



**YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA YÜZEY
PÜRÜZLÜLÜĞÜ İLE NANOYAPI
KOMBİNASYONUN BAĞLANTI MUKAVEMETİ
ÜZERİNE ETKİSİ**

Abdulsamet KARS

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Salih AKPINAR**

**2024
Her hakkı saklıdır.**



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ İLE
NANOYAPI KOMBİNASYONUN BAĞLANTI MUKAVEMETİ ÜZERİNE
ETKİSİ**

Abdulsamet KARS

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Salih AKPINAR

Ana Bilim Dalı: Makine Mühendisliği

Erzurum

2024

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

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

10 / 09 / 2024

Abdulsamet KARS

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ İLE NANOYAPI KOMBİNASYONUN BAĞLANTI MUKAVEMETİ ÜZERİNE ETKİSİ

Abdulsamet KARS

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Salih AKPINAR

Günümüzde yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar mühendislik uygulamalarında son derece güçlü ve hafif bağlantılar oluşturmayı mümkün kıldıkları için havacılık, uzay ve otomotiv sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda en önemli faktörler yapıştırılan malzeme yüzeyinin pürüzlülüğü ve yapıştırıcının yüzeye etkileşimidir. Bu tez çalışmasında, çekme yüklemesine maruz kalan alın bağlantılarda yüzey pürüzlülüğü ve nanokompozit yapıştırıcının normal gerilme mukavemeti araştırılmıştır. Yapıştırılan malzeme olarak AA2024-T3 alüminyum alaşımı, yapıştırıcı olarak DP460 yapısal yapıştırıcı, nanoyapılar olarak Grafen ve Karbon Nanotüp-COOH kullanılmıştır. Yapıştırılan yüzeylere pürüzlülük kazandırmak için zımpara ve kumlama yöntemleri kullanılmıştır. İki boyutlu eksenel simetrik sonlu eleman modeli, bağlantı hasarı hakkında fikir edinmek için geliştirilmiştir. Deneylerden elde edilen hasar yükü incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü arttıkça maksimum kuvvet değerleri de artmaktadır. Ancak yüzey pürüzlülüğü yüksek değerlere ulaştığında bağlantı mukavemetindeki bu artış azalmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün miktarı yapıştırıcının yapıştırılan yüzeye yapışmasını azaltmasından dolayı bağlantının normal gerilme değerini azaltmıştır. Yapıştırıcıya ağırlıkça %1 Grafen nanoyapı ilave edildiğinde bağlantıların maksimum normal gerilimi %9'dan %21'e yükselmiştir. Aynı oranda Karbon Nanotüp-COOH ilave edildiğinde %27'den %62'ye çıkmıştır. Zımparalama ve kumlama yöntemleriyle elde edilen aynı pürüzlülük değerlerinde bağlantılarda farklı normal gerilme değerleri elde edilmiştir.

2024, 68 sayfa

Anahtar Kelimeler: Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar, Yüzey pürüzlülüğü, Nanoyapı ilaveli yapıştırıcılar, Alın bağlantı, Çekme testi

ABSTRACT

MS. Thesis

THE EFFECT OF COMBINATION OF SURFACE ROUGHNESS AND NANOSTRUCTURE ON STRENGTH IN ADHESIVELY BONDED JOINTS

Abdulsamet KARS

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Salih AKPINAR

Today, adhesive bonded joints are widely used in the aerospace and automotive industries as they make it possible to create extremely strong and lightweight connections in engineering applications. The most important factors in these applications are the roughness of the surface of the bonded material and the interaction of the adhesive with the surface. In this thesis study examined the normal tensile strength and surface roughness of nanocomposite adhesive in butt joints under tensile stress. The bonded material was aluminum alloy AA2024-T3, the adhesive was DP460 structural adhesive, and the nanostructures were graphene and carbon nanotube-COOH. To give the bonded surfaces more roughness, sanding and sandblasting techniques were employed. To learn more about joint damage, a two-dimensional axisymmetric finite element model was created. The maximal force values rise with increasing surface roughness when the damage load from the trials is analyzed. However, this rise in connection strength stopped when the surface roughness reached large values. Because the adhesive's adherence to the bonded surface decreased as a result of the surface roughness, the joint's normal stress value decreased. The adhesive's maximum normal tension rose from 9% to 21% upon the addition of 1% by weight of graphene nanostructure. It went from 27% to 62% when the same quantity of Carbon Nanotube-COOH was added. By using sanding and sandblasting techniques, different normal stress values were produced in the connections at the same roughness values.

2024, 68 pages

Keywords: Adhesively bonded joints, Surface roughness, Nanostructure added adhesives, Butt joint, Tensile test

TEŞEKKÜR

“Yapıştırma Bağlantılarında Yüzey Pürüzlülüğü ile Nanoyapı Kombinasyonun Bağlantı Mukavemeti Üzerine Etkisi” başlıklı bu çalışma, Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Mekanik Bilim Dalı’nda yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

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

Tüm hayatım boyunca maddi ve manevi her konuda yanımda olan, destek ve ilgilerini eksik etmeyen anneme, babama ve kardeşlerime sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam sırasında sayısal çalışmalarda verdiği destekten ötürü Doç. Dr. Murat DEMİRAL’a ve deneysel çalışmalarımda bana yardımcı olan Simay BAYRAMOĞLU’na çok teşekkür ederim.

Tez çalışma sürecimde arkadaşlığı ile her zaman destek olan Resül ŞAHİN’e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda desteği ve katkılarıyla her zaman sabır ve özveriyle yanımda olan kıymetli eşim Ebru YAVUZ’a sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Abdulsamet KARS
Eylül 2024

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Yapışma İşlemi	2
1.1.1. Yapışma teorileri (mekanizmaları)	3
1.1.1.1. Mekanik kilitleme teorisi	3
1.1.1.2. Elektrostatik teorisi	3
1.1.1.3. Difüzyon teorisi	4
1.1.1.4. Adsorpsiyon (yüzeye tutunma) teorisi	5
1.2. Yapıştırıcılar	5
1.2.1. Kürleşme mekanizmaları açısından yapıştırıcılar	6
1.2.1.1. Kimyasal reaksiyonla sertleşen yapıştırıcılar	6
1.2.1.2. Fiziksel değişimle sertleşen yapıştırıcılar	11
1.2.2. Formları açısından yapıştırıcılar	12
1.3. Yapıştırma Bağlantıları	13
1.3.1. Yapıştırma bağlantılarında hasar mekanizmaları.....	15
1.3.2. Yapıştırma bağlantılarında gerilme türleri	16
1.4. Yapıştırma Bağlantılarında Yapıştırılacak Yüzeyin Hazırlanma İşlemleri	17
1.4.1. Solvent temizleme.....	18
1.4.2. Mekanik aşındırma.....	18
1.4.3. Kimyasal işlem	19
1.5. Yapıştırma Bağlantılarının Avantaj ve Dezavantajları	20
1.6. Yapıştırma Bağlantıları Mekanik Özellikleri ve Test Yöntemleri	22
1.6.1. Deneysel yöntemler.....	22
1.6.1.1. Çekme testi	23

1.6.1.2. Kayma testi	23
1.6.1.3. Soyulma testi	24
1.6.1.4. Ayrılma testi	24
1.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi	25
1.7.1. Sonlu elemanlar yönteminin avantajları	26
1.7.2. Sonlu elemanlar analizi	26
1.7.2.1. Model oluşturma (preprocessing)	26
1.7.2.2. Çözümleme (solution)	28
1.7.2.3. Sonuçların değerlendirilmesi (postprocessing)	29
1.8. Sayısal Analizde Cohesive Zone Modeli	30
2. KAYNAK ÖZETLERİ	31
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	38
3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler	38
3.2. Yapıştırma Bağlantısı Numunelerinin Hazırlanması	39
3.2.1. Yapıştırılan numunelerin hazırlanması	39
3.2.2. Yapıştırıcıların hazırlanması	40
3.3. Yapıştırma Bağlantılarının Hazırlanması	42
3.4. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantıların Test Prosedürü	44
3.5. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantıların Nümerik Analizi	45
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	49
4.1. Zımparalama ve Kumlama Yüzey Ön İşlemlerinin Yapıştırılan Numune Üzerindeki Etkisinin Araştırılması	49
4.2. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Silindirik Alın Bağlantıların Test Sonuçları	51
4.3. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Silindirik Alın Bağlantıların Test Sonuçlarının Sayısal Analiz ile Karşılaştırılması	58
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR	63
EKLER.....	68
EK 1.....	68

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

°	Derece
cm	Santimetre
J	Joule (enerji birimi)
kHz	Frekans birimi
m	Metre
mm	Milimetre
nm	Nanometre (dalga boyu)
ns	Nanosaniye
Ra	Ortalama pürüzlülük
sp	Sandpaper (zımpara kağıdı)
sb	Sandblasting (kumlama)

Kısaltmalar

AA2024	Havacılık alüminyum alaşımı (2000 serisi)
ASTM	The American Society for Testing and Materials (Amerikan test ve malzeme kurumu)
BJ	Butt joint (alın bağlantı)
CZM	Cohesive zone model
FPL	Orman ürünleri laboratuvarı
FEM	Finite element method (sonlu elemanlar yöntemi)
GFRP	Cam elyaf takviyeli polimer plakalar
GNP	Grafen nanopartikül
ISO	International Organization for Standardization (Uluslararası standartlar örgütü)
MWCNT	Çok duvarlı karbon nanotüp
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SiC	Silisyum karbür
USA	United States of America (Amerika birleşik devletleri)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda adhezyon ve kohezyon olaylarının şematik gösterimi.....	2
Şekil 1.2. Difüzyon yapışma teorisi, (a) yapıştırıcı molekülleri, (b) yapıştırılan malzeme molekülleri, (c) arayüz boyunca interdifüzyon.....	4
Şekil 1.3. Yaygın yapıştırma bağlantı türleri; a) tek tesirli bindirme, b) çift tesirli bindirme, c) boyun bindirme, d) açılı bindirme, e) teraslama (kademeli), f) tek takviyeli bindirme, g) çift takviyeli bindirme, h) alın bağlantı, i) silindirik bindirme, j) soyulma	14
Şekil 1.4. Hasar mekanizmaları türleri; a) kohezyon hasarı, b) adhezyon hasarı, c) yapıştırılan malzemedeki delaminasyon (ayırılma) hasarı.....	16
Şekil 1.5. Yapıştırma bağlantılarında oluşan dört temel gerilme türü; a) çekme gerilmesi, b) kesme (kayma) gerilmesi, c) soyulma (peel) gerilmesi, d) ayrılma (cleavage) gerilmesi.....	16
Şekil 1.6. Çekme testi temel geometrisi	23
Şekil 1.7. Kayma testi temel geometrisi.....	24
Şekil 1.8. Soyulma testi temel geometrisi	24
Şekil 1.9. ASTM tarafından önerilen standart D 3433 Cohesive Zone Hasar Modeli...	30
Şekil 3.1. AA2024-T3 alüminyum alaşım malzemesinin mekanik özellikleri	38
Şekil 3.2. DP460 yapıştırıcısının mekanik özellikleri.....	38
Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan alın bağlantı geometrisi	39
Şekil 3.4. a) Zımparalama cihazı, b) 3D profilometre cihazı, c) kumlama cihazı, d) yüzeyi hazırlanmış parçalar	40
Şekil 3.5. a) Ultrasonik karıştırıcı ile epoksi ve nanoyapının karıştırılması, b) kurutma fırını, c) hassas terazi ile epoksi ve nanoyapı miktarının kontrolü	41
Şekil 3.6. a) Özel tasarlanmış üretim kalıbı ve konum sabitleyici levhalar, b) bağlantı numunelerinin yerleştirilmesi ve metal shims, çekme gerilmesi, c) sıcak fırın, d) kurluşma sonrası temizlenmiş bağlantı numuneleri.....	43
Şekil 3.7. Çekme testi sınır koşulları ve yükleme	45
Şekil 3.8. Çekme yüklemesine maruz kalan alın bağlantısı için geliştirilen sonlu eleman modelinin detayları.....	46

Şekil 4.1. Zımparalanmış alüminyum yüzeylerin 3 boyutlu yüzey pürüzlülüğü ölçümleri	50
Şekil 4.2. Kumlanmış alüminyum yüzeylerin 3 boyutlu yüzey pürüzlülüğü ölçümleri.	51
Şekil 4.3. Pürüzlülük değişiminin maksimum bağlantı kopma yüküyle karşılaştırılması	52
Şekil 4.4. Zımparalama yöntemiyle pürüzlendirilmiş bağlantılarda maksimum normal gerilme ile yüzey pürüzlülüğünün karşılaştırılması.	53
Şekil 4.5. Kumlama yöntemiyle pürüzlendirilmiş bağlantılarda maksimum normal gerilme ile yüzey pürüzlülüğünün karşılaştırılması.	54
Şekil 4.6. Zımpara yöntemiyle pürüzlendirilmiş bağlantıların hasar yüzeyleri	55
Şekil 4.7. Kumlama yöntemiyle pürüzlendirilmiş bağlantıların hasar yüzeyleri	56
Şekil 4.8. Katkısız ve karbon nanotüp-COOH katkılı bağlantıların SEM görüntüsü, a) BJ-sp-400, b) BJ-sp-400-G, c) BJ-sp-400-C.....	58
Şekil 4.9. Yüzey pürüzlülüğü içermeyen ve içeren yapıştırılan malzemeler için yapıştırıcı tabakası üzerindeki hasar dağılımı	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantı noktaları için deneysel parametreler.	44
Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemenin mekanik özellikleri	47
Çizelge 3.3. CZM modelleme için DP460 yapıştırıcının özellikleri	48
Çizelge 4.1. Sayısal ve deneysel olarak elde edilen maksimum normal gerilmelerinin karşılaştırılması.....	59



1. GİRİŞ

1. GİRİŞ

Malzemeleri birleştirmek, birbirine eklemek ve onları bir bütün olarak kullanım süreleri boyunca bir arada tutmak maksadıyla geçmişten bugüne kadar birçok teknik ve malzeme kullanılmaktadır. Bu malzeme ve teknikler içerisinde cıvata, perçin, lehim, kaynak gibi geleneksel birleştirme yöntemleri bulunmaktadır (Akpınar 2008). Yapıştırıcı ile birleştirme metodu bu yöntemlere kıyasla kullanımı daha kolay ve daha pratik olan bir tekniktir. Yapıştırıcı ile birleştirme metodundaki hızlı gelişmelerle, yapıştırma bağlantıları; üretim kolaylığı, kullanım alanına göre bağlantı güvenilirliğinin gerekli olduğu, uzay-havacılık, otomotiv, gemi gibi birçok mühendislik alanında kullanılmaktadır (Hülagü 2018).

