adhesive joint had Al_2O_3 and SiO_2 and decreased when the adhesive of the adhesive joint had TiO_2 .

Keywords: Adhesive joints, single lap joints, nanoparticles, fatigue strength

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının şekillenmesinde; yönlendirme, bilgi ve tecrübeleriyle destek aldığım çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yaptığım bu çalışmaya maddi destek sunan Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BTÜBAP) Koordinatörlüğü'ne ve proje yürütücüm Sayın Doc. Dr. Hamit ADİN'e teşekkür ederim.

Batman Üniversitesi'nde yaptığım çekme ve yorulma deneyleri sırasında gerek deney cihazlarının kullanılmasında gerekse deneyler sırasında yardımlarını aldığım Araştırma Görevlileri Sayın Dr. Burak YENİGÜN'e ve Sayın Raşit Koray ERGÜN'e teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca, her türlü maddi ve manevi desteğini eksik etmeyen babam Hasan SARAÇ' a teşekkürü borç bilirim.

Her konuda desteğini daima hissettiğim sevgili eşim Tuğba SARAÇ'a ve çocuklarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İsmail SARAÇ
BATMAN-2018

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|-------------|
| ÖZET | iv |
| ABSTRACT | v |
| ÖNSÖZ | vi |
| İÇİNDEKİLER | vii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR | ix |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | xi |
| ÇİZELGELER LİSTESİ | xiii |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Yapıştırma Bağlantılarının Endüstride Kullanım Alanları | 3 |
| 1.2. Yapıştırma İşleminin Tarihçesi | 4 |
| 1.3. Literatür Araştırması | 5 |
| 2. KURAMSAL TEMELLER | 18 |
| 2.1. Yapışma İşlemi | 18 |
| 2.1.1. Adhezyon kuvveti | 19 |
| 2.1.2. Kohezyon kuvveti | 19 |
| 2.2. Yapışma Teorileri | 20 |
| 2.2.1. Mekanik tutunma teorisi | 20 |
| 2.2.2. Adsorpsiyon teorisi | 21 |
| 2.2.3. Elektrostatik teorisi | 21 |
| 2.2.4. Difüzyon teorisi | 22 |
| 2.3. Yapıştırma Bağlantılarının Diğer Bağlantılarla Karşılaştırılması | 22 |
| 2.3.1. Perçin bağlantıları | 22 |
| 2.3.2. Kaynaklı bağlantılar | 22 |
| 2.3.3. Lehim bağlantıları | 23 |
| 2.3.4. Vida ve civata ile yapılan bağlantılar | 24 |
| 2.3.5. Pres bağlantıları | 24 |
| 2.3.6. Yapıştırma bağlantıları | 24 |
| 2.4. Yapıştırıcılar | 26 |
| 2.4.1. Kimyasal tipleri açısından yapıştırıcılar | 27 |
| 2.4.2. Formları açısından yapıştırıcılar | 30 |
| 2.4.3. Yüksek sıcaklıklara dayanaklı yapısal yapıştırıcılar | 31 |
| 2.5. Yapıştırılacak Yüzeylerin Hazırlanması | 32 |
| 2.5.1. Çözücüyle silme | 33 |
| 2.5.2. Buharla yağ giderme | 33 |
| 2.5.3. Aşındırma | 34 |
| 2.5.4. Buharla honlama | 34 |
| 2.5.5. Ultrasonik temizleme | 34 |
| 2.5.6. Kimyasal çözeltiyle temizleme | 35 |

| | |
|---|------------|
| 2.5.7. Diğer kimyasal ve mekanik metotlar | 35 |
| 2.5.8. Primerler | 35 |
| 2.6. Yapıştırma Bağlantı Tasarımları..... | 36 |
| 2.6.1. Yapıştırma bağlantılarının maruz kaldığı kuvvetler | 36 |
| 2.6.2. Yapıştırma bağlantı çeşitleri | 38 |
| 2.7. Yorulma Olayı ve Tarihçesi..... | 39 |
| 2.7.1. Yorulma hasar çeşitleri | 43 |
| 2.7.2. Yorulma testi ve teknik terimleri | 43 |
| 2.7.3. Yorulma olayının gelişimi | 46 |
| 2.7.4. Yapıştırma bağlantılarında yorulma | 48 |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM..... | 51 |
| 3.1. Yapıştırılan Malzeme..... | 52 |
| 3.2. Yapıştırıcı Malzeme..... | 53 |
| 3.3. Nanopartikül Katkı Malzemeleri | 56 |
| 3.4. Numunelerin Hazırlanması | 57 |
| 3.4.1. Uygulanan ön işlem | 57 |
| 3.4.2. Deney numunelerinin üretimi | 58 |
| 3.5. Deney Programı | 65 |
| 3.5.1. Çekme deney programı | 65 |
| 3.5.2. Yorulma deney programı | 66 |
| 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA..... | 68 |
| 4.1. Çekme Deney Sonuçları ve Tartışma | 68 |
| 4.1.1. Çekme kırılma yüzeyleri analizi | 81 |
| 4.2. Yorulma Deney Sonuçları | 84 |
| 4.2.1. Yorulma kırılma yüzeyleri analizi | 91 |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER..... | 98 |
| 5.1 Sonuçlar | 98 |
| 5.2 Öneriler | 100 |
| KAYNAKLAR..... | 101 |
| ÖZGEÇMİŞ | 109 |

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

| | |
|------------------|---|
| Al_2O_3 | Alüminyum Oksit |
| TiO_2 | Titanyum Dioksit |
| SiO_2 | Silisyum Dioksit |
| σ_{ak} | Akma dayanımı (MPa) |
| σ_k | Kopma dayanımı (MPa) |
| E | Elastisite Modülü (GPa) |
| ν | Poisson Oranı |
| $\sigma_{maks.}$ | Maksimum Gerilme (MPa) |
| $\sigma_{min.}$ | Minimum gerilme (MPa) |
| σ_m | Ortalama gerilme (MPa) |
| $\Delta\sigma$ | Gerilme aralığı (MPa) |
| σ_a | Gerilme genliği (MPa) |
| R | Yük oranı |
| f | Frekans (Hz) |
| L | Bindirme boyu (mm) |
| N | Çevrim sayısı |
| $F_{maks.}$ | Maksimum çekme yükü (kN) |
| F_{hasar} | Ortalama hasar yükü (kN) |
| $G_{maks.}$ | Maksimum birim uzama enerji yayılma hızı (kJ/m^2) |
| G_c | Kritik birim uzama enerji yayılma hızı (kJ/m^2) |
| S | Uzama (mm) |

Kısaltmalar

| | |
|------|--|
| CFRP | Carbon Fiber Reinforced Polymer (Karbon Fiber Takviyeli Polimer) |
| GRE | Glass Reinforced Epoxy (Cam Takviyeli Epoksi) |
| DCB | Double-Cantilever Beam (Çift Konsollu Kiriş) |
| FEM | Finite Elements Method (Sonlu Elemanlar Yöntemini) |
| TDCB | Tapered Double-Cantilever Beam (Konik Çift Konsollu Kiriş) |
| FEA | Finite Elements Approach (Sonlu Elemanlar Yaklaşımı) |

| | |
|-------|---|
| MMELS | Mixed Mode End Load Split |
| CSA | Cleaning Sulfuric Acid (Sülfürik Asitle Temizleme) |
| GFRP | Glass Fiber Reinforced Polymer (Cam Elyaf Takviyeli Polimer) |
| LDB | Laminated Doublers in Bending |
| FCG | Fatigue Crack Growing (Yorulma Çatlak Gelişimi) |
| CNT | Carbon Nanotube (Karbon Nanotüp) |
| ASTM | American Society For Testing and Materials |
| LEFM | Linear Elastic Fracture Mechanics (Lineer Elastik Kırılma Mekaniği) |
| AISI | American Iron and Steel Institute |
| EDX | Eneegy Dispersive X-Ray Analysis (Enerji Ayrımlı X-Işını Analizi) |
| XPS | X-Ray Photoelectron Spectroscopy (X-Işını Fotoelektron Ölçümü) |
| ENF | End-Notched Flexure |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1. Yapışma yüzeylerinde oluşan kuvvetler..... | 18 |
| Şekil 2.2. Adhezyon ve kohezyon olayının şematik olarak gösterilmesi..... | 20 |
| Şekil 2.3. Kaynak bağlantısında gerilme dağılımı..... | 23 |
| Şekil 2.4. Gerilme tipleri..... | 37 |
| Şekil 2.5. Bazı yaygın yapıştırma bağlantı tipleri..... | 38 |
| Şekil 2.6. Yorulma çatlak başlangıcı ve hasar eğrisi..... | 42 |
| Şekil 2.7. Yorulma testi için sinüzoidal yükleme..... | 44 |
| Şekil 2.8. Yorulma yükleme biçimleri..... | 46 |
| Şekil 2.9. Tek bindirmeli birleştirmede gerilme dağılımı..... | 49 |
| Şekil 2.10. Tek tesirli yapıştırma bağlantısında tipik bir çatlak ilerlemesi..... | 49 |
| Şekil 2.11. Yorulma deneyinde yapıştırma bölge çatlak ilerlemesi..... | 50 |
| Şekil 3.1. Tek tesirli bindirme bağlantısı..... | 51 |
| Şekil 3.2. Shimadzu AG-X 250 kN universal çekme cihazı..... | 52 |
| Şekil 3.3. Shimadzu EHF-EV 100kN yorulma cihazı..... | 52 |
| Şekil 3.4. AISI 304 paslanmaz çelik çekme testi grafiği..... | 53 |
| Şekil 3.5. DP460 epoksi yapıştırıcı çekme testi grafiği..... | 54 |
| Şekil 3.6. DP 460 epoksi yapıştırıcı ve uygulama aparatı..... | 55 |
| Şekil 3.7. Yapıştırmaya hazır hale getirilmiş AISI 304 çelik malzemeler..... | 58 |
| Şekil 3.8. Numune üretim kalıbı..... | 59 |
| Şekil 3.9. Yapıştırıcı uygulaması..... | 60 |
| Şekil 3.10. Yapıştırılan malzemelerin ilkinin kalıba yerleştirilmesi..... | 60 |
| Şekil 3.11. Yardımcı malzemelerin kalıba yerleştirilmesi..... | 61 |
| Şekil 3.12. Yapıştırılan malzemelerin ikincisinin kalıba yerleştirilmesi..... | 61 |
| Şekil 3.13. Yapışma bölgelerine ağırlık uygulanması..... | 62 |
| Şekil 3.14. Kalıptan çıkartılan deney numuneleri..... | 63 |
| Şekil 3.15. Yapıştırıcının tartılması..... | 64 |
| Şekil 3.16. Nanopartikül tartılması..... | 64 |
| Şekil 3.17. Tek tesirli bindirme bağlantı geometrisi..... | 65 |
| Şekil 4.1. Al_2O_3 katkısının hasar mukavemetine etkisi..... | 69 |
| Şekil 4.2. TiO_2 katkısının hasar mukavemetine etkisi..... | 70 |
| Şekil 4.3. SiO_2 katkısının hasar mukavemetine etkisi..... | 71 |
| Şekil 4.4. Katkisız numunelerin bindirme boyuna göre hasar yükü değerleri..... | 72 |

| | |
|--|----|
| Şekil 4.5. Al ₂ O ₃ katkılı numunelerin bindirme boyuna göre hasar yükü değerleri..... | 72 |
| Şekil 4.6. TiO ₂ katkılı numunelerin bindirme boyuna göre hasar yükü değerleri..... | 73 |
| Şekil 4.7. SiO ₂ katkılı numunelerin bindirme boyuna göre hasar yükü değerleri..... | 74 |
| Şekil 4.8. 20 mm bindirme boyunda kuvvet-uzama eğrileri..... | 77 |
| Şekil 4.9. 25 mm bindirme boyunda kuvvet-uzama eğrileri..... | 78 |
| Şekil 4.10. 30 mm bindirme boyunda kuvvet-uzama eğrileri..... | 79 |
| Şekil 4.11. Katkısız numune hasar yüzeyi..... | 81 |
| Şekil 4.12. Al ₂ O ₃ takviyeli numune hasar yüzeyi..... | 81 |
| Şekil 4.13. TiO ₂ takviyeli numune hasar yüzeyi..... | 82 |
| Şekil 4.14. SiO ₂ takviyeli numune hasar yüzeyi..... | 82 |
| Şekil 4.15. Adhezyon ve kohezyon-adhezyon kırılması gösterimi..... | 83 |
| Şekil 4.16. Kohezyon ve adhezyon kuvvetlerinin gösterilmesi..... | 84 |
| Şekil 4.17. 20 mm bindirme boyunda, numunelerin S-N grafikleri..... | 85 |
| Şekil 4.18. 25 mm bindirme boyunda, numunelerin S-N grafikleri..... | 85 |
| Şekil 4.19. 30 mm bindirme boyunda, numunelerin S-N grafikleri..... | 86 |
| Şekil 4.20. Katkısız numunelerde bindirme uzunluğuna göre S-N grafikleri..... | 86 |
| Şekil 4.21. Al ₂ O ₃ katkılı numunelerde bindirme uzunluğuna göre S-N grafikleri..... | 87 |
| Şekil 4.22. TiO ₂ katkılı numunelerde bindirme uzunluğuna göre S-N grafikleri..... | 87 |
| Şekil 4.23. SiO ₂ katkılı numunelerde bindirme uzunluğuna göre S-N grafikleri..... | 88 |
| Şekil 4.24. Çatlak uzunluğu değişimi..... | 89 |
| Şekil 4.25. Katkısız numunelerin yorulma hasar yüzeyi örnekleri (L=20 mm)..... | 92 |
| Şekil 4.26. Katkısız numunelerin yorulma hasar yüzeyi örnekleri (L=25 mm)..... | 93 |
| Şekil 4.27. Al ₂ O ₃ katkılı numunelerin yorulma hasar yüzeyi örnekleri..... | 94 |
| Şekil 4.28. TiO ₂ katkılı numunelerin yorulma hasar yüzeyi örnekleri..... | 95 |
| Şekil 4.29. SiO ₂ katkılı numunelerin yorulma hasar yüzeyi örnekleri..... | 96 |

ÇİZELGELER LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Tablo 2.1. R değerlerine göre yorulma yük biçimleri..... | 45 |
| Tablo 3.1. AISI 304 mekanik özellikleri..... | 53 |
| Tablo 3.2. AISI 304 çeliği kimyasal kompozisyonu..... | 53 |
| Tablo 3.3. AISI 304 çeliği fiziksel özellikleri..... | 53 |
| Tablo 3.4. DP460 epoksi yapıştırıcı mekanik özellikleri..... | 54 |
| Tablo 3.5. DP460 epoksi yapıştırıcı fiziksel özellikleri..... | 54 |
| Tablo 3.6. DP460 kürleşme şartlarına göre dayanım değerleri..... | 55 |
| Tablo 3.7. DP460 bindirmeli yapıştırma kayma testi sonuçları | 56 |
| Tablo 3.8. Nanopartikül katkı malzemeleri özellikleri..... | 57 |
| Tablo 3.9. Çekme deneyi numune tipleri..... | 66 |
| Tablo 3.10. Yorulma deneyi numune tipleri..... | 67 |
| Tablo 3.11. Katkısız numunelere ait ortalama hasar yükü değerleri..... | 67 |
| Tablo 4.1. Katkılı ve katkısız numunelerin hasar yükü ve gerilme değerleri..... | 80 |
| Tablo 4.2. Katkılı ve katkısız numunelerin hasar yükü ve yorulma limit değerleri..... | 90 |

1. GİRİŞ

Aynı veya farklı özelliklerdeki malzemeleri bir araya getirip kullanma eğilimi çeşitli avantajlarından dolayı geçmişten günümüze devam etmektedir. Perçinli, cıvatalı, kaynaklı, lehimli ve sıkı geçmeli birleştirme yöntemleri ile birlikte, özellikle II. Dünya savaşı sonrasında plastik-yapıştırıcı teknolojisinin gelişmesine paralel olarak, yapıştırma bağlantıları da endüstride yoğun bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Geçmişte daha çok ev ve mutfak eşyaları gibi günlük yaşam malzemelerinin imalatında kullanılan yapıştırıcılar artık emniyetin çok önemli olduğu birçok mühendislik sahasında da yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bu durumda yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışlarının her yönüyle tespit edilmesi son derece önem kazanmıştır.

Yapıştırma bağlantılarının gemi, inşaat, uçak ve makine mühendisliği gibi pek çok mühendislik dalında kullanımı, endüstrinin ilk yıllarına dayanır. Teknolojinin gelişmesi ile enerji ihtiyacı artmış ve nitelikli enerji türlerinin doğada azalmasıyla, teknolojiye mümkün olan en az enerji kullanımına cevap olabilecek seçimler araştırılmıştır. 1960'lara kadar alüminyum bağlantı elemanları birçok sektörün olduğu gibi özellikle havacılık sektörünün de temel elemanı olmuştur (Çalık, 2008)

Alüminyum bağlantı elemanı; yüksek yüklenme kapasitesi, basit imal teknikleri ve tekrar üretilebilme kolaylıklarıyla yapıştırıcılara göre belirli avantajlara sahip olmasına karşın imalatçıların isteklerini 1970'lere gelindiğinde karşılayamaz oldu. Azaltılmış üretim ve bakım maliyeti, iyileştirilmiş yapısal etki (üniform yük dağılımı ve daha hafif yapı), yüksek performans ve kalite-imalat kavramları önem kazandı. Bu yüzden imalatçılar, tüm bu özellikleri rahatlıkla karşılayan yapıştırıcılara yöneldiler ve 1970'lerde uçak imalatında yapıştırıcıları kullanmaya başladılar (Kodakoğlu, 1996).

Herhangi bir sistemdeki enerji tüketimini azaltmak için çeşitli yöntemler vardır. Örneğin yakıtta tasarrufa gitmenin başlıca yollarından bir tanesi de sistemlerin ağırlığını azaltmaktır. Sistem elemanlarını birleştirmek için kullanılan cıvata, perçin ve kaynak yerine daha hafif bir bağlantı şekli olan yapıştırıcıların kullanımı sistemi daha hafif hale getirmiştir (Temiz, 2003).

Yapıştırıcı ile birleştirme tekniği aynı veya farklı malzemelerden üretilmiş plakaların birleştirilmesinde başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Literatürde yapıştırma mekanizmaları ve farklı bindirme tiplerinin mekanik davranışları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Yapıştırma bağlantılarının statik yükler altında gerilme ve deformasyon davranışları birçok çalışmada ele alınmıştır. Günümüz yapıştırıcı teknolojisi, dinamik

yükler altında yüksek mukavemet gösteren yapıştırıcıların tasarımlarda kullanımını mümkün kılmaktadır. Kullanılan yapıştırıcılar ile kısa süreli darbe ve harmonik yükler altında bağlantılar güvenli bir şekilde yükü taşımaktadır. Mühendislikte kullanılan malzemelerin kısa zaman aralığında etki eden dinamik yükler altında davranışları farklılıklar göstermektedir. Yapıştırıcı ile birleştirme tekniğinden en iyi dinamik mukavemeti elde edebilmek için, darbe sonrası oluşan ve dinamik yüklerden kaynaklanan gerilme dalgalarının yapıştırıcı ve plaka kalınlıkları boyunca yayılımı, dinamik yük altında yapıştırıcı yorulması ve dinamik yükten dolayı oluşan yapıştırıcı hasarının tespiti büyük önem kazanmaktadır (Yıldırım, 2011).

Yapıştırma bağlantıları birçok uygulamada klasik birleştirme yöntemlerinin yerini almıştır. Dolayısıyla yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin tespit edilmesi konusu önemli bir araştırma sahası olarak ortaya çıkmıştır. Makine parçaları işlevlerini yerine getirirken genellikle dinamik ve çevrimsel yüklere maruz kalmaktadır. Çevrimsel yükler altında çalışan makine parçaları zamanla statik dayanımlarının oldukça altındaki gerilme değerlerinde yorulma hasarına uğramaktadır. Bu durumda malzemelerin yorulma dayanımlarının tespit edilmesi konusu çok önemli olmaktadır. Literatürde yapıştırma bağlantılarının statik dayanımlarının araştırılması ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Buna karşın, çeşitli yöntemlerle yapıştırma bağlantılarının yorulma dayanımını artırma çalışmaları güncel bir araştırma konusu olarak önemi korumaktadır.

Yapıştırma bağlantılarının statik ve yorulma dayanımları ile ilgili yapılan araştırmalar genel olarak incelendiğinde; bağlantı bindirme uzunluğu, yapıştırılan malzemelerin kalınlığı, çevresel şartlar (sıcaklık su, nem), bağlantı kalınlığı, bağlantı geometrisi, yükleme biçimi (sabit genlikli, değişken genlikli, yükleme oranı, yükleme frekansı), farklı yüzey işlemleri, köşe geometrisi, kompozit yama, hibrid bağlantı ve yapıştırıcı madde miktarı konuları ile ilgili çalışmalar dikkat çekmektedir. Son zamanlarda ise özellikle epoksi yapıştırıcılar içerisine katılan çeşitli özelliklerdeki nanopartiküllerin, bağlantıların mekanik özelliklerine etkisi ile ilgili araştırmalara literatürde rastlanmaktadır. Yapıştırıcı içerisine nanopartikül takviyesi ile ilgili yapılan bu araştırmalar ağırlıklı olarak statik yükler altında yapılan çalışmalar olarak dikkat çekmektedir. Buna karşın çevrimsel yük altında yapılan çalışmalar, incelenen literatür içerisinde oldukça sınırlı sayıdadır. Bu çalışmalar incelendiğinde; nanopartiküllerin, yapıştırıcı madde içerisinde küçük miktarlarda kullanılmasına rağmen yapıştırıcı maddelerin özelliklerini önemli ölçülerde değiştirdiği tespit edilmiştir. Nanopartiküller yapıştırıcıların termal, elektriksel, termomekanik özelliklerine olumlu yönde katkı

sağlarken aynı zamanda yapıştırıcıların çevresel etkenlere dayanıklılığını, yüksek oranda su absorbe etme özellikleri ve geliştirilmiş yaşlanma özellikleri sayesinde arttırmaktadırlar.

Bu çalışmada; tek tesirli bindirme bağlantı geometrisinde, yapıştırıcı içerisine belirli oranlarda katılmış olan nanopartiküller vasıtasıyla yapıştırma bağlantılarının statik ve yorulma dayanımlarını arttırmak amaçlanmıştır. Ayrıca yapıştırma bağlantılarında bu çalışmada kullanılan nanopartiküller içerisinde en etkili nanopartikül çeşidi ve ideal nanopartikül karışım oranı tespit edilmeye çalışılmıştır.

1.1. Yapıştırma Bağlantılarının Endüstride Kullanım Alanları

Yapıştırıcıların özelliklerindeki gelişmeler ile birlikte kullanım alanları giderek artmaktadır. Yapıştırma işleminde metal malzemelerde kaynak, lehim gibi birleştirme yöntemlerine nazaran, malzemelerin ısıya maruz kalması nedeniyle meydana gelen kusurlar (molekül yapısındaki değişimler, gerilme yığılmaları, mukavemet azalması, çekmeler ve çarpılmalar gibi) oluşmaz ve düşük işletme maliyetleri gibi önemli avantajları vardır. Ayrıca yapıştırma bağlantılarında birleştirilen geometri için sınırlama yoktur, uygulanmaları kolaydır. Yapıştırma bağlantılarının otomotiv endüstrisinde, uzay ve uçak sanayinde, petek yapıların oluşturulmasında, farklı iki malzemenin birleştirilmesinde kullanılmaları gün geçtikçe artmaktadır. Yapıştırıcılar ayrıca elektronik sanayinde, demiryolu ve deniz araçlarının yapımında da kullanılmaktadır (Şahin,2011).

Yapıştırıcıların özelliklerindeki gelişmelerden dolayı, metallerin yapıştırılmasında büyük ilerlemeler sağlanmıştır. Kaynak veya diğer metodlarla birleştirilmeleri mümkün olmayan iki farklı metalin yapıştırılması, metal-kompozit birleştirmeleri, otomotiv endüstrisinde şasi üretiminde punta kaynağı ile birlikte kullanılmaları, uzay ve uçak sanayisinde hafiflik için tasarlanan petek yapı ile dış cidarın birleştirilmesi, dişli kutuları ve motor gövde bloklarında sızdırmazlık elemanı olarak kullanılmaları gün geçtikçe artmaktadır. Cıvataların çözülmeye karşı emniyete alınmaları için yapıştırıcı kullanımı, diğer emniyete alma metodlarına (taçlı somun, tırtıklı somun vs.) nazaran daha ekonomik ve pratik imkânlar sunmaktadır (Özenç, 2007).

Otomotiv sanayisi, endüstriyel yapıştırma uygulamalarının en geniş kullanım alanlarından birini oluşturur. Gövde altı koruyucu sızdırmazlık uygulaması, kapı-kaput iç-dış sac birleştirmeleri, far birleştirmeleri, cam montaj uygulamaları, fren balataları, yakıt filtreleri, bataryalar, metal/plastik/lastik birleştirmeleri, klima kontrol sistemleri, koltuk rayları, elektrik/elektronik devre montajları, elektrikli kapı mandalları, şasi

montajları, konfor kaplamaları, hoparlör ızgarası, kapsüllü elektronik elemanlar, kapı panelleri, yakıt göstergeleri, dolap/torpedo kilitleri, ABS modülleri, hava yastığı modülleri, su pompaları, kalibrasyon ve ekleri, motor hız sensörleri, yakıt enjeksiyon sistemleri gibi sayısız kısımlarda kullanılmaktadır (Adin ve ark., 2011)

Günümüzde yapıştırıcıların yaygın olarak kullanıldığı alanlardan birisi de uzay ve uçak sanayisidir. Uçak gövdelerinde ve kanatlarında büyük miktarlarda yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Bu yapıda alt ve üst kısımdaki plakalar (genellikle alüminyum alaşımı), aradaki petek tipi yapılara, yapıştırıcı aracılığıyla birleştirilmektedir (Özenç, 2007).

Genel olarak yapıştırıcılar sanayiinin her kolunda sağladığı birçok avantajlardan dolayı yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Örneğin gıda endüstrisinde ambalaj üretiminden uzay sanayisinde hava araçlarının imalatına kadar çok geniş bir alanda kullanım sahası vardır.

1.2. Yapıştırma İşleminin Tarihçesi

Geçmiş yıllarda ağaç, lif ve kumaş gibi temel yapısal malzemelerin birleştirilmesinde yapıştırıcılar kullanılıyordu. Yapıştırıcı olarak kullanılan ilk malzemenin tarihi M.Ö. 4000 yıllarına kadar uzanmaktadır. Yapıştırıcıların ilk kullanıldığı yıllarda, yapıştırıcılar günümüzde de kağıt, kösele, deri, odun, ahşap parçalar gibi gözenekli malzemelerin yapıştırılmasında hala kullanılan organik malzemelerden meydana gelmekteydi (Ağaç zambkı, hayvan derisi, toynak, kan proteinleri, kazein veya nişastalar). Arkeologların yaptığı çalışmalar, ilkel kabilelerin kırılan çömlekleri, ağaç öz suyundan yaptıkları yapıştırıcı reçine ile birleştirdiklerini ortaya çıkarmıştır. Ayrıca yapılan diğer arkeolojik araştırmalar, M.Ö 1500–1000 yıllarında, ahşap yapıştırma işlemlerinde yapıştırıcıların kullanıldığını ortaya koymuştur. 1700'lü yıllarda yapıştırıcıların yaygın olarak kullanılmasıyla, yapıştırıcıların tarihinde hızlı değişiklikler olmuştur. Neme ve şekil değiştirmeye karşı direncinin zayıf oldukları tespit edilen Kazein tutkalları, I. Dünya savaşı sırasında uçakların ana ahşap gövdelerinin yapımında kullanılmıştır. Bu yapıştırıcıdaki olumsuzluklar, 20. yüzyıl başlarında sentetik reçine ve diğer malzemelerden oluşturulan yeni yapıştırıcıların doğmasına yol açmıştır (Çalık, 2008).

Sentetik reçinelerin geliştirilmesi endüstride yapıştırıcı kullanımında hızlı bir artışa neden olmuştur. Sentetik reçinelerden elde edilen yapıştırıcıların; deformasyonlara ve neme karşı gösterdikleri dirençler, yapıştırma kullanımını arttırmıştır. Başlıca sentetik

reçineler doğada çok bulunan hidrojen, karbon, oksijen ve azot atomlarından oluşmaktadır (Çalık, 2008).

II. Dünya Savaşı sonrasında kimya sanayiinde gerçekleşen teknolojik gelişmelerin katkısıyla yapıştırıcıların dayanım özellikleri daha iyi duruma gelmiştir. Yapıştırıcılar, yapılan bilimsel araştırmaların öncülüğünde günümüze kadar birçok mühendislik uygulamasında yoğun bir şekilde kullanılmış ve kullanılmaya da devam etmektedir.

1.3. Literatür Araştırması

Yapıştırma bağlantılarının yorulma davranışlarının tespit edilmesi hususunda literatürde çeşitli araştırmalar bulunmaktadır. Ancak yapıştırıcı içerisine nanopartikül takviyesinin bağlantının yorulma dayanımına etkisi konusunda yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Aşağıda genel olarak yapıştırma bağlantılarının yorulması ile ilgili yapılan çalışmalar ve yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcı içerisine nanopartikül takviyesiyle ilgili çalışmalar özet olarak kronolojik sıraya göre verilmiştir.

(Imanaka ve ark., 1995), CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) ile çelik çubuk yapıştırma birleştirmelerinin yorulma dayanımını farklı bindirme uzunlukları ve farklı boru et kalınlıklarında yaptıkları dönme-eğilme yorulma testleri ve sonlu elemanlar analizleriyle araştırmışlardır. Sonuç olarak bağlantının yorulma dayanımının temel olarak yapıştırma-bindirme bölgesi ara yüzeyi sonundaki maksimum normal gerilmeye bağlı olduğunu tespit etmişlerdir.

(Fernando ve ark., 1996), alüminyum alaşımlı malzeme ve epoksi yapıştırıcı kullanarak yaptıkları bağlantıların çevrimsel yük altındaki yorulma davranışlarını kırılma mekaniği yaklaşımını kullanarak göreceli olarak kuru ve ıslak çevre şartlarında (su içerisinde) araştırmışlardır. Yapılan yorulma deneylerinde, çevrimsel yük ile oluşan çatlak gelişimi ve bu esnada serbest kalan şekil değiştirme enerjisi ($G_{maks.}$) arasındaki ilişkiyi grafiksel olarak göstermişlerdir. Yapılan yorulma deneyleri sonucunda; kuru çevre şartlarında çatlak yayılması sonucunda serbest kalan şekil değiştirme enerjisinin statik yüklemeler sonucunda kırılma sonucu oluşan şekil değiştirme enerjisiyle (G_c) karşılaştırıldığında daha küçük değerlerde olduğunu gözlemlemişlerdir. Islak çevre şartlarında yapılan yorulma deneyleri sonucunda ise kuru çevre şartlarına göre daha düşük şekil değiştirme enerji değerlerinde hasar tespit etmişlerdir.

(Blanchard ve ark., 1996), yapıştırma bağlantılarının monotonik ve yorulma yükleri altında kayma davranışlarını araştırmak amacıyla spesifik bir test yöntemi geliştirmişlerdir. Yapılan testler sonucunda bağlantı mukavemetinin, şekil değiştirme

oranı ve bağlantı kalınlığıyla doğrudan ilgili olduğunu tespit etmişlerdir. Düşük bağlantı kalınlığı ve yüksek çevrimsel hızlarda kohezyon hasarları, büyük bağlantı kalınlığı ve düşük çevrimsel hızlarda ise adhezyon hasarları gözlemlenmiştir.

(Dessureault ve Spelt, 1997), alüminyum alaşımlı malzeme (7075-T6) ve epoksi yapıştırıcı (Cybond 4523 GB) kullanarak oluşturdukları yapıştırma bağlantılarında yorulma çatlak başlangıcını ve çatlak ilerlemesini üç ayrı yükleme modu (Mod I, Mod I-II, Mod II) için araştırmışlardır. Yapılan araştırmalar sonucunda yorulma yüklemelerine maruz tutulan numunelerde çatlak başlangıcı sırasında bırakılan şekil değiştirme enerjisi miktarlarının statik yüklemeler sonucunda çatlak oluşumu sırasında bırakılan şekil değiştirme enerjisi miktarlarına göre kayda değer bir şekilde azaldığını göstermişlerdir.

(Abou Hamda ve ark., 1998), yapıştırma hattı kalınlığının yorulma çatlak oluşumunda oldukça etkili bir parametre olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda yapıştırma kalınlığının artmasıyla yorulma çatlak gelişim direncinin de arttığını tespit etmişlerdir.

(De Goeij ve ark., 1999), çevrimsel yükler altında çalışan yapıştırma bağlantılarının yorulma dayanımları ile ilgili, araştırmacılara ve tasarımcılara kaynak olabilecek temel bilgileri vermişlerdir.

(Crocombe ve Richardson, 1999), aynı tip materyal ve yapıştırıcı kullanarak oluşturdukları dört farklı bağlantı şekli için yorulma dayanımını araştırmışlardır. Araştırmacılar yaptıkları çalışma sonucunda ortalama yükün yorulma ömrüne etkisini grafiklerle göstermişler ve bağlantı şekillerinin yorulma ömrüne önemli derecede etki ettiğini belirtmişlerdir.

(Knox ve ark., 2000), yapıştırma bağlantı teknikleri kullanarak imal edilmiş 100 mm çapındaki GRE (Glass Reinforced Epoxy) boruların yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Yaptıkları deneylerde numuneler değişken eksenel, eğilme ve iç basınç yüklerine maruz bırakılmıştır. Deneyler sonucunda numuneler üzerinde eksenel simetrik olarak yorulma hasarları gözlemlenmiştir. Özellikle eksenel olarak uygulanan değişken yüklerin oluşturduğu hasarın diğer yüklemelere göre oldukça fazla olduğunu gözlemlenmiştir.

(Fu ve Mallick, 2001), yapıştırmalı ve hibrid (yapıştırma ve cıvata) birleştirmelerin statik ve çevrimsel yükler altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Deneyler sonucunda hibrid bağlantıların yapıştırma bağlantılarına göre statik ve yorulma dayanımlarının daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.

(Ferreira ve ark., 2002), kompozit malzeme kullanılarak üretilmiş yapıştırma bağlantılarının yorulma davranışlarına; tabaka oryantasyonu, bindirme bağlantı uzunluğu ve bağlantıları farklı sıcaklıklarda ve belirli periyotlarda suda bekletmenin etkilerini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda; 30 mm bindirme uzunluğunun, 60 mm bindirme uzunluğuna göre daha iyi statik ve yorulma dayanımı gösterdiği görülmüş ve yapıştırma bağlantılarının yorulma dayanımına suyun etkisinin, su sıcaklığı ve numunenin suda bekletilme süresine bağlı olduğunu tespit etmişlerdir.

(Cheuk ve ark., 2002), çift tesirli bindirme (Double-Lap Joint) metal-kompozit (Aluminum 2024-T3/Boron-Epoxy) yapıştırma bağlantılarında yorulma çatlak başlangıcı ve çatlak gelişimi olayını deneysel ve sayısal yöntemler kullanarak incelemişlerdir. Deneylerde alüminyum tabaka merkezde bırakılmış, kompozit tabakalar ise alüminyum tabakanın her iki yüzeyine yapıştırılmıştır. Araştırmacılar, deneyler sonucunda çatlak boylarını optik yöntemler kullanarak, çatlak yüzeylerini ise elektron mikroskobu ile incelemişler ve sonuçları grafiksel olarak göstermişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda yorulma çatlaklarının kompozit malzemenin köşe kısmı ile yapıştırıcı arasındaki bölge civarında oluştuğunu tespit etmişlerdir.

(Ashcroft ve Shaw, 2002), epoksi yapıştırıcı ile birleştirilmiş karbon fiber takviyeli polimerlerin (CFRP) yapıştırma bağlantılarında yorulma çatlak yayılmasına sıcaklığın etkisini (-50 C°, 22 C° ve 90 C° sıcaklıklar için) DCB (Double-Cantilever Beam) numuneleri üzerinde farklı bindirme şekilleri için incelemişler ve elde edilen sonuçları yapıştırma bağlantılarının statik yükler altında kırılma davranışları ve ön çatlaksız yapıştırma bağlantılarının yorulma davranışlarıyla karşılaştırmışlardır. Deneyler sonucunda, sıcaklığın, yorulma çatlak yayılmasında çok etkili bir faktör olduğunu göstermişlerdir.

(Abdel Wahab ve ark., 2002), Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanarak yaptıkları sayısal çalışmada, yapıştırma bağlantılarının yorulma ömürlerini öngören bir yöntem geliştirmişlerdir.

(Wang ve Pidaparti, 2002), üzerine V-tipi çentik açılmış alüminyum (7075-T6) numunelerini, kompozit (boron/epoxy) yama yapıştırarak ve yamasız şekilde statik ve yorulma yükleri altında test etmişler ve yorulma çatlak gelişimini analitik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan deneyler sonucunda kompozit yama yapılmış numunelerin hem statik mukavemetinde hem de yorulma ömründe yamasız olan numunelere göre önemli artışlar gözlemlemişlerdir.

(Hadavinia ve ark., 2003), alüminyum alaşımlı plaka ve epoksi yapıştırıcı kullanarak oluşturdukları TDCB (Tapered Double-Cantilever Beam) yapıştırma bağlantılarının Mod I yükleme koşulunda, monotonik ve çevrimsel yükler altındaki davranışlarını, farklı çevre koşullarında kırılma mekaniği yaklaşımını kullanarak deneysel olarak araştırmışlardır.

(Hadavinia ve ark., 2003), alüminyum alaşımlı plaka ve epoksi yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan tek tesirli bindirme bağlantılarında yorulma çatlak başlangıcı ve çatlak gelişimi konusunu sonlu elemanlar yaklaşımı (FEA) kullanarak incelenmişler ve bağlantılar için yorulma ömrünü tahmini olarak veren analitik ve sayısal modeller üzerinde çalışmışlardır.

(Blackman ve ark., 2003), alüminyum alaşımı, yumuşak çelik ve CFRP kompozit malzemeler ve genel amaçlı yapısal epoksi yapıştırıcı kullanarak oluşturdukları DCB ve TDCB test numuneleri üzerinde yaptıkları deneylerde kritik kırılma enerji hızlarını (G_{IC}) Mod I yükleme tipi için araştırmışlardır.

(Meguid ve ark., 2004), karbon fiber kompozit ve alüminyum alaşımlı malzeme kullanarak imal ettikleri yapıştırma bağlantılarında epoksi yapıştırıcı içerisine farklı oranlarda karbon nanotüp ve alüminyum nanopowder takviyesi yaparak, nanopartikül takviyesinin bağlantıların statik mukavemetine etkisini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda, yapıştırıcı içerisine katılan nanopartikül oranının, bağlantıların çekme ve kayma mukavemetlerinde oldukça önemli bir parametre olduğunu belirtmişlerdir.

(Abdel Wahab ve ark., 2004), epoksi yapıştırıcı ile birleştirilmiş karbon fiber kompozit malzemelerden imal edilmiş DCB test numuneleri kullanarak yaptıkları çalışmada, tek ve çift tesirli bindirme bağlantılarında yorulma çatlak yayılması ve yorulma ömrü konularını araştırmışlardır. Tespit ettikleri deneysel verilerin, analitik ve sayısal yöntemler kullanılarak oluşturdukları yorulma ömrü tahmin bağıntılarıyla uyum içerisinde olduğunu belirtmişlerdir.

(Rusforth ve ark., 2004), epoksi yapıştırıcı ve alüminyum plakalar kullanarak oluşturdukları tek tesirli yapıştırma bağlantılarının yorulma performansını ve çatlak ilerlemesini incelemişlerdir. Deneyleri farklı nem koşullarında ve alüminyum malzemelere silikon bazlı ön işlem yaparak ve ön işlemsiz şekilde ayrı ayrı yapmışlardır. Deneyler sonucunda ön işleme tabi tutulan numunelerde oluşan hasarların büyük oranda kohezyon hasarı olduğu, ön işlemsiz numunelerde oluşan hasarın ise daha çok adhezyon hasarı olduğunu belirtmişlerdir.

(Erpolat ve ark., 2004), epoksi yapıştırıcı ve CFRP kompozit malzeme kullanarak oluşturdukları çift tesirli yapıştırma bağlantılarının yorulma davranışını sabit ve değişken genlikli yüklemeler altında test etmişler ve elde edilen sonuçları sayısal sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

(Erpolat ve ark., 2004), DCB bağlantıları kullanarak oluşturdukları yapıştırma bağlantılarının koheziv ve interlaminar (tabakalar arası) yorulma çatlak gelişimini sabit genlikli (constant amplitude) ve değişken genlikli (variable amplitude) yükler altında araştırmışlar ve elde edilen deneysel verileri sayısal sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

(Kim ve ark., 2004), kompozit malzemelerde (karbon/epoksi) basamaklı bindirme yapıştırma bağlantılarının statik ve yorulma davranışlarını, farklı bindirme mesafelerinde, farklı basamak sayılarında ve farklı kenar açılarında araştırmışlardır. Deneyler sonucunda yorulma çatlağının bindirme bölgesi son kısmından başlayarak tabakalar arasında yayıldığını gözlemlemişlerdir.

(Colombi, 2005), ön gerilmeli ve ön gerilmemiş CFRP kompozit şeritler (yama bağlantısı) ile takviye edilmiş çentikli çelik plakalar üzerinde yorulma testleri yapmış ve CFRP kompozit yamanın yorulma ömrüne etkisini ve çatlak gelişim mekanizmasını deneysel ve sayısal yöntemler kullanarak araştırmıştır. Yapılan deneyler sonucunda özellikle ön gerilmeli kompozit yamanın yorulma çatlak gelişimini yavaşlattığını ve yorulma ömrünü önemli ölçüde arttırdığını tespit etmiştir.

(Underhill ve DuQuesnay, 2006), yapıştırma yüzey hazırlama işleminin, bağlantının yorulma dayanımına olan etkisini, alüminyum alaşımlı malzeme (2024-T3) ve epoksi yapıştırıcı (FM 73) kullanılarak oluşturulmuş tek tesirli bindirme bağlantı test numuneleri üzerinde farklı deney şartlarında araştırmışlardır.

(Kely, 2006), CFRP kompozit malzeme kullanarak oluşturmuş olduğu hibrid bağlantının (bonded/bolted) statik ve yorulma testlerini yapmıştır. Hibrid bağlantı test numuneleri, tek tesirli bindirme bağlantı geometrisinde imal edilmiş ve iki farklı yapıştırıcı (epoksi, poliüretan) için deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda, hibrid bağlantının, yapıştırma bağlantısına göre daha iyi statik ve yorulma mukavemeti gösterdiğini tespit etmiştir. Araştırmacı, deneyi, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak modellemiş ve sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğunu göstermiştir.

(Quaresimin ve Ricotta, 2006), karbon/epoksi kompozit malzeme ve epoksi yapıştırıcı kullanarak imal ettikleri tek tesirli bindirme bağlantılarında, bindirme mesafesi ve bindirme köşe geometrisinin bağlantının yorulma mukavemetine etkisini

araştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda bağlantıların yorulma mukavemeti uzun bindirme mesafesinde ve radüslü köşe geometrisinde daha fazla çıkmıştır. Özellikle radüslü köşe geometrisinde düz köşe geometrisine göre % 25'ten fazla oranlarda yorulma mukavemetinde artış gözlemlenmiştir.

(Underhill ve ark., 2006), alüminyum alaşımlı (2024-T3) malzeme ve epoksi yapıştırıcı (FM 73) kullanarak hazırladıkları test numuneleri üzerinde yaptıkları çalışmada yapıştırma bağlantılarının yorulma dayanımı performansı ile wedge test (ayırma testi) performansını karşılaştırmışlar ve aralarında bir ilişki tespit etmişlerdir. Alüminyum alaşımlı malzemeleri yapıştırıcı ile birleştirmeden önce sıcak su ön işlemine tabi tutmuşlar ve bu durumun bağlantıların yorulma performansına ve wedge test performansına etkilerini araştırmışlardır.

(Marcadon ve ark., 2006), denizcilik uygulamalarında kullanılan T tipi bağlantılarda vinilester yapıştırıcı kullanmışlar ve bağlantıların statik ve yorulma yüklerine karşı davranışını incelemişlerdir. Araştırmacılar, T tipi yapıştırma bağlantılarını iki farklı bindirme uzunluğunda (8 mm, 15 mm) imal etmişlerdir. Yapılan testler sonucunda hasar mekanizması incelendiğinde uzun bindirme mesafesinde oluşan hasarın kontrplakta oluştuğunu, kısa bindirme mesafesinde oluşan hasarın ise yapıştırıcı ile kontrplak arasındaki bölgede oluştuğunu göstermişlerdir.

(Quaresimin ve Ricotta, 2006), kompozit yapıştırma bağlantılarında yorulma ömrünü tahmini veren bir model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri model için deneysel ve sayısal verileri kullanmışlardır.

(De Moura ve ark., 2006), karbon epoksi kompozit malzeme kullanılarak oluşturulan tek tesirli bindirme bağlantılarında, yapıştırıcı kısmında yer alan şeritsel kusurların bağlantının mekanik özelliklerine etkilerini deneysel ve sayısal yöntemler kullanarak araştırmışlardır.

(Park ve ark., 2006), alüminyum ve karbon epoksi kompozit malzeme kullanarak oluşturdukları birlikte kürleşen (co-cured) çift takviyeli bindirme bağlantılarının çeşitli tasarım parametrelerini ve yorulma karakteristiklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Deneyler sonucunda elde ettikleri dizayn parametrelerini kullanarak oluşturdukları sonlu eleman modellemesinde bağlantıda oluşan gerilme dağılımını ve çatlak enerji bırakma oranlarını incelemişlerdir.

(De Moura ve Chousal, 2006), sonlu elemanlar yöntemini kullanarak geliştirdikleri iki ayrı modelde, yapıştırma bağlantılarının kırılma test karakteristiklerini,

DCB ve ENF (End-Notched Flexure) test geometrilerini kullanarak sayısal olarak incelemiştir.

(Duong ve ark., 2006), iki adet çatlaklı alüminyum (7075-T6) plaka kullanarak çift taraflı yapıştırma bağlantısı yapmışlar (sandviç yapı) ve elde ettikleri yapının çatlaklı yüzeylerini kompozit yamayla (boron/epoxy) tamir ederek yorulma özelliklerini ve çatlak gelişimini deneysel ve analitik olarak incelemiştir.

(Zhai ve ark., 2006), çelik malzeme ve epoksi yapıştırıcı kullanarak oluşturdukları yapıştırma bağlantılarında, yapıştırıcı içerisine farklı nanopartiküller katmışlar ve bağlantıların adhezyon mukavemetlerine nanopartiküllerin etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda özellikle Al_2O_3 nanopartikülünün bağlantının adhezyon mukavemetini önemli derecede arttırdığını tespit etmişlerdir.

(Zhai ve ark., 2007), çelik malzeme ve epoksi yapıştırıcı kullanarak oluşturdukları yapıştırma bağlantılarında, yapıştırıcı içerisine %2 oranında Al_2O_3 katmışlar ve çekme testleri yapmışlardır. Deneyler sonucunda Al_2O_3 takviyeli yapıştırma bağlantılarında adhezyon mukavemeti daha yüksek çıkmıştır.

(Gomez ve ark., 2007), çelik levha, scyanoacrylate yapıştırıcı ve çelik pim kullanarak tek tesirli bindirme bağlantısı geometrisinde oluşturdukları hibrid bağlantıların mekanik özelliklerini araştırmışlar ve bir mekanik model geliştirmişlerdir.

(Portillo ve ark., 2007), silindirik (boru şeklinde) yapıştırma bağlantılarının çevrimsel burulma yüklerine karşı yorulma davranışını analitik ve deneysel olarak araştırmışlardır. Araştırma sonucunda analitik sonuçlarla deneysel sonuçlar arasında ciddi farklar gözlemlemişlerdir. Bu durumda silindirik yapıştırma bağlantılarının torsional yüklere karşı yorulma davranışını doğru olarak tespit etmek amacıyla daha fazla araştırma yapılmasını önermişlerdir.

(Mengel ve ark., 2007), mil-göbek yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerini incelemiştir. Şaft malzemesi olarak Ck45 çeliğini, göbek (hub) malzemesi olarak da alüminyum ve magnezyum alaşımlı hafif metalleri seçmişlerdir. Yapıştırıcı olarak iki bileşenli epoksi yapıştırıcı ve tek bileşenli anaerobik yapıştırıcıları kullanmışlardır. Farklı kürleşme basınçlarında yapıştırma işlemini gerçekleştirdikten sonra bağlantıları statik ve çevrimsel yüklere maruz bırakarak test etmişlerdir. Deneyler sonucunda, yapışma işlemi sırasında uygulanan hidrostatik kürleşme basıncının atmosfer basıncına göre bağlantıların statik ve yorulma dayanımını önemli derecede arttırdığını gözlemlemişlerdir.

(Brighenti, 2007), çatlaklı plakaların yama uygulamalarıyla tamir edilmesine yönelik optimal yama şeklini bulmak ve yorulma davranışlarını incelemek amacıyla sonlu elemanlar yöntemini kullanarak sayısal araştırmalar yapmıştır. Araştırmalarda biyolojik bazlı bir metod olan genetik algoritma yöntemini kullanmıştır.

(Veer ve Zuidema, 2008), asimetrik çift takviyeli bindirme yapıştırma bağlantılı (Asymmetric Double Butt Strap) numuneler kullanarak bağlantıların kayma mukavemetlerini ve yorulma davranışlarını araştırmışlardır. Bağlantıların kenar parçalarını cam, merkezdeki parçaları ise polikarbonat olarak seçmişlerdir. Yapıştırıcı olarak ise DELO photobond 4455 yapıştırıcı kullanmışlardır. Deneyler sonucunda bağlantıların yorulma ömrü ile maksimum kayma gerilme dayanımları arasında bir ilişki gözlemlenmemişlerdir. Test numunelerinin yüksek kayma mukavemetine sahip olmasına rağmen düşük yorulma ömrüne sahip olabileceğini göstermişlerdir.

(Nolting ve ark., 2008), kaplama yapılmış ve kaplamasız 2024-T3 alüminyum alaşımlı levha ve epoksi yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan çift takviyeli bindirme bağlantılarının yorulma özelliklerini sabit ve değişken genlikli yükler altında araştırmışlardır. Sabit genlikli yüklemelerde kaplama yapılmış bağlantılarda oluşan hasarın adhesiv veya ara parçada oluştuğunu belirtmişlerdir. Kaplama yapılmamış bağlantılarda oluşan hasar tipinin ise sadece adhesiv olduğunu tespit etmişlerdir.

(Marannano ve ark., 2008), alüminyum alaşımlı malzeme (2024-T351) ve epoksi yapıştırıcı (DP 760) kullanarak oluşturdukları MMELS (Mixed Mode End Load Split) test geometrisine sahip yapıştırma bağlantılarında statik ve yorulma testlerini yapmışlardır. Oluşturdukları ara bölge çatlaklarının gelişimini analitik, sayısal (Sonlu Elemanlar Metodu) ve deneysel olarak incelemişlerdir.

(Jen ve Chang, 2008), alüminyum alaşımlı malzeme kullanarak oluşturulan bal peteği formundaki sandviç kirişler üzerinde dört nokta eğme deneyleri yaparak sandviç yapıların yorulma davranışını sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. Yorulma deneyleri sonucunda sandviç yapıda hasarın petek yapı ile plakalar arasında ayrılma şeklinde oluştuğunu gözlemlenmiştir.

(Shenoy ve ark., 2009), alüminyum alaşımlı malzeme (7075-T6) ve epoksi yapıştırıcı (FM 73M) kullanarak oluşturdukları tek tesirli bindirme bağlantılarında sabit ve değişken genlikli yükler altında yorulma olayını incelemişlerdir. Yorulma testleri sonucunda bağlantılardaki hasar ilerlemesinin yüke göre lineer olmadığını tespit etmişlerdir.

(Pereira ve ark., 2009), alüminyum alaşımlı malzeme (6082-T6) ve iki bileşenli epoksi yapıştırıcı (Araldite 420 A/B) kullanarak oluşturdukları tek tesirli bindirme bağlantılarında yüzey ön işlemlerinin ve yapıştırılan parça kalınlıklarının yorulma davranışına etkisini incelemişlerdir. Yüzey ön işlemlerini; abraziv ön işlem şeklinde ve sülfürik asitle temizleme (CSA) ön işlemi olarak iki ayrı yöntem olarak uygulamışlardır. Deneyler sonucunda en iyi yorulma dayanımını, CSA yüzey hazırlama yöntemiyle elde etmişlerdir. Yapıştırılan malzeme kalınlığının ise 1 mm'den 1,5 mm'ye çıkmasıyla yorulma dayanımında azalma tespit etmişlerdir.

(Shenoy ve ark., 2009), alüminyum alaşımlı malzeme (7075-T6) ve epoksi yapıştırıcı (FM 73M) kullanarak oluşturdukları tek tesirli bindirme bağlantılarında sabit genlikli yükler altında yorulma davranışını araştırmışlardır. Yorulmaya maruz bağlantıların dayanımlarını tahmin etmek için lineer olmayan bir model önermişler ve önerilen modelin deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğunu belirtmişlerdir.

(Zhang ve ark., 2009), ön gerilmeli GFRP kompozit malzeme ve epoksi yapıştırıcı kullanarak oluşturdukları simetrik çift takviyeli yapıştırma bağlantılarında farklı çevre şartında (farklı sıcaklık ve nem) yorulma davranışlarını, çatlak başlangıcı ve çatlak gelişimini araştırmışlardır. Numunelere uyguladıkları yorulma yükü, sabit genlikli olarak aksel yönde olmuştur. Sonuçta, farklı çevre şartlarının yapıştırma bağlantılarının yorulma ömrüne önemli derecede etki ettiğini göstermişlerdir.

(Shenoy ve ark., 2010), yapıştırma bağlantılarında yorulma davranışını önceden tahmin edebilmek için sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturdukları bir model önermişlerdir. Epoksi yapıştırıcı ve alüminyum alaşımlı malzeme kullanarak oluşturdukları tek tesirli bindirme bağlantıları için yaptıkları yorulma deney verileri ile önerdikleri model arasında iyi bir eşleşme gözlemlemişlerdir.

(Khoramishad ve ark., 2010), yorulma yüklemesi altında çalışan yapıştırma bağlantılarında sayısal yöntemleri kullanarak bir hasar modeli geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modelin sadece yapıştırıcı sistemine bağlı olduğunu ve bağlantı geometrisinden bağımsız olduğunu belirtmişlerdir. Hasar modelini oluşturmak için gerekli olan parametreleri elde etmek için tek tesirli bindirme ve LDB (Laminated Doublers in Bending) test geometrilerinde deneyler yapmışlardır.

(Khoramishad ve ark., 2010), yükleme oranı R 'nin yapıştırma bağlantılarının yorulma davranışına etkisini deneysel ve sayısal yöntemler kullanarak araştırmışlardır. Deneylerde, yapıştırma geometrisi olarak alüminyum alaşımlı malzeme (2024-T3) ve epoksi yapıştırıcı kullanarak (FM 73M OST) oluşturdukları tek tesirli bindirme

bağlantılarını kullanmışlardır. Oluşturdukları yapıştırma bağlantılarını statik ve yorulma yükleri altında test etmişlerdir. Yapıştırma bağlantılarında yük oranının yorulma davranışına etkisini tahmin etmek için şekil değiştirme bazlı bir yorulma hasar modeli geliştirmişlerdir. Elde ettikleri sayısal sonuçlar ile deneysel verilerin uyum içerisinde olduğunu belirtmişlerdir.

(Meneghetti ve ark., 2010), kompozit malzemelerin yapıştırma bağlantılarının yorulma davranışını oluşturdukları tek tesirli bindirme bağlantısı test geometrisinde araştırmışlardır. Yaptıkları deneylerde, tek tesirli bindirme bağlantılarında; kompozit tabaka oryantasyonu, bindirme mesafesi ve köşe geometrisinin yorulma davranışına etkilerini incelemişlerdir. Sonuçta tabaka oryantasyonunun yorulma mukavemetine etkisinin bindirme uzunluğu ve köşe geometrisine göre daha az olduğunu tespit etmişlerdir.

(Shenoy ve ark., 2010), tek tesirli bindirme bağlantılarının farklı tiplerde değişken genlikli yükler altında yorulma davranışlarını araştırmışlardır. Tek tesirli bindirme bağlantısını alüminyum alaşımlı malzeme (Clad 7075 T6) ve epoksi film yapıştırıcı (FM 73M) kullanarak imal etmişlerdir. Yorulma çevrimlerindeki küçük değişimlerin yüksek yorulma yüklerinde önemli derecede yorulma mukavemetini düşürdüğünü tespit etmişlerdir.

(Jen ve Ko, 2010), epoksi yapıştırıcı kullanılarak oluşturulmuş alüminyum tek tesirli bindirme bağlantılarında, farklı bindirme uzunlukları ve farklı yapıştırıcı kalınlıklarının bağlantıların yorulma mukavemetine etkisini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda sabitlenmiş ortalama kayma gerilmesi şartlarında daha büyük yapıştırıcı tabakasının yorulma mukavemetini düşürdüğünü, benzer şekilde bindirme uzunluğunun artmasıyla yorulma mukavemetinin genel olarak azaldığını tespit etmişlerdir.

(Solana ve ark., 2010), alüminyum alaşımlı malzeme (2024-T6) ve epoksi yapıştırıcı (FM 73M) kullanarak oluşturdukları tek tesirli bindirme bağlantılarında sabit genlikli yorulma deneyleri yapmışlardır. Yaptıkları deneylerde yapıştırma tabakasındaki yorulma başlangıç ve gelişimini izlemek amacıyla yapıştırma bağlantısı bindirme bölgesine 6 adet strengçe monte etmişlerdir. Yapıştırma bağlantılarının farklı yüklerde yorulma davranışlarını ön görmek amacıyla sonlu elemanlar yöntemini kullanarak bir elasto-plastik hasar modeli geliştirmişlerdir.

(Khoramishad ve ark., 2011), yapıştırma bağlantılarının değişken genlikli yükler altında yorulma davranışlarını tahmin edebilmek için sonlu elemanlar yöntemini kullanarak sayısal bir modelleme yapmışlardır. Oluşturdukları model geometrisi,

alüminyum alaşımlı malzeme ve epoksi yapıştırıcılı tek tesirli bindirme bağlantısı şeklinde olmuştur. Yaptıkları sayısal çalışma sonuçlarını diğer çalışmalarla karşılaştırmışlardır.

(Fernandez ve ark, 2011), yapıştırma bağlantılı karbon/epoksi kompozit malzemelerin Mod I yüklemesi altında yorulma davranışlarını araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada DCB test numunelerini kullanmışlardır. Yorulma çatlak gelişimini (FCG) incelemişler ve çatlak gelişimiyle açığa çıkan enerji oranlarını (G_I) araştırmışlardır.

(Srivastava, 2011), kompozit malzeme ve epoksi yapıştırıcı kullanarak oluşturdukları yapıştırma bağlantılarında, epoksi yapıştırıcı içerisine % 3 oranında çok duvarlı karbon nanotüp takviyesi yaparak çekme deneyleri yapmışlardır. Deneyler sonucunda nanopartikül takviyeli epoksi yapıştırıcı kullanılan bağlantıların statik mukavemetleri, nanopartikül takviyesi yapılmayan bağlantılara göre daha yüksek bulunmuştur.

(Jen, 2012), yapıştırma bindirme bağlantılarının farklı bindirme açılarında yorulma davranışlarını analiz etmiştir. Test numuneleri üzerinde yaptığı çalışma sonucunda, bağlantıların yorulma dayanımının bindirme açısının artmasıyla önemli ölçüde iyileştiğini belirtmiştir. Deneyler sonucunda küçük açılı birleştirmelerdeki hasarın adeziv, büyük açılı birleştirmelerde ise koheziv olduğunu tespit etmiştir.

(Canyurt ve Meran, 2012), kanallı geçmeli olarak epoksi yapıştırıcı ile birleştirilmiş sık örgülü kompozit malzemelerin yorulma davranışlarını araştırmışlardır. Farklı tasarım parametreleri kullanarak oluşturdukları test numunelerini aksenal yorulma yüklerine maruz bırakarak deneyler yapmışlardır. Deneyler sonucunda yapıştırma hattı uzunluğu, yapıştırıcı kalınlığı gibi etkenlerin bağlantıların yorulma davranışlarını etkilediğini belirtmişlerdir. Bu etkenlerin bağlantıların yorulma davranışlarına etkisini tahmin edebilmek için sayısal bir model geliştirmişlerdir.

(Moroni ve Pirondi, 2012), yapıştırma bağlantılarında yorulma çatlak gelişimini (FCG), Abaqus programını kullanarak araştırmışlardır. Yaptıkları sayısal çalışmada koheziv hasar modelini çeşitli karışık yükleme koşullarında yapıştırma bağlantılarına uygulamışlardır.

(Hafız ve ark., 2013), DCB numuneleri üzerinde yaptıkları çalışmada FM73 epoksi yapıştırıcıların, karışık yükleme modunda, yorulma çatlak gelişimini araştırmışlardır. DCB numunelerini eşit kalınlıktaki yumuşak çelik ve epoksi yapıştırıcı kullanarak oluşturmuşlardır. Araştırmacılar çatlak gelişimini bir video mikroskop kullanarak

ölçmüşler ve yorulma çatlak gelişim oranlarını Paris Yasasını kullanarak karakterize etmişlerdir.

(Bernasconi ve ark., 2013), yapıştırma bağlantılarında yorulma çatlak gelişimini, oluşturdukları DCB ve tek tesirli bindirme bağlantıları üzerinde yaptıkları deneysel çalışmalarla araştırmışlardır. Çatlak gelişim mekanizmasını, sonlu elemanlar yöntemini ve kırılma mekaniği yaklaşımını kullanarak modellemişlerdir. DCB numuneleri üzerinde yaptıkları kırılma mekaniği testleri sonucunda Paris Yasası parametrelerini türetmişlerdir. Türettikleri parametreleri kullanarak tek tesirli bindirme bağlantılarında yorulma çatlak gelişimini modellemişler ve elde edilen sonuçları kırılma gözlemleriyle karşılaştırmışlardır.

(Mactabi ve ark., 2013), alüminyum alaşımlı malzeme (2024 T3) kullanarak imal ettikleri tek tesirli bindirme bağlantılarında, epoksi yapıştırıcı içerisine belirli oranlarda katılmış karbon nanotüplerin (CNT) bağlantının statik ve yorulma dayanımına etkisini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda, elde edilen datadaki yüksek sapmalar ve dağınıklıklardan dolayı, yapıştırıcı içerisine karbon nanotüp ilavesinin bağlantının statik ve yorulma mukavemetine etkisi tam olarak belirlenememiştir.

(Kang ve ark., 2014), kompozit malzeme ve alüminyum alaşımlı malzeme kullanarak imal ettikleri tek tesirli bindirme bağlantılarında epoksi yapıştırıcı içerisine karbon nanotüp ilavesinin bağlantının statik ve yorulma dayanımlarına etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak yapıştırma bağlantılarının yorulma dayanımlarının, epoksi yapıştırıcı içerisine karbon nanotüp ilavesiyle arttığını buna karşın statik dayanımının azaldığını tespit etmişlerdir.

(Khashaba ve ark., 2015), karbon fiber kompozit malzeme ve epoksi yapıştırıcı kullanarak oluşturdukları açılı yapıştırma bağlantılarında epoksi yapıştırıcı içerisine belirli oranlarda kattıkları SiC ve Al₂O₃ nanopartiküllerinin bağlantının çekme mukavemetine etkisini incelemişlerdir. Deneyler sonucunda epoksi yapıştırıcı içerisine nanopartikül takviyesinin bağlantının maksimum çekme dayanımını dikkate değer şekilde arttırdığı tespit etmişlerdir.

(Reis ve ark., 2015), yapıştırılan malzeme olarak çelik levha ve epoksi yapıştırıcı kullanarak imal ettikleri yapıştırma bağlantılarında yükleme frekansının bağlantıların yorulma mukavemetine etkisini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda yüksek gerilme seviyelerinde frekansın etkisi fazla önemli olmazken düşük gerilme seviyelerinde yükleme frekansı değişikliğinin oldukça önemli bir parametre olduğu tespit edilmiştir.

(Akpınar, 2016), yaptığı çalışmada; farklı özelliklerdeki yapısal yapıştırıcılar içerisine Al_2O_3 ve TiO_2 katarak elde etmiş olduğu tek tesirli bindirme bağlantılarının mekanik özelliklerini çeki yükü altında deneysel olarak incelemiştir. Deneylelerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde; nanopartikül katkılı yapıştırıcıların kullanılmasıyla elde edilen bağlantılarda çeki hasar yükünün arttığı görülmüştür. Ayrıca bağlantıların kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, nanopartikül katkılı yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların yer değiştirme kapasitelerinin de arttığı belirlenmiştir.



2. KURAMSAL TEMELLER

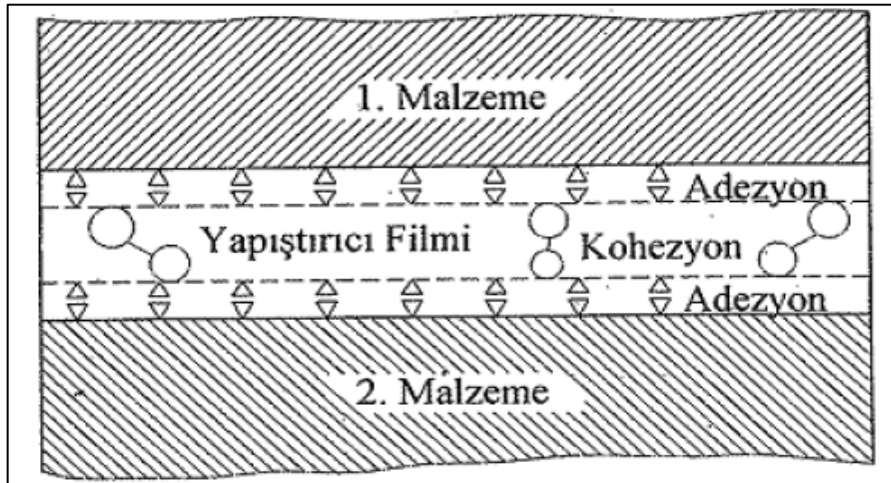
2.1. Yapışma İşlemi

Aynı veya farklı özelliklere sahip malzemelerin en az iki tanesini, birbirine adhezyon kuvvetleri aracılığı ile güçlü bir şekilde bağlayacak ve bu bağlantıyı aynı mukavemet değerini kaybetmeden uzun süre koruyacak yapıya sahip olan bağlantı elemanına yapıştırıcı denir (Çalık, 2008).

Yapıştırma; cıvata, perçin ve kaynak gibi geleneksel metodların yanında kabul gören bir birleştirme tekniğidir. Yapıştırma; kaynak, lehim, perçin vs. yanında endüstriyel bir birleştirme yöntemi olarak kullanılmaya ilk başladığından beri, başarılı bir yapıştırma için en önemli parametreleri bulmak amacıyla birçok araştırma, geliştirme ve mühendislik çalışması yapılmıştır. Yapıştırıcılar, aynı veya farklı malzemeden yapılmış yüzeyler arasında bir çeşit köprü görevi yapmaktadır (Aydın, 2012).

Yapışma olayı, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında meydana gelen adhezyon ve yapıştırıcının kendi içinde meydana gelen kohezyon kuvvetleri neticesinde oluşan fiziksel ve kimyasal bir olaydır (Şekil 2.1). Yapışmanın doğasını daha iyi anlayabilmek için adhezyon ve kohezyon kuvvetlerini daha iyi anlamak gerekir.

Yapışma mekanizması iki ana olaya bağlıdır. Birincisi, yapıştırıcı ile malzeme arasında meydana gelen, kimyasal ve fiziksel olarak gerçekleşen adhezyon olayı, ikincisi ise, yapıştırıcının kendi içinde meydana gelen kohezyon olayıdır (Solmaz, 2008).



Şekil 2.1. Yapışma yüzeylerinde oluşan kuvvetler

2.1.1. Adhezyon kuvveti

İki malzemenin temas yüzeylerinde oluşan yapışma kuvvetidir. Yapıştırıcı ile yapıştırılacak yüzey arasında oluşur. Adhezyon olayı, iki yüzeyin, ara yüzey kuvvetleri vasıtasıyla bir arada tutulması olarak adlandırılır.

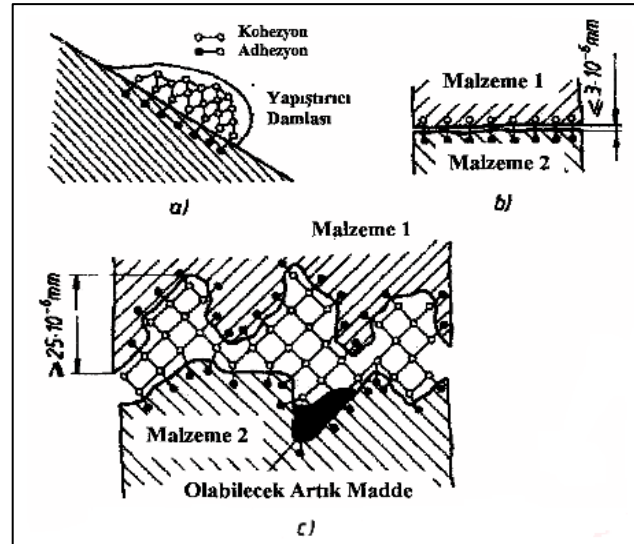
Eğer yapıştırıcı, mekanik olarak işlenmiş yüzeylerdeki pürüzlere tam olarak temas edemezse, bu moleküller arası kuvvetler oldukça zayıflar. Bu nedenle yapıştırıcının yüzey pürüzlerine tam olarak nüfuz etmesi ve bütün yüzeyi ıslatması gerekir. Dolayısıyla, yapıştırmanın kuvveti hem yüzeyin ıslatılmasına (maksimum moleküller arası temas için), hem de yüzeyin yapışma özelliklerine bağlıdır. Belirli bir yapıştırıcı yüzey gerilimi için ıslatma, yapıştırıcı sürülen yüzeyin yüzey gerilimine ve yapıştırıcının viskozitesine bağlıdır. Yüzeyde kirlerin bulunması da ıslatmayı olumsuz etkiler (Aydın, 2012). Yapıştırılacak malzemelerin yüzeylerinin her türlü kir, yağ gibi artıklardan temizlenmiş olması adhezyon kuvvetlerini artırırken tersi bir durum adhezyon kuvvetlerini zayıflatmaktadır. Bu nedenle yapıştırılacak malzemelere yapılacak ön işlem uygulamaları son derece önem kazanmaktadır.

2.1.2. Kohezyon kuvveti

Yapıştırıcı molekülleri arasında oluşan ve yapıştırıcıyı bir bütün halinde tutan kuvvetlerdir.

Kohezyon; yapıştırıcıyı oluşturan kütle bileşenlerinin kimyasal ve fiziksel kuvvetler sayesinde bir arada tutulması olarak tanımlanır. Bu olay yapıştırıcının kürleşmesi sırasında bir takım zincirleme reaksiyonlar sonucunda meydana gelir.

Şekil 2.2' de adhezyon ve kohezyon olayı şematik olarak verilerek, adhezyon ve kohezyon bağları gösterilmiştir. Şekil 2.2.a'da yapıştırıcı damlasının yapıştırılacak olan yüzeye adhezyon bağları ile nasıl tutunduğu gösterilmiştir. Şekil 2.2.b ve c'de ise polimerizasyon işlemi sonucunda, yapıştırıcı sertleşerek kendi içerisinde oluşan kohezyon bağları ve malzemeler ile kendi arasında oluşan adhezyon bağları vasıtasıyla iki malzemeyi bir arada nasıl tuttuğu gösterilmiştir (Şekercioğlu, 2001).



Şekil 2.2. Adhezyon ve kohezyon olayının şematik olarak gösterilmesi (Şekercioğlu, 2001)

Bir zincirin kuvvetinin en zayıf halkası tarafından belirlenmesi kuralına uygun olarak, yapıştırma işleminde adhezyon ve kohezyon kuvvetleri yaklaşık eşit olmalıdır (Şahin,2011).

2.2. Yapışma Teorileri

Bugüne kadar yapışma mekanizmasını açıklamak için bilim adamları yaklaşık kırk teori ortaya atmışlardır. Bu teoriler, moleküler, mikroskobik ve makroskobik seviyelerdeki kavramları esas almışlardır. Burada bu teorilerden en kapsamlı olan dört teoriden bahsedilecektir. Bu teorilerin hiç biri tek başına yapışma mekanizmasının bütün yönlerini açıklayamaz. Fakat bağlantının bir özelliğini açıklamak için bir ya da birkaç teoriden faydalanılabilir (Temiz, 2003).

2.2.1. Mekanik tutunma teorisi

(McBain ve Hopkins,1925), bir katı yüzey üzerine sıvı yapıştırıcı sürüldüğü zaman, yapıştırıcının gözeneklere gireceğini, mekanik tutunma olacağını ve dolayısıyla iyi bir yapışma meydana geleceğini söylemiştir. Mekanik tutunma, yapıştırıcının, malzeme yüzeyinden kalkmasını önler. (Venables ve ark., 1979), yapıştırıcının mekanik tutunma ile yapışmasını artıran bazı alüminyum malzemelerin yüzey işlemlerinin, aslında yüzeyde gözenekleri arttırdığını göstermiştir. Gerçekte malzeme yüzeylerini pürüzlendirmek ve yüzeydeki yağ, pas ve benzeri kirleri temizlemek yüzey alanını artırır ve yapıştırıcının yüzeye daha iyi yayılmasını ve ıslatmasını sağlar (Jennings, 1972).

Bununla beraber (Mittal, 1976)'nın çalışmalarında ve benzeri çalışmalarda da görülmüştür ki, iyi yapışma, pürüzsüz malzeme yüzeyleri kullanılarak da elde edilebilmiştir (Çitil, 2012).

2.2.2. Adsorpsiyon teorisi

Adsorpsiyon teorisi, esas malzeme ile yapıştırıcı arasında iyi bir temas sağlanması şartıyla ara yüzeyde atomlar arası ve moleküller arası kuvvetlerin oluşması sonucu yapışmanın meydana geldiğini ileri sürer. Bu teori, yapıştırıcı biliminde halen en fazla kabul edilen uygulanabilir teoridir (Kinloch, 1980) ve Sharpe ve Schornhorn tarafından geliştirilmiştir. Yapıştırıcı- esas malzeme ara yüzeyindeki kuvvetler genel olarak iki kategoride gruplanabilir. a) İyonik, kovalent ve metalik bağlar olan birincil kuvvetler. b) Van der Waals kuvvetleri, dipole-dipole, indüklenmiş dipole dipole, hidrojen bağları ve asit-baz iç etkileşimini kapsayan ikincil kuvvetler (Kinloch 1980). Birincil kuvvetlerin bağ enerjileri 60–1050 KJ/mol arasında değişirken ikincil kuvvetlerin bağ enerjileri 0.08–40 KJ/mol arasında değişir. Birbirinden bir nanometre kadar ayrılan iki katı yüzey arasında oluşan çekim kuvveti yaklaşık 100 MPa olarak hesaplanmış olup bu değer yapıştırma bağlantısı mukavemetinden daha fazladır (Kinloch, 1980). Bu fark bağlantı esnasında oluşan boşluk ve diğer kusurlardan kaynaklanmaktadır. Bağlantı mukavemetinin teorik ve deneysel değerleri arasındaki bu büyük farka rağmen yine de bağlantı mukavemetinin bu kadar yüksek mukavemete sahip olmasının sebebi ikincil bağ kuvvetleridir. (Kinloch,1980)'a göre bazı durumlarda ara yüzey bağlantısı için yüzey analiz teknikleri fikir vermesine rağmen birincil kuvvetlerin yapıştırma bağlantısındaki katkısını değerlendirmek oldukça zordur (Çitil, 2012).

2.2.3. Elektrostatik teorisi

(Deryaguin, 1948), yapıştırıcı ile esas malzeme arasındaki elektron transferinin, yapışmanın oluşmasını sağlayan bir çekim sarjı ürettiğini ileri sürmüştür. O, yapıştırıcı ile esas malzeme arasındaki bağı kapasitöre benzetmiştir. Kapasitörün plakları kaldırıldığında, sarjı boşalır ve deşarj oluncaya kadar artan bir potansiyel meydana gelir. Bu en fazla tartışılan teorilerden biridir. Çünkü birçok araştırmacı mekanizmada oluşan kuvvetlerin büyüklüğü konusunda aynı fikirde değildiler. (Skinler,1953) hesaplanan elektrostatik kuvvetlerini Van der Waals kuvvetleriyle karşılaştırmış ve metal-yapıştırma bağlantısındaki yapışma işini deneysel olarak ölçmüşlerdir. Elektrostatik yapışmaya yaptığı katkının, Van der Waals kuvvetlerinin yanında çok küçük olduğu, ölçtüğü

yapışma işinin de elektrostatik ve Van der Waals kuvvetlerin toplamından daha büyük olduğu sonucunu çıkarmıştır (Çitil, 2012).

2.2.4. Difüzyon teorisi

Difüzyon teorisi, biraz mekanik tutunma teorisine benzemektedir. Fakat difüzyon teorisi moleküler seviyededir. (Voyutski,1963) tarafından geliştirilen difüzyon teorisi iki polimer malzemenin birbirleri içine difüze olmasıyla yapışma meydana geleceğini ifade eder (Çitil, 2012).

2.3. Yapıştırma Bağlantılarının Diğer Bağlantılarla Karşılaştırılması

Yapıştırıcı ile birleştirme tekniğinin, kaynak, perçinleme ve diğer mekanik bağlantıların tamamının yerini alacağını düşünmek doğru değildir. Bu geleneksel birleştirme tekniklerinin her birinin farklı şartlar altında avantajları veya zayıf noktaları görülmektedir.

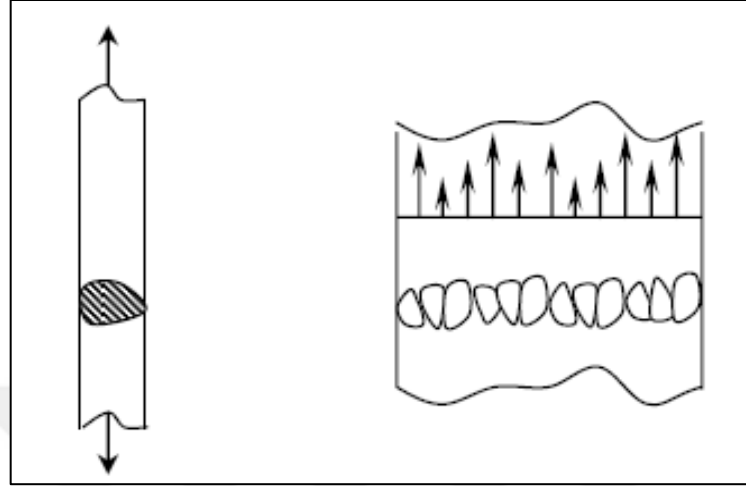
2.3.1. Perçin bağlantıları

(Kayacan, 1988)'in belirttiğine göre perçin delikleri, kesiti küçülttüğü ve çentik etkisi oluşturduğu için, delik kenarlarında gerilme tepeleri meydana gelir. Bindirme perçin bağlantılarında; kuvvetin, parçaların tam ortasına etkimemesi sebebiyle, bir eğilme momenti oluşur. Bu nedenle, hesaplarda perçin diziliş şekline göre, ana malzeme mukavemetinde %15 ile % 50 arasında bir azalma meydana gelir. Tasarımcı; bağlantıyı daha büyük ve daha ağır yapmak zorunda kalır. Bunun dışında, perçin bağlantılarında; sürekli mukavemet değerleri, düzgün olmayan gerilme dağılımından ötürü düşüktür ve perçinle birleştirme işlemi, hem yavaş hem de fazla işgücü gerektiren bir yöntemdir (Çalık, 2008).

2.3.2. Kaynaklı bağlantılar

Kaynaklı bağlantılar sayesinde, yapılarda meydana gelecek yük durumuna ve yapılarda oluşturulmak istenilen şekle göre tasarım yapmak mümkündür. Çok iyi yapılmış kaynak işlemleri ana malzemenin mukavemet değerlerine yakın dayanım değerlerine sahip olabilmektedir. Kaynaklı tasarımlar büyük yapıların inşaatında, otomotiv endüstrisinde yoğun ve güvenli bir şekilde kullanılmaktadır. Kaynak yapma sırasında malzemenin ergimesi ve hızlı soğuması bölgesel gerilmelere ve ana malzemelerin içyapısında değişmelere neden olur. Soğuma sırasında meydana gelen iç

gerilmeler ve yapıda bulunabilecek kaynak hataları dayanım değerlerinde bir azalmaya ve bağlantıda, Şekil 2.3' te görüldüğü gibi, düzgün olmayan bir gerilme dağılımına neden olur.



Şekil 2.3. Kaynak bağlantısında gerilme dağılımı (Çalık, 2008)

Kaynak dikişlerinin kontrolü zordur ve emniyet gerilmesi, kaynak kalitesine bağlı olarak çok farklı değerlerde olur. Kaynak bağlantılarının kullanılmasını sınırlayan en önemli faktörlerden biri yalnız aynı cins malzemenin birbiriyle kaynak edilebilmesidir. Ayrıca bazı malzemeler kaynak için elverişli değildir. Bunlara örnek, yüksek-mukavemet çelikleri ve hafif metal alaşımlarıdır (Çalık, 2008).

Kaynaklı bağlantıların imalatında kaynak yapan kişilerin el becerileri, kaynak makinelerinin kaliteleri, kullanılan kaynak elektrodlarının yapılmak istenen kaynağa uygunluğu gibi birçok faktör standart bir kaynak kalitesi oluşturmanın zorluğunu göstermekle birlikte özellikle endüstride yaygın bir şekilde kullanılan kaynak robotları sayesinde belirli bir kaynak kalitesini yakalamak mümkündür.

2.3.3. Lehim bağlantıları

Lehimleme ile farklı malzemeleri birleştirmek mümkündür. Lehimleme sıcaklığı, birleştirilen malzemenin ergime derecesinden daha düşüktür. Bununla birlikte sert lehimlemede içyapı değişimleri ortaya çıkabilir. Lehimlemede dekapan kullanıldığı için yüzeyler iyi temizlenmezse korozyon tehlikesi doğar. Benzer olmayan metallerin birleştirilmesinde, örneğin çelik ve alüminyumun birleştirilmesinde olduğu gibi galvanik korozyon oluşabilir. Hafif metallerin lehimlenmesi de oldukça sorunludur. Lehimleme

değişik tip pahalı malzemeleri gerektirir. Örneğin lehim en pahalı epoksi yapıştırıcıdan %30 daha pahalıdır (Solmaz, 2008).

2.3.4. Vida ve civata ile yapılan bağlantılar

Vidaların ve civataların tespiti için uygun deliklerin matkapla açılması veya darbe ile delinmesi gereklidir. Bu işlemler, birleştirilecek parçaların zayıflamasına neden olur ve ara boşlukların dolgu malzemeleri ile doldurulmasını gerektirir. Ayrıca bağlantılar yüklendiği zaman düzgün olmayan gerilme dağılımı ortaya çıkar. Bundan dolayı delik civarındaki gerilme değerleri diğer bölgelerdeki gerilmelerin oldukça üstünde değerlere çıkar. Artan bu gerilme değerlerine dayanabilecek yapıların oluşturulması için yapıların ağırlığının artmasına neden olan daha kalın malzemelerin kullanılması zorunluluğu ortaya çıkar. Yapıların ağırlığının artması sonucu ise enerji girdileri artarak maliyetlerin artması kaçınılmaz olmaktadır. Düzgün olmayan gerilme dağılımları malzemelerin yorulma dayanımlarını da düşürmektedir. Ayrıca, vidalar ve civatalar ile birleştirme genellikle fazla zaman ve işçilik gerektiren bir işlemdir. Bunun yanında malzemeleri birleştirmek için kullanılan her vida veya civatanın yapıların ağırlığını arttırdığı bir gerçektir. CNC gibi sistemlerin endüstride kullanılmaya başlamasıyla zaman ve iş gücünden tasarrufa gidilmesine rağmen bu tür sistemlerin çalıştırılması için gerekli olan teknik donanımın bilgi ve becerinin sağlanması gerekmektedir.

2.3.5. Pres bağlantıları

Soğuk ve sıcak pres yoluyla birleştirmenin sınırlı bir uygulama alanı vardır. En çok silindirik bağlantılarda kullanılır. Dar tolerans aralıklı bağlantılar elde etmek için birleştirilecek parçaların hassas işlenmesi ve uygun montaj aletleri kullanılarak birleştirmenin yapılması maliyetli ve fazla işçilik gerektirmektedir.

2.3.6. Yapıştırma bağlantıları

Yapıştırma bağlantılarında, fazla ısıl ve mekanik zorlamalar olmadan bağlantının yapılabilmesi, diğer yöntemlere göre önemli bir avantajdır. Böylece, birleştirilecek malzemelerin özellikleri değişmez. Sıcak perçinleme ve kaynak bağlantılarında olduğu gibi ısıl farklılıklardan kaynaklanan iç gerilmeler yoktur. Yapıştırma bağlantıları doğru yapıldığı sürece diğer bağlantı çeşitlerine göre birçok üstünlükleri vardır.