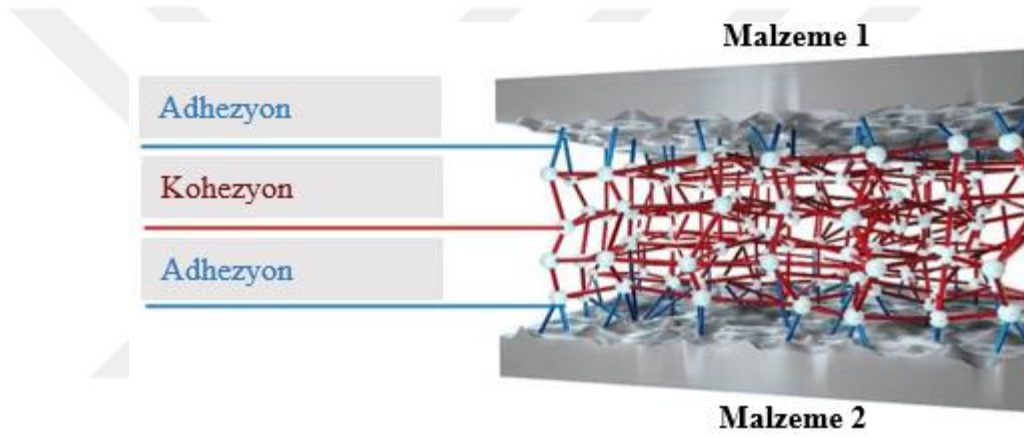
Kompozit malzemeler ve kompozit malzemelerin üretim yöntemlerinde son 30 yılda önemli atılımlar gerçekleştirilmiştir. Meydana gelen hızlı gelişim bağlantı güvenilirliğinin gerektiği, havacılık-uzay, gemi, otomotiv sanayi gibi sektörlerde bu malzemelerin kullanılması halinde geleneksel birleştirme yöntemlerinden uzaklaşılmasını zorunlu hale getirmiştir. Yapıştırıcıların birleştirme yöntemi olarak, farklı malzemeler, kompozitler ve plastiklerin birleştirilmesinde kullanılması hızlı bir şekilde artmaktadır (Özenç 2007). Yaygın kullanım alanları ve büyük avantajlar sunmasına karşın yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılar, yapıştırma bağlantılarının ve yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi, güvenilirliği ve tekrarlanabilirliğinde büyük zorluklar oluşturmaktadır. Yapısal yapıştırıcıların ve bağlantılarının mekanik özelliklerinin doğru olarak belirlenmesinin yanı sıra, verilen bir yükleme durumu için yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantının mukavemetinin tahmini başka faktörlerin anlaşılmasını da zorunlu kılar. Materyal seçimi, yük ve yükün büyüklüğü, yapısal geometri, seçilen materyaller için uygun hasar kriterlerinin belirlenmesi ve yapıştırılan malzemenin mekanik özellikleri temel faktörlerdir (Akpınar 2012).

Yapıştırma, endüstriyel bir birleştirme yöntemi olarak kullanılmaya başlandığından itibaren birçok araştırmacı yapıştırıcılar ve yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışlarının belirlenmesi üzerine birçok araştırma, geliştirme ve mühendislik çalışması yapmıştır (Özenç 2007; Akpınar 2012).

1. GİRİŞ

1.1. Yapışma İşlemi

Yapışma, iki ya da daha fazla benzer veya farklı yapıştırılan malzemeyi, yapıştırıcı kullanarak yüzeyden yüzeye birleştirme işlemidir (Brockmann et al. 2009). Yapıştırıcılardan ve yapıştırılan malzemelerden talep ettiğimiz çoklu fiziksel, reolojik, mekanik ve kimyasal özellikler iki temel mekanizmaya indirgenebilir: adhezyon ve kohezyon. Adhezyon, iki madde arasında oluşan moleküller arası kuvvetlerden kaynaklanan temas yüzeylerindeki yapışma kuvvetidir. Bu kavram, yapıştırıcı içindeki moleküller arası kuvvetleri içeren ve yapıştırıcıyı bir arada tutan kohezyondan farklıdır (Şekil 1.1) (Da Silva et al. 2011).



Şekil 1.1. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda adhezyon ve kohezyon olaylarının şematik gösterimi (Anonim 2024).

Yapıştırma; cıvatalama, perçinleme gibi klasik mekanik birleştirme tekniklerine nazaran önemli avantajlara sahiptir. Daha iyi gerilim dağılımı sağlaması, ağırlıktan tasarruf etmesi ve yapıştırma hattının uygulamada görünmez olması nedeniyle estetiklik sunması bu avantajlar arasındadır (Mittal and Pizzi 1999).

İyi bir yapışma elde etmek için; uygun yapıştırıcı seçilmesine, yapıştırılacak malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliğine, uygun bağlantı tipinin seçilmesine, yapıştırılacak yüzeylerin ıslanabilirliğine ve yapıştırıcının kürleşme prosedürüne bakılır (Wang et al. 2012).

1. GİRİŞ

1.1.1. Yapışma teorileri (mekanizmaları)

Yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında meydana gelen etkileşimleri doğru bir şekilde modellemek için tek bir yapışma mekanizması (teorisi) yoktur. Yapışma mekanizmaları, uygulamadaki gözlemleri rasyonelleştirecek metotlar sağlar. Yapıştırıcıların neden yapıştığını ve neden bazen başarısız olduklarını anlamada fayda sağlar. Yapışma mekanizmaları, tahminlerde bulunmamıza ve bağlantı kuvvetinin niteliksel olarak gerçekleşmesine olanak sağlar. Mekanizmaların her birinin çok uygun olduğu belirli uygulamalar vardır, ancak hiçbirisi evrensel olarak geçerli değildir (Petrie 2000).

Yapışma mekanizmalarını açıklamak için tarihsel olarak mekanik kilitleme, elektrostatik, difüzyon, adsorpsiyon teorileri öne sürülmüştür (Ebnesajjad 2010).

1.1.1.1. Mekanik kilitleme teorisi

Katı bir malzemenin yüzeyi tamamen pürüzsüz değildir, girintiler ve çıkıntılardan oluşmaktadır. Bir zamanlar, yapışmanın sadece yapıştırıcının akması ve malzeme üzerindeki mikro boşlukları doldurmasıyla meydana geldiği düşünülüyordu. Daha sonra yapıştırıcı sertleştğinde yüzeyler mekanik olarak birleşir. Mekanik kilitleme teorisine göre, yapışmanın düzgün gerçekleşmesi için, yapıştırıcının yüzeydeki gözeneklere nüfuz etmesi, ara yüzeyde sıkışan havanın yerini değiştirmesi ve alt tabakaya mekanik olarak kilitlenmesi gerekir. Yüzey aşınma nedeniyle pürüzlü olsa bile, malzeme yüzeyinin hem fiziksel hem de kimyasal özelliklerinde oluşan ve yapıştırıcı kuvvetinde artışa neden olan değişiklikler olduğuna yaygın olarak inanılmaktadır. Yapıştırıcı uygulamalarının bazıları mekanik kilitleme ile açıklanabilirken, mekanik etkilerin birincil öneme her zaman sahip olmadığı gösterilmiştir.

1.1.1.2. Elektrostatik teorisi

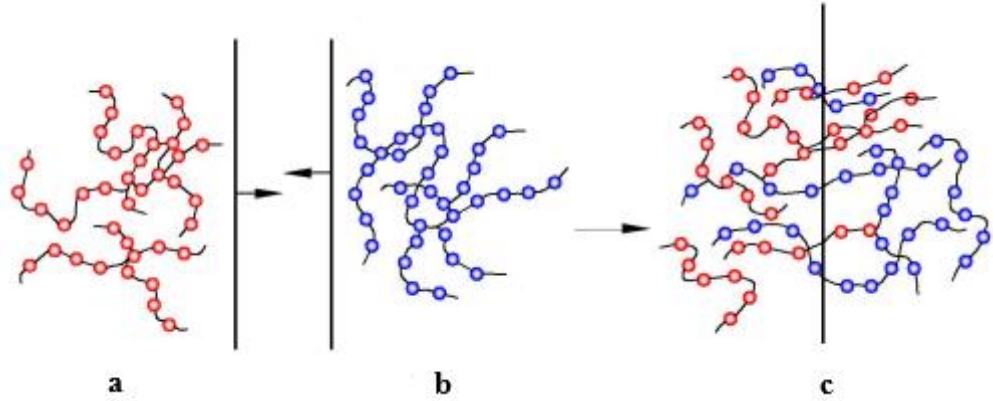
Elektrostatik yapışma teorisine göre yapışmanın, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin ara yüzündeki elektriksel çift tabaka şeklindeki elektrostatik kuvvetlerle oluştuğu düşünülmektedir. Bu kuvvetler ayrılmaya karşı direnci açıklamaktadır. Bu teori

1. GİRİŞ

yapıştırıcının, yapıştırılan malzemeden sıyrıldığında elektrik deşarjlarının farkına varılması gerçeğinden destek almıştır (Petrie 2000). Temas ara yüzeyindeki bileşenler arasındaki elektrostatik yük farkı, çekim bağının kuvvetine katkı sağlamaktadır. Ara yüzün gücü, yükün yoğunluğuna bağlıdır. Bu çekimin, ara yüzeyin nihai bağ gücüne önemli ölçüde katkı sağlaması pek olası değildir (Baldan 2012).

1.1.1.3. Difüzyon teorisi

Difüzyon teorisi, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme arasındaki yapışmanın makro moleküllerin interdifüzyonu ile sağlanacağını açıklar. Bu teoriye göre hem yapıştırıcı hem de yapıştırılan malzeme; nispeten uzun, hareket edebilen zincirli moleküllere sahip, karşılıklı olarak karışabilen ve uyumlu polimerler olduğunda uygulanabilir.



Şekil 1.2. Difüzyon yapışma teorisi, (a) yapıştırıcı molekülleri, (b) yapıştırılan malzeme molekülleri, (c) arayüz boyunca interdifüzyon (Fourche 1995).

Şekil 1.2, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme arasındaki yapışmanın nasıl meydana geldiğini açıklamaktadır. Makromoleküllerin interdifüzyonu arasındaki etkileşimle, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında yapışma ile sonuçlanan geçici bölge oluşturulabilir. Difüzyon teorisi için, makromoleküller yapışmanın gücünü ve etkileşim sürecini belirleyen önemli faktörlerdir. Makromoleküller, makromolekülün uzunluğundan, konsantrasyonundan ve sıcaklıktan etkilenir (Ghanem and Lang 2017).

1. GİRİŞ

1.1.1.4. Adsorpsiyon (yüzeye tutunma) teorisi

Adsorpsiyon teorisine göre yapışmanın, iki malzeme arasındaki moleküler temastan ve oluşan yüzey kuvvetlerinden gerçekleştiği belirtilmektedir. Yapışma, yapıştırıcı moleküllerinin, yapıştırılan malzeme üzerine tutunmasından kaynaklanan, ikincil veya van der Waals kuvvetleri olarak bilinen çekici kuvvetler etkisi ile gerçekleşmektedir. Bu kuvvetlerin oluşması için, yapıştırıcının, yapıştırılan malzeme yüzeyi ile yakın moleküler temas kurması gerekir (Petrie 2000).