Yapıştırma bağlantılarının avantajları aşağıda sıralanmıştır (Çalık, 2008):

- Gerilme dağılımı diğer bağlantılara göre daha düzgün oluşur.
- Yapıştırıcı uygulaması kolaydır ve işçilik maliyetleri düşüktür.
- Kaynak bağlantısındaki gibi malzemelerin içyapısında değişiklik olmaz.
- Sızdırmazlık özellikleri vardır.
- Benzer veya farklı özellikteki metaller kolay bir şekilde birleştirilebilir.
- Korozyon sürtünmesi nedeniyle aşınma ortadan kalkar.
- Pim, cıvata, perçin, kelepçe vs. gereksiz hale gelir. Bu nedenle parça adedi azalır.
- Perçin veya kaynakta olduğu gibi bağlantının şeklinde istenmeyen görüntüler olmaz. Bu nedenle tasarımcılara ürün görünümünün iyileştirilmesi için birçok olanak sağlar.
- Bağlantı zamanla, vida bağlantısında olduğu gibi, gevşeme olayına maruz kalmaz.
- Bağlantı için, malzeme delinmek zorunda kalmaz ve bu nedenle korozyon ihtimali de azalır.
- En az diğer bağlantılarda olduğu kadar mukavemetlidir.
- İnce metaller birleştirilebilir.
- Bağlantıdaki boşluklar doldurulur.
- Yorulma dayanımı yüksektir.
- Farklı metaller arasında korozyonu önler.
- Elektriksel yalıtımı sağlar.
- Bağlama elemanı üretiminde yüksek enerji girişine gerek yoktur.
- Sönümleyici özelliğinden ötürü titreşimleri absorbe eder.

Yapıştırma bağlantılarının deavantajları aşağıda sıralanmıştır (Çalık, 2008):

- Bağlantının sağlıklı yapılabilmesi için tecrübeli kişilere ihtiyaç vardır.
- Oldukça uzun bakımlar gerektirir.
- Yüksek ısıya karşı dayanımı düşüktür.
- Yüzey temizliği hassasiyet gerektirir.
- Bağlantının durumuna göre bağlantının uygun olabilmesi için gerekli olan süre uzun olabilir.
- Bazı durumlarda uygun bağlantı için basınç ve ısı kullanılması gerekebilir.
- Tamir edilme güçlükleri yaşanabilir.
- Bağlantı ara birimleri veya aparatları gerekebilir.
- Bağlantının tahribatsız muayenesi zordur.

- Bağlantı yapılırken uygun çevre şartları gereklidir.
- Düşük sıcaklıklarda bazı ürünlerde kolay kırılabilirlik görülebilir.
- Bükülebilir ürünlerde sürünme dayanımı düşüktür.
- Zehirleyici ve alev alma problemlerini içermektedir.

2.4. Yapıştırıcılar

İkinci Dünya Savaşı'ndan günümüze kadar, kimya sanayiinde büyük gelişmeler meydana gelmiştir. Bu gelişmelere paralel olarak, plastiklerde aynı hızda gelişmeler olmuş, değişik tür ve çeşitte plastikler üretilmiş, demir, seramik, cam, ağaç, kâğıt, deri ve tekstil gibi malzemelerin yerine plastikler kullanılmaya başlanmıştır. Plastiklerin yapışkanlık özellikleri dikkate alınarak, yapıştırıcılar üretilmiş ve bu konuda da büyük ilerlemeler sağlanmıştır (Solmaz, 2008).

Bir yapıştırıcı(adhesive) ASTM (Standard Test Method for Strength Properties of adhesives in shear by tension loading) tarafından, “yüzey teması ile malzemeleri bir arada tutabilen madde” olarak tanımlanmıştır. Yapıştırıcının diğer bir tanımı ise, “yüzeyle uygulandığında onları bir arada tutabilen ve ayrılmayı önleyen polimerik malzeme” olarak belirtmişlerdir.

Yapıştırıcı; malzemeleri bir arada tutan madde olarak tanımlanır. Yapışma; iki yüzeyin moleküller, iyonlar ve atomlar arası etkileşimden dolayı oluşan çekim kuvvetleriyle bir arada tutturulması olarak tanımlanır. Yapıştırıcılar; sıvı, katı, macun ve bant gibi birçok fiziksel şekilde olabilir. Yapısal ve yapısal olmayan yapıştırma işlemi olarak iki temel yapıştırıcı ile birleştirme tipi vardır. Yapısal yapıştırma, yapının sürekliliğini kaybetmeden, yük taşıyabilen yapıştırıcı ile birleştirme işlemidir. Yapısal birleştirme işleminde yapısal yapıştırıcılar kullanılır. Yapısal yapıştırıcılar, yükleri yapışan parçalar arasında iletmekte kullanılan yapıştırıcılardır. Yapısal yapıştırıcılar, uzay sanayi, otomotiv endüstrisi, gemicilik vb. birçok alanda kullanılmaktadır (İşcan, 2007).

Yapıştırıcılar kullanılmadan önce film, macun, sıvı ve toz gibi çeşitli formlarda olabilirler. İyi bir yapışma için yapıştırıcı kalınlığı, 0.05 ile 0.15 mm arasında olmalıdır. Yapışma öncesi birleşme yüzeylerinin temiz olması, yapışma işleminin kalitesi açısından en önemli aşamadır. Ayrıca yapıştırıcının kuruma süresince kalınlık kaybı da tasarım ve analiz açısından dikkate alınması gereken önemli bir faktördür.

Yapıştırıcılar özelliklerine göre aşağıdaki gibi iki ana gruba ayrılabilirler (İşcan, 2007).

- Kimyasal tipleri açısından yapıştırıcılar
- Formları açısından yapıştırıcılar

2.4.1. Kimyasal tipleri açısından yapıştırıcılar

Bu yapıştırıcılar iki grupta irdelenir:

- Kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcılar
- Fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcılar

Kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcılar; en güçlü yapıştırıcı grubunda yer alır. Bu tip yapıştırıcılara yapısal yapıştırıcılar da denir. Günümüzde kullanılan kimyasal reaksiyon ile sertleşen kimyasal yapıştırıcı tipleri ve özellikleri aşağıda sırayla açıklanmıştır.

Epoksiler

Epoksi yapıştırıcılar, epoksi reçine ile sertleştiriciden oluşur. Epoksi yapıştırıcılar ile son derece mukavemetli yapışmalar elde edilir. Çok farklı tipte malzemeleri yapıştırmak için kullanılabilirler. Tek bileşenli, iki bileşenli ve film olarak üç farklı formdadırlar.

Epoksi yapıştırıcılar termoset (sıcakta sertleşen) reçinelerdir. Reçine ve sertleştiriciden oluşan iki bileşenli sistemler karıştırma sonrası sertleşir. Tek bileşenli epoksilerde bu iki bileşen karıştırılır ve sertleştirmek için sadece ısıtılır (Şahin,2011).

Epoksi reçineler, büyük çoğunlukta bütün uygulamalar için kullanılabilirler. Reçine ve katılaştırıcı şeklinde iki bileşen halinde satılır ve bağlantıda kullanılmadan önce karıştırılması gerekir. Oda sıcaklığında kürleşme süresi, birkaç saatlik periyoddan birkaç günlük periyoda kadar olan çok geniş türleri bulunmaktadır. Daha mukavemetli ticari epoksilerin kürleşme sıcaklıkları 200 °C'ye kadar çıkmaktadır. Kürleşen yapıştırıcı gevrek olup nemli ortamlara karşı hassastır ve uzun çevresel etkiler altında mukavemet kaybına uğramaktadır. Kürleşme esnasında yapıştırıcıda bir miktar daralma oluşur ve bu da istenmeyen artık gerilmelerin oluşmasına neden olur. Epoksi bağlantılar 140°C'yi aşan sıcaklıklarda bozular. Epoksinin metal ve plastik yüzeylere yapışması zayıftır ve bundan dolayı bağlantıda oluşan hasar, koheziv olmaktan ziyade adheziftir, yani yapıştırıcı ile esas malzeme ara yüzeyinde oluşmaktadır.

Bununla beraber, epoksi ile yapıştırılmış ahşap yapılarda hasar, bağlantı yerinden çok ahşabın kendi içerisinde meydana gelmektedir (Temiz, 2003).

Anaerobikler

En kolay uygulanabilen yapısal yapıştırıcılardan biridir. Yapışma işlemini oksijensizlik ya da havasızlık tetiklediğinden, vaktinden evvel işlem gerçekleşmez. Bu yapıştırıcılar akrilik polyester reçine esaslıdır. Yüksek kohesiv dayanım oluşturmalarına rağmen düşük yapıştırıcı dayanımına sahiptirler. Çapta 0,25 mm boşluklara kadar kullanılmaktadır (Köksal, 2013).

Poliüretanlar

Poliüretan yapıştırıcılar, iki bileşenli ve hızlı sertleşen yapıştırıcılardır. Darbe mukavemetine dayanıklıdır. Cam esaslı kumaşları yapıştırmak için oldukça uygundur. Hızlı kuruma için makine ile yapıştırıcının uygulanması gerekir. Genellikle yapışma astarı ile beraber kullanılırlar (İşcan, 2007).

Genel olarak inşaat, otomotiv, çift cam ve tekne sektöründe kullanılırlar. Poliüretan mastikler kürleştiklerinde çekme (hacim kaybı) ihmal edilebilir derecede az olmasından ve UV dayanımları mükemmel olduğundan mastikler arasında önemli bir konuma sahiptir. Tek komponentli olanları mastik tabancası ile uygulanacak tipte formüle edilirler. Bu tiplerin esneme kapasiteleri \pm %25 ile \pm %50 arasındadır. İnşaat sektöründe metal ve plastik kapı/pencerelerin montajında, prefabrik elemanların bileşimlerinde, cephe kaplamalarında ve genişleyen derzlerin oluşturulmasında sıkça kullanılırlar (Köksal, 2013).

Sertleştirilmiş akrilikler

Akriliklerin düzenlemiş bir tipi olan bu yapıştırıcılar, oldukça hızlı sertleşirler. Yüksek mukavemet ve sertlik isteyen yerlerde kullanılırlar. Reçine ve katalizör olarak iki parçalıdır. Yapışma yüzeylerinin birine reçine, diğerine katalizör tatbik edilir (İşcan, 2007).

Akrilikler, hem metaller hem de plastikler için iyi soyulma mukavemetine sahiptirler. 110°C ile 120°C arasında elastik özelliklerini değiştirmeden korurlar. Bu yapıştırıcılar rutubetli ortamlara karşı dirençlidir ve nemden dolayı mukavemetlerinde bozulma söz konusu değildir. Bununla beraber bu yapıştırıcılar yanıcı olup yüksek sıcaklıklarda zamanla bozulurlar (Köksal, 2013).

Modifiye edilmiş fenolikler

Yüksek mukavemet gerektiren metal ile metal, metal ile ağaç ve metal ile kompozit esaslı fren pabucu yapışmaları için oldukça iyidir. Sertleşmesi için, ısı ve basınç uygulamak gerekir (İşcan, 2007).

Fenolikler doğal bileşiklerden elde edilmeyen ilk yapıştırıcıdır. Molekül iskeleti, benzen halkalarının birleştirilmesi ile elde edilmiştir. -60 °C gibi düşük sıcaklıklarda oldukça gevrek ve yüksek sıcaklıklarda ısıtılarak kürleşir. Pahalı olup çevresel faktörlere dirençlidir. Ahşap ve tabakalı yapılarda ilk tercih edilen yapıştırıcıdır (Köksal, 2013).

Siyanoakrilikler

(Özenç, 2007) belirttiğine göre kolayca uygulanan ve çabuk yapışma işleminin gerçekleştiği yapıştırıcı çeşididir. Yapıştırılacak olan yüzeyler üzerinde bulunan nem ile reaksiyona girerek sertleşirler. Bazıları birkaç saniye içerisinde bağlantı dayanımı oluştururlar. Siyanoakrilatların en büyük avantajı plastiklerin kendileriyle veya diğer malzemeler ile birleştirilebilmesidir. Bu yapıştırıcılar düşük darbe dayanımına sahip olup neme ve kimyasal çözeltilere karşı oldukça hassastırlar. Küçük alanların birleştirilmesi için uygundur. Boşluk doldurma özellikleri iyi olmadığı gibi diğer yapıştırıcılara göre pahalıdırlar (Köksal, 2013).

Silikonlar

Silikon yapıştırıcılar sınırlı koheziv dayanıma sahiptirler. Fakat -60 °C'den 370 °C'ye kadar olağanüstü bir sıcaklık aralığında çalışma şartlarına sahiptirler. Zincir yapısı çok esnek olup iyi soyulma mukavemeti gösterir. Metal, cam, lastik ve plastiklerin yapıştırılmasında ve mikro elektronik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla beraber kısmen pahalıdırlar (Palancıoğlu, 2011).

Fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcılar, kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcılara nazaran daha düşük yapışma mukavemetine sahiptirler. Bu yapıştırıcılara, yapısal olmayan yapıştırıcılar da denir. Endüstride oldukça yaygın kullanım alanına sahip fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcı tipleri aşağıda kısaca açıklanmıştır (İşcan, 2007).

Sıcak eriyikler

Sıcak eriyikler polimer esastır. Hafif yüklere maruz kalacak şekilde tasarlanmış yapıları, hızlıca birleştirmek için kullanılırlar.

Kauçuk yapıştırıcılar

Eriyik esaslı kauçuk yapıştırıcılar, su ortamının ya da çözülmenin kaybolması ile sertleşirler. Yüke maruz kalan yapışmalar için uygun değildirler.

PVA'lar (Polyvinyl Acetates)

Endüstride oldukça geniş kullanım alanlarına sahiptirler. Ağaç, karton gibi gözenekli malzemelerin yapışması için uygundur.

Basınç gerektirmeyen yapıştırıcılar

Yüke maruz yapışmalar için uygun değildirler. Bu yapıştırıcılar sertleşmemelerine rağmen çevre şartları durumlarını değiştirirler. Etiket için uygundurlar.

2.4.2. Formları açısından yapıştırıcılar

Modern yapıştırıcılar, macun, sıvı ve toz gibi çeşitli formlarda olabilirler. Kullanım yeri olarak çeşitli gruplarda değerlendirilebilirler. Bu gruplar aşağıda açıklanmıştır (İşcan, 2007).

Macun tip yapıştırıcılar

Metal ya da kompozit parçaları birleştirmek için kullanılan iki bileşenli, oda sıcaklığında sertleşen yapıştırıcılardır. Bu yapıştırıcıların yüksek viskoziteye sahip olanları, mükemmel yakın yapışma sağlar. Bu yapıştırıcılar 80 °C'nin altındaki sıcaklıklarda sertleşirler. Sabit ısıtma gerektiğinde ısı yorganı kullanmak gerekir. Yapıştırıcı kalınlığının 0.1 ile 0.2 mm arasında olması, yapışma için yeterlidir. Karışım oranlarına dikkat edilmez ise, uygulama süresi göreceli olarak düşer. Bu yapıştırıcıların viskoziteleri düşük olduğundan düşey yüzeylerde ya da düşey yapışmalarda kullanılmazlar.

Film tip yapıştırıcılar

Film tipi yapıştırıcılar, metalik ya da kompozit malzemelerin yapıştırılması ya da yapışmasına yardım etmesi için kullanılan epoksi esaslı malzemelerdir. Çok geniş kullanım alanına sahiptirler.

Kompozit malzemelerin tamirleri için kalın filmler (300 gr/m²), metal parçaların tamirleri için ise ince filmler (150 gr/m²) kullanılırlar.

Düşük viskoziteli yapıştırıcılar

Bu yapıştırıcılar, epoksi reçine esaslıdır. Oda sıcaklığında ya da yüksek sıcaklıklarda(120-1800 °C) sertleşirler.

Düşük viskoziteli yapıştırıcılar, petek yapıları veya sandviç levhaların kenarlarını doldurmak için kullanılırlar. Bu yapıştırıcılar, birleşmeler içindeki süreksizliklere karşı daha fazla kayma mukavemetine sahip olmalarından dolayı, yapısal bütünlüğü korurlar. Kuruma süresi içinde köpürmez ve genişlemezler. Bu yüzden bu yapıştırıcıları belli bir yerde hapsetmek için özel bir aparata veya korumaya gerek yoktur.

Düşük yoğunluklu yapıştırıcılar

Düşük yoğunluklu yapıştırıcılar; iki bileşenli, oda sıcaklığında sertleşebilen yapıştırıcılardır. Bu yapıştırıcılar; göçük ya da dolgu tamiri, kompozit kumaş tabakalarının yapıştırılması, mükemmel yapışması istenen iki parçanın yapıştırılması için kullanılırlar. Optimum yapışma, kuruma eğrisine göre, sertleşme işlemi sona erdikten sonra yapılabilir. Karışma oranı yanlış yapılırsa, yapıştırıcının uygulama süresi göreceli olarak düşer.

Reçineler

Kompozit kumaşların emdirilmesi için kullanılan, iki parçalı düşük viskoziteli epoksi reçinelerdir. Optimum yapışma kuruma eğrisine göre sertleşme işlemi tamamen sona erdikten sonra elde edilebilir. Karışma oranı yanlış yapılırsa uygulama süresi göreceli olarak düşer.

Köpükler

Köpükler, kuruma süresince genişleyen epoksi esaslı yapıştırıcılardır. Bu yapıştırıcılar birleşmedeki boşlukları doldururlar ve birleşen parçalarının tümünü birbirine kuvvetlice yapıştırırlar. Köpük kalınlığının en az 2 mm olması istenir.

2.4.3. Yüksek sıcaklıklara dayanaklı yapısal yapıştırıcılar

Genel olarak yapıştırıcılar metal, seramik ve polimer malzemelerden oluşurlar. Polimerler, organik esaslı malzemeler oldukları için, yüksek sıcaklıklara dayanma mukavemetleri düşüktür.

Polimer esaslı yapıştırıcılar, termosetler ve termoplastikler olarak iki gruba ayrılır. Termosetler ve termoplastikler arasındaki en önemli fark, termosetlerin sertleşmesi

için moleküler yapıda çapraz bağların oluşması gerekirken, termoplastikler böyle bağ oluşturmazlar. Ayrıca termoplastiklerin ısıtılıp soğutulduklarında önceki şekillerini tekrar kazanabilmeleri mümkünken termosetler sertleştikten sonra, tekrar ısıtıldıklarında bozulurlar.

Termoset malzemeler genelde termoplastik malzemelerden daha serttirler ve yüksek sıcaklıklara dayanıklıdırlar. Termoset malzemelerin üretim zamanı, termoplastik malzemelere nazaran çok daha uzundur.

Bilindiği gibi yapıştırıcılar, belirli bir sıcaklığın üzerinde kimyasal özelliğini kaybederler. Yapıştırıcıların kimyasal özelliğini kaybettiği bu sıcaklığa, yumuşama noktası adı verilir. Yumuşama noktası yüksek değere sahip olan yapıştırıcılar, yüksek sıcaklıklara dayanıklı yapıştırıcılardır. Bu yapıştırıcılara metalik yapıştırıcılar da denilebilir.

Bütün polimer malzemelerin yumuşama noktası düşüktür. Bu yüzden yapıştırıcının yüksek sıcaklığa dayanımı arttırmak için, yapıştırıcının kimyasal bileşimindeki fenolik ve epoksi reçine oranını arttırmak ya da polimer oranını düşürmek gerekir.

Metal yapıştırıcılar olarak bilinen yüksek sıcaklığa dayanıklı, çok çeşitli malzemeler arasında mükemmel yapışma sağlayan fenolik esaslı yapıştırıcılar, ideal şartlarda ve ideal oranlarda karıştırılması sonucunda, yapıştırıcıda kırılma olmaksızın yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet vermenin yanında iyi bir dolgu malzemesi olarak da kullanılırlar (İşcan, 2007).

2.5. Yapıştırılacak Yüzeylerin Hazırlanması

Yapıştırma bağlantıları, yapıştırıcı ve yüzeyler arasında temas olmadığı durumlarda istenilen dayanımı gösteremezler. Başarılı bir yapıştırma için uygun bir ön işlem seçilmeli ve ön işlem uygulaması titizlikle yapılmalıdır.

Yüzey hazırlığı, yapıştırıcı kullanılarak yapılan birleştirme yönteminin en kritik aşamasıdır. Yüzey hazırlamanın amacı; sürekli ve yüksek dayanımlı bir yapıştırma bağlantısı sağlayacak şekilde, yapıştırılan malzeme yüzeylerinin oluşturulabilmesidir. Pratik olmamasına karşın, yapıştırılacak malzemelerin, oksit, boya, krom ve fosfor gibi tabakaların araya girmeden yapıştırıcıyla direkt temas etmesi istenir. Bu tabakalar “Zayıf Sınır Tabakalar” olarak adlandırılır. Böylece bu tabakaları ihtiva eden malzemeleri yapıştırma yöntemiyle bir araya getirme çabası, tozlu bir yüzeye hassas bant

uygulamasına benzer. Bu şartlar altında yapıştırıcı, yapıştırılacak malzeme yüzeyleri ile asla temas içinde olmayacaktır (İşcan, 2007).

Basit mekanik temizleme, kimyasal yağ almadan ve karmaşık fiziksel yüzey hazırlamaya kadar birçok ön işlem yöntemi mevcuttur (Çalık, 2008)

Yüzey hazırlama yöntemleriyle en azından yağ, gres ve yüzeye tutunma kuvveti yapıştırıcınınkinden az olabilecek kaplamalar temizlenmelidir. Birçok plastik ve metal malzemede basit zımparalama ve solventle (sentetik kuru temizleme eriyiği) temizleme kullanılır. Ancak bazı metallerde, iyi bir yapışma veya uzun vadeli ortam şartlarına dayanma temin etmek için bu basit yüzey hazırlama yöntemleri etkili olmayabilir (Çalık,2008).

Yüzey pürüzlülüğü yapıştırma bağlantılarının mukavemetine önemli derecede etki eder. Yapıştırıcının pürüzler arasında girip sertleşmesi bir şekil bağı meydana getirir. Bu nedenle, yapıştırılacak yüzeylerin çok parlak olmaması gerekir (Temiz, 2003). Pürüzlülük değerlerinin seçimi malzeme ve yapıştırıcı uyumuna bağlı ve deneysel olarak yapılması gerekmektedir.

En çok kullanılan yüzey hazırlama metotları aşağıda açıklanmıştır (Adin,2007).

2.5.1. Çözücüyle silme

En çok kullanılan fakat en az başarılı olduğu düşünülen bir metottur. Yüzeyler; üzerine temiz çözücü damlatılmış bir bez veya kâğıtla silinerek temizlenirler. Bezler çözücü kabına dokundurulmamalıdır. Silinen yüzeylerde çizgi oluşması bezin veya çözücünün temiz olmadığını gösterir. Silme işlemi için kullanılan çözücüler toluen, metil-etil keton, trikloroetilen ve asetondur. Küçük parçalar için çözücü içinde çalkalama ve sonra temiz, kuru azot içine salıverme; silme işleminden daha etkili olacaktır.

2.5.2. Buharla yağ giderme

Burada yapıştırılacak yüzeyler damıtılmış, yoğunlaşmış çözücü buharıyla yıkandığı için buharla yağ giderme silmeye tercih edilir. Çözücü buharlarının sıcaklığı kaynama noktasındadır ve ekseriyetle trikloroetilen veya perkloroetilen kullanılır. Buharla yağ giderme üstün bir temizleme metodudur. Trikloroetilen buharına bir dakika daldırma, ekseriyetle metallerin yağının tam olarak giderilmesi için yeterlidir.

2.5.3. Aşındırma

Yapıştırma bağlantılarının mukavemetine yüzey pürüzlülüğünün önemli derecede etkisi vardır. Bu etki, malzemenin yüzey alanını artırarak (dolayısıyla malzeme ve yapıştırıcı arasındaki kimyasal bağlar artar) sağlanır. Bu etki belirli bir sınıra kadardır.

İmalattan çıkmış parçaların yüzeyleri genellikle belli bir pürüzlülük değerine sahiptir. Ama parlatılmış ve taşlanmış veya ince işlenmiş yüzeyler, özellikle yapıştırma öncesi pürüzlendirilmedikçe yapışma mukavemetleri düşük olur. Etkili bir yüzey aşındırması sadece yüzey alanını artırmakla kalmaz ayrıca yüzeydeki yabancı madde tabakalarını da temizler. Buna ilaveten aşındırmanın yüzey ıslatmayı da geliştirdiği belirlenmiştir.

Aşındırmada kullanılan yöntemlerden birkaçı kum veya zımpara kâğıdı ile aşındırma; kum, tane veya hava püskürtme ve çelik yünle ovmadır. Kum püskürtme yapılıyorsa ince kum kullanılmalıdır ve püskürtme için kullanılan hava, kuru ve süzölmüş olmalıdır. Bu durum özellikle nemli alanlarda önemlidir. Kum ayrıca temiz olmalıdır. Hava basıncı ve tane çeşidi, temizlenecek yüzeyin sertliğine bağılı olarak değişir.

Aşındırma yöntemlerinden sonra yüzeyde kalan katı taneler temiz, kuru, basınçlı hava ile temizlenebilir. Pürüzlendirilen yüzeyler mümkünse hemen yapıştırılmalıdır. Aksi takdirde yüzeyler primer(yapışma performansını arttırmak amacıyla yüzeye yapıştırıcıdan önce uygulanan kaplama) ile kaplanmalıdır (Temiz,2003).

2.5.4. Buharla honlama

Çok küçük veya hassas metal parçaları için olağan aşındırma metotları çok kaba olabilir. Daha yumuşak ama yine aşındırma olan bu yöntem, buhar püskürtme veya hidro püskürtme olarak da bilinir. Bu işlem, suda asılı çok ince aşındırıcılar ve korozyon önleyiciler içeren bileşimlerin yüzeyi temizlemesi şeklindedir. Bu metod küçük parçaları temizlemek için faydalıdır ama honlama sonrası suda çalkalamaya gerek duyulur.

2.5.5. Ultrasonik temizleme

Ultrasonik temizleme sert, kırılğan malzemeleri efektif olarak temizlemek için üretilmiş mekanik işlemdir. İş parçası ve takım arasındaki sıvıda taşınan aşındırıcı taneler vasıtasıyla iş parçası yüzeyi yüksek hızda bombardıman edilerek temizlenir. Bu metod öncelikle küçük parçalar için kullanılır. Dalgaların hafifletilmemesi veya bozulmaması için parçalar sıvı içinde asılı kalmalı ve tank dibine dokundurulmamalıdır (Adin, 2007).

2.5.6. Kimyasal çözeltiliyle temizleme

Yüzeylerin kimyasal çözeltili yöntemi ile temizlenmesi, en etkili yüzey temizleme metodudur. Bu temizleme metodu, yüzeyin daha güçlü olması ve daha fazla ıslatılabilirlik sağlanması için, yüzeyin fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirir. Her malzeme yüzeyi, kendisine uygun ve farklı kimyasal işlem gerektirir. Birleştirilecek alan, hazırlanan asit çözeltisinin içine konular ve birkaç dakika bekletilir. Zamanla kimyasal çözeltili, malzeme yüzeyinden giderdiği pisliklerle kirleneceği ve yoğunluğu değişeceği için periyodik olarak çözeltili yenilenmelidir. Çözeltili sıcaklığı da kontrol altında tutulmalıdır ve çözeltili ile temas edilmemelidir. Çünkü bu tür çözeltiler genellikle sağlık açısından sakıncalıdır. Ayrıca pasta türü dağlama ürünleri de mevcut olup yüzeye sürülür ve hem yüzeyi temizler hem de kimyasal olarak yüzeyin özelliklerini değiştirir. Ancak pasta türü dağlama ürünleri asit banyolarından daha uzun zaman gerektirir (Adin, 2007).

2.5.7. Diğer kimyasal ve mekanik metotlar

Bu tür mekanik ve kimyasal metotlara son zamanlarda alev metodu, boşlukta iyonik bombardımanı ve elektrik cereyanı boşalması gibi fiziksel metotlar da eklenmiştir. Bu teknikler polietilen, polipropilen, politetrafloroetilen gibi asal plastikler için başarılı sonuçlar vermişlerdir. Ama bu metotlar malzemenin yüzey yapısını etkiler. Yağın giderilmesi için diğer bir yöntemde deterjanla yıkamadır. Özellikle lanolin gibi gresler yüzeye sürülmüşse faydalı olur. Çünkü bu greslerin çözücülerle çıkarılması zordur. Yüzey yağının bir kimyevi madde ile alınmasından sonra parçalar genellikle soğuk su ile iyice çalkalanarak yıkanır ve yüzeylerdeki artıklar giderilir. Sonra çeşitli kimyevi maddelerle (çok sulu asit veya alkali banyoları gibi) ikinci bir işleme tabi tutulur. Bol su içinde tekrar yıkanır. Böylece yüzeylerde herhangi bir temizleyici madde artığı da kalmaması sağlanır. Bu şekilde hazırlanmış yüzeyler temiz bir yerde genellikle sıcak hava ile kurutulur. Bundan sonra yapıştırma işlemine geçilir. Temizlenmiş ve kurutulmuş parçaların uzun süre özellikle rutubetli yerlerde bırakılması, oluşabilecek oksit tabakalarından ötürü bağlantının mukavemetine büyük etki eder (Adin, 2007).

2.5.8. Primerler

Primerlerin yüzey hazırlamadaki önemi gittikçe artmaktadır. Bir yapıştırıcı primeri, kuru yüzeylere 0.0015-0.05 mm kalınlık aralığında uygulanan ve organik çözücüler içerisinde genellikle seyreltilen bir yapıştırıcı çözeltilisidir. Birçok yapısal yapıştırıcı ile beraber kullanılan primerler, korozyonu önlemek ve soyulma dayanımını

artırmak için kullanılır. Gerçekte primerler, en fazla yüzeyi temizlenen metallerin yüzeyinin havadaki oksijenle aktivasyonunu azaltmak için kullanılır. Primerler, yüzey hazırlama ile yüzeye yapıştırıcının uygulanıp yapıştırılması arasında geçen süreyi uzatır. Örneğin bu süre alüminyum için maksimum 12 saattir. Eğer malzeme, yüzeyi temizlendikten sonraki ilk 12 saat içerisinde yapıştırılmaz ise bu yüzey, yapıştırılacağı zaman tekrar temizlenmelidir. Hâlbuki eğer uygun primer/yapıştırıcı sistemi kullanılırsa, yüzey hazırlama ile yapıştırma işlemi arasındaki süre 3 günden 6 aya kadar uzayabilir. Bu süreç, birçok parçanın yüzeyinin temizlenmesi, primerlenmesi ve yapıştırılmadan önce nispeten uzun süre saklanmasına imkân verir. Bu sayede artık üreticinin planları ve takvimi yüzey hazırlama işlemine bağımlı kalmaz (Adin,2007).

2.6. Yapıştırma Bağlantı Tasarımları

Yapısal mühendislik tasarımının rasyonel temeli, bir yükleme durumunda yükleri belirleyebilmek ve oluşacak gerilmeleri pratik olarak hesaplayabilmek olmalıdır. Yükleme sistemi genellikle bir fonksiyon ile tanımlanır, fakat mühendis en uygun ve maliyet açısından en etkili çözüme ulaşacak en iyi malzeme ve tasarım tekniğini kullanma becerisine sahip olmalıdır. Bu da sürekli olarak teknolojiye ilerlemeyi gerektirir ve yapısal yük ve gerilmeleri ölçecek modern mühendisliğin önemini artırır (Adin,2007).

Yapıştırma yoluyla birleştirilecek parçaların bağlantı şekilleri yapıya gelecek yüklere göre tasarlanmalıdır. Gerilme ve yükleri dikkate almadan yapıştırma bağlantısını tasarlamak hatalıdır. Yapıştırma bağlantıları, yapıştırıcının çalışma şartlarına uyacak şekilde tasarlanırsa klasik metodlarla sağlanan bağlantılardan daha emniyetli olduğu görülür.

Bir yapıştırma bağlantısı çekme, basma, kayma, soyulma veya tüm bu yükleme durumlarının kombinasyonu olarak yüklenebilir. Bu yüzden bir yapıştırma bağlantısı tasarımında bağlantının maruz kalacağı yük durumu mutlaka göz önünde bulundurulmalı ve yapıştırıcı hangi yükleme durumu için maksimum performans sergiliyorsa o yükleme durumuna uygun bağlantı tipi seçilmelidir (Köksal, 2013).

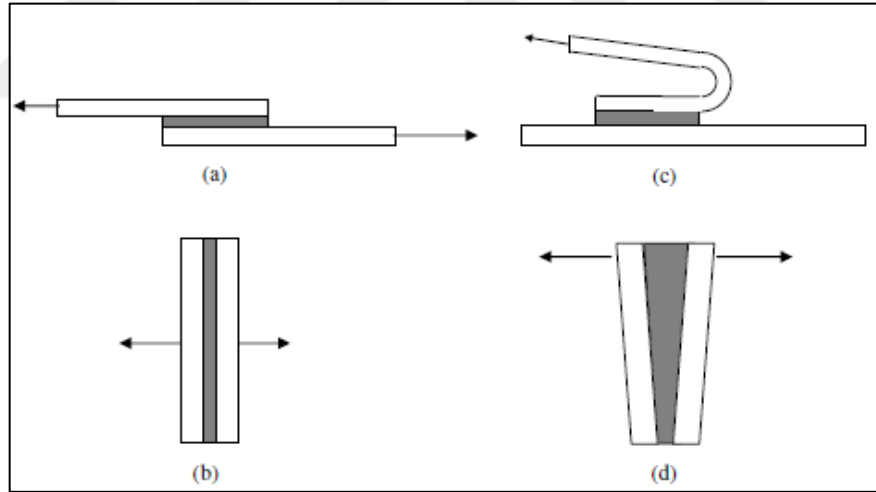
2.6.1. Yapıştırma bağlantılarının maruz kaldığı kuvvetler

Yapıştırma bağlantılarında dört önemli gerilme çeşidi oluşmaktadır. Bunlar; çekme, kesme, soyulma(peeling) ve çekme-makaslama(cleavage)'dır (Şekil 2.4). Yapıştırma bağlantılarını tasarlarken bu gerilme tiplerini dikkate alarak tasarlamak

bağlantıdan elde edilecek mukavemeti olabilecek en yüksek düzeye çıkarmak için oldukça önemlidir.

Kesme: Kesme kuvvetleri yapıştırılan alanın tamamına düzgün etki eder (Şekil 2.4a). Bu tür yüklemelerde yapışma alanının tamamının etki altında olması bağlantı ömrünü artırarak verimlilik sağlar. Mümkün olduğu yerlerde bağlantılar, yükün büyük bir kısmı kesme yükü olarak iletilebilecek şekilde tasarlanmalıdır.

Çekme: Şekil 2.4.b’de görüldüğü gibi bu tür yüklemelerde kuvvetler yapıştırıcı tabakasına dikey olarak etki etmektedir. Bu kuvvetlerden dolayı olan gerilme, yapışma alanına eşit şekilde dağılmaktadır. Ama bağlantıya sadece bu tür gerilmenin etkidiğinden emin olmak her zaman mümkün değildir. Eğer yükler eksenden kaçık olarak etkimekte ise o zaman yapışma alanına gerilmenin eşit yayılması mümkün olmayacak ve bağlantının hasar görme olasılığı artacaktır. Önemli olan diğer bir nokta da yapıştırılan malzemenin kalın olmamasıdır. Bağlantılarda yük etkisi ile fark edilir oranda bir eğilme oluşmamalıdır. Bağlantılara eğilme gerilmesi etki ettiği durumlarda gerilme dağılımı eşit olmayacaktır.



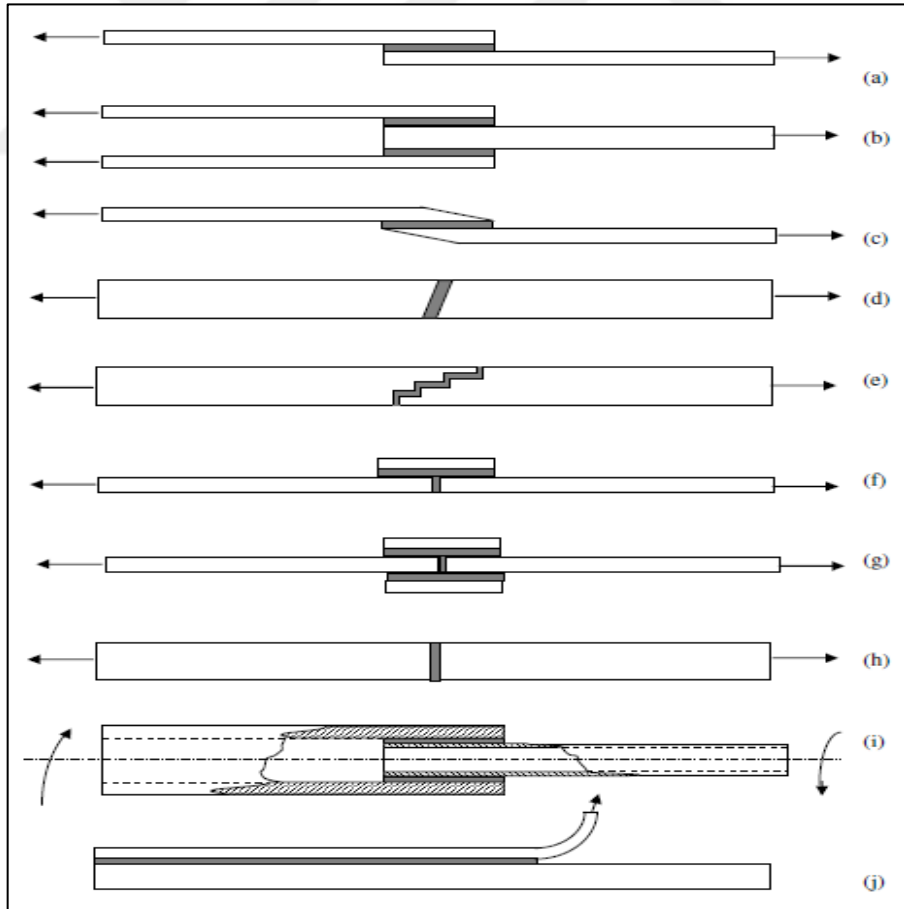
Şekil 2.4. Gerilme tipleri: (a) Kesme, (b) Çekme, (c) Soyulma, (d) Çekme-makaslama

Soyulma: Bu tür gerilmenin oluşması için yapıştırılan malzemelerden biri veya her ikisi de esnek olmalıdır (Şekil 2.4c). Bu tür yüklemelerde bağlantı sınırında oluşan gerilme çok yüksektir. Bağlantı çok geniş veya yük düşük olmadıkça yapıştırma bağlantısı hızlı bir şekilde hasara uğrayacaktır. Bu tür yükleme biçiminden zorunlu olmadıkça kaçınılmalıdır. Zorunlu durumlarda ise bağlantı alanı geniş tutulmalı ve uygulanacak yükler düşük seviyelerde tutulmalıdır.

Çekme-Makaslama: Bu tip yükleme, genellikle eksenden kaçık çekme kuvvetinin etkisiyle oluşan eğilme momentinin sonucudur. Bu gerilme tipi, yapışma alanına eşit olmayan şekilde etki etmekte ve bağlantının bir tarafında yoğunlaşmaktadır. Bu gerilmeyi karşılamak için yeterli derecede yapışma alanına ihtiyaç vardır. Çekme veya kesme gerilmelerine göre bu alan daha fazla olduğu için bu tarz bağlantı tavsiye edilmez; çünkü artan bağlantı alanı kullanılan malzeme miktarını artırarak maliyetlerin artmasına yol açmaktadır.

2.6.2. Yapıştırma bağlantı çeşitleri

Şekil 2.5'te çeşitli yapıştırma bağlantı tipleri gösterilmektedir. Bu bağlantılardan en çok kullanılanı Şekil 2.5.a'da gösterilen tek tesirli bindirme bağlantısıdır. Bu bağlantı çeşidi yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin tespit edilmesinde araştırmacılar tarafından diğer bağlantı tiplerine göre üretim kolaylığı sayesinde daha çok tercih edilmektedir.



Şekil 2.5. Yapıştırma bağlantı tipleri, (a) tek tesirli bindirme, (b) çift tesirli bindirme, (c) boyun bindirme, (d) açılı bindirme, (e) teraslama, (f) tek takviyeli bindirme, (g) çift takviyeli bindirme, (h) alın bağlantı, (i) silindirik bindirme, (j) soyulma (Adin, 2007)

2.7. Yorulma Olayı ve Tarihçesi

Makine parçalarının sadece statik yükleme altında çalışması çok az rastlanan bir durumdur. Makine parçalarının büyük bir kısmı değişken ya da düzenli/düzensiz tekrarlanan yükler altında çalışırlar. Bu nedenle mühendisler tekrarlı, değişken ve darbeli yüklerin malzemede meydana getirdiği farklı kırılma biçimlerine odaklanırlar. Değişken yüklemelere maruz kalan parçalarda, yükleme tipine bağlı olarak değişken ya da düzenli/düzensiz tekrarlanan gerilmeler meydana gelmekte ve bu gerilmeler genellikle malzemelerin yorulmaya bağlı olarak kırılmasına neden olmaktadır.

Dizayn mühendislerinin sıklıkla karşılaştıkları problem, makine parçalarından beklenen yüksek performans, düşük ağırlık ve uzun ömür gibi özelliklerin düşük maliyetle ve olabildiğince kısa üretim sürelerinde elde edilmesi zorunluluğudur. Birbirleriyle çelişen bu beklentilerin üstesinden gelebilmenin tek yolu daha yüksek yorulma dayanımına sahip parçaların tasarlanmasıdır. Fakat yorulma analizi ve ömür hesabına ilişkin olarak karşılaşılan problemler şöyle özetlenebilir (Ünal, 2006).

- Ömür hesapları, dayanım hesaplarına kıyasla daha az doğru sonuçlar vermektedir.
- Yorulma özellikleri mekanik özellikler kullanılarak doğru bir biçimde elde edilemezler. Doğrudan ölçülmeleri gerekir.
- Doğru bir ömür hesabının yapılabilmesi için tam boyutlardaki bir prototipin test edilmesi gerekmektedir.
- Laboratuvar testleri daha elverişli şartlarda yapıldığından, çalışma ortamında karşılaşılan ömür, hesaplanan ömür ile farklılık gösterebilir.

Bütün bu problemler, gelişmiş bilgisayar destekli analiz programları, yapılan binlerce laboratuvar testleri sonucu elde edilen veri tabanları ve bu veriler sayesinde ulaşılan amprik formüller ile aşılmaya çalışılmaktadır.