1.2. Yapıştırıcılar

Yapıştırıcılar, insanlar tarafından yüzyıllardır birleştirme aracı olarak kullanılmaktadır. Bununla beraber, yapıştırma işlemi, yapıştırıcı bilimi ve teknolojisi son elli yılda önemli ölçüde ilerlemiştir. Bu durumun temelinde teknik açıdan zor uygulamaların çoğunluğunda kullanılan yapıştırıcıların sentetik polimerlere dayalı olması yer almaktadır. Ancak sentetik polimerler son elli yıldır mevcuttur. Sentetik polimerlerin, diğer malzemelerle kolayca yapışmaları, uygulanan yükleri yapıştırılan bir malzemeden diğerine iletmeleri gibi yeterli kuvvete sahip özellikleri vardır.

Yapıştırıcı (adhesive), malzemelerin yüzeyine uygulanarak birleştirme sağlayan ve ayrılmaya karşı direnç gösteren malzemedir. Birleştirilen malzemelere, alt tabakalar veya yapıştırılan malzemeler (adherend, substrate) denir (Kinloch 1997).

Yapıştırıcılar birleştirme işleminden önce çeşitli formlarda bulunmaktadır. Bunlar; ince sıvılar, kalın macunlar, filmler, tozlar, eritilmesi gereken katılar şeklindedir. Yapıştırıcılar; kağıtları yerinde tutmak için zayıf yapıştırıcılardan, araba ve uçakları yapıştırmak için yüksek mukavemetli yapısal sistemlere kadar büyük bir güce sahip şekilde tasarlanabilir. Günümüzde kullanılmakta olan yapıştırıcılar, kimyasal tipleri (kürleşme mekanizmaları) ve formları açısından iki temel grupta sınıflandırılabilir (Dunn 2004).

1. GİRİŞ

1.2.1. Kürleşme mekanizmaları açısından yapıştırıcılar

Kürleşme mekanizmaları açısından yapıştırıcılar, kimyasal reaksiyonla sertleşenler (yapısal yapıştırıcılar) ve fiziksel bir değişimle sertleşenler olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Her iki sınıf da endüstriyel dünyada önemli olmasına rağmen, yalnızca kimyasal reaksiyonla sertleşen yapıştırıcılar yüksek düzeyde sürekli yüklemeyi tolere edebilirler ve bu nedenle de yapısal yapıştırıcılar olarak uygundur (Adderley 1988).

1.2.1.1. Kimyasal reaksiyonla sertleşen yapıştırıcılar

Kimyasal reaksiyonla sertleşen yapıştırıcılar, sıradan yapıştırıcıların aksine genellikle ağır yükleri desteklemesi amaçlanarak tasarlanmış yüksek mukavemetli malzemelerdir. Bu yapıştırıcılar yüksek ve düşük sıcaklık döngülerine, agresif sıvılara ve hava koşullarına maruz kalmaktadır. Yapıştırıcılarda hareket, darbe veya titreşim etkilerine karşı koymak için bir dereceye kadar esneklik veya tokluk istenmesine rağmen, bu yapıştırıcılar genellikle sert yapıların yapıştırılmasında kullanılır.

Malzemelerin birleştirilmesi için yapısal yapıştırıcılar çeşitli avantajlar sunar:

- Yükler tüm eklem bölgesine dağıtılır.
- Mükemmel yorulma özellikleri gösterirler.
- Mekanik titreşimleri ve gürültüyü azaltırlar.
- Genellikle hem yapıştırıcı olarak hem de su veya diğer sıvıların girişine karşı sızdırmazlık maddesi olarak ikili bir amaca hizmet eder.
- Düşük elektrik iletkenlikleri nedeniyle farklı metaller arasındaki galvanik korozyonu önemli ölçüde önler.
- Yapıştırıcı ile oluşturulan derzler, kaynak veya vida ile yapılan birleştirmelere göre daha iyi görsel görünümüne sahiptir.
- Yapıştırıcıların montajı genellikle mekanik yöntemlerden daha uygun ve ekonomiktir (Baldwin 1986).

1. GİRİŞ

Aşağıda, günümüzde kullanılan ve kimyasal reaksiyonla sertleşen kimyasal yapıştırıcılar şunları içerir: anaerobik yapıştırıcılar (silindirik şekilleri yapıştırmak için uygundur), epoksi yapıştırıcılar (yüksek mukavemete ve sıcaklık direncine sahiptir), sertleştirilmiş akrilik yapıştırıcılar (hızlı kürlenme ve daha kirli ve daha az hazırlanmış yüzeyleri tolere etme özelliklerine sahip çok yönlü yapıştırıcılar), poliüretan yapıştırıcılar (düşük sıcaklıklarda iyi esneklik ve yorulmaya karşı dirençli), siyanoakrilat yapıştırıcılar (plastik ve kauçuğa hızlı bağlanma özellikleri, ancak nem ve sıcaklığa karşı zayıf esneklik), fenolik yapıştırıcılar (kısa süreler için iyi mukavemet koruması, termal şoklara karşı sınırlı direnç) (Banea and Da Silva 2009).

Anaerobik yapıştırıcılar: Yapıştırıcı kullanımının ekonomisi hakkında oluşan büyük bir farkındalık, mekanik montaj maliyetlerini düşürmek için devam eden arzuların sonucudur. Akrilik yapıştırıcılar, düşük maliyetleri ve üstün çekme mukavemetleri nedeniyle diğer yapıştırıcı türlerine göre tercih edilmektedir. Bu yapıştırıcıların çeşitli formları bulunmaktadır, ancak anaerobik yapıştırıcıların metal bileşenleri kilitlemek, yalıtım ve tutmak için özellikle yararlı olduğu gösterilmiştir.

Anaerobik yapıştırıcılar, oda sıcaklığında ve yalnızca havasız ortamlarda sertleşen tek bileşenli akrilik yapıştırıcılardır. Başlıca kullanımları, boru bağlantı parçalarının sızdırmazlığı, dişli parçaların kilitlenmesi, yataklar ve burçlar gibi eş eksenli olarak takılan elemanların tutulması ve yerinde üretilen contalar içindir. Yapısal uygulamalarda kullanılabilen sertleştirilmiş sistemler haricinde, anaerobik bileşimler, yapıştırıcılardan ziyade esas olarak sızdırmazlık maddesi olarak kullanılır. Standart ürünlerin yüzeylerle yakın temas kurabilmeleri ve vidalı geçme ve tutma uygulamalarında yaşanan derz yüklerini taşıyabilecek yüksek basınç dayanımları etkili olmalarının başlıca sebepleridir. Normalde ürünler sıvı formda kullanılır. İyi ısılatma ve bazı durumlarda nüfuz etme özellikleri, eşleşen bileşenler arasındaki boşluğu tamamen doldurmayı mümkün kılar. Düşük viskozite dereceleri, dökümlerdeki mikro gözenekleri veya boru bağlantılarındaki küçük sızıntı yollarını kapatmak için kullanıldığında, bu özellik bilhassa yararlıdır.

Yapıştırıcı, bileşenlerin yüzeyleriyle temas ederek katalize edilen hava çıkarıldığında polimerleşmeye başlar. Sıcaklık, bağ çizgisi kalınlığı ve yüzey aktivitesi, bir malzemenin sertleşme hızını etkilemektedir. Uygulamaya göre birçok anaerobik

1. GİRİŞ

sistem sertleşme hızı uyarlanmıştır. Bazı uygulamalar hızlı bir sertleşme gerektirebilir (nihai mukavemetin %80'ine 1-2 saatte ulaşılmalı ve taşıma mukavemetine 5-15 dakikada ulaşılmalıdır), ancak seri olarak kilitlenen boru bağlantıları, montajın sürtünme ısısının hızlı sertleşen bir yapıştırıcının erken sertleşmesine neden olacağı girişim bağlantı parçaları ve flanş cıvatalarını sıkılamak için yeterli sürenin verilmesi gereken conta uygulamaları dahil olmak üzere belirli durumlarda gecikmeli sertleşme gerektirir (Baldwin 1986).

Epoksi yapıştırıcılar: Havacılık, endüstri ve otomotiv endüstrilerinde, epoksiler geleneksel olarak metallerin ve kompozitlerin yapısal olarak yapıştırılması için kullanılan ana yapıştırıcı ailesi olmuştur. Epoksiler, uzun bir başarılı yapısal bağlama geçmişine sahiptir ve 1970'lerden beri kullanılmaktadır. İyi termal ve çevresel dirence sahip olan ve çeşitli metallere bağlanan sert, eriyemez reçinelere kürlenmeleri ile ayırt edilirler. Isıyla sertleşen tek bileşenli varyantları olduğu gibi iki bileşenli versiyonları da mevcuttur ve yıllar boyunca, çeşitli kullanımlar için kelimenin tam anlamıyla yüzlerce formülasyon geliştirilmiştir.

Tipik bir iki bileşenli epoksi yapıştırıcı, aşağıdaki bileşenlerden oluşur: epoksi reçine; sertleştirici; dolgu maddeleri; plastikleştiriciler; hızlandırıcılar; reaktif seyreltici ve sertleştirici maddeler. Epoksi reçine ve sertleştirici, yapıştırıcının iki bileşeninde ayrı tutulur, ancak viskoziteyi değiştirmek ve iki bileşenin karışım oranını değiştirmeye yardımcı olmak için diğer bileşenler herhangi bir kısma dahil edilebilir. Epoksi reçine sistemlerinin çok yönlü olması, her biri elde edilen polimerde farklı bir sertleşme profili ve farklı bir moleküler yapı ile sonuçlanan epoksi reçine ve sertleştirici kombinasyonlarının çeşitliliğinden kaynaklanmaktadır. Epoksiler metallere, seramiklere ve cama kolaylıkla yapışan güçlü, çok yönlü yapıştırıcılardır.

Epoksilerin, iki bileşenli (veya ısıyla sertleşen) formları, yağlı yüzeylerde zayıf performansları, doğal sertlik eksikliği ve plastiklere sınırlı yapışma yeteneği gibi dezavantajları vardır. Yaklaşık 20 yıl öncesinden beri, araştırmacılar epoksilerin geleneksel zayıflıklarından biri olan kırılganlığa odaklanıyor ve karboksi sonlu bütadien-akrilonitril gibi kauçuklar dahil ederek daha sert epoksiler üretmek için önemli atılımlar yapmışlardır (Dunn 2004). Sertlikleri, yüksek sıcaklık performansları, kimyasal

1. GİRİŞ

dirençleri ve yapışkan nitelikleri nedeniyle epoksi yapıştırıcılar, kaplamalar, yapıştırıcılar, yalıtım malzemeleri ve lifli kompozitler için yaygın şekilde kullanılmaktadır (Wang et al. 2012).

Sertleştirilmiş akrilik yapıştırıcılar: Akrilik yapıştırıcılar, oksijensiz ortamda ve oda sıcaklığında aktivatör ile kürleşir. Oksijen ile teması önlemek için yapıştırma yüzeyi en az 5 mm genişliğinde olmalıdır. Yapıştırıcı sadece aktivatör ile temas ettiğinde sertleştiğinden, montaj sırasında açık kalma süresi veya karıştırılan malzemelerin anında kullanımı ile ilgili herhangi bir zorluk yoktur.

Yapıştırıcı türüne bağlı olarak yapıştırıcı ve aktivatör yapıştırılacak yüzeylere ayrı ayrı sürülebilir veya uygulamadan hemen önce statik karıştırıcı da karıştırılabilir. Bazı yapıştırıcılar, düşük viskoziteli bir aktivatörün kullanılmasını gerektirir. Bu yapıştırıcılar asla bir aktivatör ile karıştırılmaz. Yapıştırıcı ve aktivatör her zaman ayrı ayrı uygulanır. Yapıştırıcı, iki parça temas ettiğinde sertleşmeye başlar. Sıvı aktivatörü ortadan kaldıran, yapıştırıcı ve aktivatör ile aynı viskoziteye sahip akrilik yapıştırıcılar mevcuttur. Bunların iki bileşenli sistemler olması nedeniyle, yapıştırıcı ve aktivatörün üst üste binen veya yan yana şeritler halinde uygulanmasını gerektirir. Yapıştırılacak parçalar birleştirilirken yapıştırıcı da karışmış olur. Karıştırılan yapıştırıcı 5 dakika veya daha fazla bekleyebiliyorsa, statik bir karıştırıcı da kullanılabilir. Statik bir karıştırıcı ile önceden karıştırılmış olan yapıştırıcının kullanılması, karıştırmanın montaj sırasındaki hareketten bağımsız olması avantajına sahiptir.

Akrilik yapıştırıcılar hem plastikler hem de metaller için iyi soyulma mukavemetine sahiptirler. -110 °C ile 120 °C arasında elastik özelliklerini değiştirmeden korurlar. Bu yapıştırıcılar nemli koşullara dayanabilir ve nemin mukavemetleri üzerinde herhangi bir olumsuz etkisi yoktur. Ancak bu yapıştırıcılar sıcak ortamlarda alev alabilir ve yüksek sıcaklıklarda zamanla bozulurlar (Aydın vd. 2011).

Poliüretan yapıştırıcılar: Poliüretan yapıştırıcılar, poliöl ve izosiyanatın reaksiyona girmesi ile poliüretan oluşturan sert yapıştırıcılardır. Tekrarlanan üretan bağlantısı, izosiyanat grubunun bir poliölün hidroksil grubuyla etkileşimiyle oluşturulmaktadır. Poliüretanlar, yüksek soyulma mukavemeti ile güçlü bağlantılar

1. GİRİŞ

oluşturmak için, çeşitli sertliklerde ve esneklik derecelerinde formüle edilebilen çok yönlü sistemlerdir. Poliüretan yapıştırıcılar, bir veya iki bileşenli sistemler şeklinde üretilmektedir (Dunn 2004).

Tek bileşenli yapıştırıcılar, havadaki nemle veya bağlı yüzeylerde bulunan fonksiyonel gruplarla reaksiyona girerek polimerize olurlar. İki bileşenli yapıştırıcılar ise yapıştırma yüzeylerine uygulanmadan hemen önce karıştırılarak aktivatör yardımıyla polimerize olurlar. Genellikle oda sıcaklığında hızlı sertleşme süreleri, yüksek darbe direnci, su ve kimyasal direnç ve yapıştırma yüzeylerine mükemmel yapışma poliüretan yapıştırıcıların özellikleridir (Janik et al. 2014).

Poliüretan yapıştırıcılar, her türlü sandviç eleman, gemiler, trenler, kamyonlar, konteynerler, ince levha yapıştırma ve soğuk hava deposu elemanları dahil birçok alanda kullanılmaktadır (Strobech 1990).

Siyanokrilat yapıştırıcılar: Tek bileşenli bu yapıştırıcılar, yapıştırılacakları yüzeylerde nem ile reaksiyona girerek, ek enerjiye ihtiyaç duymadan ortam koşullarında sertleşirler. Yalnızca birkaç saniye içinde çok hızlı bir şekilde sertleşirler (Adderley 1988). Anında yapışan yapıştırıcılar olmaları bakımından diğer yapıştırıcı sınıflarından ayrılırlar.

Bu özellikleri ve çeşitli farklı yüzeylere yapışma kapasiteleri nedeniyle çeşitli yapıştırma uygulamaları için mükemmel yapıştırıcılardır. Her bağ için genellikle tek bir damla gerekir ve pratik olarak anında oda sıcaklığında sertleşmesi, oldukça yüksek toplu maliyetlerine rağmen demirbaşlara, fırınlara ve pahalı radyasyon kaynaklarına olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Bu durum siyanokrilat yapıştırıcıları gerçek uygulamalarda kullanmak için son derece uygun maliyetli hale getirir (Coover et al. 1990).

İyi birleştirilmiş iki yüzey arasına ince bir yapışkan filmin uygulanması, bir siyanokrilat yapıştırıcının başarılı bir şekilde uygulanmasının en önemli aşamasıdır. Yapışkan filmi ne kadar ince olursa, bağ oluşum hızı o kadar hızlı ve bağ kuvveti o kadar yüksek olur. Güçlü bağlar için uygun şekilde hazırlanmış bir yüzey gereklidir.

1. GİRİŞ

Fenolik yapıştırıcılar: Fenolformaldehit yapıştırıcılar olarak bilinen bu yapıştırıcılar, monohidrik bir fenol ve formaldehitin yoğunlaşma ürünleridir. Bu yapıştırıcılar, sıcaklık ve yüksek basınçla kürlenir. Fenolikler, ısıyla sertleştirilebilir, tek bileşenli sıvı çözelti ve toz veya katalizörlerin eklenmesi gereken sıvı çözelti olarak sağlanır. Ayrıca en düşük maliyetli yapıştırıcılar arasındadır ve ahşap yapıştırıcı alanına hakimdirler (Ebnesajjad 2010).

Fenolik yapıştırıcılar, ısıya, neme kimyasallara karşı üstün mukavemeti ve esnekliği nedeniyle öncelikle yapısal yapıştırma uygulamalarında kullanılır (Hartshorn 2012). Fenolik yapıştırıcıların ana özellikleri; yüksek mekanik dayanım, iyi solvent ve su direnci, alev geciktirici ve yüksek termal kararlılıktır. Başlıca kullanım alanları; ahşaplar, aşındırıcı tekerler, dökümhane kalıpları, fren balataları ve elektronik endüstrisidir (Hussey and Wilson 1996).

1.2.1.2. Fiziksel değişimle sertleşen yapıştırıcılar

Fiziksel değişimle sertleşen yapıştırıcılar, kimyasal reaksiyonla sertleşen yapıştırıcılara kıyasla çok daha düşük mukavemete ve kalıcılığa sahiptirler. Genel olarak, zayıf alt tabakaları yapıştırmak veya geçici sabitleme için kullanılır. Bu özelliklerine rağmen genellikle kullanımları kolaydır. Ayrıca, bu yapıştırıcılar yapısal olmayan yapıştırıcılar olarak da adlandırılır. Aşağıda, günümüzde yaygın olarak kullanılan ve fiziksel değişimle sertleşen yapıştırıcılar yer almaktadır (Petrie 2000).

Sıcak eriyik yapıştırıcılar: Katı malzemelerden oluşan sıcak eriyik yapıştırıcılar, alt tabakalara sıcak bir sıvı olarak uygulandığında hızla katılaşarak yapışkan bir bağ oluşturan tek bileşenli malzemelerdir. Uygulamalarını kolayca otomatik bir hale getirebilirler. Ahşabı, birçok plastiği, kağıt ve kartonu yapıştırmak için kullanılabilirler. Ancak alt tabaka ısıyı çok hızlı ilettiği için metalleri yapıştırırken ısılatma miktarını sınırlar ve sorun yaşarlar (Adams 2021).

Gereken sıcaklığı ve kaplama oranını kontrol etmek için gerekli uygulama ekipmanı kullanılarak ısıtılmaları gerekir. Sıcak eriyikler, uygulamadan sonra ısı kaynağı kapatıldığında (birkaç saniye içinde) hemen sertleşirler. Bu nedenle, sıcak eriyikler

1. GİRİŞ

yüksek hız gerektiren sürekli yapıştırma işlemleri için çok uygundur (Pizzi and Mittal 2017).

Kauçuk yapıştırıcılar: Sulu ortam veya çözünme ortadan kalktığında kauçuk bazlı yapıştırıcılar sertleşirler. Yüke maruz kalan yapıştırıcılar için uygun değildirler (Kodakoğlu 1996). Yapıştırıcılar için hammadde olarak birçok farklı malzeme kullanılmaktadır, ancak kauçuk bazlı yapıştırıcılar diğer genel yapıştırıcı türleriyle karşılaştırıldığında bazı özel özellikler göstermektedir. Bunun nedeni, doğal, sentetik, kauçuk türevleri, geri kazanılmış kauçuklar ve kauçuk lateks dahil olmak üzere birçok kauçuk türü ve formunun mevcut olması ve bunların hepsinin yapıştırıcı hazırlamak için kullanılabilmesidir. Kauçuk, kauçuk bazlı yapıştırıcıların temelini oluşturur ve esnekliği nihai yapıştırıcı ürünün özellikleri üzerinde etkilidir. Bununla birlikte, bu yapıştırıcıların birincil özelliği yapışkanlıktır. Niteliklerini değiştirmek için kauçuk bazlı yapıştırıcılara çeşitli bileşik kimyasallar eklenebilir (Pizzi and Mittal 2017).

Polivinil asetat yapıştırıcılar: Bu yapıştırıcı genellikle su emülsiyonu olarak sağlanır ya da sıcak eriyik olarak kullanılır. Bazen “beyaz tutkal” olarak adlandırılan polivinil asetat, hızlı bir şekilde kurur ve güçlü bir bağ oluşturur. Esnektir, ısıya ve neme karşı direnci düşüktür. Emülsiyon olarak reçine kullanıldığında gözenekli yüzeyler gerekmektedir (Schneberger 1983).

Bu yapıştırıcı genel olarak ambalajlamada, kâğıt yapıştırmada, kitap ciltlemede, bardak yapıştırıcılarında ve mobilya endüstrisinde kullanılır (Da Silva et al. 2011).

1.2.2. Formları açısından yapıştırıcılar

Kullanımdan önce, yapıştırıcılar çok çeşitli formlarda bulunabilirler. Formları açısından yapıştırıcılar, sıvı, macun, film ve toz gibi birçok formda olabilmektedir (Dunn 2004). Bu yapıştırıcılar;

Macun tipi yapıştırıcılar: Yüksek viskoziteleri nedeniyle çok fazla damlama riski olmayan dikey yüzeylere uygulanabilmektedir. Bu yapıştırıcılar sızdırmazlık ve boşluk dolgusu görevi de görmektedir (MIL-HDBK-691B 1987).

1. GİRİŞ

Sıvı yapıştırıcılar: Yapıştırıcıların çeşitli yöntemlerle uygulanabildiği ve en yaygın halidir. Ölçülmesi, aktarılması ve birleştirilmesi nispeten basit olması nedeniyle avantaja sahiptirler. Ayrıca, alt tabakayı kolayca ıslatma eğilimleri ve homojen yapışma hattı kalınlığı sağlama özellikleri vardır. Ancak bunların yanı sıra bazı dezavantajları vardır. Bunlar; bazen dağınık olmaları, temizlik gerektirmeleri ve nispeten yüksek derecelerde atık oluşturmalarıdır.

Film yapıştırıcılar: Yalnızca ince tabaka halindeki yapıştırıcıdan oluşurlar. Film yapıştırıcılar, özellikle parçalar arasındaki boşluğun bağlanma yüzeyi boyunca derinliği değişiyorsa burada zayıf boşluk dolduruculardır. Ayrıca kolaylıkla dağıtılabilirler ve sürekli kalın bir bağ çizgisi sağlarlar. Havacılık endüstrisi gibi geniş alanların yapıştırılmasında kullanılabilir.

Toz yapıştırıcılar: Katı yapıştırıcının başka bir formu olan ve sıvı hale getirmek için önce ısıtılan veya solventle etkinleştirilmesi gereken yapıştırıcılardır. Tek bileşenli bir sisteme sahiptirler ve karıştırma hatalarını ortadan kaldırır. Ancak büyük düzenekler üzerinde eşit dağıtılması zordur (Petrie 2000).

1.3. Yapıştırma Bağlantıları

Yapıştırma Bağlantıları, alt tabaka üzerine bir yapıştırıcı vasıtasıyla birleştirilen aynı malzemeden olabilen ya da olmayabilen iki tabakadan oluşur (Cognard 2005). Yapıştırıcının dışında kalan katı malzemeler yapıştırılan madde olarak bilinir. Yapıştırıcının, yapıştırılan parçadan yapıştırıcı bağlantı noktasına bir yük iletmesini sağlayan olaya ise yapışma adı verilir (Pocius 2012).

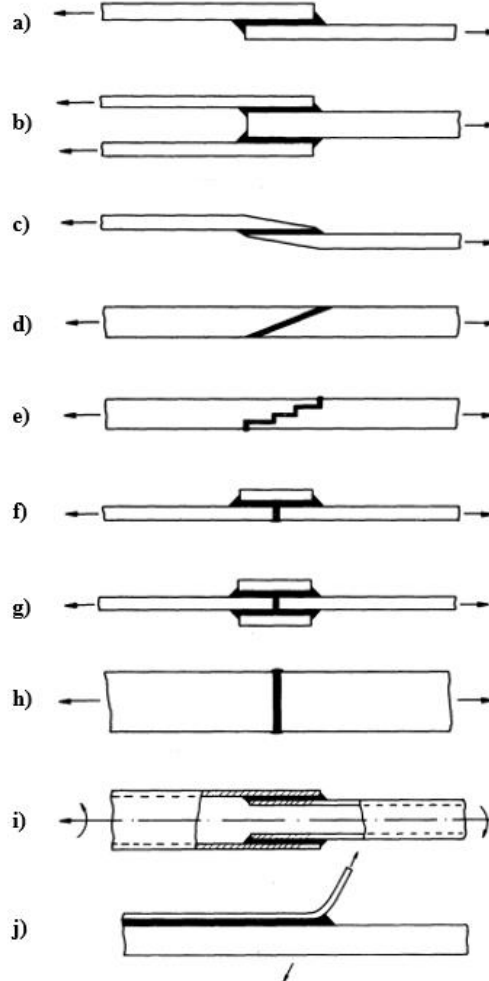
Yapıştırma bağlantıları oluşturulurken tasarım planlaması yapıştırıcıların temel özelliklerine göre yönlendirilmelidir. Başka bir montaj yöntemi için tasarlanan bağlantıları kullanmak ve daha sonra bunları yapıştırıcılara uyum sağlayacak şekilde değiştirmek kötü sonuçlara yol açabilir. Bağlantı tasarımları, çoğu yapıştırıcı prosedüründe olduğu gibi birçok başka faktör dikkate alınmadan tamamlanamaz. Yapıştırıcıların özellikleri ve kür koşulları hakkında bilgi sahibi olmak gerekir. Alt tabakaların farklı bağlantı geometrilerinde şekillendirilmesi ve işlenmesiyle ilgili

1. GİRİŞ

maliyetlerin ve gerekliliklerin de anlaşılması gerekir. Ayrıca gerilme dağılımı analizi, bağlantının verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için stratejiler sağlayacaktır.