Mühendislik yapı elemanlarının yorulmadan dolayı hasar görmesi ve kopması bugün hala mühendislerin güncel problemi olarak önemini korumaktadır. Bu problem özellikle, değişen tekrarlı yüklerin uygulandığı ve yapı malzemesinin yüzey düzensizliği ihtiva ettiği durumlarda önemli olmaktadır. Malzemelerin tekrarlı gerilmeler ve uzamalar karşısındaki davranışı yorulma olarak tanımlanır. Yorulma olayının en önemli özelliği malzemede bulunan süreksizliklerin, hasarların, çatlakların uygulanan tekrarlı gerilme etkisiyle sürekli olarak gelişmesi, büyümesi ve sonunda da malzemenin kopmasıdır (Günaydın, 2003).

İkinci Dünya Savaşı sonrası yapıştırıcı teknolojisinin gelişmesiyle birlikte yapıştırma bağlantıları yoğun bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu durumda

yapıştırma bağlantılarının yorulması konusu üzerinde çalışılması gereken önemli bir araştırma sahası olarak ortaya çıkmıştır. Özellikle 1970'lerden sonra yapıştırma bağlantılarının uzay ve havacılık sanayiinde kullanımının artması, değişken ve dinamik yüklere maruz yapıştırma bağlantılarının yorulma analizlerinin yapılmasının önemini daha da arttırmıştır.

Yorulma olayının malzemelerdeki bir takım kusurlar ve süreksizlikler neticesinde geliştiği ve malzemeleri hasara uğrattığı bilinmektedir. Bu açıdan bakıldığında özellikle yapıştırma bağlantılarında gerek malzeme ile yapıştırıcı arasındaki yapışma bölgesinde gerekse yapıştırıcı içerisinde mikro düzeyde ayrılmaların ve süreksizliklerin olması ihtimali her zaman vardır. Gözle görülemeyen bu kusurlar değişken yük altında zamanla gelişerek yorulma hasarına neden olmaktadır. Dolayısıyla yapıştırma bağlantılarının statik yükler altında mekanik özelliklerinin tespit edilmesinin yanında değişken yükler altında yorulma davranışlarının da tespit edilmesi her zaman emniyetli bölgede çalışmak isteyen mühendisler açısından hayati önem taşımaktadır.

Yorulma olayının oluşumu, gelişimi ve yorulma hasarlarının önlenmesi üzerine geçmişten günümüze kadar çok sayıda çalışma yapılmış ve bu çalışmalar sonucunda büyük gelişmeler sağlanmıştır. Yorulma olayının bir mühendislik problemi olarak açığa çıkışını ve yapılan ilk çalışmaları tarihi süreç içerisinde incelemek mümkündür.

Buharlı makinenin geliştirilmesi ile mekanik olarak çalışan ve hareketli parça sayısı fazla olan araçların yaygın olarak kullanılmasıyla tekrarlı değişen yüklere maruz kalan parçalarda hasarların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Büyük yapı ve makine parçalarının kesit değişikliğinin bulunduğu kısımlara tekrarlı değişken yükün uygulanması durumunda kırılmaların olduğu fark edilmiştir. Rapor edilen ilk yorulma araştırması, Alman maden mühendisi W.A.S. Albert'in 1829 yılında demir zincire uyguladığı tekrarlı yükleme testleri olarak bilinmektedir. 1840'lı yıllarda ise Rankine, malzemelerin tekrarlı değişen yükün etkisi ile gevrek olarak kırıldığını gözlemlemiştir. Uygulanan tekrarlı değişen yüklerin etkisiyle malzemenin dayanım gücünün azaldığı ve yorulduğu sonucuna 1840 ile 1850'li yıllarda varılmıştır (Günaydın, 2003 ve Ünal, 2006)

Çalışma ortamındaki bir makina parçasının bilinen en eski yorulma kırılması ise, yolcu vagonlarının dingillerinde meydana gelmiştir. Demiryollarının hızla yayılmaya başladığı 19. yüzyılın ortalarında, vagon dingillerinde meydana gelen yorulma kırılmaları sıkça karşılaşılan bir problem olarak ortaya çıkınca, bütün dikkatlerin düzenli tekrarlanan yüklemenin, makina parçaları üzerindeki etkilerine yoğunlaşmasına sebep oldu. Böylelikle ilk defa birçok benzer parça akma gerilmesinin altındaki gerilmelerde

milyonlarca kez yüklenerek teste tabi tutuldu. Yapılmak istenen şey ise, çalışan parçaların açıklanamayan kırılmalarının laboratuvar ortamında oluşmasını sağlamaktır (Ünal, 2006).

Yorulma olayı üzerine ilk sistematik çalışma, 1850 ile 1860 yılları arasında Agust-Wöhler tarafından kendi geliştirdiği yorulma deney cihazı ile demiryolu vagonları aksları üzerinde yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda yorulmada maksimum gerilmeden çok gerilme aralığının önemli olduğu sonucuna varılmıştır. Gerilme-çevrim sayısı (S-N) eğrisi ilk olarak Wöhler tarafından çizilmiştir. Bu diyagram ile numunelerin sınır gerilme aralığı altındaki gerilmelerde kırılmadığı gösterilmiştir.

1900'lü yıllarda yorulma olayının incelenmesi için optik mikroskop kullanılmıştır. Daha sonraki yıllarda ise elektron mikroskobu geliştirilmiştir. Irwin, Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği'nin temeli olan K (Gerilme Şiddet Faktörü) değerini tanımlamıştır (Günaydın, 2003).

1950'li yılların sonlarına doğru ise yorulma ömrünün tayini için iki yaklaşım geliştirildi. Manson-Coffin lokal şekil değiştirme yaklaşımı olarak bilinen birinci metodun amacı çatlak oluşumunun tahmin edilmesi ve açıklanmasıydı. Diğer metod ise "Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği" (LEFM) olarak bilinen ve çatlak ilerlemesini açıklamaya yönelik bir yöntemdir (Ünal, 2006).

1960'lı yıllarda Paris ve Erdoğan yorulma çatlak ilerleme hızını, gerilme şiddet faktörünün bir fonksiyonu olarak tanımlamıştır.

Günümüzde ise yorulma olayı, farklı malzemelerde ve gelişmiş deney cihazları kullanılarak değişik deney şartlarında incelenmeye devam etmektedir. Bu kapsamda yapıştırma bağlantılarının yorulması konusunda yoğun araştırmalar yapılmaktadır.

Yorulma, ASTM E 206-72'ye göre şu şekilde tanımlanmıştır: Tekrarlı gerilme ve uzamalara maruz kalan malzemelerde belirli bir tekrar sayısından sonra çatlakların büyümesine ve sonucunda da kırılmaya neden olan kalıcı yapı değişimidir.

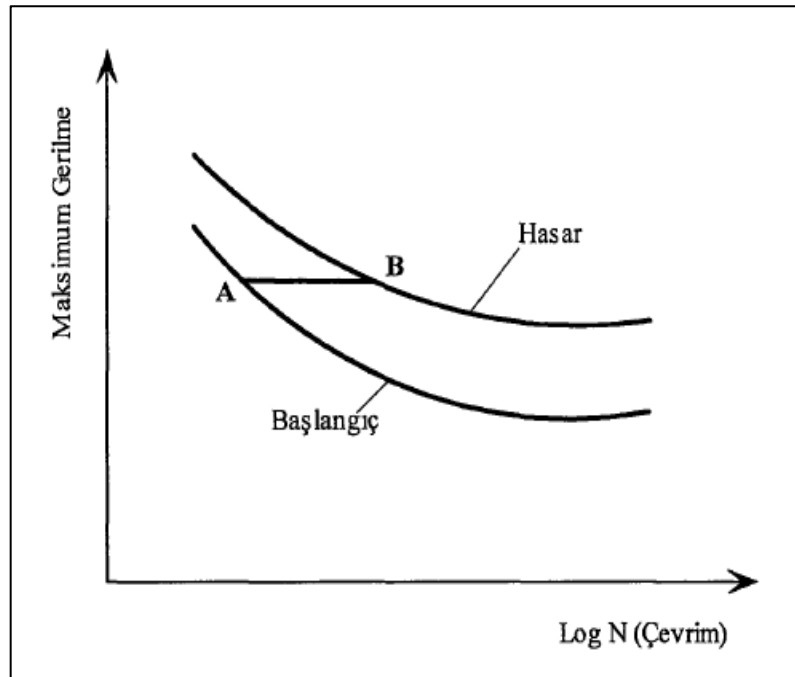
Yorulma, malzemelerin tekrarlı gerilme veya uzamalar etkisindeki davranışını belirler. Yorulma olayının gerçekleşmesi için malzemenin tekrarlı gerilmelere maruz kalması ve malzeme yüzeyinde çekme gerilmesinin etkili olması gerekmektedir. Yorulma olayının en önemli özelliği, olayın sürekli olarak devam etmesi, bölgesel gelişmesi ve çatlak büyümesinin ilerlemesiyle kopmanın meydana gelmesidir.

Tekrarlayan yüklere maruz kalan malzemeler, lokal gerilme konsantrasyonlarından dolayı yorulurlar. Bu malzemelerde yorulma hasarları meydana gelir. Bu yorulma hasarlarından kaçmak için ya malzemede oluşacak gerilme yoğunlukları en aza

indirilmeli ya da bu mümkün olmuyorsa yorulma çatlağının oluşumuna ve büyümesine karşı dirençli malzemeler tercih edilmelidir.

Yorulma olayı iki faktörle yakından ilişkilidir. Birincisi; değişken yüke maruz yapının genel hasarı, ikincisi ise; yorulma yükü altındaki çatlakların ilerleme hızıdır. Bir malzemenin yorulma özellikleri, malzemenin çevrim yüküne karşı davranışdır. Yorulma dayanımı statik dayanımdan daha düşüktür. Makro seviyede yorulma hasarları, az bir plastik deformasyon meydana getirirken, yorulan yüzeyin mikro seviyede incelenmesi plastik deformasyonun oluştuğunu açığa çıkarır. Yorulma ömrü, malzemeye uygulanan gerilmenin seviyesine, biçimine, çevrim moduna, işlem ve çevresel şartlara bağlıdır (Günaydın, 2003).

Metallerin yorulması, Şekil 2.6'da gösterildiği gibi hasar oluşuncaya kadar logaritmik çevrim-gerilme aralığı ($\Delta\sigma$ -logN) grafiğinin kullanılmasıyla karakterize edilmektedir. Bu grafikte gerilme aralığı maksimum gerilmeye eşit olması için minimum gerilme sıfır alınmıştır. Verilen maksimum gerilme için alt eğri çatlak başlangıcını, üst eğri hasar oluşumunu göstermektedir. A-B arasındaki yatay çizgi ise yorulma çatlak oluşumu, ilerleme ve son kırılma aşamalarını belirtmektedir. Ayrıca A'dan başlayan yatay çizgi belirtilen maksimum gerilme için hasar eğrisi ile kesişmez ise başlayan çatlak ilerlemiyor veya durdurulmuştur (Karcı, 2002).



Şekil 2.6. Yorulma çatlak başlangıcı ve hasar eğrisi (Karcı, 2002)

2.7.1. Yorulma hasar çeşitleri

Yorulma hasarları çok farklı şekillerde olmaktadır. Sadece artıp azalan (çevrimsel) gerilme veya deformasyon uygulanması ile mekanik yorulma oluşmaktadır. Yüksek sıcaklık, tekrarlanan gerilmeler ile birlikte uygulandığında sürünme yorulmasına, çevrimsel olarak yüklenmiş parçaya artıp azalan ısı uygulandığında ısı-mekanik yorulmaya neden olmaktadır. Tekrarlı yükler kimyasal ve koroze edici ortamlarda malzemeye uygulandığında korozyon yorulması oluşmaktadır. Genellikle korozif çevre şartları aktif olmayan çevre şartlarına göre yorulma ömrünü azaltacak şekilde etki etmektedir. Birleştirilmiş parçalara tekrarlı gerilmelerin uygulanması nedeniyle parçalar arasında oluşan temas yorulması, bu gerilmelerin darbe şeklinde parçalara etki etmesiyle malzemede sürtünen yüzeyler arasında aşınma yorulmasına yol açmaktadır. Makine parçalarında görülen hasarların çoğu, yukarıda belirtilen yorulma hasarlarından biri şeklinde gerçekleşmektedir.

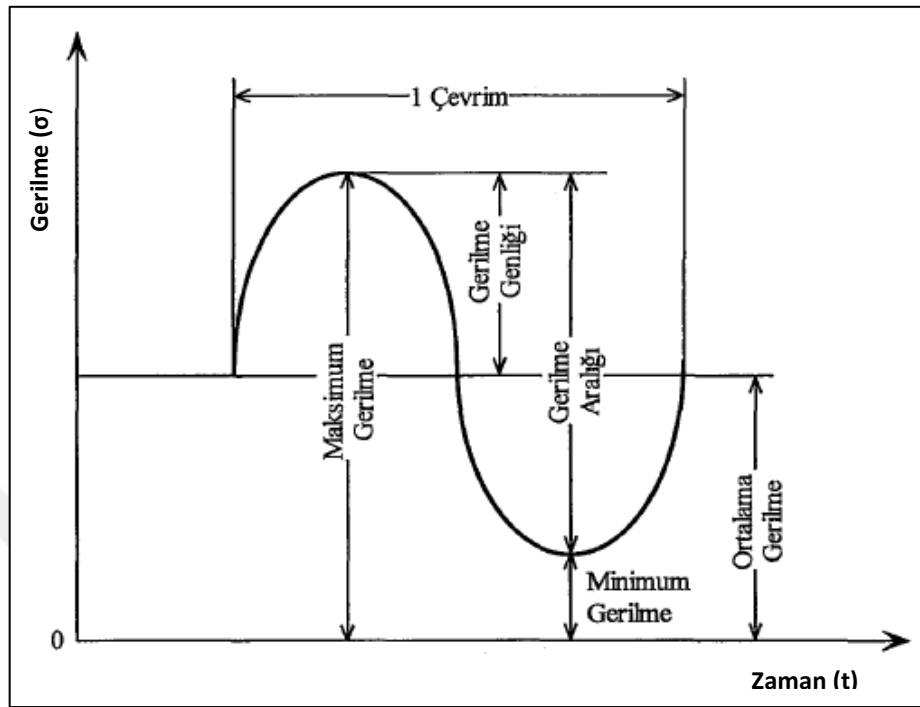
2.7.2. Yorulma testi ve teknik terimleri

Malzemelerin yorulma testi, yorulma deneyleri yapmak için özel olarak tasarlanmış cihazlarda yapılır. Bu makinelerde malzemeye zamana bağlı olarak değişkenlik gösteren sinüzoidal gerilmeler uygulanır. Bu sinüzoidal dalgada gerilme artarak maksimum ve azalarak minimum değere ulaşır. Gerilmenin maksimum ve minimum değeri arasında bir yükleme işi yapılmış olur (Günaydın, 2003).

Değişken gerilme uygulanan makine elemanlarında gerilmelerin maksimum değerleri ile bunların periyodik değişimi yani tekrarı önemlidir. Periyodik olarak değişen bu gerilmeler elemanın iç bünyesinde çatlaklara ve ayrılmalara sebep olduğu için, kopma durumu statik sınırların çok altında olur. Değişken gerilmelerin etkisiyle malzemenin iç yapısındaki değişikliklere yorulma, malzemenin kopuncaya kadar dayandığı süreye ise yorulma ömrü denilir. Büyüklüğü ve yönü düzenli ya da düzensiz sürekli değişen kuvvet ve momentlerin etkisine yorulma zorlaması denir. Zorlama sırasında yük istenildiği ölçüde tekrarlanabilir ve zorlamanın yapıldığı zaman aralıkları mevcut olabilir. Kuvvetin en küçük ve en büyük değerleri sıfır konumuna göre ters veya aynı işaretli olabilir. Kuvvet veya moment aynı büyüklükte biri artı diğeri eksi işaretli iki sınır değeri arasında değişiyor ise, dalgalı yorulma vardır.

Yorulma testi genellikle sinüzoidal yük kullanılarak yapılır. Böylece yorulma yükünün durumuna göre Şekil 2.7'de gösterilen birkaç parametre tanımlanabilir. Maksimum ve minimum gerilmeyi belirterek diğeri gerilme parametreleri, gerilme aralığı

(σ_r), gerilme genliği (σ_a), ortalama gerilme (σ_m) ve yorulma yük oranı (R) gibi parametreler kolaylıkla belirlenebilir (Günaydın, 2003).



Şekil 2.7. Yorulma testi için sinüzoidal yüklemeye (Günaydın, 2003)

Yorulma ile ilgili araştırmalarda uygulanan gerilmeler ve elde edilen sonuçlarla ilgili kullanılan bazı teknik terimler vardır. Bunlar aşağıda açıklanmıştır (Karcı, 2002).

Çevrim (N): Şekil 2.7’de görülen gerilme zaman eğrisinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçasına çevrim denilmektedir.

Maksimum Gerilme (σ_{maks}): Uygulanan gerilmeler arasında cebirsel olarak en büyük değere sahip olan gerilmedir. Değeri negatif, pozitif veya sıfır olabilir.

Minimum gerilme ($\sigma_{min.}$): Uygulanan gerilmeler arasında cebirsel olarak en küçük değere sahip olan gerilmedir. Değeri negatif, pozitif veya sıfır olabilir.

Ortalama gerilme(σ_m): Maksimum ve minimum gerilme değerlerinin aritmetik ortalamasına eşittir.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{maks.} - \sigma_{min.}}{2} \quad (2.1)$$

Gerilme aralığı ($\Delta\sigma$): Maksimum ve minimum gerilme değerleri arasındaki farka eşittir.

$$\Delta\sigma = \sigma_{maks.} - \sigma_{min.} \quad (2.2)$$

Gerilme genliği (σ_a): Gerilme aralığı değerinin yarısına eşittir.

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (2.3)$$

Gerilme oranı (R): Minimum gerilmenin maksimum gerilmeye oranı şeklinde ifade edilmektedir.

$$R = \frac{\sigma_{min.}}{\sigma_{maks.}} \quad (2.4)$$

R değeri yorulma yükleme şeklini göstermektedir. Aşağıda Tablo 2.1'de önemli yükleme tipleri belirtilmiştir.

Tablo 2.1. R değerleri ne göre yorulma yük biçimleri

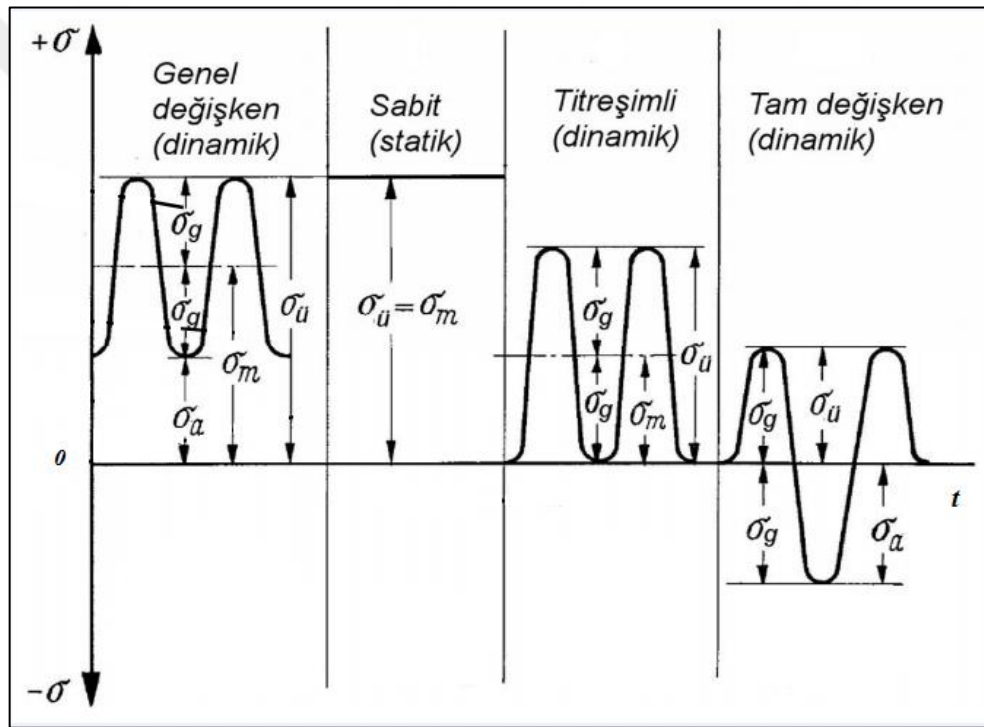
| Yorulma Yük Oranı | Yorulma Yük Biçimi |
|-------------------|-----------------------|
| $R=0$ | Çekme-Yükünü Boşaltma |
| $0<R<1$ | Çekme-Çekme |
| $R=-1$ | Çekme-Basma |
| $-1<R<0$ | Çekme-Basma |
| $1<R<\infty$ | Basma-Basma |

Yorulma dayanımı (N çevrim için): Malzemenin belirli bir N çevrim sayısı sonunda çatlama veya kopma gösterdiği gerilme değerini olarak tanımlanır.

Yorulma ömrü: Benzer numunelerin sabit koşullarda belirli bir gerilme değerini altında çatlama veya kopma olayı gösterdikleri N çevrim sayılarının ortalaması, yorulma ömrü şeklinde tanımlanır.

Yorulma deneylerinde yorulma özellikleri belirlenecek olan parçanın çalışma koşullarında karşılaşabileceği yüklere benzer şekilde, yük dağılım tipleri uygulanabilmektedir. Sabit genlikli yorulma araştırmalarında Şekil 2.8'de gösterildiği gibi bu yükler çekme-çekme, çekme-basma ve çekme-boşaltma şeklinde olabilmektedir.

Uygulanan yüklere göre yorulma deneyleri, aksel gerilmeli yorulma deneyi, eğme gerilmeli yorulma deneyi, burma gerilmeli yorulma deneyi ve birleşik gerilmeli yorulma şeklinde sınıflandırılmaktadır. Aksel gerilmeli yorulma deneyinde numuneye uzunluk ekseni boyunca değişen değerlerde çekme ve basma gerilmeleri uygulanır. Eğme gerilmeli yorulma deneyinde numuneye, bir düzleme göre tekrarlanan eğme gerilmeleri uygulanabileceği gibi, dönme hareketi yapan numuneye tekrarlanan eğme gerilmeleri uygulanabilir. Burma gerilmeli yorulma deneyinde deney numunesine sabit bir eksene göre tekrarlanan burma gerilmeleri uygulanmaktadır. Yukarıda belirtilen farklı gerilme türlerinden en az ikisinin ya da daha fazlasının uygulandığı yorulma deneyleri ise birleşik gerilmeli yorulma deneyleri olarak adlandırılır (Karcı, 2002).



Şekil 2.8. Yorulma yükleme biçimleri (Kurbanoğlu,2009)

2.7.3. Yorulma olayının gelişimi

Yorulma olayı genel olarak üç aşamada incelenmektedir.

- Çatlak oluşumu
- Çatlak ilerlemesi
- Malzeme kesitinin kırılması

Yorulma olayının gerçekleşmesi için malzeme ya da makine parçasına çekme gerilmesinin uygulanması, bu gerilmeye değişimlerin ya da dalgalanmaların olması ve bu

esnada plastik şekil değişiminin gözlenmesi gerekir. Bu üç faktörden herhangi biri olmazsa yorulma çatlak başlamaz ve ilerleyemez. Çekme gerilmesinde meydana gelen değişimler ve dalgalanmalar çatlak başlatır. Çatlak ilerlemesi ise çekme gerilmesinin etkisiyle olur (Karcı, 2002).

Yorulma üzerine yapılan çalışmaların başlangıç dönemlerinde çevrim sayısını belirlemek üzere sabit büyüklükte değişken gerilmelerle malzemeler yükleniyordu. Daha sonraları ise yorulma hasarlarının metalürjik hatalardan ve hatalı tasarımlardan kaynaklandığı ve çatlakların süreksizliklerden başlayıp ilerlediğinin tespit edilmesi üzerine yorulmanın bazı kademelerden geçerek meydana geldiği ve ilerlediği fikrine varıldı.

Kırılma mekaniği açısından bir yapı ve makine elemanının ömrü üç adımda incelenir. İmalattan kaynaklanan bir kusurun ya da sürünme, yorulma etkisiyle bir mikro çatlak oluşumu olan çatlak başlangıç safhası, kırılma tokluğu ve gerilme şiddet faktörü ile kontrol edilen kararlı çatlak ilerleme safhası ve hızlı çatlak ilerlemesi ile ani kopmanın meydana geldiği kırılma safhasıdır (Günaydın, 2003).

Yorulma çatlakları içyapıda bulunan veya malzeme yüzeyindeki çentik civarında oluşan bölgesel deformasyonların çok şiddetli olduğu bölgelerden başlamakta ve ilerlemektedir. Malzemedeki bulunan çatlak, çentik, boşluk, sert parçaların, ani kesit değişimlerinin çevresindeki gerilmeler parçanın maruz kaldığı dış gerilmelere göre daha büyük değerlerdedir. Bu gerilmeler etkisinde yapı içerisinde plastik şekil değişimi meydana gelir. Bir metal parçada maruz kalınan elastik sınır altındaki yükler nedeniyle mikro yapı içerisindeki mevcut hatalar (dislokasyonlar) bölgesel olarak hareket ederler ve kayma bantlarını oluştururlar. Kayma bantlarının oluşumu sonucu yüzeyde girinti ve çıkıntılar gerilim yoğunlaşmasına sebep olmaktadır. Gerilme yığınlarının etkisiyle yüzeyde mikro çatlaklar oluşur. Mikro çatlaklar zamanla büyüyerek ilerler ve yapı içerisinde yayılırlar (Karcı, 2002).

Malzemelerde talaşlı imalat sonucu oluşan izler, malzeme yüzeyindeki çizgiler, malzeme içerisindeki sert yabancı maddeler, çökelmiş sert tanecikler, ikiz sınırları ve tane sınırları gibi kristal süreksizlikler çatlak başlamasını etkileyen unsurlardır.

Zorlamalar sonucu makine ve yapı elemanlarında oluşan gerilmeler her zaman ideal olmaz. Çekme ve basma gerilmeleri parça kesitinde eşit olarak dağılmayabilir. Eğilme ve burulma gerilmeleri yüzeyden merkeze doğru bir azalma göstermeyebilir. Uygulamada bu gerilme dağılımlarında az veya çok sapmalar görülebilir. Parçanın şekli yüzey kalitesi, ortamın korozyon etkisi, kuvvet iletim türü, ön gerilme, malzeme hatası,

mikro yapının büyük ölçüde heterojen olması gibi nedenlerle yerel gerilme yığılması oluşur. Bu gerilme yığılmalarının bulunduğu bölgede yorulma çatlakları başlar. Aşırı zorlanan bir bölgede çatlakların başlaması durumunda ise yorulma kırılmasının önlenmesine genellikle olanak yoktur. Kırılmanın oluşması ise belirli bir çevrim sayısında çatlakların ilerlemesiyle olur. Yorulma sonucu oluşan keskin çatlak ek bir çentik etkisi ortaya çıkararak meydana gelen yüksek gerilme yığılmaları, çatlakların hızla ilerlemesine ve büyümesine neden olur (Günaydın, 2003).

Yorulma çatlak ilerlemesi üç safhada gerçekleşir. Birinci safha çatlakların oluşum safhası olup bu bölge gerilme şiddet faktörü kritik değere ulaşıncaya kadar devam eder. İkinci safha çatlakların ilerleme safhasıdır. Üçüncü safha ise kırılmanın meydana geldiği bölgedir.

Yorulma kırılmalarının büyük çoğunluğu (%85-90) malzeme hatalarından dolayı değil çentik etkisi yapan şekil ve yüzey etkilerinden, aşırı yüklemekten, montaj hatalarından, yetersiz bakım ve benzeri nedenlerden ortaya çıkmaktadır.

Çatlak ilerlemesi, çatlak uzunluğuna karşı çatlak büyüme hızı olarak veya gerilme şiddetine karşı çatlak büyüme hızı olarak tanımlanır.

Çatlak ilerleme hızının hesaplanabilmesi için Lineer Elastik Kırılma Mekanikliği yardımıyla hazırlanan çeşitli denklemler mevcuttur. Paris-Doğan denklemleri de bu denklemlerden biridir. Bu denklem aşağıda gösterilmiştir (Paris ve Doğan, 1963)

$$da/dN = A(\Delta K)^n \quad (2.5)$$

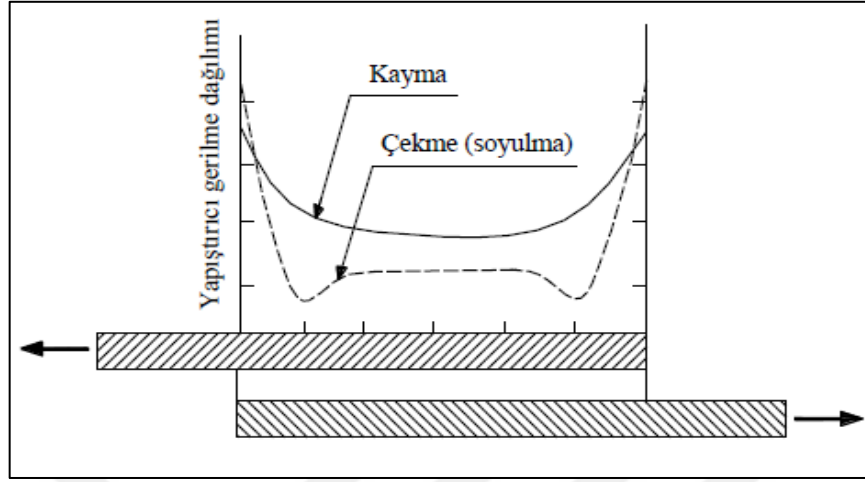
Bu denklemde da/dN çatlak ilerleme hızı, ΔK gerilme şiddet faktörü değişimi, n ve A ise malzeme sabitleridir.

2.7.4. Yapıştırma bağlantılarında yorulma

Yapıştırma bağlantısı tekrarlı veya statik olarak yüklendiğinde, yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcı arasındaki elastik farklılıktan, olası geometrik asimetriden ve bağlantıda olabilecek süreksizliklerden dolayı düzgün bir gerilme alanının meydana gelmesi mümkün değildir. Şekil 2.9'da tek tesirli bindirme bağlantılarında kayma ve çekme gerilme dağılımları gösterilmektedir.

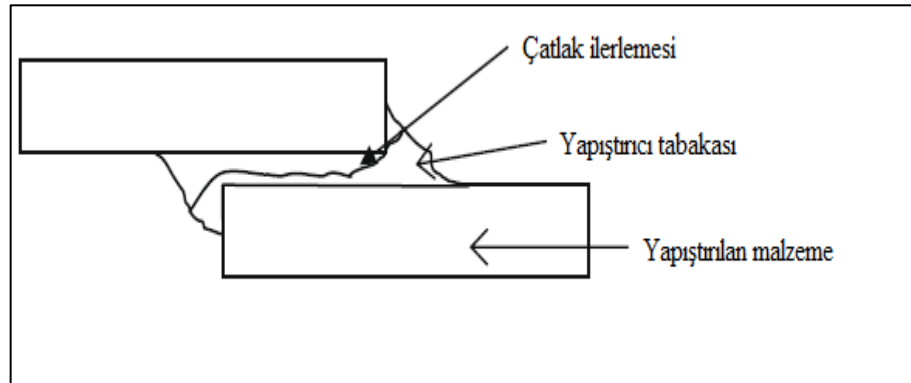
Yorulma çatlakları şeklindeki bir hasar ya yapıştırıcı tabakasında ya da yapıştırılan ve yapıştırıcı ara yüzeyinde meydana gelir. Çift bindirmeli birleşimlerde yorulma çatlakları her iki yapışma alanında da meydana gelebilir. Yapışma alanlarının birinde meydana

gelen çatlak, gerilme etkisi ile diğer yapışma alanındaki çatlakların başlamasına sebep olabilir (Günaydın, 2010).

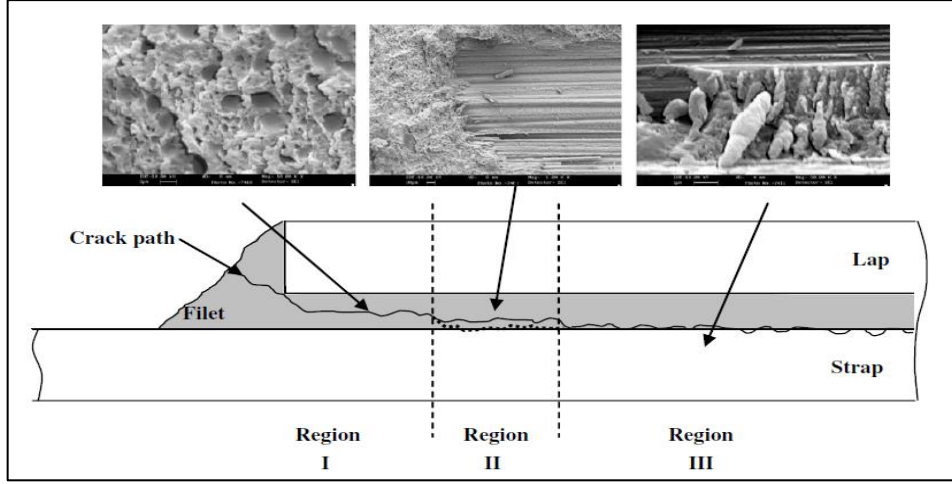


Şekil 2.9. Tek bindirmeli birleştirmede gerilme dağılımı

Çevrim yükü etkisiyle yorulma çatlakları, gerilme konsantrasyonunun yoğun olduğu bindirme kenarlarında başlar. Bindirmeli birleştirmelerde, yapıştırıcı iç ve dış kavisleri, gerilme ve şekil değiştirme konsantrasyonlarının meydana geldiği bölgelerdir. Şekil 2.10 ve 2.11’de tek tesirli bir bindirme bağlantısında tipik bir çatlak başlangıcı ve ilerlemesi gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Tek tesirli yapıştırma bağlantısında tipik bir çatlak ilerlemesi



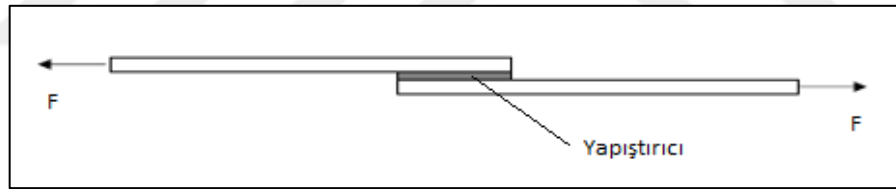
Şekil 2.11. Yorulma deneyinde yapıştırma bölge çatlak ilerlemesi (Casas-Rodriguez ve ark.,2008)

Yapıştırma bağlantılarında, yapışma bölgesinde oluşan hasar iki şekilde incelenmektedir. Yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında olan ayrılmaya adhezyon hasarı denilmektedir. Adhezyon hasarı genelde iyi yapışmanın olmadığına göstergesidir. Bu tür hasarların önüne geçebilmek için yapıştırılan malzemelere yapılan ön işlem büyük önem taşımaktadır. Bağlantıların yorulma ömürleri yapılan ön işlemlerden oldukça etkilenmektedir. Diğer hasar çeşidi ise yapıştırıcı tabakasının kendi içerisinde bir ayrılmanın olmasıdır, bu durum literatürde kohezyon hasarı olarak adlandırılmaktadır. Yapıştırma bağlantılarında kohezyon hasarının oluşması genelde seçilen yapıştırıcı cinsi, küreleşme sıcaklık ve basıncı gibi faktörlerin iyileştirilmesiyle önlenmektedir. Tabii ki yapıştırma bağlantıları ne kadar iyi tasarlanırsa tasarlansın sonuç olarak bağlantının bir yük taşıma kapasitesi vardır, bu eşik yük değeri aşıldığında bağlantılar hasar görmektedir. Bu açıdan bakıldığında bağlantıların taşıyacağı emniyetli yüklerin belirlenmesi için çok sayıda deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmasının önemi açığa çıkmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, çekme ve yorulma deney parametreleri açıklanmış ve numune üretim aşamaları hakkında ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Yapılan deneysel çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak çekme deneyleri yapılmıştır. Daha sonra çekme deneylerinde elde edilen sonuçları dikkate alarak yorulma deney parametreleri belirlenmiş ve yorulma deneyleri yapılmıştır.

Yapılan çalışmada epoksi yapıştırıcı içerisine üç farklı nanopartikül takviyesi yapılarak ve takviyesiz yapıştırıcı kullanılarak tek tesirli yapıştırma bağlantıları üretilmiştir. Üretilen yapıştırma bağlantıları ile çekme ve yorulma deneyleri yapılarak nanopartikül takviyesinin bağlantıların çekme ve yorulma mukavemetine etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi tek tesirli bindirme bağlantı geometrisi kullanılmıştır. Literatür incelendiğinde bu bağlantı çeşidi, imalatının basit olması ve gerilme davranışlarının daha kolay tespit edilebilmesi gibi avantajlarından dolayı yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin tespit edilmesinde araştırmacılar tarafından daha çok tercih edilmektedir.



Şekil 3.1. Tek tesirli bindirme bağlantısı

Deneysel çalışmada; Al_2O_3 , TiO_2 ve SiO_2 katkılı ve katkısız yapıştırıcı kullanılarak 20, 25, 30 mm bindirme boylarında test numuneleri üretilmiştir. Numunelerin genişliği 25 mm olarak sabit alınmıştır. Üretilen numuneler çekme ve yorulma testlerine tabi tutulmuştur. Çekme deneyleri Şekil 3.2’de gösterilen, Shimadzu AG-X 250 kN universal test cihazında 1mm/dak. çekme hızında yapılmıştır. Yorulma deneyleri ise Şekil 3.3’te gösterilen Shimadzu EHF-EV 100 kN yorulma cihazında 10 Hz sabit frekans değerinde ve 0.1 sabit yükleme oranı değerinde yapılmıştır.



Şekil 3.2. Shimadzu AG-X 250 kN universal çekme cihazı



Şekil 3.3. Shimadzu EHF-EV 100kN yorulma cihazı

3.1. Yapıştırılan Malzeme

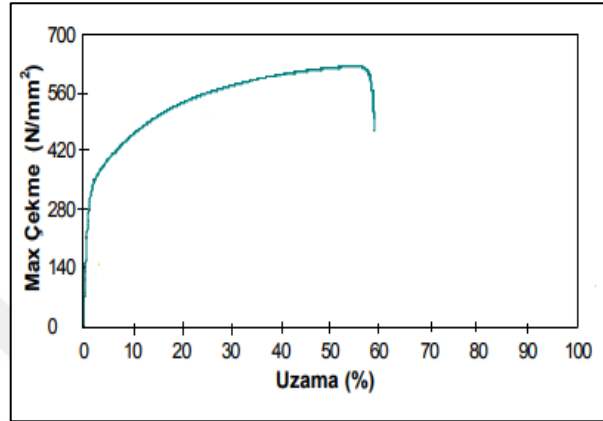
Bu çalışmada yapıştırılan malzeme olarak, paslanmaz çeliğin en yaygın çeşidi olan ve bütün endüstri kollarında yoğun bir şekilde kullanılan AISI 304 kalite paslanmaz çelik sac kullanılmıştır.

Deneylerde kullanılan AISI 304 kalite paslanmaz çelik malzemeler, 2 mm kalınlığındaki levhadan 120 mm, 125 mm ve 130 mm boylarında ve 25 mm eninde olmak üzere lazer kesim yöntemi kullanılarak piyasadan temin edilmiştir.

AISI 304 çeliğinin oda sıcaklığında mekanik özellikleri Tablo 3.1 ve Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

Tablo 3.1. AISI 304 çeliği mekanik özellikleri (Anonim,2016)

| | |
|--|-----------|
| Kopma Mukavemeti (σ_k , MPa) | 515-720 |
| Akma Mukavemeti (σ_{ak} , MPa) | 210 |
| Sertlik (HB) | 201 |
| Elastisite Modülü (E, GPa) | 193 |
| Poisson Oranı (ν) | 0.29 |
| Kopma Uzaması (%) | ≥ 50 |

**Şekil 3.4.** AISI 304 paslanmaz çelik çekme testi grafiği (Kaya, 2010)

AISI 304 çeliğinin kimyasal bileşimi ve oda sıcaklığında fiziksel özellikleri ise sırasıyla Tablo 3.2 ve 3.3'te gösterilmiştir.

Tablo 3.2. AISI 304 çeliği kimyasal kompozisyonu (%) (Kaya,2010)

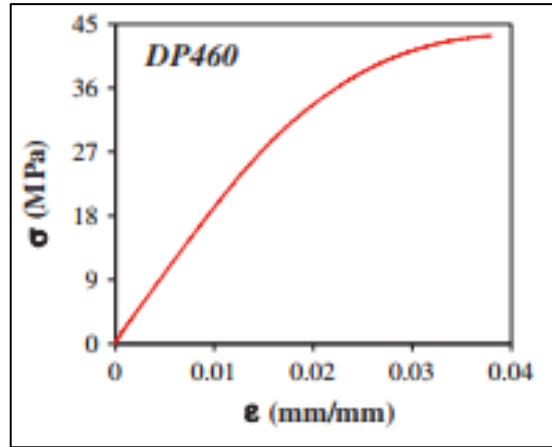
| Kalite | C | Mn | P | S | Si | N | Cr | Ni | Fe |
|-------------|------|------|-------|------|------|-----|-------|------|-------|
| 304(1.4301) | 0.07 | 1.01 | 0.045 | 0.02 | 0.75 | 0.1 | 18-23 | 8-12 | Kalan |

Tablo 3.3. AISI 304 çeliği fiziksel özellikleri (Anonim,2016)

| | |
|-------------------------------------|------|
| Özgül Ağırlığı (kg/m ³) | 8000 |
| Ergime Sıcaklığı (°C) | 1450 |

3.2. Yapıştırıcı Malzeme

Yapılan çalışmada yapıştırıcı olarak, yüksek kayma ve soyulma direnci gösterebilen, kolay karışabilen ve 60 dakika çalışma ömrüne sahip 3M™ Scotch-Weld™ DP460 Beyaz epoksi yapısal yapıştırıcı kullanılmıştır. 3M™ DP460; epoksi (B) ve hızlandırıcı (A)'nın hacimce B:A=2:1 oranında karışımıyla oluşan sıvı yapıştırıcıdır. DP460 epoksi yapıştırıcının mekanik özellikleri Şekil 3.5 ve Tablo 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. DP460 epoksi yapıştırıcı çekme testi grafiği (Akpınar ve ark., 2013)

Tablo 3.4. DP460 epoksi yapıştırıcı mekanik özellikleri (Akpınar ve ark., 2013)

| | |
|--------------------------------------|------------|
| Kopma Mukavemeti (σ_k , MPa) | 38.4 ± 1.1 |
| Elastisite Modülü (E, MPa) | 1984 ± 43 |
| Poisson Oranı (ν) | 0,37 |
| Kopma Uzaması (%) | 4.7 |

DP460 Epoksi Yapıştırıcısının oda sıcaklığında ve kürleşmemiş halde fiziksel özellikleri Tablo 3.5'te gösterilmiştir.

Tablo 3.5. DP460 epoksi yapıştırıcı fiziksel özellikleri (Anonim,2016)

| | | |
|-----------------------------|---|-------------------|
| Viskozite; | Temel yapıştırıcı Hızlandırıcı | 20.000-50.000 cps |
| | | 8.000-14.000 cps |
| Reçine; | Temel yapıştırıcı Hızlandırıcı | Epoksi |
| | | Amin |
| Renk; | Temel yapıştırıcı Hızlandırıcı | Beyaz |
| | | Amber |
| Özgül ağırlık; | Temel yapıştırıcı Hızlandırıcı | 1,11-1,16 kg/l |
| | | 1,05-1,10 kg/l |
| Karışım oranı (B:A); | Hacim Ağırlık | 2:1 |
| | | 2:0,96 |
| Yapıştırıcı çalışma süresi; | 20 g karışım 10 g karışım 5 g karışım | 60 dakika |
| | | 75 dakika |
| | | 90 dakika |

50 ml'lik tüpler şeklinde piyasadan temin edilen yapıştırıcı, uygulama aparatıyla birlikte Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. DP 460 epoksi yapıştırıcı ve uygulama aparatı

Metal, seramik, cam ve birçok kompozit malzemenin birleştirilmesinde kullanılan DP460, farklı şartlarda kürleşebilmektedir. Tablo 3.6'da, DP460 Epoksi Yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme olarak 2024-T3 alüminyum alaşımı kullanılarak, ASTM D 1002-72'ye göre farklı kürleşme şartlarında yapıştırılmış bindirme bağlantılarının kayma test sonuçları verilmiştir.

Tablo 3.6. DP460 kürleşme şartlarına dayanım değerleri (Anonim,2016)

| Bekleme süresi | Kürleşme sıcaklığı (°C) | | |
|----------------|-------------------------|------------|-----------|
| | 23 °C | 49 °C | 60 °C |
| 30 dakika | - | < 0,34 MPa | 20,68 MPa |
| 60 dakika | - | 8,96 MPa | 31,02 MPa |
| 90 dakika | - | 29,64 MPa | - |
| 2 saat | - | 30,33 MPa | 33,09 MPa |
| 3 saat | - | 33,09 MPa | - |
| 5 saat | 2,75 MPa | - | - |
| 6 saat | 6,89 MPa | - | - |
| 7 saat | 24,13 MPa | - | - |
| 24 saat | 27,57 MPa | - | - |

Yapılan çalışmada, deney numuneleri oda sıcaklığı şartlarında 24 saat kalıpta bekletilmiştir. Numunelerin kalıptan çıkartılma işlemini takiben tamamen kürleşmenin sağlanması amacıyla oda sıcaklığında 7 gün bekletildikten sonra teste tabi tutulmuştur.

DP460 epoksi yapıştırıcının yapıştırılan mazemeye uyumu iyi bir yapışma için oldukça önemlidir. Tablo 3.7’de yapıştırıcı olarak DP460 ve yapıştırılan malzeme olarak farklı metallerin kullanılmasıyla oluşturulan yapıştırma bağlantılarının bindirme kayma test sonuçları gösterilmiştir, bu deneylerde kullanılan numunelerin kürleşmesi 23 °C’de, 7 gün bekletme sonucu sağlanmıştır. Tablo 3.7’de gösterilen metallere yapıştırma öncesinde sırasıyla çözücüyle silme(metil etil keton), aşındırma ve tekrar çözücüyle silme ön işlemleri uygulanmıştır. Tablo 3.6’da gösterilen test sonuçları incelendiğinde, DP460 ve paslanmaz çeliğin birlikte kullanımının uygun olduğu görülmektedir.

Tablo 3.7. DP460 bindirmeli yapıştırma kayma testi sonuçları (Anonim,2016)

| Metal malzeme | Kayma test sonucu (MPa) |
|------------------------|--------------------------------|
| Alüminyum | 24,13 |
| Soğuk hadelenmiş çelik | 19,30 |
| Bakır | 27,57 |
| Paslanmaz çelik | 27,57 |

3.3. Nanopartikül Katkı Malzemeleri

Yapılan deneysel çalışmada 3 çeşit nanopartikül kullanılmıştır. Tablo 3.8’de deneysel çalışmada kullanılan nanopartikül katkıları ve özellikleri gösterilmiştir. Nanopartikül katkıları epoksi yapıştırıcı içerisine, çekme deneylerinde, her bir nanopartikül için sırasıyla %2, %4 ve %6 ağırlık oranlarında, yorulma deneylerinde ise çekme deneylerinde maksimum hasar mukavemetinin elde edildiği katkı oranlarında eklenmiştir.

Tablo 3.8. Nanopartikül katkı malzemeleri özellikleri (Anonim,2016)

| Özellikler | Kullanılan nanopartiküller | | |
|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------|------------------|
| | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | TiO ₂ |
| Saflık (%) | 99 | 99,5 | 99 |
| Ortalama partikül boyutu (nm) | 20 | 15-20 | 10-25 |
| Özgül yüzey alanı (m ² /g) | 140 | 150-550 | 60 |
| Gerçek yoğunluk (kg/m ³) | 3900 | 2200 | 4100 |
| Şekilsel özellik | Küresel | Düzensiz, gözenekli | Küresel |
| Renk | Beyaz | Beyaz | Beyaz |

3.4. Numunelerin Hazırlanması

AISI 304 kalite paslanmaz çelik malzemeler, DP 460 epoksi yapıştırıcı, kalıp malzemeleri, aseton, P80 zımpara kağıdı ve yardımcı malzemeler piyasadan temin edildikten sonra numune hazırlama sürecine geçilmiştir. Test numunelerinin hazırlanması sürecinde ilk olarak yapıştırılacak olan AISI 304 paslanmaz çelik malzemelere ön işlem uygulaması yapılmış olup daha sonra yapıştırma işlemine geçilmiştir.

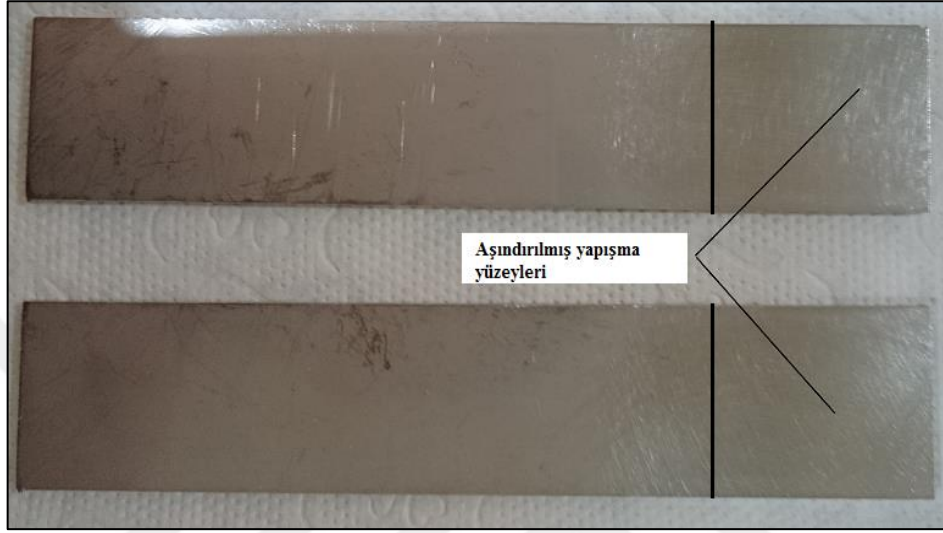
3.4.1. Uygulanan ön işlem

Yapıştırma bağlantılarında yüzey hazırlığı en önemli aşamadır. Yapıştırılacak yüzeyler ve yapıştırıcı arasında tam temas olmaması bağlantıyı olumsuz etkiler. Yapılan deneysel çalışmada yüzey hazırlama yöntemi olarak sırasıyla aşındırma ve çözücüyle silme yöntemi kullanılmıştır. Aşındırma işlemi için P80 zımpara kağıdı, çözücü olarak ise aseton kullanılmıştır. Yüzey hazırlama aşağıda verilen işlem sırasına göre gerçekleştirilmiştir:

- Piyasadan temin edilen AISI 304 paslanmaz çelik malzemeler, üzerlerindeki kalıntılardan arındırmak amacıyla sıcak su ve toz deterjan kullanılarak yıkandı ve kurutuldu. Bu yöntem yapıştırılacak malzemelerin üzerindeki kir, yağ ve artıkların temizlenmesi amacıyla yapılan ilk işlemdir.
- Yapıştırma yüzeyleri P80 zımpara kağıdıyla aşındırıldı. Aşındırma işleminin amacı çelik yüzeyindeki ince mat tabakanın kaldırılmasıyla ana malzemeye ulaşılacak istenmesidir. Aşındırma işlemi sadece yapıştırılacak alanlara uygulanmıştır.
- Aşındırma işleminden sonra malzemeler deterjanlı suyla yıkandı, durulandı ve kurutuldu.
- Yapıştırma yüzeyleri asetonlu temiz bir bezle birkaç defa silindi.

- Asetonla silme işleminden sonra malzemeler tekrar suyla yıkandı ve kurulandı.
- Malzemeler 2-3 saat oda sıcaklığında bekletilerek üzerindeki nemin tamamen buharlaşması sağlandı ve yapıştırma işlemine hazır hale getirildi.

Şekil 3.7’de aşındırılmış ve yapıştırmaya hazır hale getirilmiş AISI 304 çelik malzemeler gösterilmiştir.

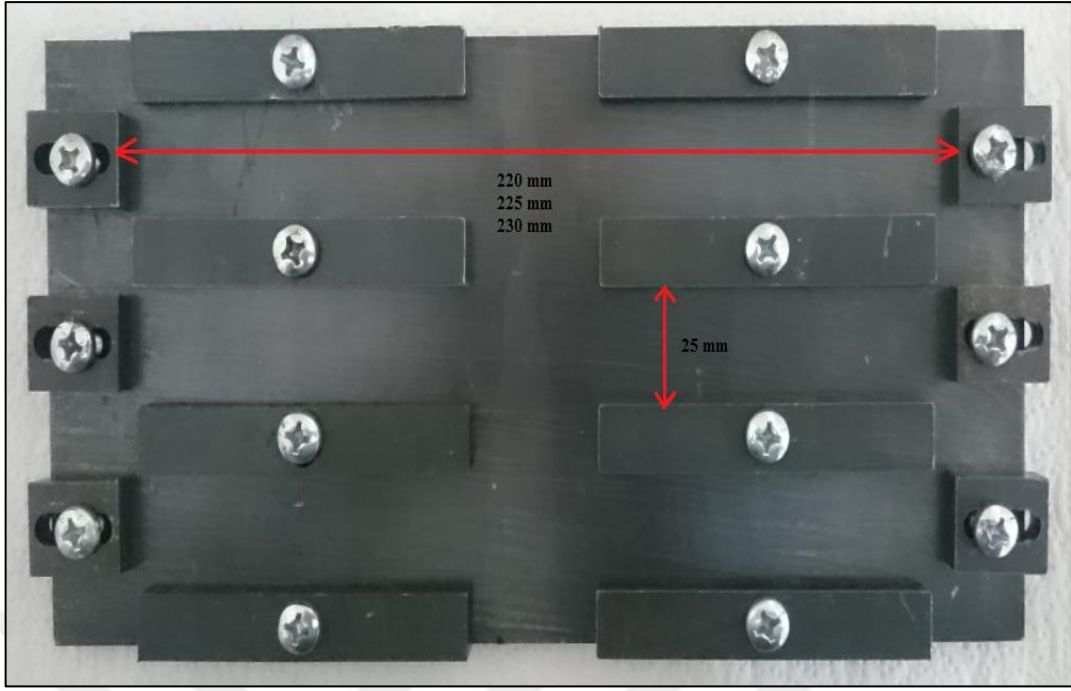


Şekil 3.7. Yapıştırmaya hazır hale getirilmiş AISI 304 çelik malzemeler

3.4.2. Deney numunelerinin üretimi

Yapıştırılacak malzemelerin yapışma yüzeylerine uygulanan ön işlemten sonra numunelerin üretim aşamasına geçildi ve ilk olarak katkısız deney numuneleri üretildi. Deney numunelerinin üretim aşaması aşağıda maddeler halinde açıklanmıştır:

1) Katkılı ve katkısız numunelerin üretiminde kullanılmak üzere Şekil 3.8’de gösterilen kalıptan 3 adet hazırlandı. Bu kalıplar tek tesirli bindirme bağlantısı geometrisine uygun şekilde, bindirme boyunu ayarlamak ve yapıştırılan yüzeylerin kürleşme süresince sabit kalmasını sağlamak amacıyla hazırlanmıştır. Her kalıpta bir seferde 3 adet numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan kalıplarda numune toplam boyu, bindirme boylarındaki değişimi dikkate alarak 220 mm ile 230 mm arasında ayarlanabilmektedir.

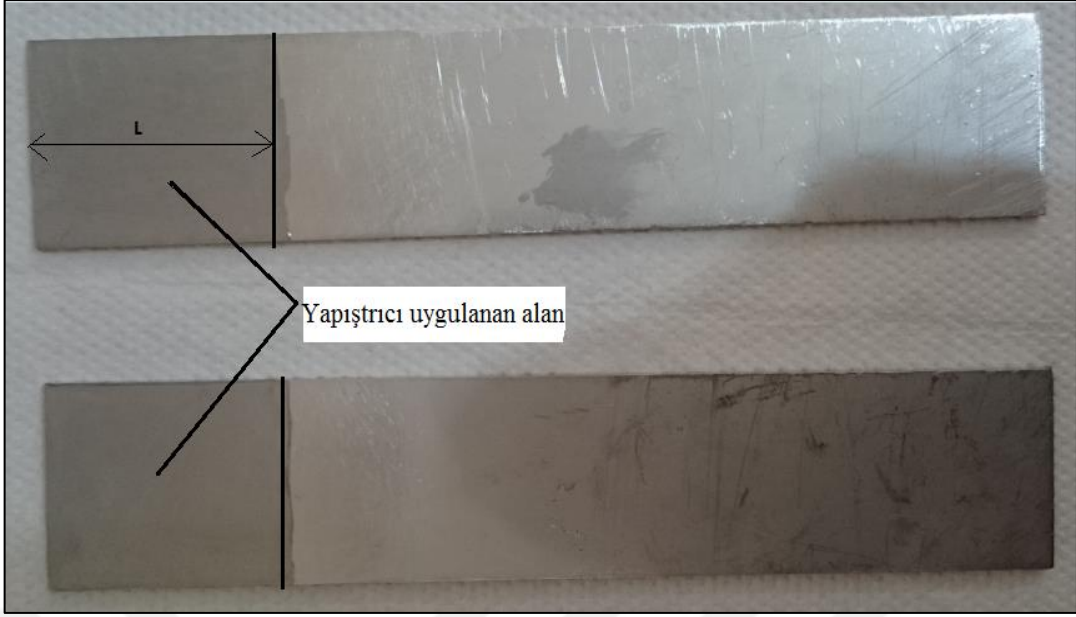


Şekil 3.8. Numune üretim kalıbı

2) Yapıştırma işlemi sırasında yapışma yüzeyinden taşan yapıştırıcı artıklarının kalıba yapışmaması için kalıplara yapışmayı önleyici spreyci uygulandı.

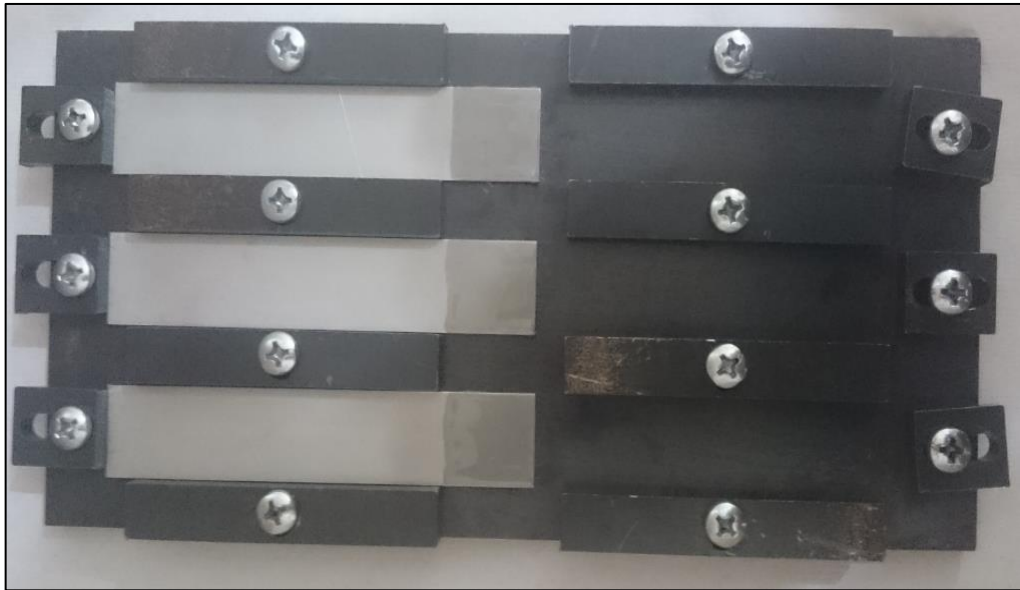
3) DP460 iki bileşenli epoksi yapıştırıcısı, uygulama aparatı kullanılarak temiz bir plastik parça üzerine, yapıştırılacak numune sayısına göre yeterli miktarda boşaltıldı. 50 ml'lik tüp içerisinde boşaltılan reçine ve sertleştirici madde, tahta bir çubuk vasıtasıyla mekanik olarak homojen bir karışım oluşuncaya kadar yaklaşık 2 dakika kadar karıştırılmıştır.

4) Hazırlanan yapıştırıcı, yapıştırılacak malzemelerin her ikisinin yüzeylerine bir spatula vasıtasıyla bindirme boyuna uygun bir şekilde ince bir tabaka halinde uygulanmıştır. Yapıştırıcı uygulamasından sonra beklenilmeden malzemeler yapıştırılmıştır. Yapıştırma işleminden sonra kalıp veya yapıştırılan malzemeler hareket ettirilmemiştir. Şekil 3.9'da yapıştırıcı uygulanan malzemeler gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Yapıştırıcı uygulaması

5) Yapıştırılacak malzemelere yapıştırıcı uygulandıktan sonra malzemeler kalıba yerleştirilmiştir. Şekil 3.10 - 3.12'de yapıştırılan malzemelerin kalıba yerleştirilme aşamaları gösterilmiştir. Bindirme boyunu ayarlamak ve yapışma bölgesini sabit tutmak amacıyla yardımcı parçalar kullanılmıştır. Şekil 3.10'da gösterildiği gibi ilk olarak yapıştırılacak malzemelerden birincisi yapıştırıcı uygulamasından sonra kalıba yerleştirilmiştir.



Şekil 3.10. Yapıştırılan malzemelerin ilkinin kalıba yerleştirilmesi

Yapıştırılacak malzemelerin birincisi kalıba yerleştirildikten sonra ikinci aşamada yardımcı malzemelerden birincisi Şekil 3.11’de gösterildiği gibi kalıba yerleştirilmiştir.



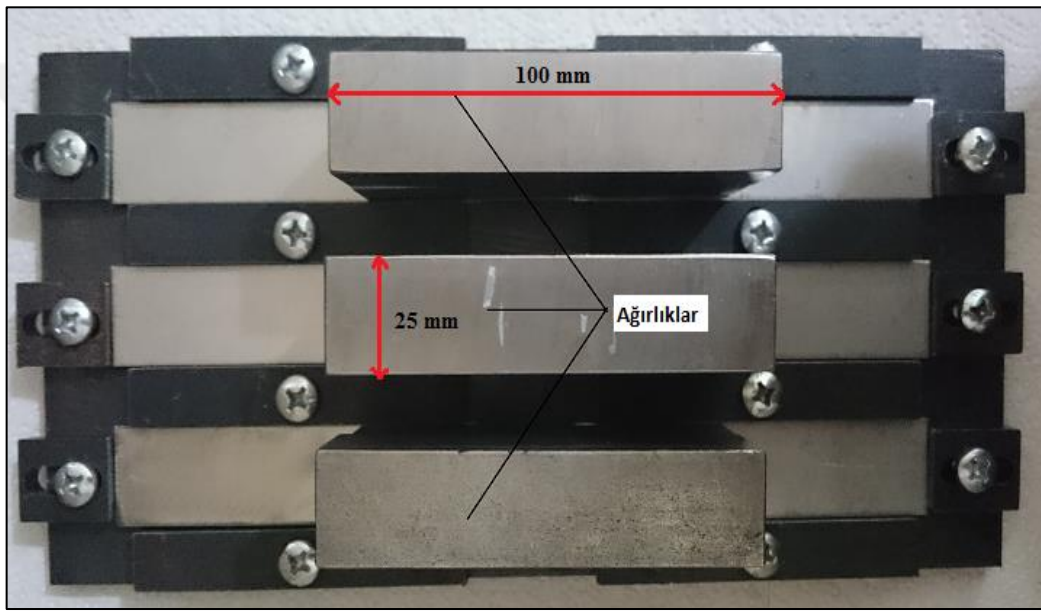
Şekil 3.11. Yardımcı malzemelerin kalıba yerleştirilmesi

Üçüncü aşamada Şekil 3.12’de gösterildiği gibi ilk olarak yardımcı malzemelerden ikincisi kalıba yerleştirilmiş daha sonra yapıştırılacak ikinci malzeme yapıştırıcı uygulamasından sonra kalıba yerleştirilmiştir



Şekil 3.12. Yapıştırılan malzemelerin ikincisinin kalıba yerleştirilmesi

6) Yapıştırılan malzemeler kalıba yerleştirildikten sonra yapıştırıcının yüzeylere tamamen etki etmesini sağlamak ve sabit bir yapışma kalınlığı elde etmek amacıyla yapışma bölgelerine Şekil 3.13'te gösterildiği gibi ağırlıklar bırakılmıştır. Yapıştırılan malzemelerin üzerine bırakılan ağırlıklar vasıtasıyla bindirme bölgesine değeri $0,4 \text{ N/cm}^2$ olan belirli bir kürleşme basıncı uygulanmıştır. Kürleşme sonrasında test numuneleri yapıştırıcı kalınlığı, $0,1-0,15 \text{ mm}$ aralığında ölçülmüştür. Bu değer hem yapıştırma bağlantıları için tavsiye edilen değerler aralığında hem de DP460 epoksi yapıştırıcı kataloğunda çelik malzemelerin yapıştırılmasında tavsiye edilen değerler aralığındadır. Yapıştırılan malzemeler üzerine bırakılan ağırlıklar 24 saat sonra alınmıştır.



Şekil 3.13. Yapışma bölgelerine ağırlık uygulanması

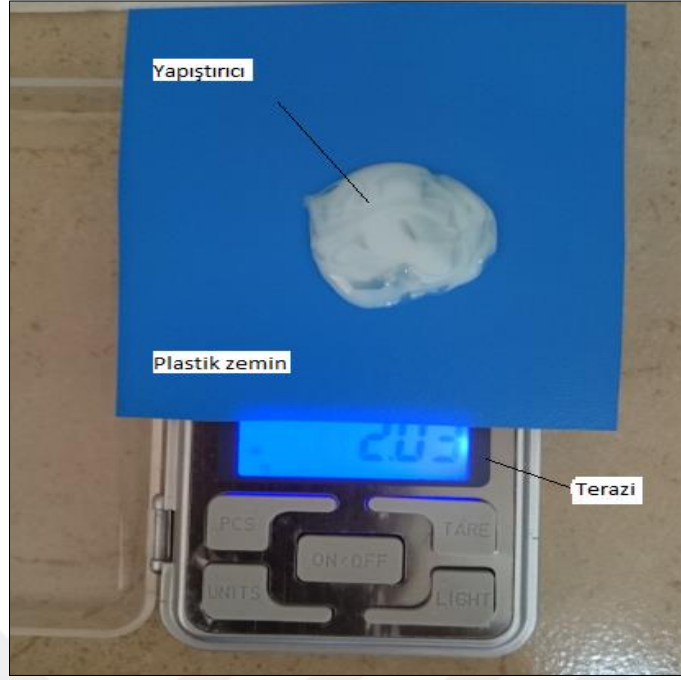
7) Numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkartılmış ve tamamen kürleşmenin sağlanması amacıyla oda sıcaklığında en az 7 gün bekletilmiştir. Şekil 3.14'te kalıptan çıkartılan örnek numuneler gösterilmiştir. Kalıptan çıkartılan numuneler üzerine silinmez kalemle gerekli kodlamalar yapılmış ve kapalı bir kap içerisinde oda sıcaklığında deney öncesine kadar saklanmıştır.



Şekil 3.14. Kalıptan çıkartılan deney numuneleri

Katkılı numunelerin üretim aşamasında, katkısız numune üretim aşamasına göre tek fark yapıştırıcı içerisine belirli oranlarda nanopartikül katılması olmuştur. Diğer aşamalar katkısız numune üretiminde olduğu gibi gerçekleştirilmiştir. Aşağıda yapıştırıcı içerisine nanopartikül katılma süreci açıklanmıştır:

1) Şekil 3.15'te gösterildiği gibi yapıştırıcı madde, boşaltma aparatı vasıtasıyla temiz bir plastik parça üzerine boşaltıldı ve 0,01 gr. hassasiyetinde bir terazi kullanılarak tartıldı. Burada yapıştırıcı miktarı, yapıştırılacak olan numunelerin sayısına göre tahmini olarak belirlendi. Deneylerde 3 adet kalıp kullanıldığı için bir seferde 9 numune üretimi gerçekleştirildi. Buna göre 9 adet numune üretimi için 2 gr civarında yapıştırıcı yeterli oldu.



Şekil 3.15. Yapıştırıcının tartılması

2) Yapıştırıcı içerisine katılacak nanopartikül, üretilecek numune tipine göre Şekil 3.16'da gösterildiği gibi hassas terazi ile tartıldı ve yapıştırıcı içerisine eklendi. Daha sonra, yapıştırıcı ve nanopartikül bir çubuk vasıtasıyla karıştırılarak kullanıma hazır hale getirildi.



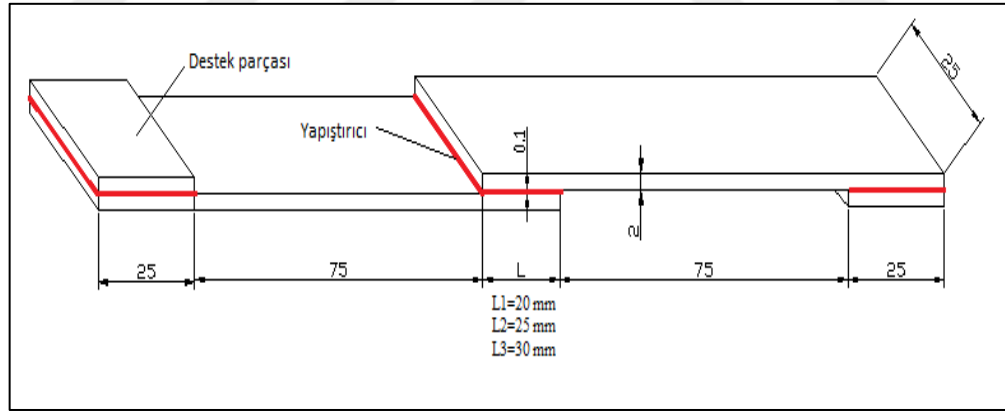
Şekil 3.16. Nanopartikül tartılması

3.5. Deney Programı

Yapılan deneysel çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak çekme deneyleri yapılmıştır. Daha sonra çekme deneylerinden elde edilen ortalama hasar yükleri dikkate alınarak yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

3.5.1. Çekme deney programı

Deneysel çalışmada tek tesirli bindirme bağlantı geometrisi kullanılmıştır. Kullanılan deney numunelerinin ölçüleri Şekil 3.17’de gösterilmiştir. Deney numunelerine, test cihazına bağlanmadan önce Şekil 3.17’de gösterildiği gibi destek parçaları bağlanmıştır. Bu destek parçalarının numunelere bağlanma amacı deney numunelerinin yapısından kaynaklı eksantirikliği engelleyerek eğilme gerilmelerinin oluşmasını en aza indirmek ve yükün bindirme bölgesine daha düzgün etki etmesini sağlamaktır. Deneysel çalışmada kullanılan bağlantı tipleri ve bu bağlantı tiplerindeki değişkenler Tablo 3.9’da gösterilmiştir. Deney numuneleri bindirme boyuna bağlı olarak 3 ana grupta toplanmıştır. Katkı türüne ve oranına bağlı olarak bağlantı tipleri belirlenmiştir.



Şekil 3.17. Tek tesirli bindirme bağlantı geometrisi

Şekil 3.17’de görüldüğü gibi numune toplam boyları; 20 mm bindirme boyunda imal edilen numunelerde 220 mm, 25 mm bindirme boyunda imal edilen numunelerde 225 mm, 30 mm bindirme boyunda imal edilen numunelerde 230 mm olarak bütün deneyler boyunca sabit alınmıştır.

Tablo 3.9. Çekme deneyi numune tipleri

| Tip | Bindirme boyu (mm) | Katkı türü | Katkı oranı (%) |
|--------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| K-20 | 20 | Katkısız | - |
| 20-A-2 | 20 | Al ₂ O ₃ | 2 |
| 20-A-4 | 20 | Al ₂ O ₃ | 4 |
| 20-A-6 | 20 | Al ₂ O ₃ | 6 |
| 20-T-2 | 20 | TiO ₂ | 2 |
| 20-T-4 | 20 | TiO ₂ | 4 |
| 20-T-6 | 20 | TiO ₂ | 6 |
| 20-S-2 | 20 | SiO ₂ | 2 |
| 20-S-4 | 20 | SiO ₂ | 4 |
| 20-S-6 | 20 | SiO ₂ | 6 |
| K-25 | 25 | Katkısız | - |
| 25-A-2 | 25 | Al ₂ O ₃ | 2 |
| 25-A-4 | 25 | Al ₂ O ₃ | 4 |
| 25-A-6 | 25 | Al ₂ O ₃ | 6 |
| 25-T-2 | 25 | TiO ₂ | 2 |
| 25-T-4 | 25 | TiO ₂ | 4 |
| 25-T-6 | 25 | TiO ₂ | 6 |
| 25-S-2 | 25 | SiO ₂ | 2 |
| 25-S-4 | 25 | SiO ₂ | 4 |
| 25-S-6 | 25 | SiO ₂ | 6 |
| K-30 | 30 | Katkısız | - |
| 30-A-2 | 30 | Al ₂ O ₃ | 2 |
| 30-A-4 | 30 | Al ₂ O ₃ | 4 |
| 30-A-6 | 30 | Al ₂ O ₃ | 6 |
| 30-T-2 | 30 | TiO ₂ | 2 |
| 30-T-4 | 30 | TiO ₂ | 4 |
| 30-T-6 | 30 | TiO ₂ | 6 |
| 30-S-2 | 30 | SiO ₂ | 2 |
| 30-S-4 | 30 | SiO ₂ | 4 |
| 30-S-6 | 30 | SiO ₂ | 6 |

Çekme deneylerini gerçekleştirmek amacıyla 30 farklı tip numune üretilmiştir. Deney sonuçlarının güvenilirliğini arttırmak amacıyla her numune tipinden 3 adet üretilmiş olup statik deneyler için toplamda 90 adet numune üretilmiştir.

3.5.2. Yorulma deney programı

Yorulma deneylerinde de Şekil 3.17’de gösterilen numune geometrisi kullanılmıştır. Deney numuneleri 20, 25 ve 30 mm bindirme boylarında ve 3 farklı nanopartikül kullanılarak üretilmiştir. Aşağıda Tablo 3.10’da yorulma deney parametreleri ve numune tipleri gösterilmiştir. Deneylerde yükleme oranı (R) 0.1, frekans (f) ise 10 Hz olarak bütün yorulma deneylerinde sabit alınmıştır.

Tablo 3.10. Yorulma deneyi numune tipleri

| Tip | Bindirme boyu (mm) | Katkı türü | Katkı oranı (%) |
|----------|--------------------|--------------------------------|-----------------|
| Y-20-K | 20 | Katkısız | - |
| Y-20-A-4 | 20 | Al ₂ O ₃ | 4 |
| Y-20-T-4 | 20 | TiO ₂ | 4 |
| Y-20-S-6 | 20 | SiO ₂ | 6 |
| Y-25-K | 25 | Katkısız | - |
| Y-25-A-4 | 25 | Al ₂ O ₃ | 4 |
| Y-25-T-4 | 25 | TiO ₂ | 4 |
| Y-25-S-6 | 25 | SiO ₂ | 6 |
| Y-30-K | 30 | Katkısız | - |
| Y-30-A-4 | 30 | Al ₂ O ₃ | 4 |
| Y-30-T-4 | 30 | TiO ₂ | 4 |
| Y-30-S-6 | 30 | SiO ₂ | 6 |

Yorulma deneylerinde numunelere uygulanacak maksimum yükler ($F_{maks.}$) çekme deneylerinden elde edilen katkısız numunelere ait ortalama hasar yüklerinin azaltılmasıyla belirlenmiştir. Tablo 3.11’de katkısız numunelere ait her bindirme boyu için tespit edilen ortalama hasar yük değerleri gösterilmiştir.

Tablo 3.11. Katkısız numunelere ait ortalama hasar yükü değerleri

| Bindirme boyu (L, mm) | Ortalama hasar yükü (F_{hasar} , kN) |
|-----------------------|---|
| 20 | 5,28 |
| 25 | 7,01 |
| 30 | 9,27 |

Yorulma deneyleri, her bir numune tipi için yorulma eğrisini çizebilmek amacıyla 4 farklı yükte yapılmıştır. Her deney, güvenilirliği arttırmak amacıyla 5 defa tekrarlanmıştır. Toplamda 240 yorulma deney numunesi üretimi yapılmıştır.

Yorulma deneylerinde, her numune tipi için ilk olarak sonsuz ömür kabul edilen 1 milyon çevrimin elde edildiği yük deneysel olarak belirlenmiştir. Daha sonra S-N eğrilerini çizebilmek amacıyla her numune tipi için sonsuz çevrimin elde edildiği yük artırılarak en az dört noktadaki çevrim sayıları tespit edilmek koşuluyla deneyler yapılmış ve S-N eğrileri çizilmiştir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Deney numunelerinin üretiminden sonra çekme ve yorulma deneyleri yapılmıştır. İlk olarak çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyleri; 20, 25 ve 30 mm bindirme boylarında, ağırlıkça %2, %4 ve %6 oranlarında Al_2O_3 , TiO_2 ve SiO_2 nanopartikül katkılı ve katkısız yapıştırıcı kullanılarak üretilen numunelerle yapılmıştır. Yorulma deneyleri; 20, 25 ve 30 mm bindirme boylarında, ağırlıkça %4- Al_2O_3 , %4- TiO_2 ve %6- SiO_2 katkılı yapıştırıcı ve katkısız yapıştırıcı kullanılarak üretilen numunelerle yapılmıştır.

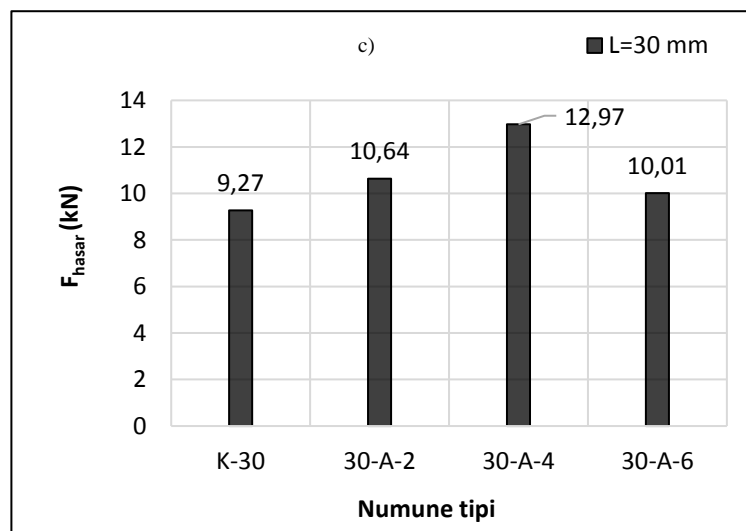
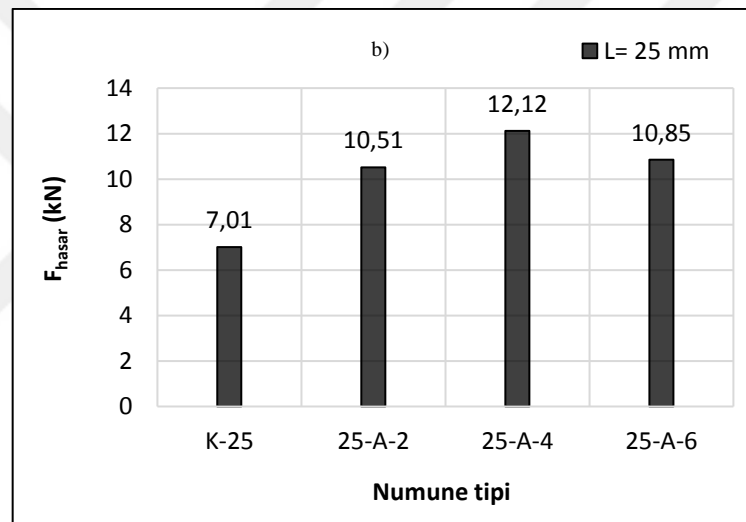
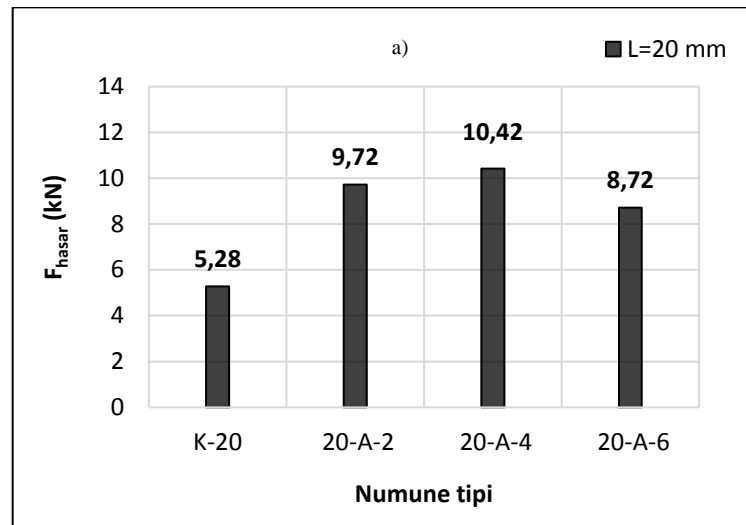
Çekme ve yorulma deneyleri sonucunda ölçülen değerler grafiklerle gösterilmiş ve deney sonuçları irdelenmiştir.

4.1. Çekme Deney Sonuçları ve Tartışma

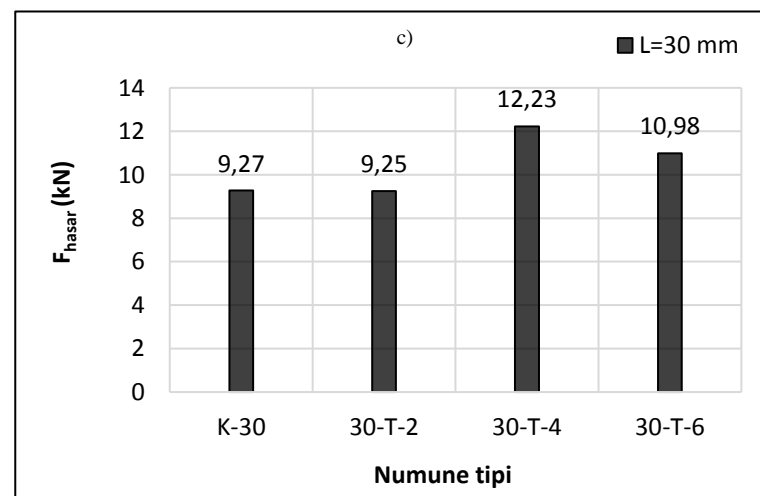
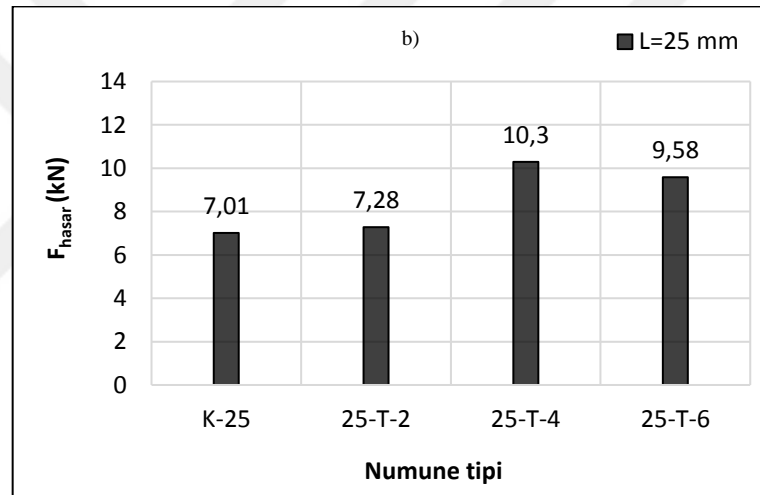
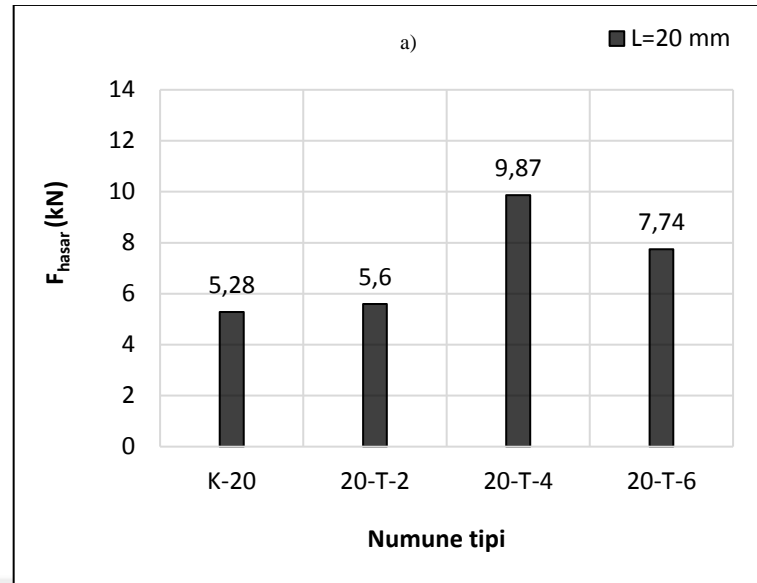
Çekme deneyleri, Shimadzu AG-X 250 kN universal test cihazında, 1 mm/dak sabit çekme hızında yapılmıştır.