Bağlantı tasarımıındaki amaç, bir bağın belirli bir alanı için maksimum mukavemet elde etmektir. Yapıştırma bağlantıları, belirli bir noktaya değil alanlara etki etmektedir. Bu nedenle bağlantı gerilme konsantrasyonunu en aza indirecek şekilde tasarım yapılmalıdır (Petrie 2000).

Şekil 1.3’de mevcut mühendislik uygulamalarında en yaygın kullanılan yapıştırma bağlantıları verilmiştir.



Şekil 1.3. Yaygın yapıştırma bağlantı türleri; a) tek tesirli bindirme, b) çift tesirli bindirme, c) boyun bindirme, d) açılı bindirme, e) teraslama (kademeli), f) tek takviyeli bindirme, g) çift takviyeli bindirme, h) alın bağlantı, i) silindirik bindirme, j) soyulma (Adams and Wake 1984).

1. GİRİŞ

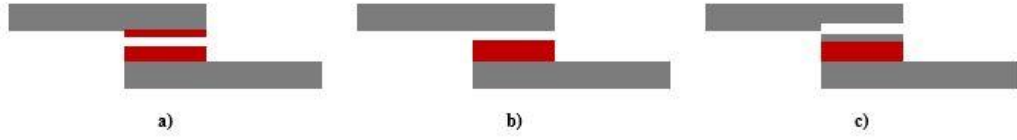
1.3.1. Yapıştırma bağlantılarında hasar mekanizmaları

Yapıştırma bağlantılarında oluşan hasarlar, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzemeler arasındaki ara yüzeyde meydana gelmektedir. Genel anlamda bu başarısız yapıştırmaların nedeni; yapıştırılan yüzeyin kalitesi, yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcı arasındaki hidratlı kimyasal bağlar, hatalı yüzey hazırlama tekniği, yapışan yüzeylerdeki yabancı maddelerin uzaklaştırılmaması, uygun olmayan kürleme döngüsü sayılabilir.

Yapıştırma bağlantılarındaki hasar mekanizmalarının sınıflandırılması bağlantının hasarının nedenini anlamak, bağlantının mukavemetini ve dayanımını doğru bir şekilde tahmin etmek için kritik öneme sahiptir. Temelde üç hasar mekanizması vardır: adhezyon, kohezyon ve karışık mod (Şekil 1.4). Adhezyon hasarı, yapıştırıcı ile yapışan malzeme arasındaki bağların kopması sonucu oluşan hasardır. Bu hasar mekanizması, yapıştırıcı ile yapışan malzeme arasındaki yüzey enerjilerinin uyumsuzluğundan, yapıştırıcının yapışan yüzeylere yeterli şekilde yayılmamasından, yapıştırıcının yapışan malzeme yüzeylerinde yeterli şekilde kürleşmemesinden kaynaklanabilir. Kohezyon hasarı, yapıştırıcı içindeki bağların kopması sonucu oluşan hasardır. Bu hasar mekanizması, yapıştırıcının özelliklerinin yetersizliği, yapıştırıcı içindeki yabancı partiküller, yapıştırıcının bozulması gibi faktörlerden kaynaklanabilir. Karışık mod hasarı, adhezyon hasarı ve kohezyon hasarının birlikte meydana gelmesi sonucunda oluşan hasardır. Bu hasar mekanizması, yapıştırıcı-yapışan malzeme ara yüzeyinde ve yapıştırıcı içinde aynı anda gerilmelerin oluşması sonucu gerçekleşmektedir.

Yapıştırma bağlantılarında oluşan hasar mekanizmalarını azaltmak için önlemler alınabilir. Bunlar; yapıştırıcı ve yapışan malzemelerin yüzeylerinin temiz ve düzgün olması, yapıştırıcının yapışan malzeme yüzeylerine yeterli şekilde uygulanması, yapıştırıcının uygun sıcaklık ve nem koşullarında kürlenmesi ve yapıştırma bağlantılarının uygun tasarlanması temel olarak sayılabilir (Gursel et al. 2019).

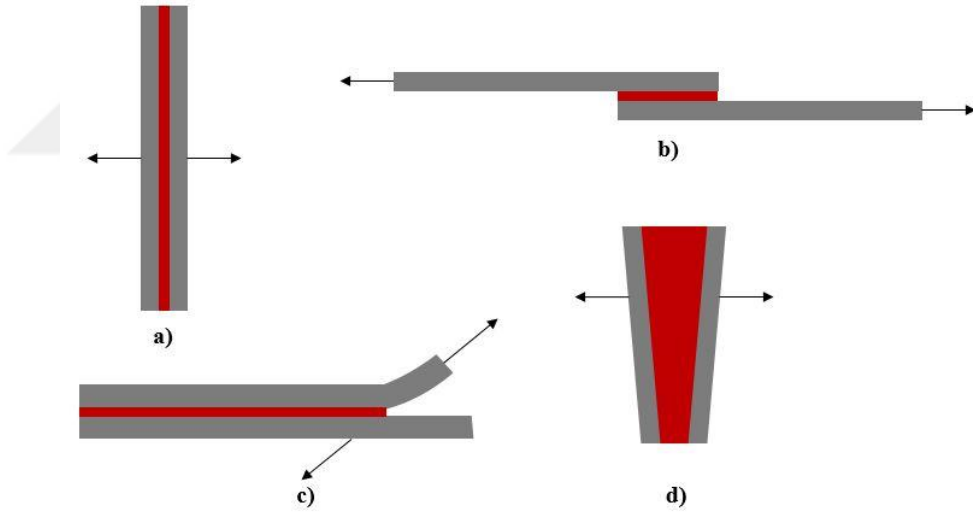
1. GİRİŞ



Şekil 1.4. Hasar mekanizmaları türleri; a) kohezyon hasarı, b) adhezyon hasarı, c) yapıştırılan malzemedeki delaminasyon (ayrılma) hasarı.

1.3.2. Yapıştırma bağlantılarında gerilme türleri

Yapıştırma bağlantılarında dört temel yükleme türü yaygındır: çekme, kesme, soyulma ve ayrılma. Ancak yapıştırma bağlantılarında genellikle tekdüze bir gerilim modeli oluşmaz. Bunun nedeni, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzemenin özelliklerinin farklı olması ve bağlantıya uygulanan kuvvetlerin genellikle eşit olmayan bir şekilde dağıtılmasıdır. Bu nedenle, pratikte bu gerilimlerin herhangi bir kombinasyonu ile karşılaşılabilir (Petrie 2000).



Şekil 1.5. Yapıştırma bağlantılarında oluşan dört temel gerilme türü; a) çekme gerilmesi, b) kesme (kayma) gerilmesi c) soyulma (peel) gerilmesi, d) ayrılma (cleavage) gerilmesi.

Çekme gerilmesi: Çekme gerilmesi, bağlantı düzlemine dik olarak etki eden kuvvetlerin tüm bağlantı alanına eşit olarak dağıtılmasında gelişmektedir. Yapıştırıcının tamamı bağlantının mukavemetine katkıda bulunduğundan, yapıştırma bağlantıları çekme yüküne karşı iyi bir direnç gösterir. Uygulanan yük herhangi bir şekilde dengelenmemişse, eşit olarak dağıtılmış olan gerilimin faydası son bulacaktır. Böylece bağlantının arızalanma ihtimali yüksek olacaktır.

1. GİRİŞ

Kesme gerilmesi: Kesme gerilmesi ile birleştirilen alanın tamamına eşit bir gerilim uygulanır. Bu tür bir gerilimle, bağlantı alanı en iyi şekilde kullanılır ve sonuç olarak, bağlantı arızasına en az duyarlı, ekonomik açıdan sağlam bir bağlantı elde edilir. Bağlantı yerleri mümkün olduğunca yükün çoğunun bir kesme yükü olarak iletileceği şekilde tasarlanmalıdır.

Soyulma gerilmesi: Bu tür bir gerilmenin oluşabilmesi için yapıştırılan yüzeylerden birisinin veya her ikisinin de esnek olması gerekmektedir. Soyulma gerilmesi, bağlantının sınır çizgisi üzerinde son derece yüksek gerilime maruz kalmasına neden olur. Bağlantı noktası geniş değilse veya yük küçükse bağlantıda kopma meydana gelecektir. Bu tür aşırı yüklemelerden mümkün olduğunca kaçınılmalıdır.

Ayrılma gerilmesi: Bu gerilme genellikle bir malzemenin bir yüzeyinde diğerine göre bir miktar sapmaya neden olan bir çekme kuvvetinin veya bir momentin sonucu oluşur. Diğer gerilme türlerinin aksine, ayrılma gerilmesi eşit şekilde dağılmaz, bağlantının bir tarafında yoğunlaşır. Bu tür bir gerilimi karşılamak için yeterince geniş bir yapıştırma alanına ihtiyaç duyulur, bu da ekonomik olmayacaktır. Genel olarak ayrılma gerilmesi istenmeyen bir durumdur (MIL-HDBK-691B 1987).

1.4. Yapıştırma Bağlantılarında Yapıştırılacak Yüzeyin Hazırlanma İşlemleri

Yüzey hazırlığı, yapıştırma işlemi için en kritik adım olarak kabul edilir. Yapıştırıcıya maksimum yapışma sağlamak ve birleştirilmiş bağlantıların yapısal bütünlüğünü uzun vadeler korumak amacıyla doğru yüzey hazırlığı yapmak çok önemlidir. Çünkü yetersiz ve yanlış yüzey hazırlığı bağlantı noktalarının zayıf olmasına ve öngörülemez bir şekilde bozulmasına neden olacaktır.

Yüzey hazırlığının amacı, yapıştırılacak yüzey ile yapıştırıcı arasındaki yapışma kuvvetlerini uygun hale getirmektir. İdeal olarak yapıştırıcının yüzeye yayılması; yani, yapıştırılacak malzeme yüzeyinin seçilen yapıştırıcıyla ıslatılması gerekir. Yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında kimyasal uyumluluk (moleküller arası ve kimyasal etkileşimler) sağlanmasıdır. Ayrıca bunlar yapılırken yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında “zayıf tabaka” olmamasına dikkat edilir. Bu tabaka; kirletici filmler, oksit

1. GİRİŞ

katmanları, pas, korozyon, kireç, toz ve yağ gibi çeşitli faktörler sonucu oluşabilir. Bu nedenle, yapıştırma işlemine başlamadan önce yüzey hazırlığının sıkı bir şekilde kontrol edilmesi gerekir. Yüzey kir, yağ, toz ve diğer kirleticilerden arındırılmalı ve yapıştırılan malzeme yüzeyine uygun bir yüzey işlemi yapılmalıdır (Marques et al. 2021).

Yüzey işlemleri genel olarak üç kategoriye ayrılabilir: solvent temizleme, mekanik aşındırma, kimyasal işlem. Ayrıca yüzey hazırlama yapılırken verilen işlemlerden biri veya birkaçı uygulanabilir.

1.4.1. Solvent temizleme

Solvent temizleme, malzemede herhangi bir kimyasal veya fiziksel değişikliğe neden olmadan sadece yüzeydeki organik kirleticilerin (yağlar, tozlar, gresler vb.) ortadan kaldırılmasıyla ilgilidir. Bu kirletici maddeler yüzeydeki serbest enerjiyi azaltarak, yetersiz ıslanmadan dolayı zayıf ara yüzü oluşturarak yapışma olasılığını azaltmaktadır.

Silme, daldırma, püskürtme, buharla yağ giderme ve ultrasonik fırçalama solvent temizliğinde kullanılan tekniklerden bazılarıdır. En yaygın yöntem olan silme, organik kirleticilerin çoğundan kurtulmak için yeterlidir. Başlangıçta organik kirletici maddelerden kurtulmak için yapıştırılacak malzemeler sıklıkla yağdan arındırılır. Bu, aşındırıcı ortamın kirlenmesini önlemek ve mekanik aşındırma işlemi sırasında yabancı maddelerin yapıştırılacak yüzeylere karışmasını durdurmak için gereklidir. Ayrıca mekanik olarak aşındırılan yüzeylerden geriye kalan kalıntılar veya kirletici maddelerden kurtulmak amacıyla yine yüzeyleri temizlemek için solvent temizleme kullanılır.

Solvent temizliği aşırı yapıldığında bazı yüzey katmanlarını zayıflatabilir, yüzeyin pürüzleşmesine neden olabilir ve bazı malzemelere zarar verebilir (Broughton and Lodeiro 2002).

1.4.2. Mekanik aşındırma

Mekanik aşındırma yüzey işlemi, yüzeyin kimyasını önemli ölçüde değiştirmeden yüzeyi fiziksel ve mekanik olarak değiştirir. Yüzeylerin yapışmalarında iyileşmeler

1. GİRİŞ

sağlamanın güvenilir ve etkili yolunu sağlamaktadır. Yapıştırıcı ile yapıştırma işleminden önce yapıştırılacak bölgenin pürüzlendirilmesi, malzemenin yüzey alanının artırılmasına, yüzey enerjisinin artmasına ve ıslanma davranışının iyileşmesine yardımcı olmaktadır (Bowditch and Shaw 1996).

Zımpara kağıdı, tel fırça, aşındırıcı diskler ve kum püskürtme (kuru veya ıslak) mekanik aşındırma yüzey hazırlama tekniklerine örneklerdir. Kir, kireç, kararma ve oksit tabakaları gibi kirletici maddelerin çıkarılmasında bu teknikler kullanılmaktadır. Bu kirletici maddelerin yayılmasını önlemek için, mekanik aşındırma işleminden önce yüzeyler temizlenir (yani solventle silinir). Mekanik aşınma işleminin ardından kalan parçacıklar genellikle solventli silme ve temiz, kuru hava püskürtme kullanılarak temizlenir. Solvent temizleme ve mekanik aşındırma işlemleri birleştirildiğinde ve yüzey topolojisi değiştirildiğinde çoğu kirletici madde ortadan kaldırılır ve yüzey pürüzlülüğü veya bağ alanı artar (Petrie 2000).

Mekanik aşındırma, daha iyi mekanik yapışma sağlamak için yapıştırıcıyla kenetlenen bir yüzey oluşturmaktadır. Hazırlanan yüzeylere soyulabilir bir koruyucu astarın uygulanması, çoğu zaman bu yüzeylerin gelecekte kullanılması için güvenli olmasını sağlayacaktır. Aksi takdirde yüzeyi aşındırılmış malzemeye hemen veya birkaç saat içinde yapıştırıcı uygulanması tavsiye edilmektedir (Shields 1984).

1.4.3. Kimyasal işlem

Kimyasal işlem, bağlanma mukavemeti ve çevresel dayanıklılık gibi yapışma özelliklerini iyileştirmek için yapıştırılan yüzeyin morfolojisini ve kimyasını değiştirmeyi tanımlar. Birçok yapıştırıcı bağlama için, tek başına solvent temizleme, solvent temizlemeyi takip eden mekanik yüzey işlemleri ve ardından tekrar eden solvent temizleme işlemleri yeterli olabilmektedir. Ancak bu her zaman güçlü bir yapışma özelliği sağlamaya yetmeyebilir. Bunun için yüzey hazırlama işleminin son aşaması olan mekanik aşındırma işlemi ve solvent temizlemenin ardından kimyasal yüzey işlemi gerçekleştirilebilir.

1. GİRİŞ

Yaygın olarak kullanılan kimyasal yüzey işlemleri; asitle aşındırma, anotlama, ultraviyole ışınlama ve lazerdir. Kimyasal yüzey işlemleri; zayıf sınır katmanını kaldırarak veya alt tabakaya güçlü bir şekilde bağlanan oksit katmanı oluşturarak, alt tabaka yüzeyinin yüzey enerjisini artırarak, yüzey topografyasını değiştirerek, çevresel etkilere karşı yüzeyi koruyarak bağ gücünü ve çevresel dayanıklılığı artırır.

Yüzeyi kimyasal olarak işlenerek birleştirilmiş bağlantılar, çeşitli faktörlerden (yüzey kimyası, yüzey mikro yapısı, işlem koşulları, bağlantı tipi vd.) etkilenebilen ve bu nedenle bağ mukavemetinde dalgalanmalara duyarlı olan yapılardır. Bu bağlantıların tasarımı ve üretimi esnasında bu faktörlerin dikkate alınması önemlidir (Broughton and Lodeiro 2002).

1.5. Yapıştırma Bağlantılarının Avantaj ve Dezavantajları

Birleştirme yöntemi seçerken malzeme, bağlantı tipi, istenen mukavemet, üretim maliyetleri gibi faktörler göz önünde bulundurulmaktadır. Bu faktörlerin yanı sıra seçilen birleştirme yöntemlerinin kendine özgü avantaj ve dezavantajlarını bilmek, bu yöntemin kullanımında doğru karar vermemizi ve uygun olanaklar sağlamamızı sağlayacaktır.

Diğer birleştirme yöntemlerine kıyasla yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların birçok avantaj ve dezavantajı aşağıda verilmiştir (Petrie 2000).

Avantajları:

- Yapıştırma işlemi, iki malzemeyi tek bir parça halinde davranacak şekilde birleştirmektedir. Bu sayede, gerilme tüm yüzeye eşit dağılmaktadır ve daha büyük yüklerin taşınması mümkün olmaktadır.
- Yapıştırma teknolojisi, ince ve hassas veya farklı kalınlıklardaki malzemeleri güvenli bir şekilde birleştirmeyi mümkün kılmaktadır.
- Yapıştırma teknolojisi, farklı türdeki malzemeleri birbirine yapıştırmak için kullanılabilir. Bu sayede, farklı malzemelerin bir araya getirilmesi gereken ürünlerin üretimi kolaylaşmaktadır.

1. GİRİŞ

- Bazı mekanik birleştirme yöntemlerinde kullanılan vidalar ve perçinler, farklı metallerin bir araya gelmesiyle elektrokimyasal korozyona neden olabilmektedir. Yapıştırma teknolojisi bu sorunu ortadan kaldırarak, korozyon riski olmadan farklı malzemelerin birleştirilmesini sağlamaktadır.
- Yapıştırma teknolojisi, yorulmaya ve tekrarlı yüklere karşı yüksek direnç göstermektedir. Bu sayede, titreşime maruz kalan ürünlerde ve yorulma riskinin yüksek olduğu uygulamalarda güvenli bir şekilde kullanılmaktadır.
- Yapıştırma işlemi, estetik açıdan daha düzgün, güzel ve işlevsel ürünler üretmeyi mümkün kılmaktadır.
- Yapıştırıcılar, toz, su, kimyasallar ve ısı gibi farklı ortamlara karşı yalıtım sağlamaktadır. Bu sayede, elektronik cihazlarda ve hassas ekipmanlarda güvenli bir şekilde kullanılabilir.
- Bazı yapıştırıcılar, ısı ve elektrik iletkenliği olmayan özel bir yapıya sahiptir. Böylece, ısı ve elektrik yalıtımı gerektiren uygulamalarda kullanılabilir.
- Yapıştırıcılar, darbe ve titreşimleri absorbe ederek ürünlerin korunmasına yardımcı olmaktadır. Bu sayede, darbeye ve titreşime maruz kalan ürünlerde güvenli bir şekilde kullanılabilir.
- Yapıştırma teknolojisi, havacılık, otomotiv ve diğer hassas alanlarda yüksek mukavemetli ve hafif ürünler üretmek için kullanılabilir.
- Yapıştırma teknolojisi, diğer mekanik birleştirme yöntemlerine göre daha kolay ve daha hızlı bir uygulama sunmaktadır. Ayrıca vida ve perçin gibi ek malzemelere ihtiyaç duyulmadığı için daha ekonomiktir.
- Yapıştırma teknolojisi, diğer mekanik birleştirme yöntemleriyle birlikte kullanılarak her iki yöntemde avantajlarından yararlanma imkanı sunmaktadır.
- Yapıştırma teknolojisi, birçok farklı üretim teknolojisiyle entegre olarak uyumlu bir şekilde kullanılabilir.

Dezavantajları:

1. GİRİŞ

- Yapıştırma işleminde, parçaların doğru bir şekilde hizalanması ve sabitlenmesi önemlidir. Bu işlem, karmaşık geometriye sahip parçalar için zor olabilmektedir.
- Yapıştırma işleminin başarılı olabilmesi için, yapıştırılacak yüzeylerin yapıştırma öncesinde temiz ve pürüzsüz olması gerekmektedir.
- Yapıştırıcıların mekanik özellikleri, zaman ve sıcaklıktan etkilenebilmektedir. Bu nedenle, yapıştırma işleminin yapılacağı ortamın sıcaklığı ve nem oranı dikkate alınmalıdır.
- Bazı yapıştırıcılar, darbeye ve soyulmaya karşı yeterince dayanıklılık göstermeyebilir. Bu nedenle, yapıştırma işleminin yapılacağı ürünün kullanım amacı ve maruz kalacağı koşullar göz önünde bulundurulmalıdır.
- Bazı yapıştırıcıların kürleşme (sertleşme) süresi uzun olabilmektedir. Bu durum, üretim süreçlerini uzatabilir ve pratik olmayabilir.
- Yapıştırma bağlantısının ömrü, maruz kaldığı sıcaklık, nem, kimyasallar ve diğer çevresel etkenlerden etkilenebilir. Bu nedenle, yapıştırma işleminin yapılacağı ürünün kullanım ortamı dikkate alınmalıdır (Akpınar 2012).

1.6. Yapıştırma Bağlantıları Mekanik Özellikleri ve Test Yöntemleri

Mekanik özelliklerin belirlenmesi, yapıştırma bağlantılarının uygulamalara entegre edilmesi için önemli bir adımdır. Bu bağlantıların mekanik özellikleri günümüzde hem deneysel hem de sayısal (nümerik) olarak çeşitli deneyler kullanılarak incelenmektedir. Bu tez çalışması kapsamında hem deneysel hem de sayısal (nümerik) yöntemlerden faydalanılmıştır.

1.6.1. Deneysel yöntemler

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan bu testler, özelliklerin (gerilme, kesme, soyulma, dayanıklılık, yorulma vd.) karşılaştırılması, yapıştırıcıların standartlara uygun olup olmadığı, yüzey veya diğer hazırlıkların kontrol edilmesi, parametrelerin (kürleşme koşulları, yapışma hattı kalınlığı vd.) belirlenmesi ve çeşitli nedenlerle yapılmaktadır. Yapılan bu testler, sadece yapıştırıcının değil, aynı zamanda yapıştırma tekniğinin, yüzey temizliğinin, yüzey

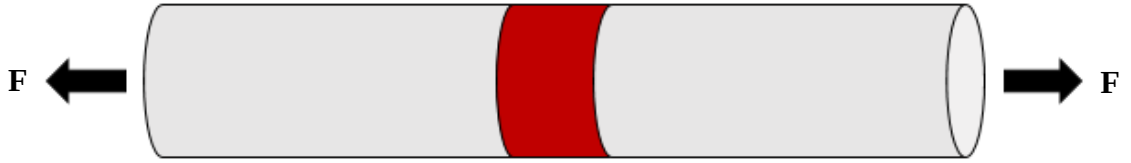
1. GİRİŞ

işlemlerinin, yüzey aşındırmasının, yapıştırıcının uygulanmasının ve kurlenme döngüsünün de değerlendirilmesini sağlamaktadır.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde birçok test yöntemi kullanılmaktadır.

1.6.1.1. Çekme testi

Çekme testi, yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerini değerlendirmek için kullanılan yaygın bir test yöntemidir. Bu testte, yük, yapıştırma hattına dik olarak ve yapıştırma alanlarının merkezi doğrultusunda paralel olarak uygulanır. Çekme testinde, özel olarak tasarlanmış numuneler kullanılır. Yük, test cihazına yerleştirilen numuneye kademeli olarak uygulanır ve numunenin kopması veya yapıştırma hattının ayrılması gözlemlenir. Şekil 1.6'da çekme testlerinin temel geometrisine bir örnek gösterilmektedir.

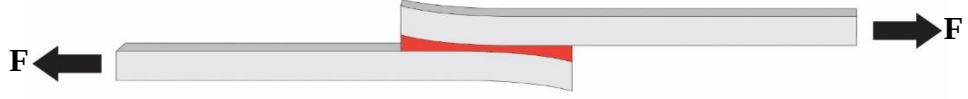


Şekil 1.6. Çekme testi temel geometrisi

1.6.1.2. Kayma testi

Kayma testi, yapıştırma hattına paralel ve aynı düzlemde uygulanan bir test yöntemidir. Numunelerin hazırlanmasının kolay olması, testlerin birçok yapıştırıcının gerçek çalışma koşullarına oldukça benzer koşullarda gerçekleştiriliyor olmasından dolayı, kesme testleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Gerilme dağılımı, çekme testlerinde olduğu gibi tekdüze değildir. Her ne kadar kayma gerilimini yükün bağlanma alanına bölünmesiyle hesaplamak alışlagelmiş olsa da bağ hattındaki maksimum gerilme, ortalama gerilmeden önemli ölçüde daha yüksek olabilir. Şekil 1.7'de kayma testlerinin temel geometrisine bir örnek gösterilmektedir.