Literatür incelendiğinde yapıştırma bağlantılarında, nanopartikül katkılı ve katkısız numunelerle yapılan çekme deney sonuçları, numune tipine göre ortalama hasar yükü şeklinde grafiklerle gösterilmiştir. Literatürde katkısız numunelerin hasar yükü değerleri, katkılı numunelerin hasar yükü değerleriyle birlikte verilerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Ayrıca grafiklerde yapıştırıcı içerisindeki nanopartikül oranlarının değişiminin ortalama hasar yüküne etkisi gösterilmiştir.

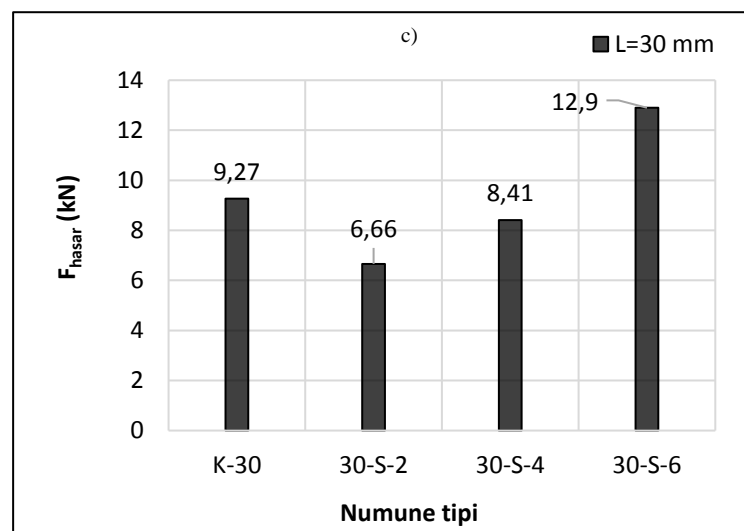
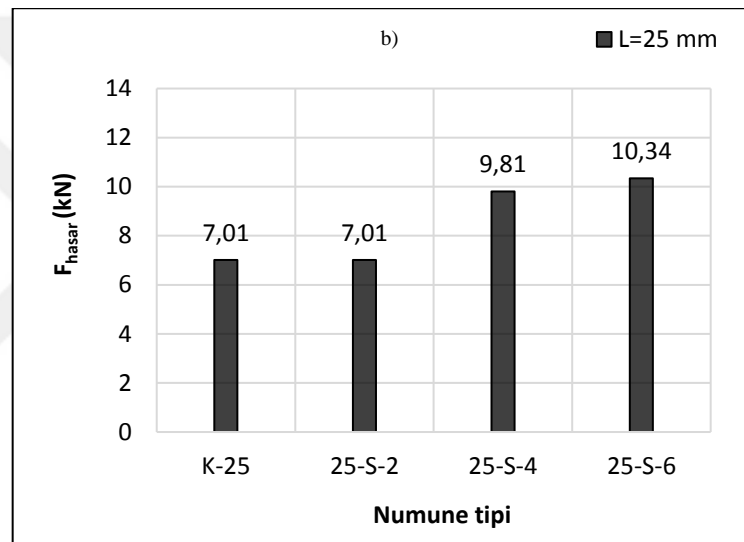
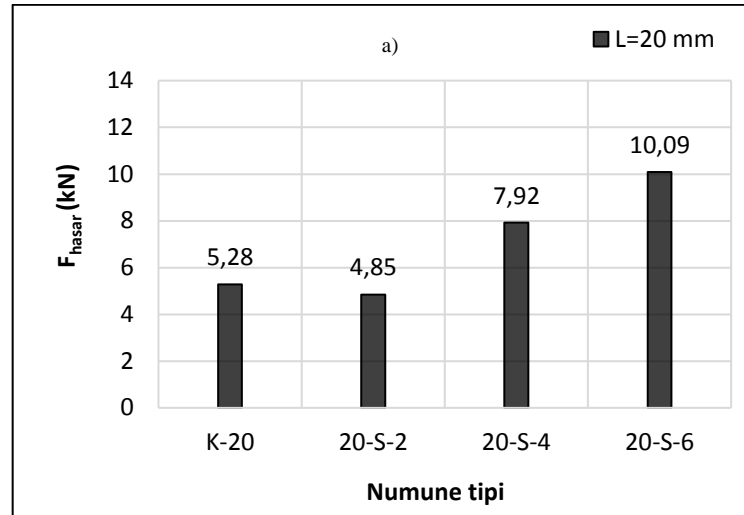
Yapılan çekme deneyleri sonuçları; Şekil 4.1 - 4.3'te verilen grafiklerde, 20, 25 ve 30 mm bindirme boylarında, her nanopartikül çeşidi için, yapıştırma bağlantılarının numune tipine göre hasar yükü (F_{hasar}) değerleri şeklinde gösterilmiştir. Numune tipleri, Tablo 3.9'da gösterildiği gibi bindirme boylarına göre üç ana gruba ayrılmıştır. Deney numunesinin katkı durumuna, katkı çeşidine ve katkı oranına göre alt gruplar belirlenmiştir. Şekil 4.4 - 4.7'de ise, katkısız ve katkılı yapıştırma bağlantılarının bindirme uzunluğuna göre hasar yükü değerleri gösterilmiştir.



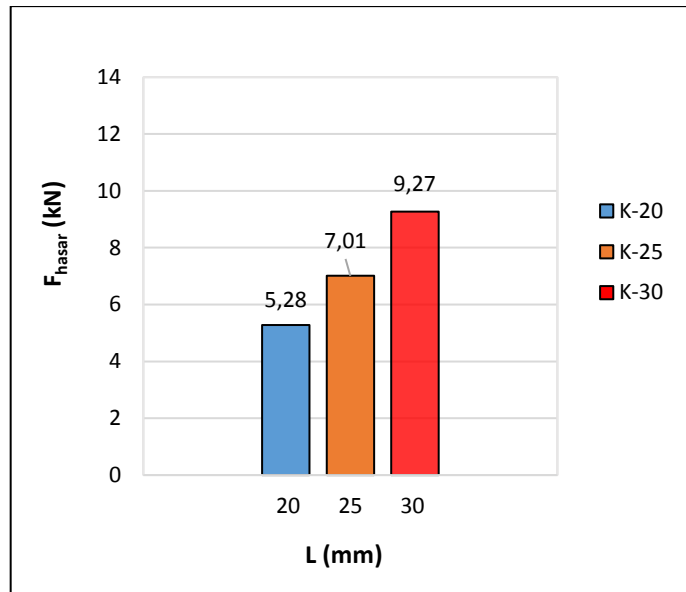
Şekil 4.1. Al_2O_3 katkısının hasar mukavemetine etkisi



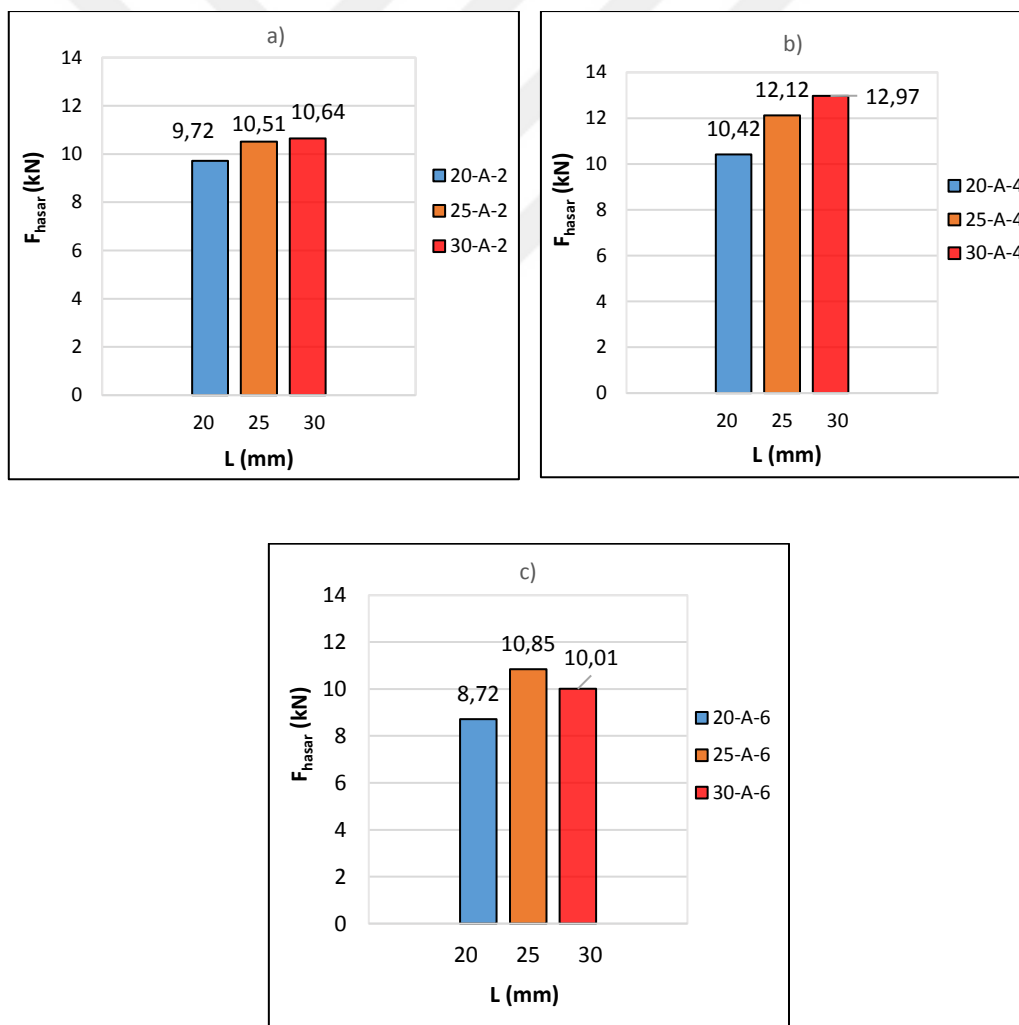
Şekil 4.2. TiO_2 katkısının hasar mukavemetine etkisi



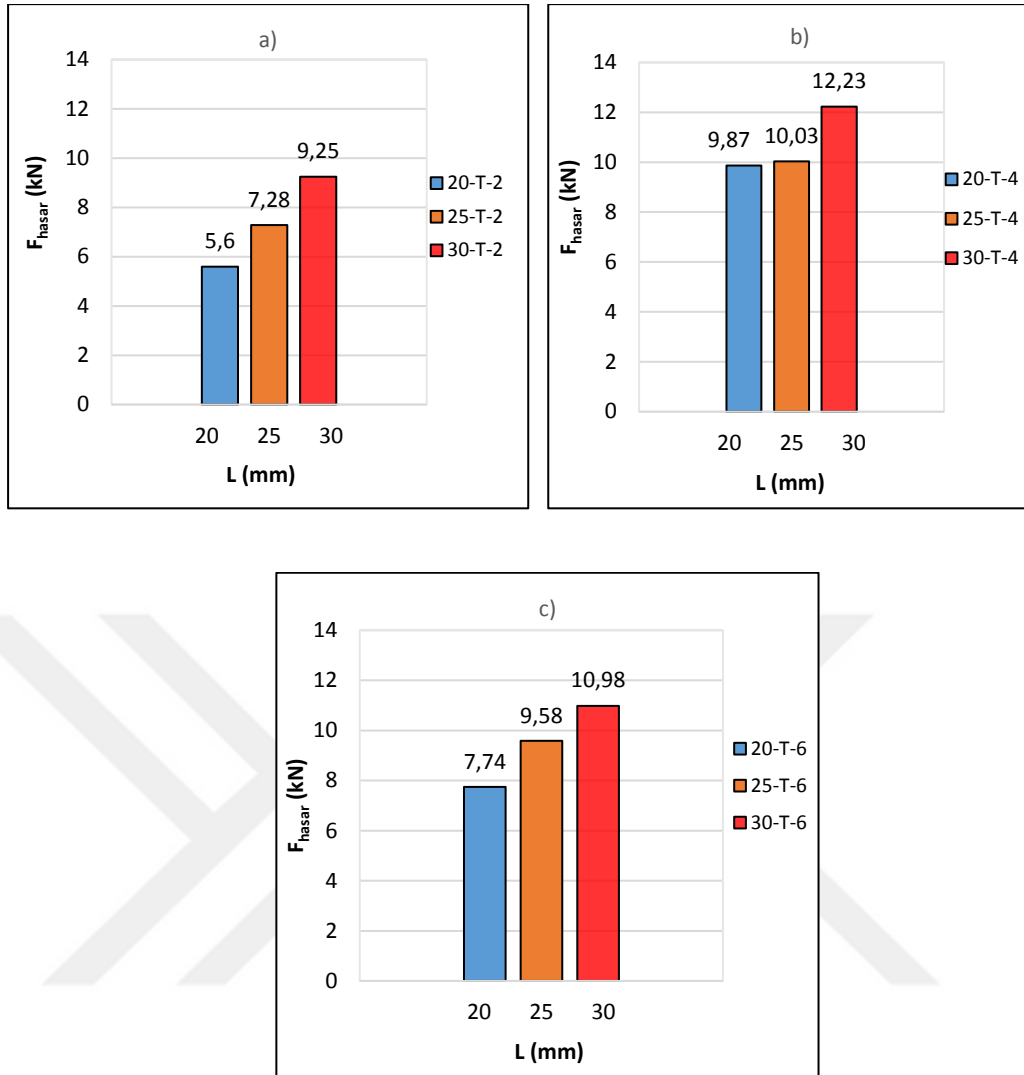
Şekil 4.3. SiO₂ katkısının hasar mukavemetine etkisi



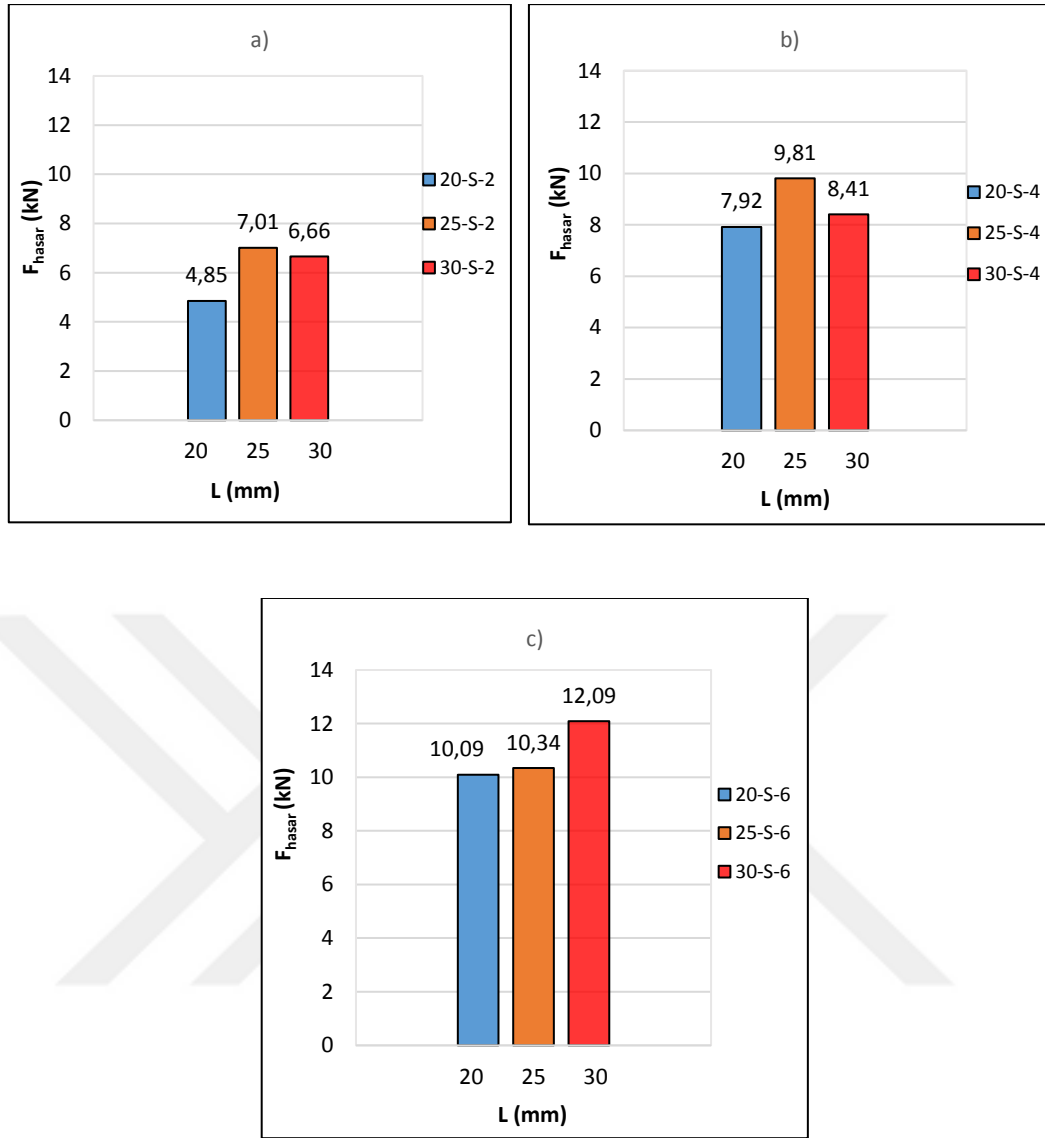
Şekil 4.4. Katkısız numunelerin bindirme boyuna göre hasar yükü değerleri



Şekil 4.5. Al₂O₃ katkılı numunelerin bindirme boyuna göre hasar yükü değerleri



Şekil 4.6. TiO₂ katkılı numunelerin bindirme boyuna göre hasar yükü değerleri



Şekil 4.7. SiO₂ katkılı numunelerin bindirme boyuna göre hasar yükü değerleri

Şekil 4.1 - 4.3'te verilen numune tipi-hasar yükü grafiklerinde görüldüğü gibi epoksi yapıştırıcı içerisine çeşitli oranlarda nanopartikül ilavesi genel olarak yapıştırma bağlantılarının ortalama hasar yükünü katkısız numunelere kıyasla önemli ölçüde arttırmıştır.

Şekil 4.1'de verilen grafikler incelendiğinde, yapıştırıcı içerisine Al₂O₃ ilavesiyle yapılan testler sonucunda elde edilen ortalama hasar yükleri, katkısız numunelerin ortalama hasar yükleriyle kıyaslandığında en yüksek mukavemet artışı bütün bindirme boylarında %4 oranında gerçekleşmiştir. 20 mm bindirme boyunda yapıştırıcı içerisine %4-Al₂O₃ ilavesi ortalama hasar yükünü %97 oranında arttırmıştır, 25 mm bindirme boyunda artış %72, 30 mm bindirme boyunda ise artış %39 oranlarında olmuştur. %6-

Al_2O_3 ilavesinde bütün bindirme boylarında ortalama hasar yükü, %4- Al_2O_3 ilavesiyle kıyaslandığında düşüş göstermiştir.

Şekil 4.2’de verilen grafikler incelendiğinde, yapıştırıcı içerisine TiO_2 ilavesiyle yapılan testler sonucunda elde edilen ortalama hasar yükleri, katkısız numunelerin hasar yükleriyle kıyaslandığında en yüksek mukavemet artışı bütün bindirme boylarında %4 oranında gerçekleşmiştir. 20 mm bindirme boyunda yapıştırıcı içerisine %4 oranında TiO_2 ilavesi ortalama hasar yükünü %86 oranında arttırmıştır, 25 mm bindirme boyunda artış %50, 30 mm bindirme boyunda ise artış %32 oranlarında olmuştur. %6- TiO_2 ilavesinde; hasar yükü, %4- TiO_2 ilavesiyle kıyaslandığında düşüş göstermiştir.

Şekil 4.3’te verilen grafikler incelendiğinde, yapıştırıcı içerisine SiO_2 ilavesiyle yapılan testler sonucunda elde edilen ortalama hasar yükleri, katkısız numunelerin hasar yükleriyle kıyaslandığında en yüksek mukavemet artışı bütün bindirme boylarında %6 oranında gerçekleşmiştir. 20 mm bindirme boyunda yapıştırıcı içerisine %6 oranında SiO_2 ilavesi ortalama hasar yükünü %91 oranında arttırmıştır, 25 mm bindirme boyunda artış %47, 30 mm bindirme boyunda ise artış %39 oranlarında olmuştur.

Şekil 4.4 - 4.7’de verilen grafik incelendiğinde katkılı ve katkısız numunelerde bindirme boyunun artmasıyla genel olarak ortalama hasar yükü artmıştır.

Katkısız numunelerde; 20 mm bindirme boyunda ortalama hasar yükü 5,28 kN, 25 mm bindirme boyunda 7,01 kN, 30 mm bindirme boyunda 9,27 kN olarak ölçülmüştür.

%2- Al_2O_3 katlı numunelerde; 20 mm bindirme boyunda ortalama hasar yükü 9,72 kN, 25 mm bindirme boyunda 10,51 kN, 30 mm bindirme boyunda 10,64 kN olarak ölçülmüştür. %4- Al_2O_3 katlı numunelerde; 20 mm bindirme boyunda ortalama hasar yükü 10,42 kN, 25 mm bindirme boyunda 12,12 kN, 30 mm bindirme boyunda 12,97 kN olarak ölçülmüştür. %6- Al_2O_3 katlı numunelerde; 20 mm bindirme boyunda ortalama hasar yükü 8,72 kN, 25 mm bindirme boyunda 10,85 kN, 30 mm bindirme boyunda 10,01 kN olarak ölçülmüştür.

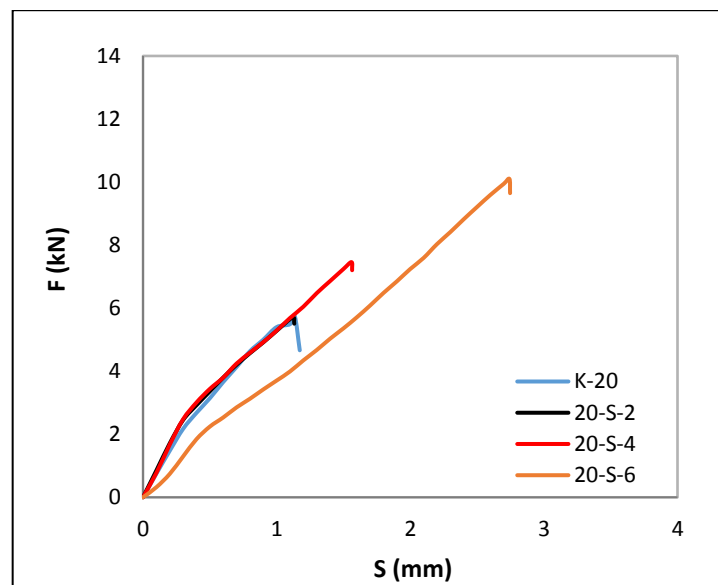
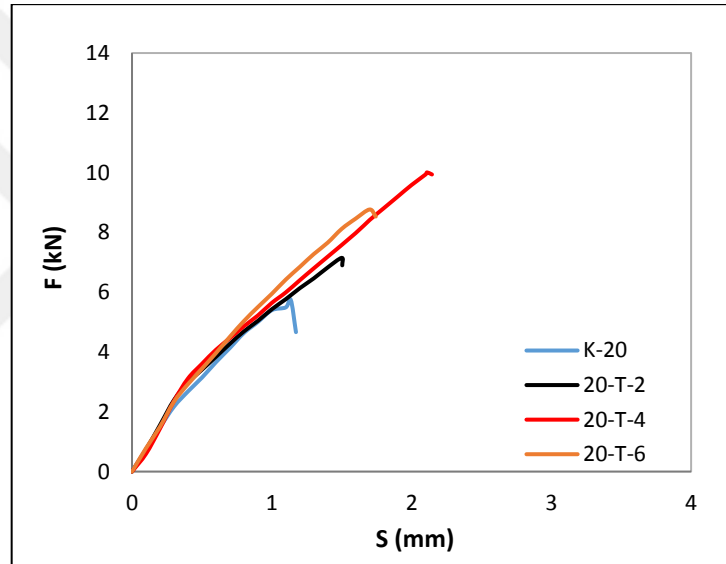
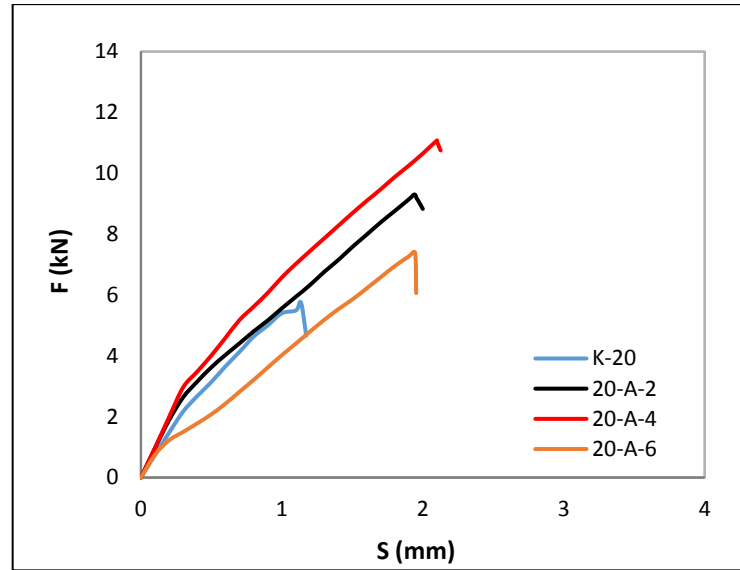
%2- TiO_2 katlı numunelerde; 20 mm bindirme boyunda ortalama hasar yükü 5,6 kN, 25 mm bindirme boyunda 7,28 kN, 30 mm bindirme boyunda 9,25 kN olarak ölçülmüştür. %4- TiO_2 katlı numunelerde; 20 mm bindirme boyunda ortalama hasar yükü 9,87 kN, 25 mm bindirme boyunda 10,03 kN, 30 mm bindirme boyunda 12,23 kN olarak ölçülmüştür. %6- TiO_2 katlı numunelerde; 20 mm bindirme boyunda ortalama hasar yükü 7,74 kN, 25 mm bindirme boyunda 9,58 kN, 30 mm bindirme boyunda 10,98 kN olarak ölçülmüştür.

%2-SiO₂ katlı numunelerde; 20 mm bindirme boyunda ortalama hasar yükü 4,85 kN, 25 mm bindirme boyunda 7,01 kN, 30 mm bindirme boyunda 6,66 kN olarak ölçülmüştür. %4-SiO₂ katlı numunelerde; 20 mm bindirme boyunda ortalama hasar yükü 7,92 kN, 25 mm bindirme boyunda 9,81 kN, 30 mm bindirme boyunda 8,41 kN olarak ölçülmüştür. %6-SiO₂ katlı numunelerde; 20 mm bindirme boyunda ortalama hasar yükü 10,09 kN, 25 mm bindirme boyunda 10,34 kN, 30 mm bindirme boyunda 12,09 kN olarak ölçülmüştür.

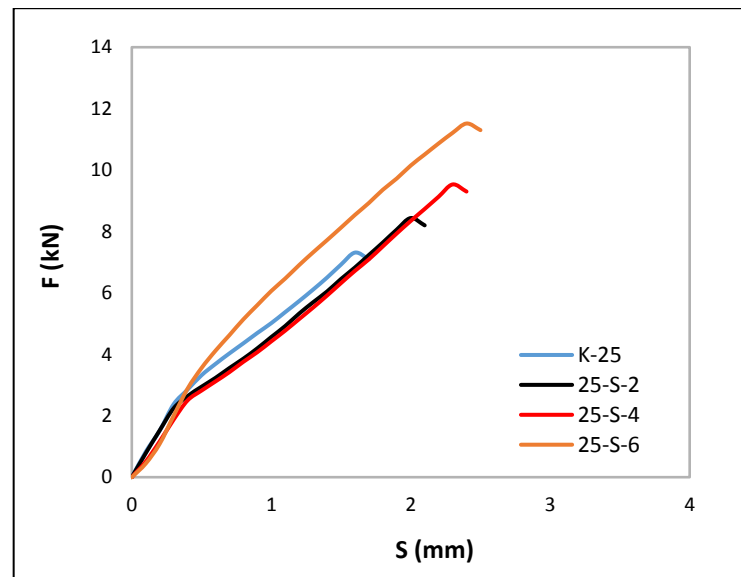
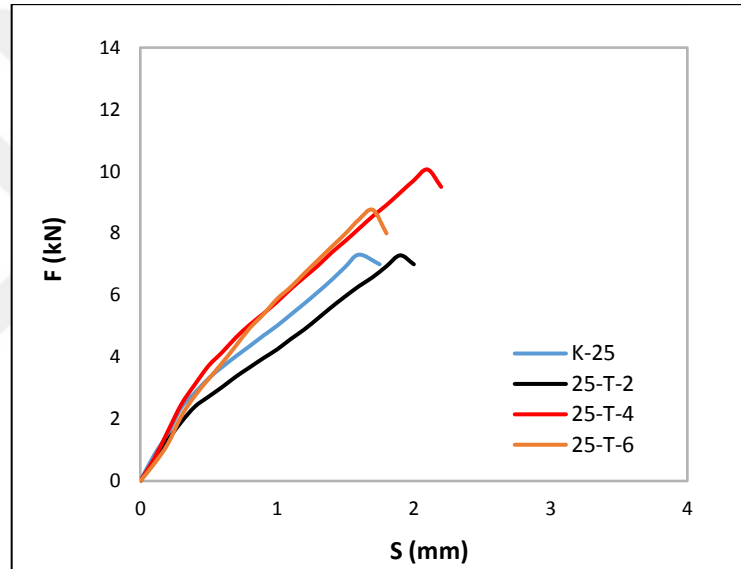
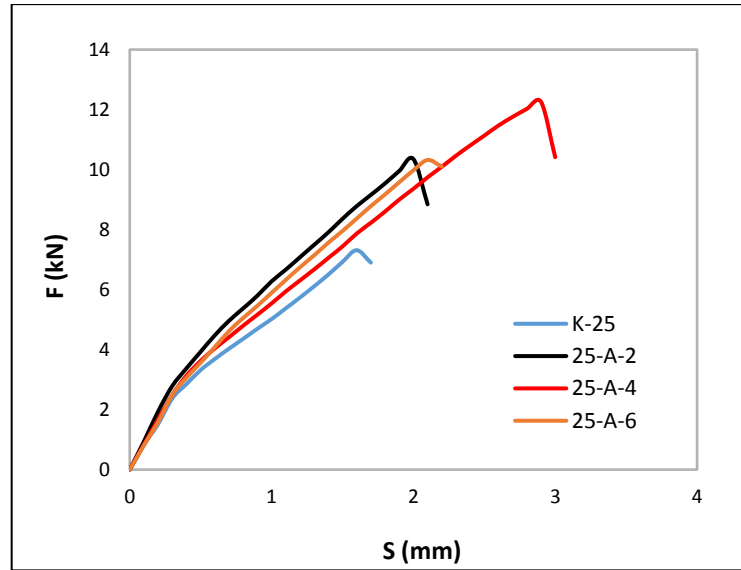
Tek tesirli bindirme bağlantılarının geometrisinden kaynaklı eksantriklik nedeniyle maksimum gerilmeler bindirme uçlarında oluşmaktadır. Hasar ise bu maksimum gerilmelerin oluştuğu, bindirme uçlarından başlamakta ve merkeze doğru ilerlemektedir.

Yapılan deneylerde elde edilen sonuçlara göre çizilen kuvvet-uzama eğrileri Şekil 4.8 - 4.10'da gösterilmiştir. Şekil 4.8 - 4.10'da gösterilen kuvvet-uzama eğrileri, her bir deney üç defa tekrarlandığından ortalama değerlere en yakın numunelerin deney sonuçlarına göre çizilmiştir.

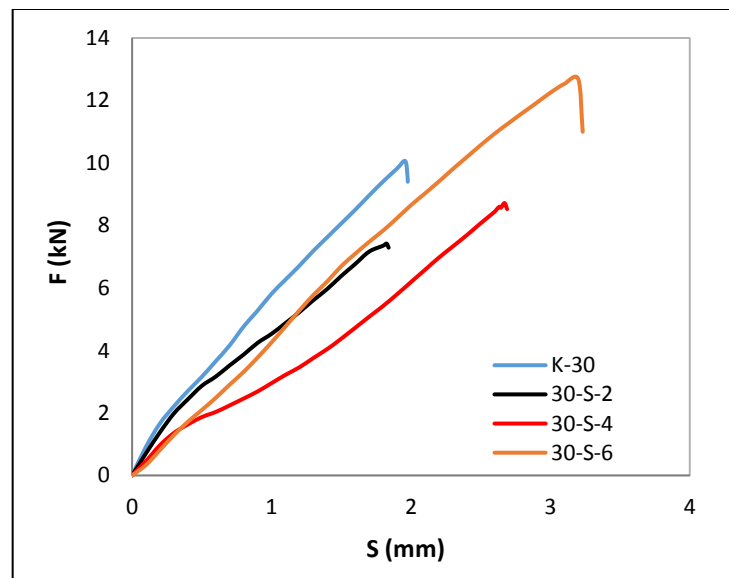
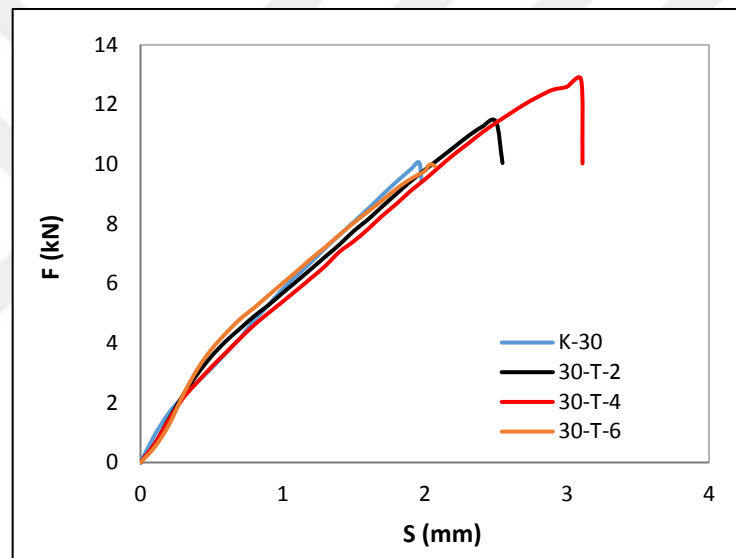
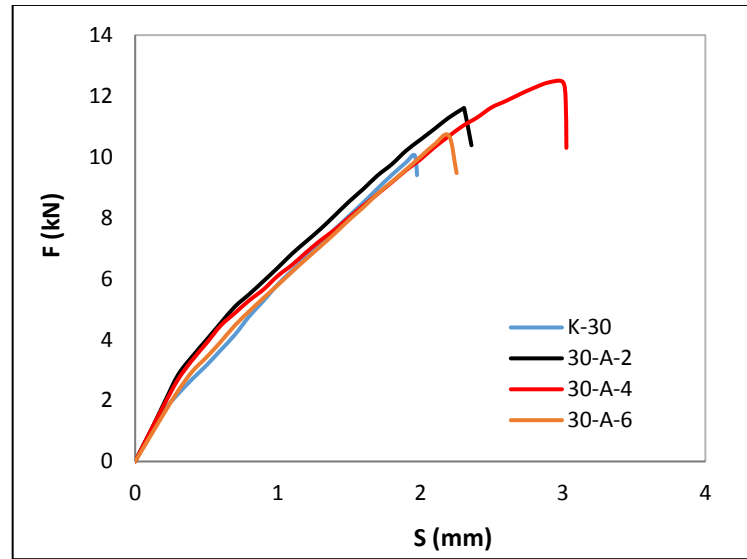
Şekil 4.8 - 4.10'da gösterilen kuvvet-uzama eğrileri incelendiğinde, yapıstırıcı içerisine nanopartikül ilave edilmesiyle bağlantıların uzama miktarının arttırdığı görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, bütün nanopartikül çeşitleri için en yüksek hasar yükünün tespit edildiği karışım oranlarında, en yüksek uzama miktarları ölçülmüştür. Sonuç olarak bağlantıların uçlarında meydana gelen gerilmeler, nanopartikül takviyesiyle artan şekil değiştirme enerjisi tarafından absorbe edilerek hasar başlangıcının geciktiği düşünülmektedir.



Şekil 4.8. 20 mm bindirme boyunda kuvvet-uzama eğrileri



Şekil 4.9. 25 mm bindirme boyunda kuvvet-uzama eğrileri



Şekil 4.10. 30 mm bindirme boyunda kuvvet-uzama eğrileri

Şekil 4.1 - 4.3'te verilen grafiklerde gösterilen sonuçlar incelendiğinde genel olarak bindirme boyunun artmasıyla nanopartikül katkısının hasar mukavemetini artırma oranı azalmıştır. Örneğin, her nanopartikül çeşidi için maksimum hasar mukavemetinin elde edildiği karışım oranlarında elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, %4- Al_2O_3 katkısı; 20 mm bindirme boyunda ortalama hasar mukavemetini %97 oranında artırırken 25 mm bindirme boyunda %72, 30 mm bindirme boyunda ise %39 oranlarında arttırmıştır. %4- TiO_2 katkısı; 20 mm bindirme boyunda ortalama hasar mukavemetini %86 oranında artırırken 25 mm bindirme boyunda %50, 30 mm bindirme boyunda ise %32 oranlarında arttırmıştır. %6- SiO_2 katkısı; 20 mm bindirme boyunda ortalama hasar mukavemetini %91 oranında artırırken, 25 mm bindirme boyunda %47, 30 mm bindirme boyunda ise %39 oranlarında arttırmıştır.

Tablo 4.1'de, yapılan çekme deneyleri sonucunda ölçülen, numunelerin ortalama hasar yükü ve ortalama hasar gerilme değerleri; katkısız, %4- Al_2O_3 , %4- TiO_2 ve %6- SiO_2 katkılı numuneler için gösterilmiştir. Tablo 4.1 'de görüldüğü gibi nanopartikül katkılı numunelerde bindirme uzunluğunun artmasıyla ortalama hasar gerilme değerleri genel olarak düşüş göstermiştir. Bu durum bindirme uzunluğunun artmasıyla nanopartikül katkısının ortalama hasar mukavemetini artırma oranındaki düşüşün sebebi olarak düşünülmektedir. Bunun yanısıra, bindirme uzunluğu arttığında yapıştırıcı uygulanan alan da artmaktadır, yapıştırıcı uygulanan alanın artması ile yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasındaki süreksizlilerin ve birtakım yapıştırma kusurlarının olma ihtimali de artmaktadır.