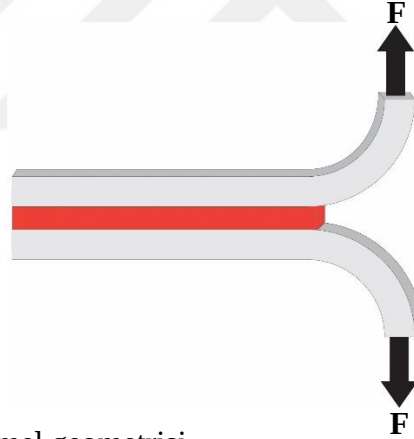
1. GİRİŞ



Şekil 1.7. Kayma testi temel geometrisi

1.6.1.3. Soyulma testi

Soyulma testi, yapıştırıcıların performansını değerlendirmek ve oldukça lokalize gerilmelere karşı direncini ölçmek için kullanılan test yöntemidir. Bu testte, yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılara uygulanan bir kuvvetin etkisiyle bağlantılar birbirinden ayrılırlar ve bu esnada yapıştırıcının ayrılma/kopma direnci ölçülür. Gerilmenin uygulandığı alan yapıştırılan malzemenin ve yapıştırıcının kalınlığına ve modülüne bağlı olduğundan tam değerlendirilmesi mümkün değildir. Uygulanan gerilme veya kopma gerilmesi doğrusal değer olarak rapor edilir. Şekil 1.8’de soyulma testlerinin temel geometrisine bir örnek gösterilmektedir.



Şekil 1.8. Soyulma testi temel geometrisi

1.6.1.4. Ayrılma testi

Ayrılma testi, yapıştırıcı ile birleştirilmiş malzemelerin birbirinden ayrılma direncini ölçmek için kullanılan bir test yöntemidir. Bu test, yapıştırıcıların performansını değerlendirmek için önemlidir. Testte, yük numunenin bir ucundaki bağlanma alanına dik olarak uygulanır. Ayrılma geriliminin kuvvetleri ise yapıştırma hattına dik olarak ve bağ çizgisinden uzağa uygulanır. Bu nedenle de ayrılma gerilmesi tipik olarak bir kenarda yoğunlaşır. Ayrılma testi, yapıştırıcıların kenar bölgesindeki direncini ve lokalize gerilmelere karşı dayanıklılığını ölçmek için faydalıdır. Ancak, ayrılma testi karmaşık bir

1. GİRİŞ

test düzeneği gerektirebilir ve gerilme dağılımı her zaman eşit olmayabilir. Ayrıca test sonuçları, numunenin geometrisine ve boyutlarına bağlı olarak değişebilir (Ebnesajjad 2008).

1.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) olarak adlandırılan sayısal yöntem, herhangi bir fiziksel niceliğe sahip malzemenin çeşitli analizlerini gerçekleştirmek için mühendislik hesaplamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yaklaşım belirli koşullar altında incelenmesi gereken yapıyla ilgili bir problemle başlamaktadır (Anonim 2024).

Sonlu elemanlar yönteminde temel fikir, karmaşık haldeki problemin çözümünü, daha basit bir problemle değiştirerek bulmaktır. Çözüm bulunurken basit bir problem asıl problemin yerini aldığından, kesin çözüm yerine yaklaşık bir çözüm bulunmaktadır. Pratik problemlerin çoğunun kesin çözümünü (hatta bazen yaklaşık çözümünü) bulmak için mevcut matematiksel araçlar yeterli olmamaktadır. Bu nedenle, bir problemin yaklaşık çözümünü bulmak için başka bir yöntem bulunamaması halinde sonlu elemanlar yöntemi tercih edilmektedir (Rao 2017).

Sonlu Elemanlar Yöntemi, problemi belirli sayıda küçük parçaya bölerek bir sonraki analizlerde her bir parçanın matematiksel olarak davranışının test edilmesini amaçlamaktadır. Bu amaçla genel olarak kısmi diferansiyel denklemlerden türetilen formüller kullanılmaktadır.

Bu yöntem, karmaşık sistemlerin modellenmesini ve analizini yaparken, analitik çözümlerin mümkün olmadığı durumlarda büyük avantajlar sağlamaktadır. Özellikle mühendislikte pek çok alan akışkanlar mekaniğinden elektromanyetizmaya, yapısal mühendislikten ısı transferine çeşitli alanlar bu yöntemden yararlanmaktadır (Anonim 2024).

1.7.1. Sonlu elemanlar yönteminin avantajları

1. GİRİŞ

- Katı cisimlerin farklı geometrilere ayrılabilmesi nedeniyle karmaşık şekillere kolayca uygulanmaktadır.
- Sınır koşulları kolayca uygulanabilmektedir.
- Gelişmiş bilgisayarların kullanımıyla çözüm hızı yüksektir.
- Çeşitli mühendislik problemlerine esnek bir şekilde uygulanabilmektedir.
- Eleman sayısı arttıkça tam çözüme oldukça yaklaşılmaktadır.

Bunlar ve benzeri avantajları sayesinde, sonlu elemanlar yöntemi özellikle son yıllarda oldukça tercih edilen ve vazgeçilmez bir sayısal çözüm yöntemi haline gelmiştir.

1.7.2. Sonlu elemanlar analizi

Bir sonlu elemanlar analizi genel olarak üç temel aşamadan oluşmaktadır.

1.7.2.1. Model oluşturma (preprocessing)

Modellemede yer alan kademeler aşağıdaki gibidir.

İşin adının belirlenmesi: Bu işlem analizin başlığını oluşturur. Normal bir analiz oturumunda isteğe bağlı ancak önerilen bir adımdır. Grafik ekranında ve çıktıda görünerek kullanıcının sorunları izlemesini kolaylaştırır.

Model oluşturulması: Genellikle, model uygun birimlerle (mm, m, inç vb.) iki veya üç boyutlu uzayda oluşturulur. Sonlu elemanlar modeli, iki veya üç boyutlu olarak sınıflandırılabilir. Çalışacağımız fiziksel modelin bunlardan hangisine uyacağına önceden karar verilmesi gerekmektedir. Üç boyutlu bir sistemde mümkün ise eksenel simetri, düzlemsel gerilim ve düzlemsel gerinim özellikleri kullanılarak model iki boyutlu oluşturulabilir. Eğer sistemde simetri varsa sonlu eleman modelimiz daha basit hale gelir. Modeli oluştururken akılda tutulması gereken önemli bir nokta ise, çizimde kullanılan birimin, malzeme özellikleri ve uygulanan yük birimleriyle uyumlu olmasıdır.

1. GİRİŞ

Eleman tipi seçimi: Sonlu eleman modelinin temel bileşenlerinden birisi elemanlardır. Kullanılacak eleman tipi veya tipleri, meshlemenin başlayabilmesi için belirtilmelidir; aksi halde mesh oluşturulmasına izin verilmeyecektir. Analiz yazılımlarının eleman kütüphanesinde yüzün üzerinde farklı eleman türü bulunmaktadır. Her eleman türünün ayrı bir numarası ve eleman kategorisini belirten bir öneki vardır. Mevcut olan elemanları sınıflandırmak için boyutsallık, analiz disiplini ve malzeme davranışı dahil olmak üzere çok sayıda faktör bulunmaktadır. Elemanların seçimi yapılacak analizin çeşidine göre (yapısal, termal, akışkan, statik vs.) dikkate alınmaktadır.

Malzeme özelliklerinin belirlenmesi: Her eleman tipi için minimum sayıda malzeme özelliği tanımlanmalıdır. Tanımlanacak bu sayı analizin türüne göre değişmektedir. Malzeme özellikleri analize bağlı olarak, izotropik veya anizotropik, lineer veya nonlineer, sıcaklığa bağımlı veya sıcaklıktan bağımsız olabilir. Her malzeme özelliği kümesinin, gerçek sabitlerle ve eleman türleri ile aynı olan bir referans numarası yer alır. Farklı malzemeler içeren problemlerde kullanıcıdan çok sayıda malzeme özellik seti belirtmesi istenir. Her malzeme analiz programı tarafından farklı bir referans numarası kullanılarak tanımlanır.

Modelin elemanlara bölünmesi: Sonlu elemanlar problemini çözmek için elemanlara ve düğümlere ihtiyacımız vardır. Katı modeli eleman ve düğüm noktaları ile doldurmak, modeli elemanlara bölme işlemidir. Sonlu elemanlar analizinde elemanlara bölünmede eleman yoğunluğu arttıkça sonuç doğru çözüme yaklaşır. Ancak eleman yoğunluğu arttıkça ihtiyaç duyulan çözüm süresi de artar. Sonuç olarak gerekli eleman yoğunluğunun seçilmesi önemlidir. Analizden önce bunu tahmin etmek oldukça zordur. Katı bir modeli elemanlarına bölme işleminden önce elemanın şeklini seçmek daha iyi bir başlangıç olacaktır.

1.7.2.2. Çözümleme (solution)

Çözümlemede yer alan kademeler aşağıdaki gibidir.

Analiz türünün belirlenmesi: Analiz türünün belirlenmesi süreci, model ilk oluşturulduğunda belirlenmiş olsa bile analiz türü genellikle çözüm işlemcisi içerisinde

1. GİRİŞ

belirlenir. Analizler genellikle; Elektromanyetizma, Akışkan, Bağlı Alan (coupled field) alanlarından birinin kapsamına girer. Kullanılan elemanın türü veya elemanın serbestlik derecesi, analizin yukarıda belirtilen bilimsel disiplinlerden birine girip girmediğini belirler.

Sınır koşullarının belirlenmesi: Oluşturulmuş bir model için tüm sınır boyunca koşulların bilinmesi gerekir. Aksi halde, modele bir yük uygulandığında bir kısıtlama veya sınır koşulu getirilinceye kadar çözümlemeye devam eder. Akışkan bir problemde sınır koşulları için basınç, yapısal bir problemde sınır koşulları için genellikle yer değiştirme, termal bir problemde ise sınır koşulları için sıcaklık tanımlanır. Sınır koşulları bütün yönlerde (x, y, z) uygulanabileceği gibi, tek bir yönde de uygulanabilir. Alanlarda, çizgilerde, kilit noktalarda veya düğüm noktalarında sınır koşulları tanımlanabilir. Sınır koşulları, simetrik veya asimetrik olabilir.

Yüklerin uygulanması: Yük tanımlaması, sistemin belirlenen sınır koşullarında nasıl davranacağını öğrenmek için yapılır. Bir analiz işleminde yük tanımlaması önemli bir aşamadır. Sonlu eleman modeli veya katı model çeşitli yüklere maruz kalabilir. Örneğin kuvvetler bir düğüm noktasına veya kritik bir bölgeye uygulanabilir. Yükler, nasıl uygulandıklarına bakılmaksızın çözüm yapılırken sonlu eleman yükleri olarak değerlendirilir. Başka bir deyişle, katı modele uygulanan yükler, çözümün başlangıcındaki sınır koşullarına göre düğüm noktalarına ve elemanlara iletmesi anlamına gelir. Yükleri genel olarak aşağıdaki gibi sınıflandırabiliriz.

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

1. GİRİŞ

Çözüm: Sonlu elemanlar çözücüsü genellikle üç bölüme ayrılır: ön çözücü, matematik motoru ve son çözücü. Ön çözücü kısmında model okunur ve daha sonra matematiksel olarak formüle edilir. Ön çözücü, ön işleme aşamasında ayarlanan tüm parametreleri kontrol eder ve herhangi bir eksik parametre tespit ederse matematik motorunun devreye girmesini durdurur. Modelde hata yok ise, çözücünün devreye girmesiyle eleman direngenlik matrisini oluşturur ve basınç, yer değiştirme verilerini üretmek için matematik motorunu çalıştırır. Düğüm noktalarına ilişkin gerilme, deformasyon miktarı ve hız gibi değerler matematik motoru tarafından elde edilen verilere dayanılarak son çözücü de üretilir.