Tablo 4.1. Katkılı ve katkısız numunelerin hasar yükü ve gerilme değerleri

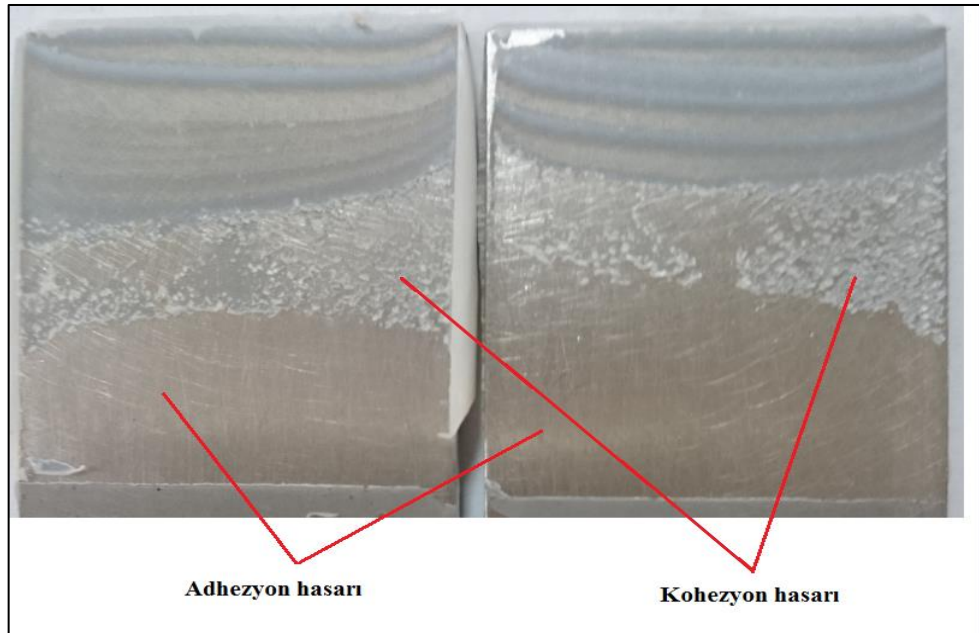
| Tip | Katkı türü/oranı | L (mm) | Ortalama hasar yükü (kN) | Ortalama Hasar gerilmesi (MPa) |
|--------|------------------|--------|--------------------------|--------------------------------|
| K-20 | Katkısız | 20 | 5,28 | 10,56 |
| K-25 | Katkısız | 25 | 7,01 | 11,21 |
| K-30 | Katkısız | 30 | 9,27 | 12,36 |
| 20-A-4 | %4- Al_2O_3 | 20 | 10,42 | 26,05 |
| 25-A-4 | %4- Al_2O_3 | 25 | 12,12 | 19,39 |
| 30-A-4 | %4- Al_2O_3 | 30 | 12,97 | 17,29 |
| 20-T-4 | %4- TiO_2 | 20 | 9,87 | 24,67 |
| 25-T-4 | %4- TiO_2 | 25 | 10,03 | 16,04 |
| 30-T-4 | %4- TiO_2 | 30 | 12,23 | 16,30 |
| 20-S-6 | %6- SiO_2 | 20 | 10,09 | 25,22 |
| 25-S-6 | %6- SiO_2 | 25 | 10,34 | 16,54 |
| 30-S-6 | %6- SiO_2 | 30 | 12,09 | 14,50 |

4.1.1. Çekme kırılma yüzeyleri analizi

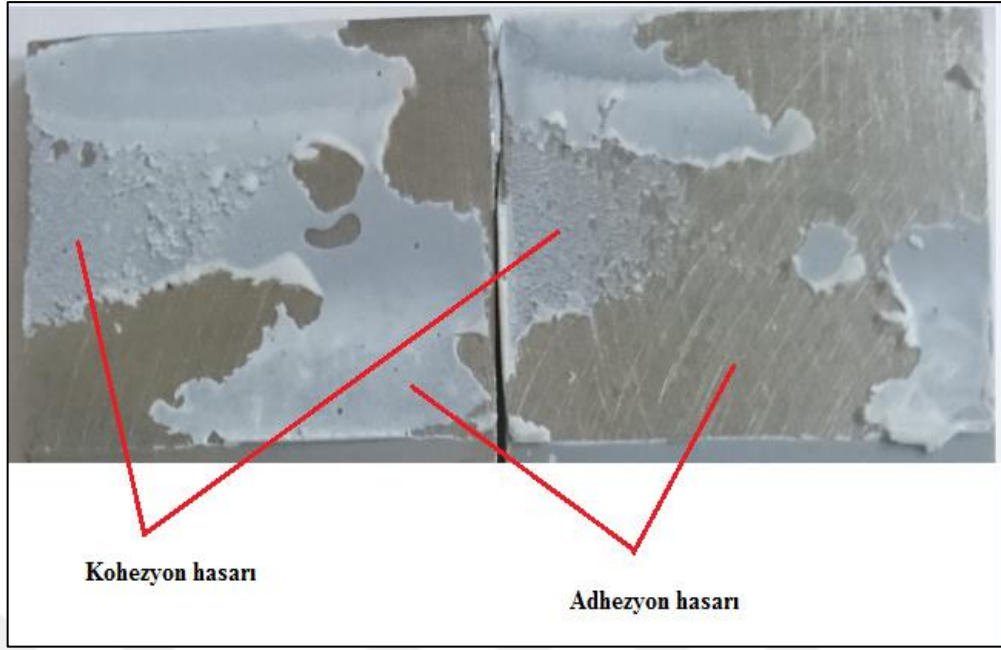
Deneysel sonuçlarda numunelerin hasar yüzeyleri incelendiğinde sade yapıştırıcı kullanılan numunelerde adhezyon hasarı gözlemlenirken (Şekil 4.11), nanopartikül takviyeli numunelerde hasar, ara yüzey ve kohezyon hasarı karışımı şeklinde gözlemlenmiştir (Şekil 4.12 - 4.14)



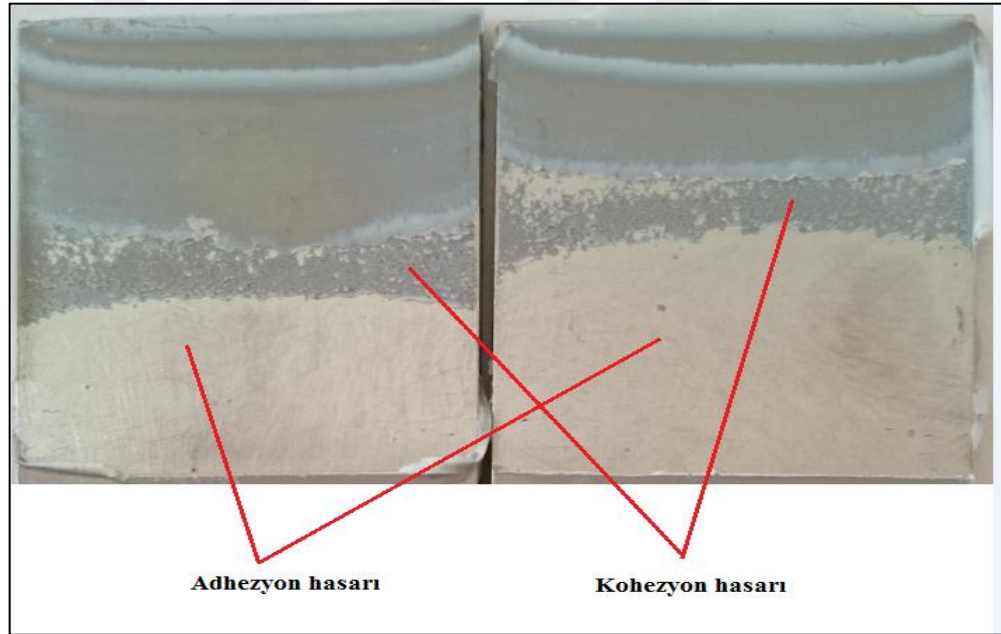
Şekil 4.11. Katkısız numune hasar yüzeyi



Şekil 4.12. Al₂O₃ takviyeli numune hasar yüzeyi



Şekil 4.13. TiO₂ takviyeli numune hasar yüzeyi



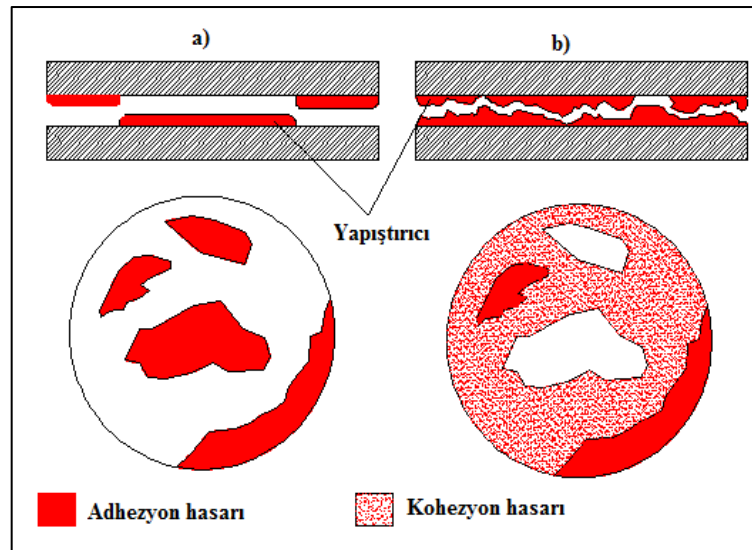
Şekil 4.14. SiO₂ takviyeli numune hasar yüzeyi

Epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılan parçalar arasındaki adhezyon kuvvetleri ve yapıştırıcı içerisindeki kohezyon kuvvetleri bağlantının mukavemetini sağlayan kuvvetlerdir. Şekil 4.15'te ara yüzey ve kohezyon kuvvetleri şematik olarak gösterilmiştir. Yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında bulunan küçük çatlaklar uygulanan kuvvetlerin etkisiyle büyüyerek ara yüzey hasarına sebep olmaktadır. Nanopartikül katkısız bağlantılarda hasar adhezyon kırılması şeklinde

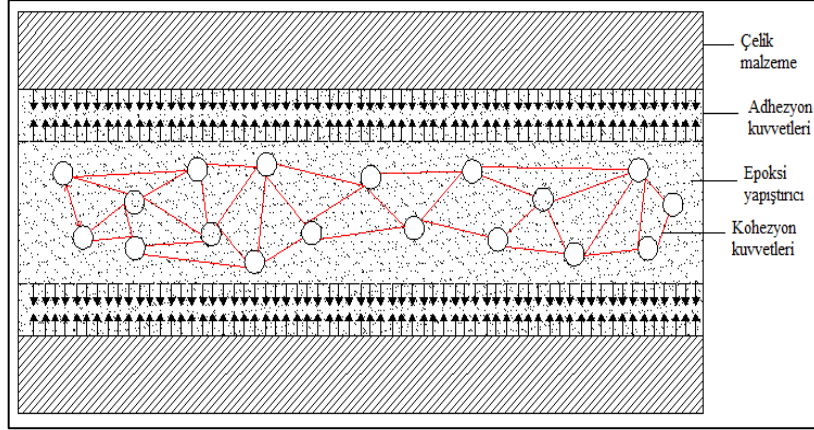
gözlemlenmektedir. Bu durum, katkısız bağlantılarda, adhezyon kuvvetlerinin kohezyon kuvvetlerinden daha zayıf olduğu sonucunu açığa çıkarmaktadır.

Nanopartikül katkıli bağlantılarda nanopartiküllerin etkisiyle adhezyon kuvvetleri artmaktadır. Nanopartikül katkıli numunelerde hasar ara yüzey ve yapıştırıcı tabaka içerisindeki çatlakların etkisiyle oluşmaktadır. Hasar adhezyon ayrılması ve kohezyon ayrılması karışımı şeklinde görülmektedir. Sonuç olarak bağlantılara nanopartikül katkısıyla epoksi yapıştırıcı ve AISI 304 kalite paslanmaz çelik malzeme arasındaki etkileşim artmakta ve bu etkileşim Şekil 4.16'da şematik olarak gösterilen ara yüzey kuvvetlerinin artmasına neden olmaktadır. Ara yüzey kuvvetlerindeki artış ise bağlantıların ortalama hasar yükünün artmasına neden olmuştur.

Literatürde yer alan, yapışma mekanizmasının açıklanmasıyla ilgili yapıştırma biliminde halen en fazla kabul edilen teori olan adsorpsiyon teorisinde, esas malzeme ile yapıştırıcı arasında iyi bir temas sağlanması şartıyla ara yüzeyde atomlar arası ve moleküller arası kuvvetlerin oluşması sonucu yapışmanın meydana geldiği görüşü öne çıkmaktadır. Buna göre nanopartikül katkısıyla esas malzeme üzerindeki atom ve moleküllerin yapıştırıcı ve yapıştırıcı içerisinde yer alan nanopartiküllere ait atom ve moleküllerle bağ yapması sonucu ara yüzey kuvvetleri artmaktadır.



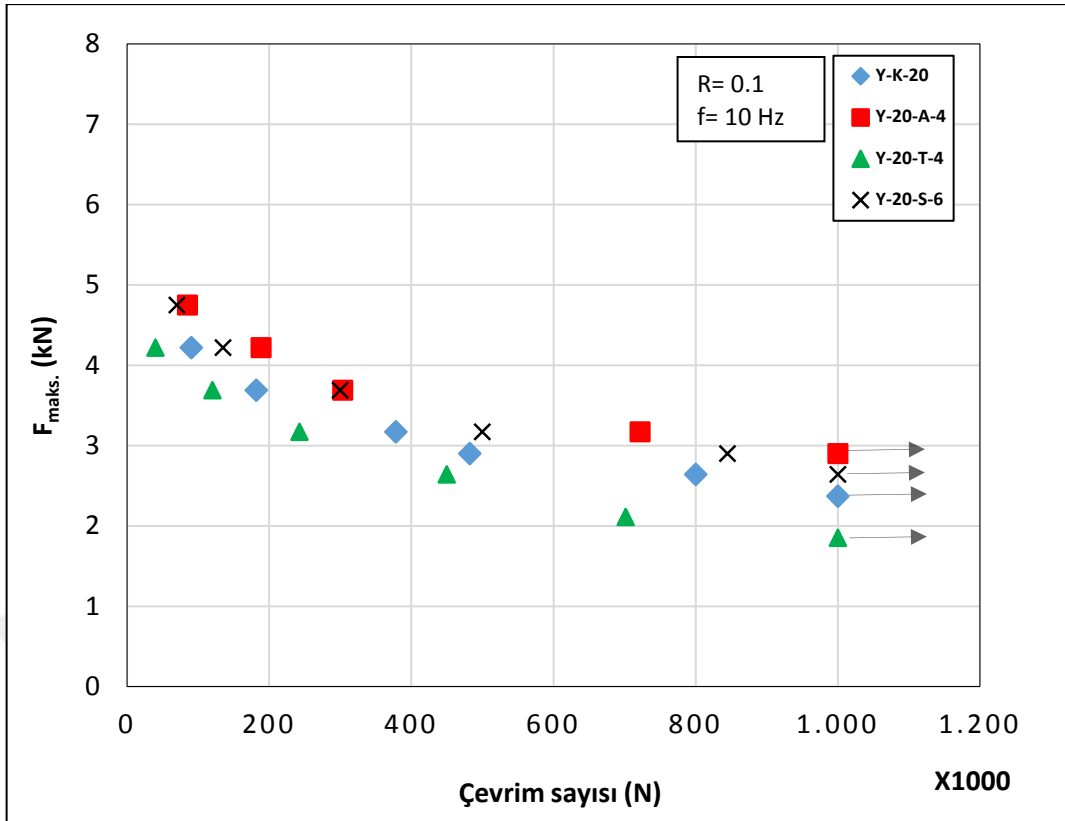
Şekil 4.15. Adhezyon ve kohezyon-adhezyon kırılması gösterimi



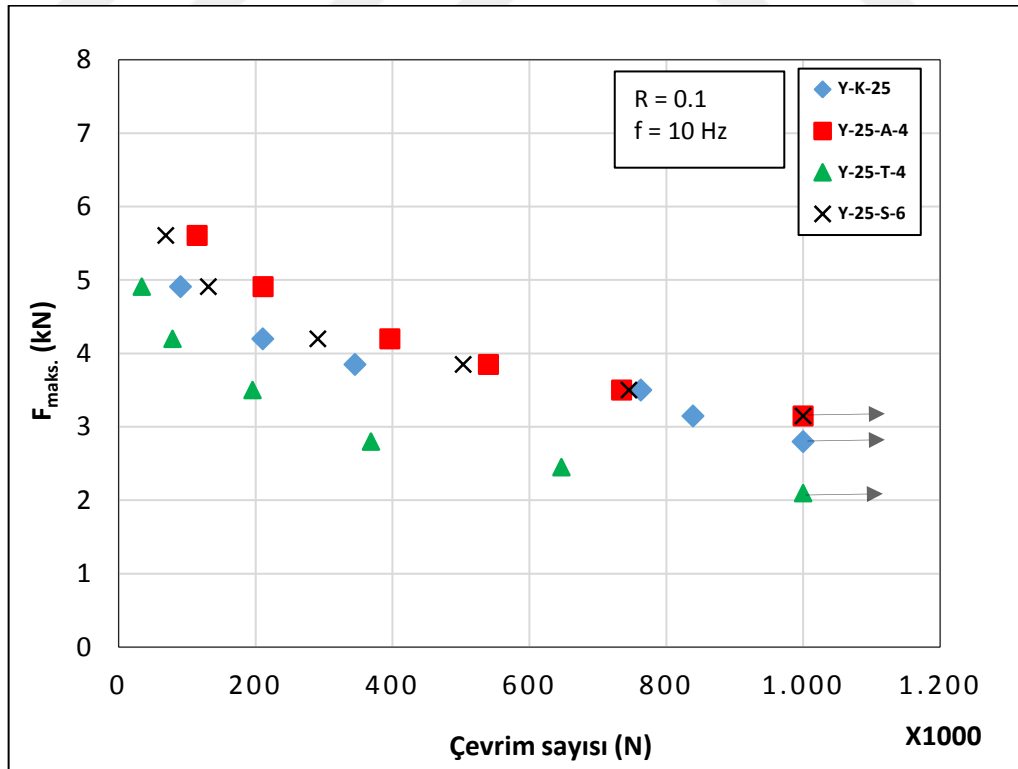
Şekil 4.16. Kohezyon ve adhezyon kuvvetlerinin gösterilmesi

4.2. Yorulma Deney Sonuçları

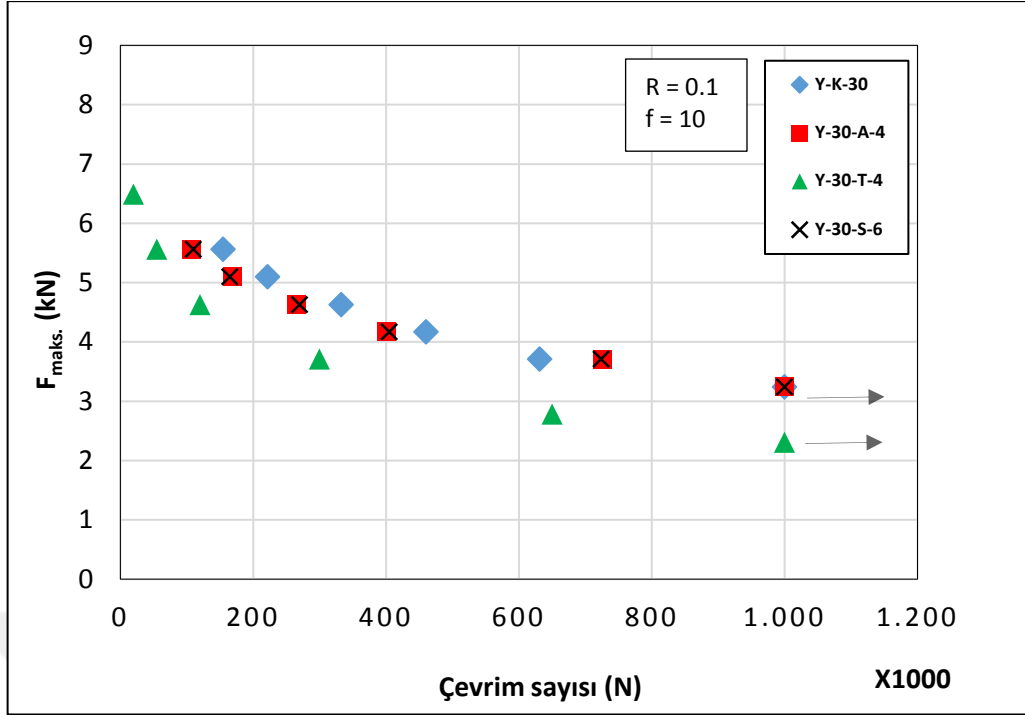
Çekme deneyleri için üretilen numunelerden aynı şekilde yorulma deneyleri için de üretildi ve yapıştırma bağlantılarının yorulma dayanımları incelendi. Yorulma deneyleri sonunda numunelere ait S-N grafikleri çizildi. Deneylerde Shimadzu EHF-EV 100 kN yorulma cihazı kullanıldı. Yük oranı (R) ve frekans (f) sırasıyla 0,1 ve 10 Hz olarak tüm deneylerde sabit tutuldu. Sonsuz ömür olarak 1 milyon çevrim sayısı alındı. Deney numuneleri 1 milyon çevrime ulaşıldığında test bitirildi. Şekil 4.17 - 4.23'te verilen S-N grafiklerinde sırasıyla yapıştırıcı içerisine nanopartikül takviyesinin ve bindirme uzunluğunun bağlantıların yorulma ömürlerine etkisi gösterilmiştir. Yapılan yorulma deneylerinde bir değer için 5 numune kullanılarak toplamda 240 deney yapıldı. Deneyler sonunda ortalama değerler alınarak yorulma grafikleri oluşturulmuştur.



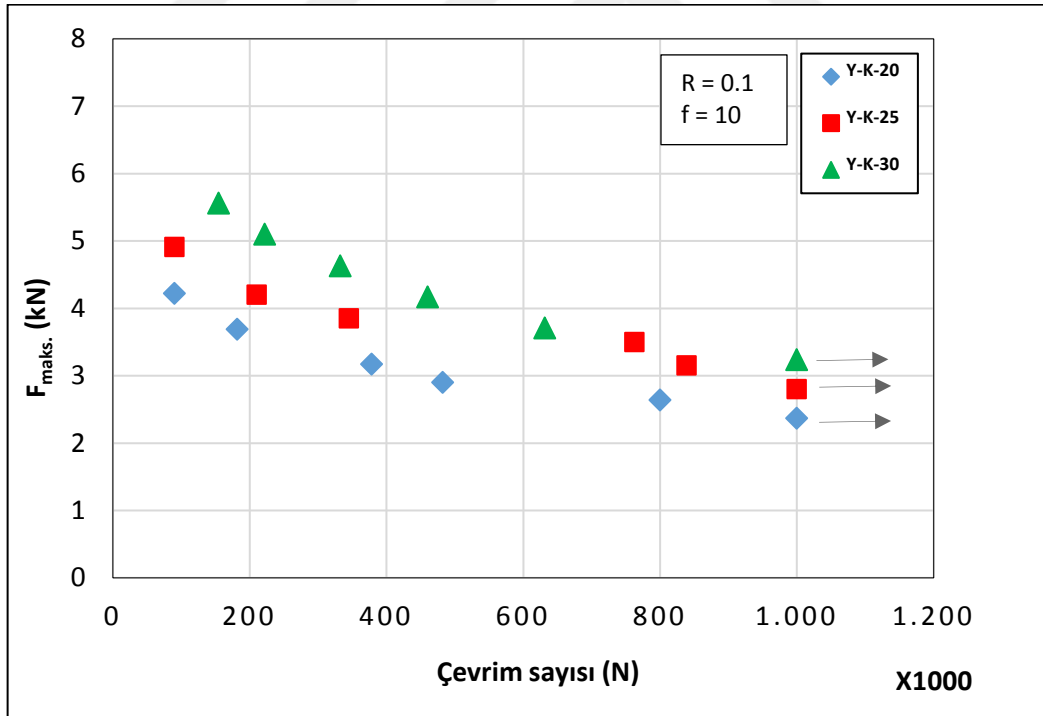
Şekil 4.17. 20 mm bindirme boyunda S-N grafikleri



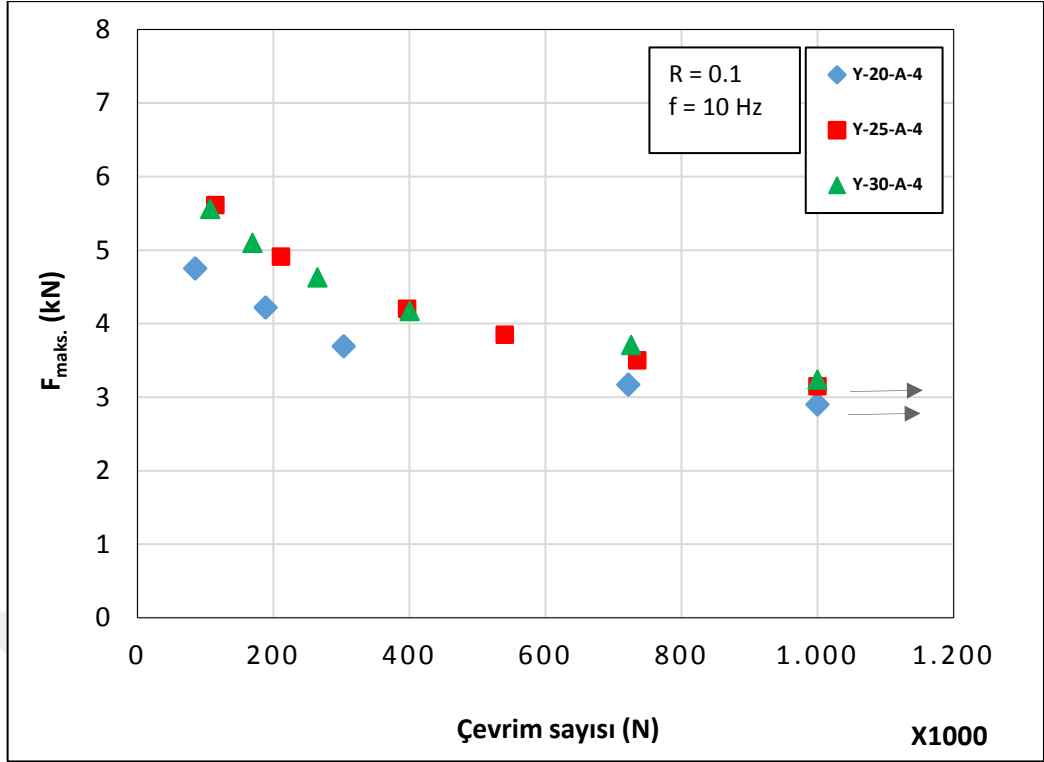
Şekil 4.18. 25 mm bindirme boyunda S-N grafikleri



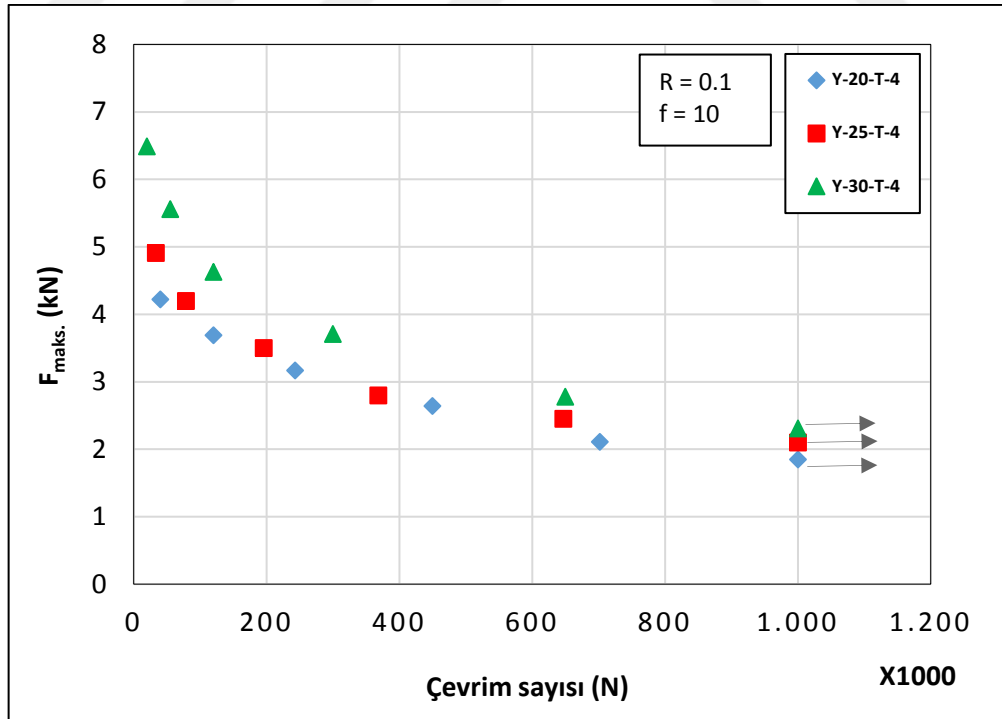
Şekil 4.19. 30 mm bindirme boyunda S-N grafikleri



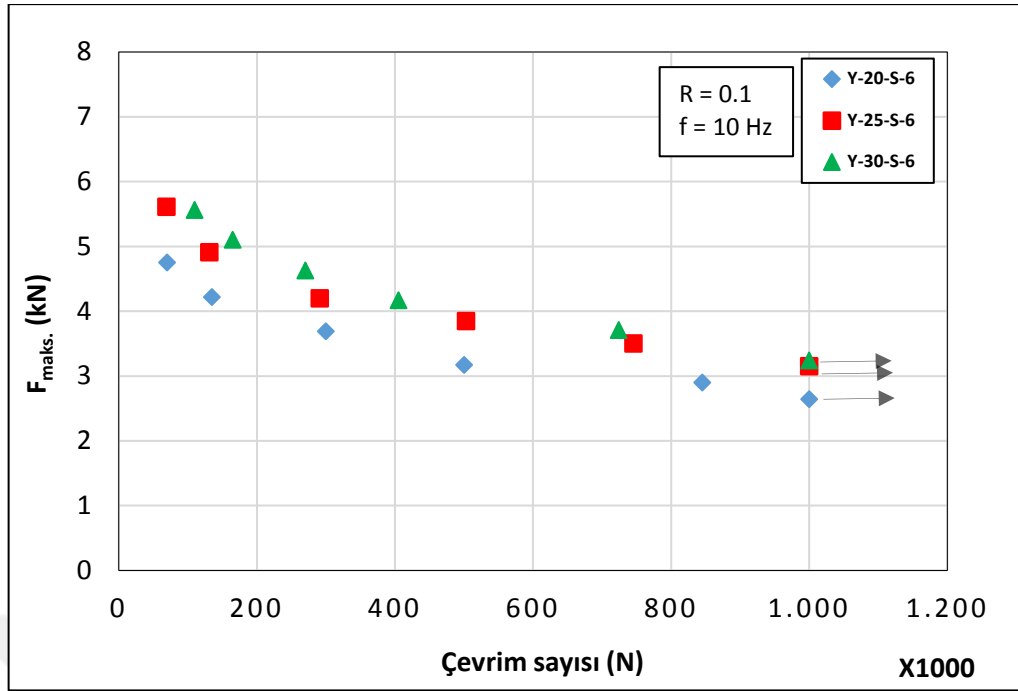
Şekil 4.20. Katkısız numunelerde bindirme uzunluğuna göre S-N grafikleri



Şekil 4.21. Al₂O₃ katkılı numunelerde bindirme uzunluğuna göre S-N grafikleri



Şekil 4.22. TiO₂ katkılı numunelerde bindirme uzunluğuna göre S-N grafikleri



Şekil 4.23. SiO₂ katkılı numunelerde bindirme uzunluğuna göre S-N grafikleri

Şekil 4.17 - 4.19 incelendiğinde yapıştırıcı içerisine %4-Al₂O₃ ve %6-SiO₂ takviyesi; 20 ve 25 mm bindirme boylarında bağlantıların yorulma dayanımını artırıcı yönde etki ederken, 30 mm bindirme boyunda katkısız numunelerin ortalama değerlerine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Yapıştırıcı içerisine %4-TiO₂ takviyesi ise 20, 25 ve 30 mm bindirme boylarında bağlantının yorulma mukavemetini düşürücü yönde etki etmiştir.

20 mm bindirme boyunda, katkısız numunelerin yorulma dayanıklılık limiti 2.37 kN, %4-Al₂O₃ katkılı numunelerin 2.90 kN, %6-SiO₂ katkılı numunelerin 2.64 kN, %4-TiO₂ katkılı numunelerin 1.85 kN olarak ölçülmüştür. 20 mm bindirme boyunda; %4-Al₂O₃ katkısı, bağlantıların yorulma dayanıklılık limitini % 22,3, %6-SiO₂ katkısı %11.3 artırırken, %4-TiO₂ katkısı % 22 azaltmıştır.

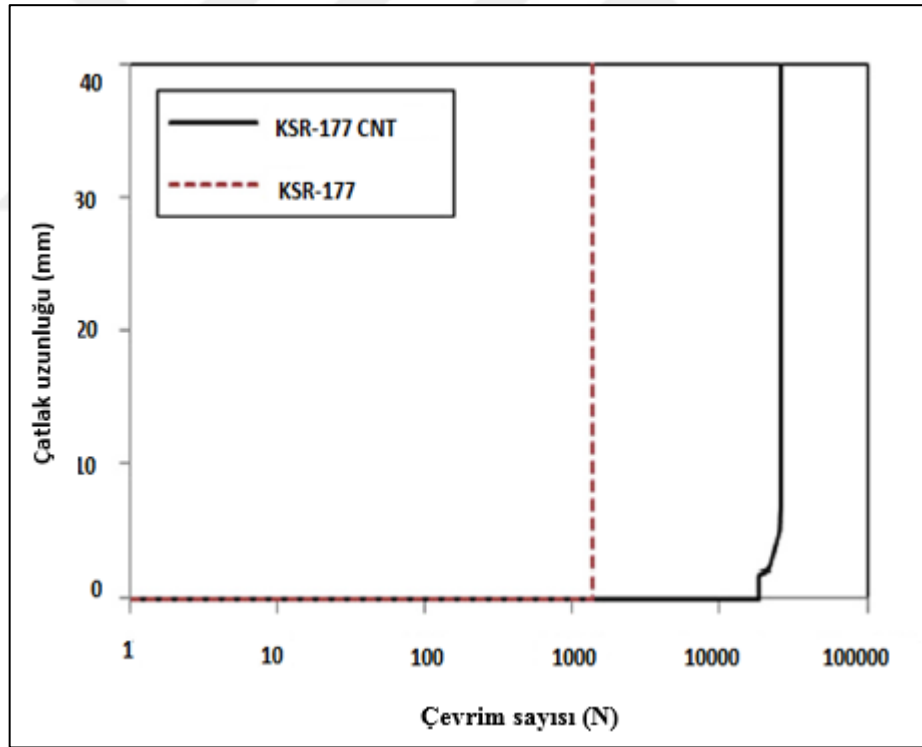
25 mm bindirme boyunda, katkısız numunenin yorulma dayanıklılık limiti 2.80 kN, %4-Al₂O₃ katkılı numunelerin 3.15 kN, %6-SiO₂ katkılı numunelerin 3.15 kN, %4-TiO₂ katkılı numunelerin 2.45 kN olarak ölçülmüştür. 25 mm bindirme boyunda; %4-Al₂O₃ katkısı, bağlantıların yorulma dayanıklılık limitini %12.5, %6-SiO₂ katkısı %12.5 artırırken, %4-TiO₂ katkısı %30 azaltmıştır.

30 mm bindirme boyunda, katkısız numunenin yorulma dayanıklılık limiti 3.24 kN, %4-Al₂O₃ katkılı numunelerin 3.24 kN, %6-SiO₂ katkılı numunelerin 3.24 kN, %4-TiO₂ katkılı numunelerin 2.45 kN olarak ölçülmüştür. 30 mm bindirme boyunda;

%4- Al_2O_3 ve %6- SiO_2 katkısı bağlantıların yorulma dayanıklılık limitini etkilememiştir. %4- TiO_2 katkısı ise % 30 azaltmıştır.

(Kang ve ark., 2014), yaptıkları deneysel çalışmada, tek tesirli bindirme bağlantılarında epoksi yapıştırıcı içerisine ağırlıkça %2 oranında karbon nanotüp ilavesinin bağlantının yorulma dayanımını arttırdığını tespit etmişlerdir. Yaptıkları düzenekle katkısız ve katkılı numunelerin çatlak başlangıç ve ilerleme zamanını ölçmüşler ve grafiksel olarak göstermişlerdir (Şekil 4.24). Sonuç olarak yapıştırıcı içerisine karbon nanotüp ilavesinin çatlak başlangıç ve ilerleme zamanını arttırdığını, katkısız numunelerde ise çatlak ilerleme zamanı olmadan ani kırılmalar olduğunu tespit etmişlerdir.

Yapılan bu açıklamaya göre yapıştırıcı içerisine nanopartikül ilavesinde bağlantıların yorulma dayanımlarının iyileşmesinin bağlantının yorulma çatlak başlangıç ve ilerleme zamanlarının artmasıyla ilgili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.24. Çatlak uzunluğu değişimi (Kang ve ark., 2014).

Şekil 4.20 - 4.23'te verilen grafikler incelendiğinde katkılı ve katkısız numunelerde bindirme boyunun artmasıyla bağlantıların yorulma dayanıklılık limit değerleri artmıştır. Katkısız numunelerde; 20 mm bindirme boyunda yorulma dayanıklılık limit değeri 2,37 kN olarak, 25 mm bindirme boyunda 2,80 kN, 30 mm bindirme boyunda 3,24 kN olarak

ölçülmüştür. %4- Al_2O_3 katkılı numunelerde; 20 mm bindirme boyunda yorulma dayanıklılık limit değeri 2,90 kN olarak, 25 mm bindirme boyunda 3,15 kN, 30 mm bindirme boyunda 3,24 kN olarak ölçülmüştür. %4- TiO_2 katkılı numunelerde; 20 mm bindirme boyunda yorulma dayanıklılık limit değeri 1,85 kN olarak, 25 mm bindirme boyunda 2,10 kN, 30 mm bindirme boyunda 2,31 kN olarak ölçülmüştür. %6- SiO_2 katkılı numunelerde; 20 mm bindirme boyunda yorulma dayanıklılık limit değeri 2,64 kN olarak, 25 mm bindirme boyunda 3,15 kN, 30 mm bindirme boyunda 3,24 kN olarak ölçülmüştür.

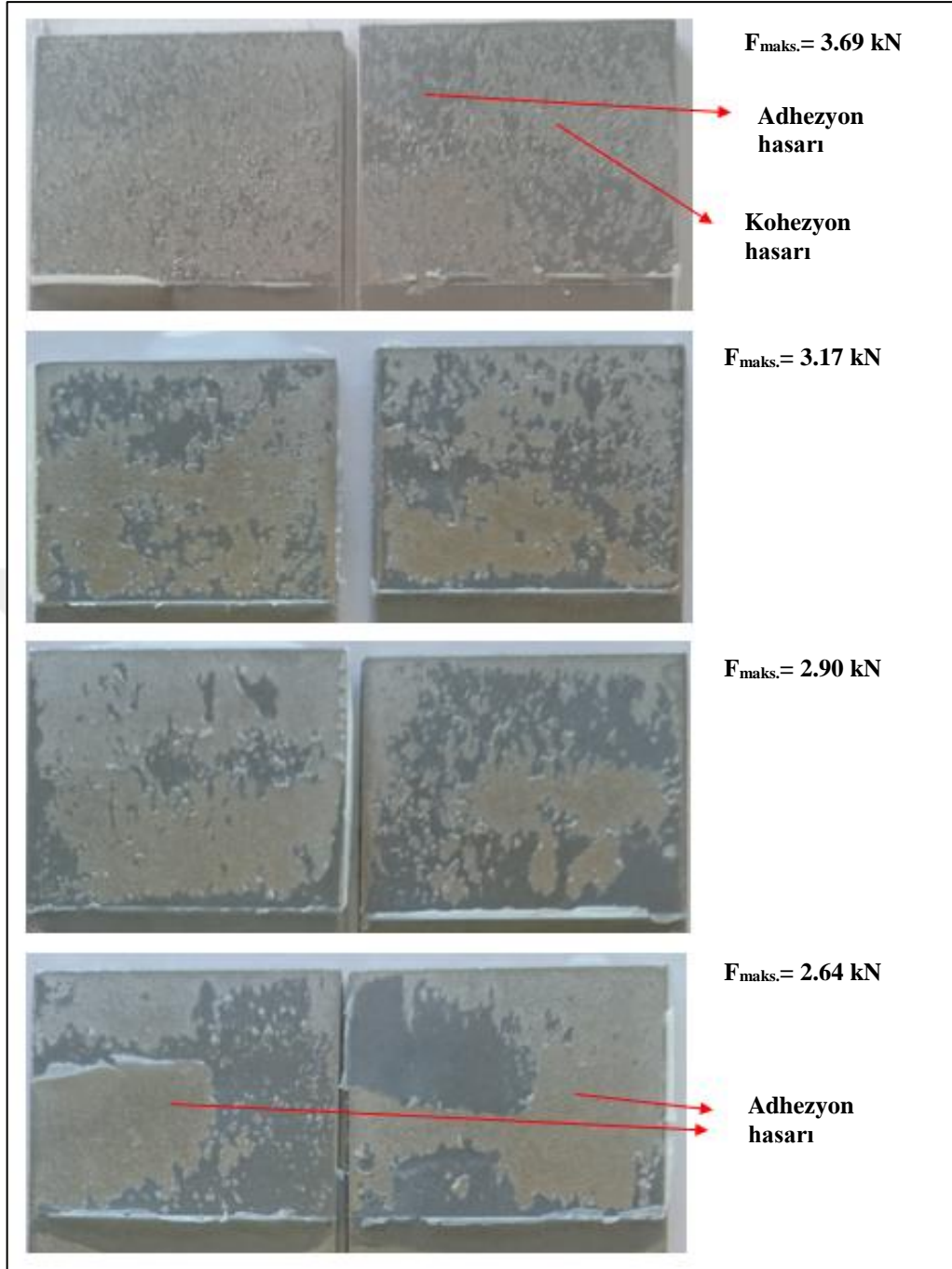
Yorulma deneylerinde bağlantılara uygulanan yükler, katkısız numunelerin statik deneylerde elde edilen ortalama hasar yüklerinin belirli oranlarda azaltılmasıyla tespit edilmiştir. Yorulma deneylerinde elde edilen değerler incelendiğinde bağlantıların bindirme uzunluğunun artmasıyla bütün numunelerde yorulma dayanıklılık limitinin arttığı görülmektedir. Ancak Tablo 4.2’de gösterilen $F_{\text{maks.}}/F_{\text{hasar}}$ değerleri bütün numunelerde bindirme uzunluğunun artmasıyla azalmaktadır. Örnek olarak 20 mm bindirme boyunda katkısız numunelerin sonsuz yorulma ömrü kabul edilen 1 milyon çevrim sayısına % 45 yük değerinde ulaşılırken, 25 mm bindirme boyunda % 40, 30 mm bindirme boyunda ise % 35 değerinde ulaşılmıştır. Bu durumda yorulmaya karşı en dayanıklı bindirme uzunluğunun 20 mm olduğu söylenebilmektedir.

Tablo 4.2. Katkılı ve katkısız numunelerin hasar yükü ve yorulma limiti değerleri

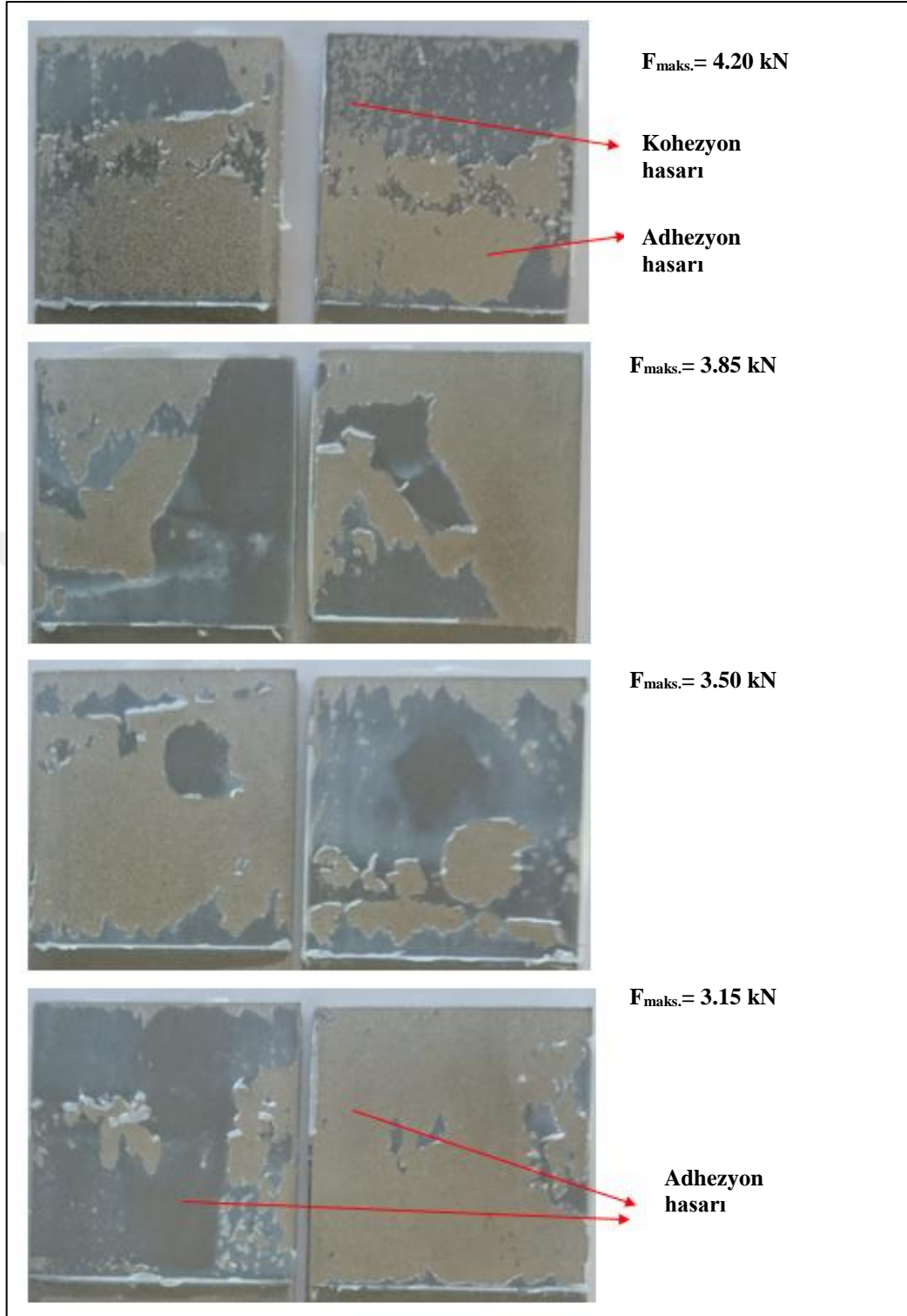
| L (mm) | Katkı türü | Ortalama hasar yükü (F_{hasar} , kN) | Yorulma dayanım limiti ($F_{\text{maks.}}$, kN) | $F_{\text{maks.}} / F_{\text{hasar}}$ |
|--------|-----------------------------|--|---|---------------------------------------|
| 20 | Katkısız | 5,28 | 2,37 | 0,45 |
| 25 | Katkısız | 7,01 | 2,80 | 0,40 |
| 30 | Katkısız | 9,27 | 3,24 | 0,35 |
| 20 | %4- Al_2O_3 | 5,28 | 2,90 | 0,55 |
| 25 | %4- Al_2O_3 | 7,01 | 3,15 | 0,45 |
| 30 | %4- Al_2O_3 | 9,27 | 3,24 | 0,35 |
| 20 | %4- TiO_2 | 5,28 | 1,85 | 0,35 |
| 25 | %4- TiO_2 | 7,01 | 2,10 | 0,30 |
| 30 | %4- TiO_2 | 9,27 | 2,31 | 0,25 |
| 20 | %6- SiO_2 | 5,28 | 2,64 | 0,50 |
| 25 | %6- SiO_2 | 7,01 | 3,15 | 0,45 |
| 30 | %6- SiO_2 | 9,27 | 3,24 | 0,35 |

4.2.1. Yorulma kırılma yüzeyleri analizi

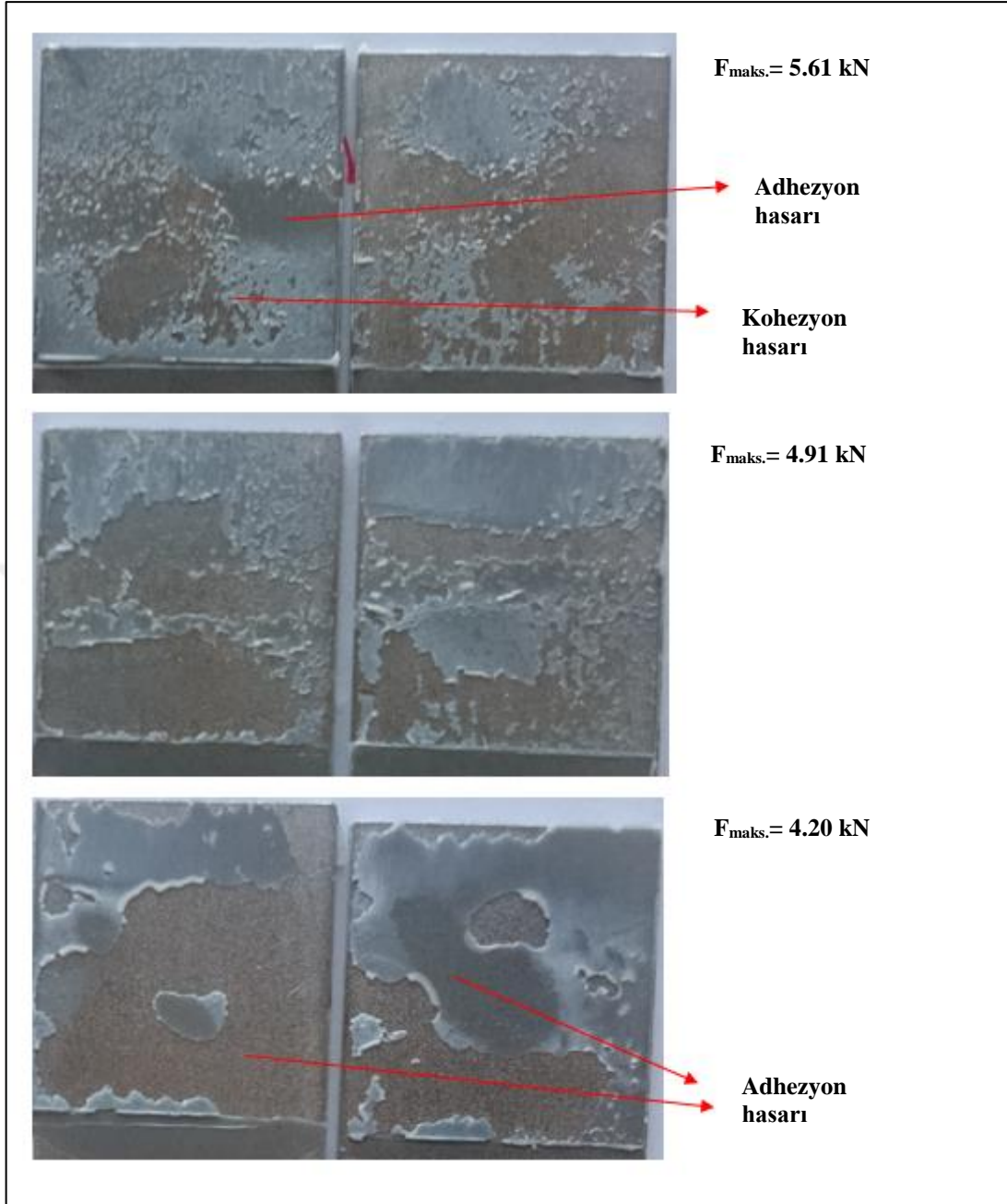
Yorulma deneyleri sonucunda numunelere ait kırılma yüzeyleri örnekleri numunelere uygulanan maksimum yükler ile birlikte Şekil 4.25 - 4.29'da gösterilmiştir. Şekil 4.25 - 4.29 arasında gösterilen kırılma yüzeyleri görsel olarak incelendiğinde; katkısız ve %4-Al₂O₃ katkılı numunelerin hasarları adhezyon ve kohezyon hasar tiplerinin karışımı şeklinde gözlemlenmiştir, %4 -TiO₂ ve %6-SiO₂ katkılı numunelerin hasarları ise ağırlıklı olarak ara yüzey ayrılması şeklinde gözlemlenmiştir. Yapılan yorulma deneyleri sonucunda, numunelere uygulanan maksimum yükün, hasar şekline etkisinin oldukça önemli olduğu görülmüştür. Maksimum yükün daha büyük olduğu numunelerin deneyleri sonucunda kohezyon hasarı daha belirgin şekilde gözlemlenirken, maksimum yükün daha küçük olduğu deneylerde hasar şekli adhezyon ayrılması şeklinde gözlemlenmiştir. Bu durum özellikle katkısız numunelerin ve %4-Al₂O₃ katkılı numunelerin hasar yüzeylerinde belirgin olarak gözlemlenmiştir. %4-TiO₂ ve %6-SiO₂ katkılı numunelerde ise maksimum yükün daha büyük olduğu numunelerin hasar yüzeylerinde ağırlıklı olarak adhezyon hasarı gözlemlenirken, maksimum yükün daha küçük olduğu numunelerde hasar şekli tamamen adhezyon hasarı şeklinde gözlemlenmiştir. Maksimum yükün küçük olduğu durumlarda, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında yer alan çatlakların çevrim sayısının artmasıyla zamanla büyüyerek kritik uzunluğa geldiği ve kırılmanın olduğu düşünülmektedir. Bu durumda uygulanan maksimum yük, yapıştırıcı tabakası içerisindeki kohezyon kuvvetlerinden küçük olmaktadır. Maksimum yükün büyük olduğu durumlarda ise ara yüzeyde yer alan çatlak büyümesinin yanısıra yapıştırıcının kendi içerisinde yer alan kohezyon bağ kuvvetlerinin sınır değerlerinin geçilmesi sonucu hasarın bir kısmı kohezyon hasarı olarak açığa çıkmaktadır.



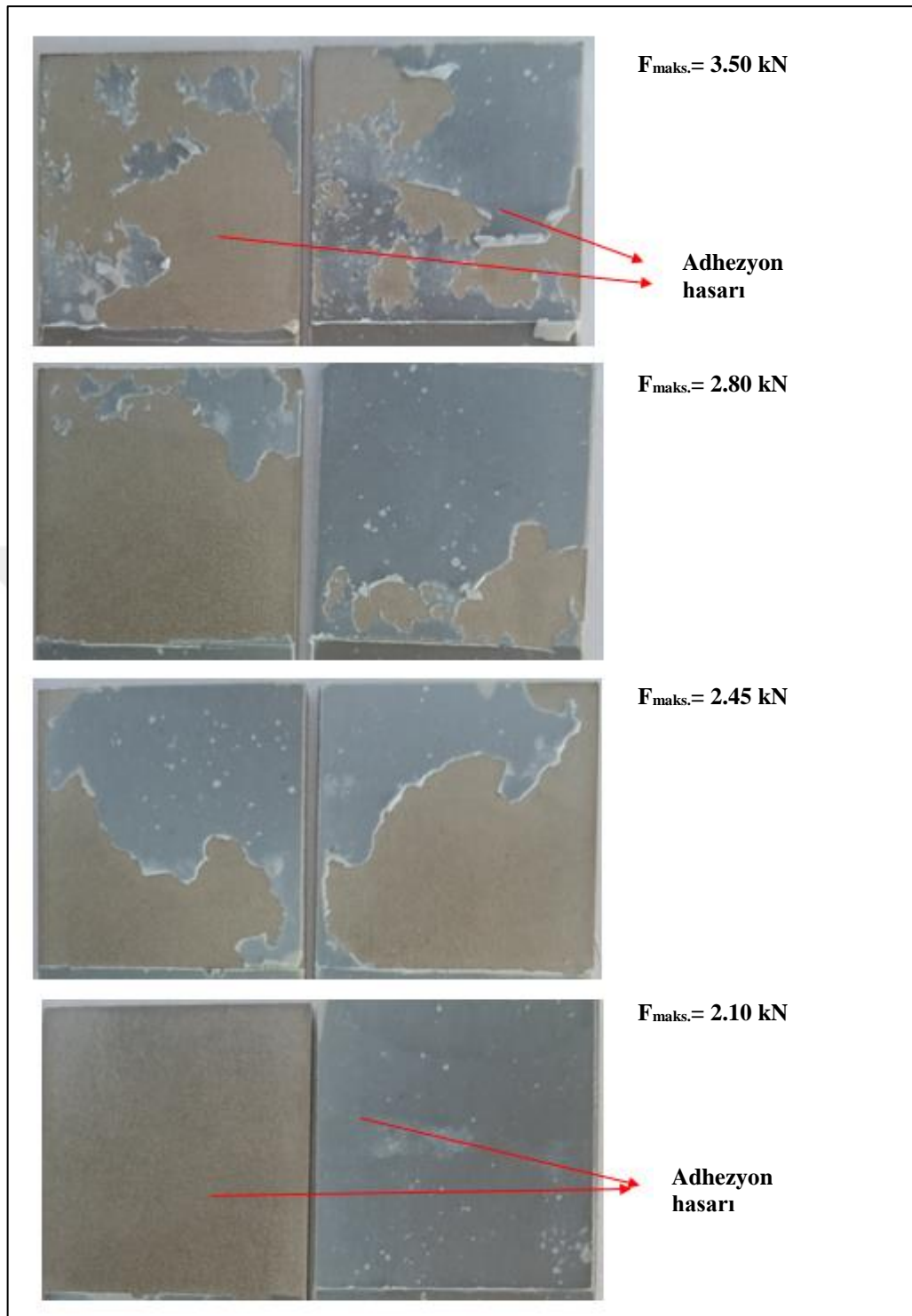
Şekil 4.25. Katksız numunelerin yorulma hasar yüzeyi örnekleri (L=20 mm)



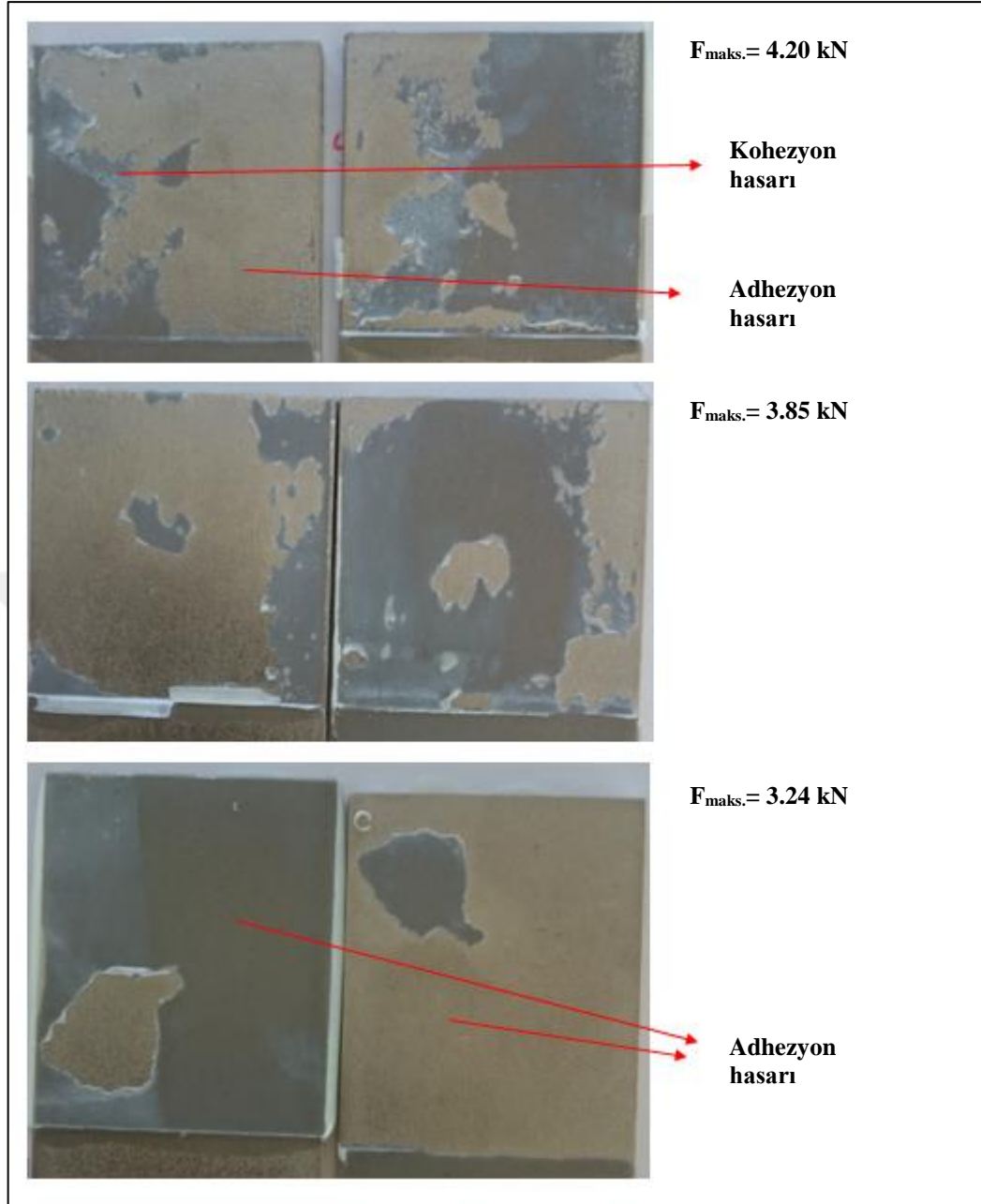
Şekil 4.26. Katksız numunelerin yorulma hasar yüzeyi örnekleri (L=25 mm)



Şekil 4.27. Al₂O₃ katkılı numunelerin yorulma hasar yüzeyi örnekleri



Şekil 4.28. TiO_2 katkılı numunelerin yorulma hasar yüzeyi örnekleri



Şekil 4.29. SiO₂ katkılı numunelerin yorulma hasar yüzeyi örnekleri

Yapılan deneysel çalışma sonucunda %4-TiO₂ katkısının yorulma dayanımını çok belirgin bir şekilde düşürdüğü görülmüştür. %4-TiO₂ katkılı numunelerin hasar yüzeyleri incelendiğinde tamamen ara yüzey ayrılması şeklinde hasarla karşılaşılmaktadır. Bu durumda %4-TiO₂ katkısının, yapıştırıcı ile ara yüzey arasında süreksizlikleri artırarak çevrimsel yük altında çatlakların büyümesi sonucu hasarın oluşmasına neden olduğu söylenebilmektedir. %4-Al₂O₃ ve %6-SiO₂ katkısının ise çatlak oluşumunu ve ilerlemesini yavaşlatarak bağlantıların yorulma dayanımını arttırdığı düşünülmektedir.

%4- Al_2O_3 ve %6- SiO_2 katkılı numunelerin hasar yüzeyleri incelendiğinde özellikle maksimum yükün yüksek olduğu durumlarda kohezyon hasarının daha fazla gözlemlenmesi, Al_2O_3 ve SiO_2 katkılarının, bağlantıların adhezyon kuvvetlerini arttırdığı sonucunu çıkarmaktadır. Bağlantıların adhezyon kuvvetlerinin artması sonucu yorulmada hasara sebep olan yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasındaki yorulma çatlaklarının ilerlemesi için gerekli olan kuvvetler de artmıştır. Bu durumda çatlak ilerlemesi gecikerek bağlantıların yorulma dayanım limitleri artmıştır.



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Yapılan bu deneysel çalışma, yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin nanopartikül takviyesiyle iyileştirilmesi amacıyla yapılmıştır. Yapılan çalışmada tek tesirli bindirme bağlantı modeli kullanılmıştır. Yapıştırıcı olarak DP460 epoksi yapıştırıcı, yapıştırılan malzeme olarak da AISI 304 kalite paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. Yapılan çalışmada; epoksi yapıştırıcı içerisine belirli oranlarda, Al_2O_3 , TiO_2 ve SiO_2 nanopartikülleri katılarak ve katısız epoksi yapıştırıcı kullanılarak tek tesirli bindirme bağlantıları imal edilmiş ve bağlantıların statik ve yorulma dayanımları 20, 25 ve 30 mm bindirme boylarında deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Çekme deneyleri sonucunda elde edilen sonuçlar:

- Epoksi yapıştırıcı içerisine Al_2O_3 , TiO_2 ve SiO_2 nanopartiküllerinin takviyesi yapıştırma bağlantılarının ortalama hasar yükünü önemli ölçüde arttırmıştır.
- Epoksi yapıştırıcı içerisine katılan nanopartiküllerin katkı oranlarının değişimi bağlantıların hasar mukavemetinde önemli bir parametre olarak açığa çıkmıştır. Yapıştırma bağlantılarının en yüksek hasar mukavemeti değerleri deneylerde kullanılan katkı oranları dikkate alındığında; Al_2O_3 için %4 oranında, TiO_2 için %4 oranında, SiO_2 için %6 oranında ölçülmüştür.
- Nanopartikül türünün yapıştırma bağlantılarının statik mukavemetinde önemli bir parametre olduğu tespit edilmiştir.
- Al_2O_3 ve TiO_2 takviyesi yapılan numunelerin deneyleri sonucunda en yüksek hasar mukavemet değerleri %4 oranında elde edildikten sonra katkı oranı %6'ya çıkarıldığında ortalama hasar mukavemet değerleri azalmıştır. Ancak, SiO_2 takviyesinde en yüksek hasar mukavemet değerine %6 oranında ulaşılmıştır.
- En yüksek hasar mukavemet artış oranı; 20 mm bindirme boyunda yapıştırıcı içerisine %4- Al_2O_3 takviyesiyle %97 oranında gerçekleşmiştir.
- Bindirme boyunun artmasıyla ortalama hasar yükü genel olarak artmıştır.
- Bindirme boyunun artmasıyla nanopartikül katkısının hasar mukavemetini artırma oranı azalmıştır. %4- Al_2O_3 katkısı; 20 mm bindirme boyunda ortalama hasar mukavemetini %97 oranında artırırken 25 mm bindirme boyunda %72, 30

mm bindirme boyunda ise %39 oranlarında arttırmıştır. %4 TiO₂ katkısı; 20 mm bindirme boyunda ortalama hasar mukavemetini %86 oranında artırırken 25 mm bindirme boyunda %50, 30 mm bindirme boyunda ise %32 oranlarında arttırmıştır. %6-SiO₂ katkısı; 20 mm bindirme boyunda ortalama hasar mukavemetini %91 oranında artırırken 25 mm bindirme boyunda %47, 30 mm bindirme boyunda ise %39 oranlarında arttırmıştır.

- Bağlantıların hasar mukavemet artışına en etkili nanopartikülün Al₂O₃ olduğu tespit edilmiştir.
- 20, 25 ve 30 mm bindirme boylarında yapılan statik deneyler sonucunda en yüksek hasar mukavemet artışları 20 mm bindirme boyunda gerçekleşmiştir.
- Numunelerin hasar yüzeyleri incelendiğinde sade yapıştırıcı ve kullanılan numunelerde ağırlıklı olarak adhezyon hasarı gözlemlenirken, nanopartikül takviyeli numunelerde hasar, adhezyon ve kohezyon karışımı şeklinde gözlemlenmiştir.
- Yapıştırıcı içerisine nanopartikül ilave edilmesinin bağlantıların uzama miktarlarını arttırdığı tespit edilmiştir. Bütün nanopartikül çeşitleri için en yüksek hasar yükünün tespit edildiği karışım oranlarında, en yüksek uzama miktarları ölçülmüştür.

Yorulma deneyleri sonucunda elde edilen sonuçlar:

- Epoksi yapıştırıcı içerisine %4-Al₂O₃ takviyesi ve %6-SiO₂ takviyesi bağlantıların yorulma dayanım limitini arttırmıştır. Yapıştırıcı içerisine %4-TiO₂ takviyesi ise yorulma dayanım limitini düşürmüştür.
- Nanopartikül türünün yapıştırma bağlantılarının yorulma mukavemetinde önemli bir parametre olduğu tespit edilmiştir.
- En yüksek yorulma dayanım limit artışı 20 mm bindirme boyunda, %4-Al₂O₃ katkılı numunelerde %22,3 oranıyla gerçekleşmiştir. %6-SiO₂ katkılı numunelerde en yüksek yorulma dayanım limit artışı 20 mm bindirme boyunda %11,5 oranıyla gerçekleşmiştir.
- 30 mm bindirme boyunda; yapıştırıcı içerisine %4-Al₂O₃ ve %6-SiO₂ takviyesi bağlantıların yorulma dayanım limit değerlerini etkilememiştir. %4-TiO₂ takviyesi yorulma dayanım limitini ise düşürmüştür.
- Bindirme boyunun artmasıyla bağlantıların yorulma dayanım limiti artmıştır.

- Numunelerin hasar yüzeyleri incelendiğinde, katkısız ve Al_2O_3 katkılı numunelerde adhezyon ve kohezyon hasarları şeklinde karışık bir hasar durumu tespit edilmiştir.
- TiO_2 ve SiO_2 katkılı numunelerin hasarları ağırlıklı olarak adhezyon kırılması şeklinde gözlemlenmiştir.
- Numunelere uygulanan maksimum yükün hasar şekline etkisi görülmüştür. Yüksek yük uygulanan numunelerde kohezyon hasarı daha belirgin şekilde gözlemlenirken, düşük maksimum yüklerde hasar şekli ara yüzey ayrılması şeklinde açığa çıkmıştır.

5.2 Öneriler

Yorulma deneylerinde nanopartikül karışım oranları çekme testlerinde elde edilen en yüksek hasar yüklerinin bulunduğu oranlar olarak alındı ve katkısız numunelerle kıyaslamalar yapıldı. Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda nanopartikül karışım oranları değiştirilerek deneyler yapmak faydalı olacaktır. Ayrıca sonlu elemanlar yazılımları (Abaqus, Ansys gibi) kullanılarak yapılan deneylerin doğruluğu araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Abou-Hamda, M.M., Megahed, M.M., Hammouda, M.M.I., 1998, Fatigue crack growth in double cantilever beam specimen with an adhesive layer, *Engineering Fracture Mechanics Vol. 60*, No. 5-6, 605-614.
- Abdel Wahab, M.M., Ashcroft, I.A., Crocombe, A.D., Smith, P.A., 2002, Numerical prediction of fatigue crack propagation lifetime in adhesively bonded structures, *International Journal of Fatigue*, 24 (2002), 705–709.
- Abdel Wahab, M.M., Ashcroft, I.A., Crocombe, A.D., Smith, P.A., 2004, Finite element prediction of fatigue crack propagation lifetime in composite bonded joints, *Composites: Part A*, 35 (2004), 213–222.
- Adin, H., 2007, Yapıştırıcı ile birleştirilmiş ters Z tipi kompozit malzeme bağlantılarının mekanik analizi, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ.
- Adin, H., Altun, S. ve Yasar, F., 2011, Onarımda kullanılan darbe dayanımlı iki bileşenli yapıştırıcılar, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 16-18 May, Elazığ, Turkey.
- Anonim, www.3M.com/structuraladhesives, Ziyaret tarihi 2 Haziran 2016.
- Anonim, <https://nanografi.com>, Ziyaret tarihi 3 Mayıs 2016.
- Anonim, <https://bircelik.com/tr/kategori/paslanmaz-celik>, Ziyaret tarihi 5 Mayıs 2016.
- Ashcroft, I.A., Shaw, S.J., 2002, Mode I fracture of epoxybonded composite joints 2. Fatigue loading, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 22 (2002), 151–167.
- Aydın, S., 2012, Yapıştırıcı ile birleştirilmiş prizmatik geçmeli bağlantıların mekanik analizleri, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ.
- Bernasconi, A., Jamil, A., Moroni, F., Pirondi, A., 2013, A study on fatigue crack propagation in thick composite adhesively bonded joints, *International Journal of Fatigue*, 50 (2013), 18–25.
- Brighenti, R., 2007, Patch repair design optimisation for fracture and fatigue improvements of cracked plates, *International Journal of Solids and Structures*, 44 (2007), 1115–1131.
- Blanchard, C., Chateauminois, A., Vincent, L., 1996, A new testing methodology for the assessment of fatigue properties of structural adhesives, *Int. J. Adhesion and Adhesives*, 16 (1996), 289-299.

- Blackman, B.R.K., Kinloch, A.J., Paraschi, M., Teo, W.S., 2003, Measuring the mode I adhesive fracture energy, G_{IC} , of structural adhesive joints: the results of an international round-robin, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 23 (2003), 293–305.
- Canyurt, O.E., Meran, C., 2012, Fatigue strength estimation of adhesively bonded tongue and Groove joint of thick woven composite sandwich structures using genetic algorithm approach, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 33 (2012), 80–88.
- Casas-Rodriguez, J.P., Ashcroft, I.A., Silberschmidt, V.V., 2008, Damage in adhesively bonded CFRP joints: Sinusoidal and impact-fatigue, *Composites Science and Technology*, 68 (2008) 2663–2670.
- Cheuk, P.T., Tong, L., Wang, C.H., Baker, A., Chalkley, P., 2002, Fatigue crack growth in adhesively bonded composite-metal double-lap joints, *Composite Structures*, 57 (2002), 109–115.
- Colombi, P., 2005, Plasticity induced fatigue crack growth retardation model for steel elements reinforced by composite patch, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 43 (2005), 63–76.
- Crocombe, A.D., Richardson, G., 1999, Assessing stress state and mean load effects on the fatigue response of adhesively bonded joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 19 (1999), 19-27.
- Çalık, A., 2008, Yapıştırıcılar ve köşeleri yuvarlatılmış basamaklı bindirme yapıştırıcı bağlantılarda gerilme analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak.
- Çitil, Ş., 2012, Ortası boş ve ara elemanlı çift takviyeli yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum.
- De Goeij, W.C., Van Tooren, M.J.L., Beukers, A., 1999, Composite adhesive joints under cyclic loading, *Materials and Design*, 20(1999), 213-221.
- De Mouraa, M.F.S.F., Daniauda, R., Magalhaes, A.G., 2006, Simulation of mechanical behaviour of composite bonded joints containing strip defects, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 26 (2006), 464–473.
- De Moura, M.F.S.F., Chousal, J.A.G., 2006, Cohesive and continuum damage models applied to fracture characterization of bonded joints, *International Journal of Mechanical Sciences*, 48 (2006), 493–503.
- Dessureault, M., Spelt, J.K., 1997, Observations of fatigue crack initiation and propagation in an epoxy adhesive, *Int. J. Adhesion and Adhesives*, 17 (1997), 183-195.

- Duong, C.N., Verhoeven, S., Guijt, C.B., 2006, Analytical and experimental study of load attractions and fatigue crack growths in two-sided bonded repairs, *Composite Structures*, 73 (2006), 394–402.
- Erpolat, S., Ashcroft, I.A., Crocombe, A.D., Abdel-Wahab, M.M., 2004, A study of adhesively bonded joints subjected to constant and variable amplitude fatigue, *International Journal of Fatigue*, 26 (2004), 1189–1196.
- Erpolat, S., Ashcroft, I.A., Crocombe, A.D., Abdel-Wahab, M.M., 2004, Fatigue crack growth acceleration due to intermittent overstressing in adhesively bonded CFRP joints, *Composites: Part A*, 35 (2004), 1175–1183.
- Fernandez, M.V., De Moura, M.F.S.F., Da Silva, L.F.M., Marques, A.T., 2011, Composite bonded joints under mode I fatigue loading, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 31 (2011), 280–285.
- Fernando, M., Harjoprayitno, W.W., Kinloch, A.J., 1996, A fracture mechanics study of the influence of moisture on the fatigue behaviour of adhesively bonded aluminium-alloy joints, *Int. J. Adhesion and Adhesives*, 16 (1996), 113-119.
- Ferreira, J.A.M., Reis, P.N., Costa, J.D.M., Richardson, M.O.W., 2002, Fatigue behaviour of composite adhesive lap joints, *Composites Science and Technology*, 62 (2002), 1373–1379.
- Fu, M., Mallick, P.K., 2001, Fatigue of hybrid (adhesive/bolted) joints in SRIM composites, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 21 (2001), 145-159.
- Gomez, S., Onoro, J., Pecharroman, J., 2007, A simple mechanical model of a structural hybrid adhesive/riveted single lap joint, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 27 (2007), 263–267.
- Günaydın, B., 2003, Yüzey çatlaklı cam/polyester kompozit malzemelerde yorulma çatlak ilerlemesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Günaydın, B., 2010, Kompozit yama ile onarılmış yüzey çentikli filaman sarım borularda yorulma davranışları, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Hadavinia, H., Kinloch, A.J., Little, M.S.G., Taylor, A.C., 2003, The prediction of crackgrowth in bonded joints under cyclic-fatigue loading I. Experimental studies, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 23 (2003), 449–461.
- Hadavinia, H., Kinloch, A.J., Little, M.S.G., Taylor, A.C., 2003, The prediction of crackgrowth in bonded joints under cyclic-fatigue loading II. Analytical and finite element studies, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 23 (2003), 463–471.

- Hafiz, T.A., Abdel-Wahab, M.M., Cromcobe, A.D., Smith, P.A., 2013, Mixed-mode fatigue crack growth in FM73 bonded joints, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 40 (2013), 188–196.
- Imanaka, M., Nakayama, H., Morikawa, K., Nakamura, M., 1995, Evaluation of fatigue life of adhesively bonded CFRP pipe/steel rod joints, *Composite Structures*, 31 (1995), 235-241.
- İşcan, B., 2007, Yapıştırıcı malzeme ile birleştirilmiş Z tipi bağlantılarının mekanik analizi, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ.
- Jen, M.Y., Chang, L.Y., 2008, Evaluating bending fatigue strength of aluminum honeycomb sandwich beams using local parameters, *International Journal of Fatigue*, 30 (2008), 1103–1114.
- Jen, Y.M., Ko, C.W., 2010, Evaluation of fatigue life of adhesively bonded aluminum single-lap joints using interfacial parameters, *International Journal of Fatigue*, 32 (2010), 330–340.
- Jen, Y.M., 2012, Fatigue life evaluation of adhesively bonded scarf joints, *International Journal of Fatigue*, 36 (2012) 30–39.
- Kang, M.H., Choi, J.H., Kweon, J.H., 2014, Fatigue life evaluation and crack detection of the adhesive joint with carbon nanotubes, *Composite Structures*, 108 (2014), 417–422.
- Karcı, A., 2002, 2024-T3 Al alaşımının tek aşırı yük altında yorulma davranışı, Yüksek Lisans Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir.
- Kaya, Y., AISI 304 ve AISI 430 Paslanmaz çeliklerin TIG, MIG ve örtülü elektrod ark kaynağıyla birleştirilebilirliğinin araştırılması, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Cilt 25, No 3, 549-557, 2010.
- Kelly, G., 2006, Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints, *Composite Structures*, 72 (2006) 119–129.
- Khashaba, U.A., Aljinaidi, A.A., Hamed, M.A., 2015, Development of CFRE composite scarf adhesive joints with SiC and Al₂O₃ nanoparticle, *Composite Structures* 128 (2015) 415-427.
- Khoramishad, H. Crocombe, A.D., Katnam, K.B., Ashcroft, I.A., 2010, Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model, *International Journal of Fatigue*, 32 (2010) 1146–1158.
- Khoramishad, H. Crocombe, A.D., Katnam, K.B., Ashcroft, I.A., 2010, A generalised damage model for constant amplitude fatigue loading of adhesively bonded joints, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 30 (2010), 513–521.

- Khoramishad, H. Crocombe, A.D., Katnam, K.B., Ashcroft, I.A., 2011, Fatigue damage modelling of adhesively bonded joints under variable amplitude loading using a cohesive zone model, *Engineering Fracture Mechanics*, 78 (2011) 3212–3225.
- Kim, J.H., Park, B.J., Han, Y.W., 2004, Evaluation of fatigue characteristics for adhesively-bonded composite stepped lap joint, *Composite Structures*, 66 (2004) 69–75.
- Knox, E.M., Cowling, M.J., Hashim, S.A., 2000, Fatigue performance of adhesively bonded connections in GRE pipes, *International Journal of Fatigue*, 22 (2000), 513–519.
- Kodakoğlu, L., 1996, Yapıştırıcıların Genel Özellikleri ve Çekme Gerilmesine Maruz Yapışma Birleşmesinin Analitik ve Nümerik Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 139.
- Köksal, H., 2013, Yapıştırıcılı ve çok pimli kompozit plakaların analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Aksaray.
- Kurbanoğlu, C., 2009, Makine Elemanları Teori Konstrüksiyon ve Problemler, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 6.
- Mactabi, R., Rosca, L.D., Hoa, S.V., 2013, Monitoring the integrity of adhesive joints during fatigue loading using carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*, 78(2013)1-9.
- Marannano, G.V., Mistretta, L., Cirello, A., Pasta, S., 2008, Crack growth analysis at adhesive–adherent interface in bonded joints under mixed mode I/II, *Engineering Fracture Mechanics*, 75 (2008), 5122–5133.
- Marcadon, V., Nadot, Y., Roy, A., Gacougnolle, J.L., 2006, Fatigue behaviour of T-joints for marine applications, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 26 (2006), 481–489.
- Meguid, S.A., Sun, Y., 2004, On the tensile and shear strength of nano-reinforced composite interfaces, , 2004, *Materials and Design* 25 (2004) 289–296.
- Meneghetti, G., Quaresimin, M., Ricotta, M., 2010, Influence of the interface ply orientation on the fatigue behaviour of bonded joints in composite materials, *International Journal of Fatigue*, 32 (2010), 82–93.
- Mengel, R., Haberle, J., Schlimmer, M., 2007, Mechanical properties of hub/shaft joints adhesively bonded and cured under hydrostatic pressure, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 27 (2007), 568–573.
- Moroni, F., Pironi, A., 2012, A procedure for the simulation of fatigue crack growth in adhesively bonded joints based on a cohesive zone model and various mixed-mode propagation criteria, *Engineering Fracture Mechanics*, 89 (2012), 129–138.

- Nolting, A.E., Underhill, P.R., DuQuesnay, D.L., 2008, Variable amplitude fatigue of bonded aluminum joints, *International Journal of Fatigue*, 30 (2008), 178–187.
- Özenç, M., 2007, Yapıştırma bağlantılarının darbe yükleri altındaki davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, *Fen BilimlerEnstitüsü*, Denizli.
- Palancıoğlu, H., 2011. Yapıştırılmış ve pim bağlantısı uygulanmış metal levhalardaki gerilmelerin analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Aksaray.
- Paris, P.C., Erdoğan, F., 1963, A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, *Transactions of ASME, journal of Basic Engineering*, D85, 528-534.
- Park, S.W., Kim, H. S., Lee, D.G., 2006, Optimum design of the co-cured double lap joint composed of aluminum and carbon epoxy composite, *Composite Structures*, 75 (2006), 289–297.
- Pereira, A.M., Ferreira, J.M., Antunes, F.V., Bartolo, P.J., 2009, Study on the fatigue strength of AA 6082-T6 adhesive lap joints, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 29 (2009), 633–638.
- Portillo, P., Dr. Kreiner, J., Dr. Lancey, T., 2007, Torsional fatigue behavior of adhesively joined tubes, *Journal of Materials Processing Technology*, 191 (2007), 339–341.
- Quaresimin, M., Ricotta, M., 2006, Fatigue behaviour and damage evolution of single lap bonded joints in composite material, *Composites Science and Technology*, 66 (2006) 176–187.
- Quaresimin, M., Ricotta, M., 2006, Life prediction of bonded joints in composite materials, *International Journal of Fatigue*, 28 (2006), 1166–1176.
- Reis, P.N.B., Monteiro, J.F.R., Pereira, A.M., Ferreira, J.A.M., Costa, J.D.M., Fatigue behaviour of epoxy-steel single lap joints under variable frequency, *International Journal of Adhesion&Adhesives*, 63(2015) 66–73.
- Rushforth, M.W., Bowen, P., McAlpine, E., Zhou, X., Thompson, G.E., 2004, The effect of surface pretreatment and moisture on the fatigue performance of adhesively-bonded aluminium, *Journal of Materials Processing Technology*, 153–154 (2004), 359–365.
- Shenoy, V., Ashcroft, I.A., Critchlow, G.W., Crocombe, A.D., AbdelWahab, 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 & Adhesives*, 29 (2009), 639–649.
- Shenoy, V., Ashcroft, I.A., Critchlow, G.W., Crocombe, A.D., AbdelWahab, M.M., 2009, Strength wearout of adhesively bonded joints under constant amplitude fatigue, *International Journal of Fatigue*, 31 (2009), 820–830.

- Shenoy, V., Ashcroft, I.A., Critchlow, G.W., Crocombe, 2010, Unified methodology for the prediction of the fatigue behaviour of adhesively bonded joints, *International Journal of Fatigue*, 32 (2010), 1278–1288.
- Shenoy, V., Ashcroft, I.A., Critchlow, G.W., Crocombe, 2010, Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue, *Engineering Fracture Mechanics*, 77 (2010), 1073–1090.
- Solana, A.G., Crocombe, A.D., Ashcroft, I.A., 2010, Fatigue life and backface strain predictions in adhesively bonded joints, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 30 (2010), 36–42.
- Solmaz, M.Y., 2008, Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mekanik analiz ve tasarımları, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ.
- Srivastava, V.K., 2011, Effect of carbon nanotubes on the strength of adhesive lap joints of C/C and C/C–SiC ceramic fibre composites, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31(2011), 486-489.
- Şahin, A., 2011, Kompozit Metal Köpük Malzemelerin Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Kesme Mukavemetinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, 55.
- Şekercioğlu, T., 2001, Yapıştırma bağlantılarının dinamik yükler altındaki davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli.
- Temiz,Ş., 2003, Yapışma Bağlantılarının Mekanik Özellikleri Üzerine Çevresel Faktörlerin Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 112.
- Underhill, P.R., DuQuesnay, D.L., 2006, The dependence of the fatigue life of adhesive joints on surface preparation, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 26 (2006), 62–66.
- Underhilla, P.R., Riderb, A.N., DuQuesnaya, D.L., 2006, The effect of warm water surface treatments on the fatigue life in shear of aluminum joints, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 26 (2006), 199–205.
- Ünal, E., 2006, Cam elyaflı kompozit malzemelerin atmosferik ortamda ve deniz ortamında yorulma simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir
- Veer, F.A., Zuidema, J., 2008, The relation between the adhesive application method and the fatigue lifetime for a photocatalytic adhesive joint, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 28 (2008), 291–295.

- Wang, O.Y., Pidaparti, R.M., 2002, Static characteristics and fatigue behavior of composite-repaired aluminum plates, *Composite Structures*, 56 (2002), 151–155.
- Yıldırım, M., 2011, Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Bağlantıların Düşük Hızlı Darbe Davranışları, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 15.
- Zhang, Y., P. Vassilopoulos, A., Keller, T., 2009, Environmental effects on fatigue behavior of adhesively-bonded pultruded structural joints, *Composites Science and Technology*, 69 (2009), 1022–1028.
- Zhai, L., Ling, G., Li, J., Wang, Y., 2006, The effect of nanoparticles on the adhesion of epoxy adhesive, *Materials Letters* 60 (2006) 3031–3033.
- Zhai, L., Ling, G., Li, J., Wang, Y., 2007, Effect of nano- Al_2O_3 on adhesion strength of epoxy adhesive and steel, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 28 (2007) 23–28.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : İsmail Saraç
Uyruğu : T.C
Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara-1980
Telefon : 0541 828 06 12
Faks :
e-mail : isarac1980@gmail.com

EĞİTİM

| Derece | Adı, İlçe, İl | Bitirme Yılı |
|---------------|----------------------------|--------------|
| Lise | : Mamak İ.H. Lisesi/Ankara | 1997 |
| Üniversite | : Pamukkale Üniv./Denizli | 2002 |
| Yüksek Lisans | : Fırat Üniv /Elazığ | 2013 |
| Doktora | : Batman Üniv./Batman | Devam ediyor |

İŞ DENEYİMLERİ

| Yıl | Kurum | Görevi |
|------------|---------------------------|------------------|
| 2003-2004 | İleri Makine-Ostim/Ankara | Makine Mühendisi |
| 2004-2005 | Eti Maden İşletmeleri | Makine Mühendisi |
| 2005- | T.P.A.O | Makine Mühendisi |

UZMANLIK ALANI

Yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin nanopartikül katkılarıyla iyileştirilmesi

YABANCI DİLLER

İngilizce (2017-Bahar Dönemi YDS Puanı :72,5)

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR

Saraç, İ., Adin, H., Temiz, Ş., 2016, Experimental determination of the mechanical properties of adhesive joints bonded epoxy adhesive included Al₂O₃ nanoparticle, European Journal of Technic, Vol 6, Number 2.