1.7.2.3. Sonuçların değerlendirilmesi (postprocessing)

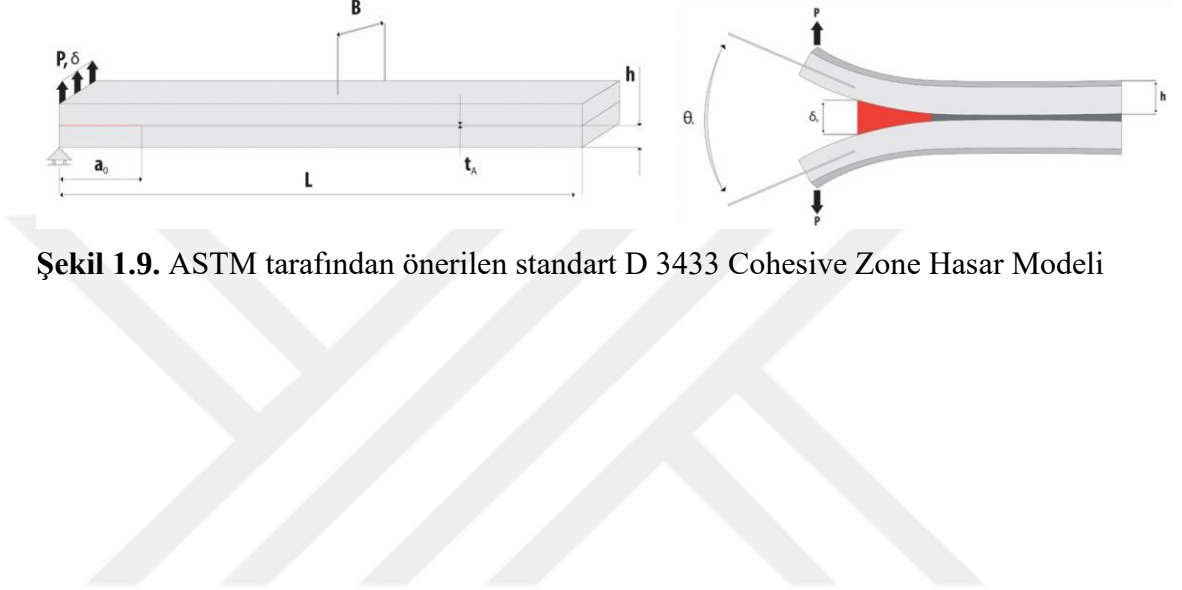
Analiz oturumunda bir çözüm elde edildikten sonra sonuçların incelendiği ve yorumlandığı bölümdür. Elde edilen sonuçlar; deforme olmuş bir cisim, kontur grafikleri veya tablolar olarak görüntülenebilir. Ayrıca modelin yük altındaki davranışı animasyon kullanılarak gösterilebilir. Yapısal türdeki problemleri sunarken, kontur grafikleri en iyi yöntemdir. Sonuçları görüntüleme, belirli açılarda x, y ve z koordinatlarında ve koordinat eksenini boyunca gerilme ve gerinme hesabında kullanılabilir. Etkin gerilme ve birim şekil değiştirme sonuçlarının yanı sıra akma gerilmesi ve şekil değiştirme sonuçları da gözlemlenebilmektedir. Ayrıca plastik şekil değiştirme miktarı ve birim şekil değiştirme enerjisi görsel olarak belirlenebilir (Demir 2016).

1.8. Sayısal Analizde Cohesive Zone Modeli

Son yıllarda başarıyla uygulanan ve hem gerilme analizine hem de kırılma mekaniğine dayanan Cohesive Zone Model, yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların sayısal analizinde bulunan bazı sorunlar nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda çatlağın başlaması, ilerlemesi ve hasarın oluşmasını simüle eden bu model, yalnızca hasarı değil hasarın ilerleyişini ve bağlantıların mukavemetini tahminde bulunmak için eklenen basit bir eklentidir. Cohesive zone model ile sonlu elemanlar analizi yapabilmek için yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda bazı parametrelerin bilinmesi gerekmektedir.

1. GİRİŞ

Bulk numune testleri ile kayma modülü ve elastisite parametreleri elde edilir. Mod-I'deki çift konsol kiriş veya konikleştirilmiş çift konsol kiriş numuneleri üzerinde gerçekleştirilen testler ile kırılma enerjisi parametreleri hesaplanır. ASTM tarafından önerilen standart D 3433 (Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints) kullanılarak Mod-I'de kullanılan kırılma enerjisi belirlenir (Şekil 1.9) (Durmuş 2019).



Şekil 1.9. ASTM tarafından önerilen standart D 3433 Cohesive Zone Hasar Modeli

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda hem yapıştırılan malzemenin hem de yapıştırıcının mukavemetini artırmak için, yapıştırılan malzemeye yüzey ön işlemleri uygulamak ve yapıştırıcı içerisine nano yapılar ilave edilmektedir. Literatür çalışmaları incelendiğinde, yapıştırılan malzemeye yüzey ön işlemlerinin uygulanması ve yapıştırıcı içerisine nano yapılar eklenmesinin yapıştırma bağlantılarının hasar yükünü artırdığı görülmektedir.

Geleneksel bağlantı elemanlarına göre yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların bazı avantajları vardır. Homojen gerilme dağılımı sunması, zaman ve maliyet tasarrufu, geleneksel birleştirme yöntemlerinden daha kolay ve kaliteli olması, daha düşük ağırlığa sahip olması, darbeleri ve titreşimi sönmüleme kabiliyetinin iyi olması ve çeşitli ince ve kalın malzemeleri birleştirmesi avantajları arasındadır. Bu durum göz önüne alındığında yapıştırıcı teknolojisi, çeşitli kullanımlar için uygun maliyetler sunması, kimyasal uyumluluk ve diğer bazı parametreler açısından optimize edilebilir (Edwards 1998).

Literatür incelendiğinde; tek tesirli bindirme, çift tesirli bindirme, T, geçmeli gibi yapıştırıcı ile birleştirilmiş birçok bağlantı tipine rastlanmaktadır. Bu bağlantı tiplerinden biri basit geometrisi nedeniyle kapsamlı olarak incelenen alın bağlantı (BJ)'dır. Ayrıca literatür araştırıldığında birçok araştırmacının alın bağlantılarının mukavemetini araştırdığı görülmüştür. Adams and Coppedale (1979), tarafından yapılan çalışmada, eksenel yüke maruz kalan alın bağlantılarında yapıştırıcı tabakasındaki gerilme dağılımının etkileri teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Bir alın bağlantısının ölçülen gerilim-uzama davranışının, yapışkanın tutuculuğu tarafından adezif olarak indüklenen üç eksenli gerilim durumuna bağlı olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, yapıştırıcı basınca bağlı bir akma kriterine uyuyorsa, bir alın bağlantısının basma akma gerilimi benzer bir bağlantının çekme akma geriliminden çok daha büyük olabileceği ve bazı durumlarda bir alın bağlantısının basma akması tamamen bastırabileceği sonucuna varılmıştır (Adams and Coppedale 1979).

Zhang et al. (2019), tarafından yapılan bir çalışmada ise, ortalama gerilim, gerilim genliği ve gerilim oranının, yapışkanla birleştirilmiş alın bağlantılarının tek eksenli

kilitlenme tepkisi ve düşük devirli yorulma ömrü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Tek eksenli döngüsel çekme deneyleri, içi boş silindirik bağlı alın bağlantı numuneleri kullanılarak gerilim kontrollü modda gerçekleştirilmiştir. Gerilme genliğinin tek eksenli gerilimi üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür ve gerilme genliği arttığında, yorulma hasarı değişkeninin arttığı sonucuna ulaşılmıştır (Zhang et al. 2019).

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların yüksek performans göstermesi için, yapıştırılan malzemelere yapıştırma işlemi öncesinde yüzey ön işlemleri uygulanması gerekmektedir. Yüzey ön işlemlerinin iki önemli amacı vardır: yüzeyde bulunan ve yüzeyin ıslanabilirliğini değiştirebilecek toz, yağ, nem, korozyon ürünleri gibi kirletici maddelerin ortadan kaldırılması, daha sonra yüzey pürüzlülüğünü ve dolayısıyla teması artırmaktır. Bağlantının yapışma sorununu önlemek ve mukavemetini artırmak için yapıştırılan yüzeyin aşındırılarak pürüzlülük verilmesi önemlidir. Bu nedenle, yapıştırıcı ve yapıştırılan yüzey temasının yaygın olarak kullanılan zımparalama veya kumlama gibi mekanik bir işlemle artırılması tavsiye edilir. Bunlar genellikle bağlantı mukavemeti ve yüzey pürüzlülüğü için istenen seviyeyi kontrol etmek adına en etkili yöntemlerden kabul edilir (Mandolfino et al. 2013).

Gendler et al. (1994), tarafından yapılan bir çalışmada, kromik asitle anodize edilmiş 2024-T3 alüminyum alaşımı bir excimer lazer (193 nm dalga boyu, darbe başına $0.2-7 \text{ J cm}^{-2}$ enerji yoğunluğu ve 24 ns süre) yüzey ön işlemine tabi tutulmuştur. Lazer ön işlemi uygulanmış anodize alüminyum, ön işlem görmemiş numunelerle karşılaştırıldığında yapışma bağlanma mukavemetini %150'ye kadar artırdığı bulunmuştur. Bu artışı özellikle gözeneklilik miktarındaki artışa ve yüzeyde elde edilen pürüzlülüğe bağlı olarak yüksek oranlara çıkan mekanik kilitlenmeye bağlamışlardır (Gendler et al. 1994).

Ozenc and Sekercioglu (2013), tarafından yapılan bir çalışmada, yüzey ön işlemleri ve çalışma sıcaklığının yapışma mukavemetine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. 1050 alüminyum alaşımı mekanik aşınma, FPL (Orman Ürünleri Laboratuvarı) ve P2 (Sülfo Ferrik) aşındırma koşulları altında epoksi bazlı yapıştırıcı ile birleştirilerek farklı test sıcaklıklarında (-20 °C, 0 °C, 20 °C, 50 °C) kesme testleri gerçekleştirmişlerdir. Perçinin etkisini görmek için üç tip perçin konfigürasyonu test

edilmiştir. Tek bindirmeli kesme testlerinden elde edilen en yüksek sonuçlar 20 °C’de gözlemlenmiştir. Bu sıcaklıktaki test sonuçları, aşındırılmış yapışkan bağlantılarla karşılaştırıldığında, FPL ile aşındırılmış yapışkan bağlantıların %26 oranında, P2 ile aşındırılmış yapışkan bağlantıların ise %30 oranında iyileştiğini göstermiştir. Kesme dayanımı değerlerinin kimyasal ön işlemlerde mekanik ön işlemlere göre daha yüksek olmasının nedeni, daha gözenekli ve kontrollü yüzeylere bağlanmıştır (Ozenc and Sekercioglu 2013).

Atikah et al. (2014), tarafından yapılan bir çalışmada, yapıştırılan malzeme olarak alüminyum alaşımı ve paslanmaz çelik, yapıştırıcı olarak Araldite® ve çeşitli zımpara kağıtları kullanılıp farklı yüzey pürüzlülükleri elde edilerek yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tüm yapıştırma yüzeyleri farklı tane boyutlarına sahip zımpara kağıtları ile pürüzlendirildikten sonra Araldite® yapıştırıcı ile alüminyum alaşımı ve paslanmaz çelik çubukların alın bağlantıları oluşturulmuştur. Numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve bağlantı mukavemeti arasındaki ilişkiyi incelemek için çekme testleri yapılmıştır. Farklı yapıştırılan malzemeler için P360 ila P500 arasındaki zımpara kağıtları, benzer malzemeler için, özellikle alüminyum için P1000 zımpara kağıdının kullanılması en yüksek bağlanma mukavemetine sahip en uygun yüzey pürüzlülüğünü sunmuştur. Bununla birlikte, paslanmaz çelik için yüzey pürüzlülüğünü araştırma da zımpara kağıdını kullanmak iyi olmamakla beraber optimum bağlanma mukavemeti için P360 zımpara kâğıdı kullanılmıştır (Atikah et al. 2014).

Mandolino et al. (2015), tarafından yapılan bir çalışmada, Al6061 alüminyum alaşımı üzerinde yapıştırılacak yüzeylerin yapışmasını iyileştirmek ve yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerine etkisini araştırmak için lazer ve düşük plazma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Uygulanan işlemlerin etkinliğini değerlendirmek için bağlanma yüzeylerinde tek ve çift noktalarda çekme testleri yapılmıştır. İşlem görmüş numunelerin mukavemetinin, işlenmemiş referans numunelere göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. Düşük plazma işlemi uygulanan numunelerin en yüksek dayanıklılığa sahip olduğu tespit edilmiştir (Mandolino et al. 2015).

Rudawska et al. (2016), tarafından yapılan bir çalışmada, farklı basınç parametrelerinde (1, 2 ve 4 bar) ve farklı granülasyona sahip üç farklı aşındırıcı malzeme

kullanılarak çelik üzerinde farklı pürüzlülük parametrelerine sahip yüzeyler elde edilerek yapışmaya etkileri incelenmiştir. Hem yüzey pürüzlülüğünün hem de yapışkanlık özelliklerinin kumlama proses parametrelerinden ziyade uygulanan aşındırıcı malzeme tipinden daha fazla etkilendiği gözlemlenmiştir (Rudawska et al. 2016).

De Freese et al. (2018), tarafından yapılan bir çalışmada, karbon fiber takviyeli plastiklerin yüksek mukavemetli (yapısal) yapıştırması için parmak frezeleme yüzey ön işlemi kullanılarak araştırılmıştır. Farklı frezeleme parametreleri kullanılarak ön işleme tabi tutulan yüzeyler yapıştırılarak birleştirilmiş ve ardından test edilmiştir. Parmak frezelenmiş yüzeylerin yapışma mukavemeti, zımparalama ve diğer endüstriyel standart ön işlem yöntemlerinin mukavemetinin altında olduğu gözlemlenmiştir. Taramalı elektron mikroskobu ile yapılan ayrıntılı yüzey araştırmalarının sonucunda yapışma mukavemetinin zayıflığı için iki ana neden tanımlanmıştır. Yüzeyde oluşturulan intralaminer hasarlar ve mikropartikül kalıntıları karbon fiber takviyeli plastiklerin yapıştırma bağlantılarının mukavemetinin azalmasına neden olmuştur (De Freese et al. 2018).

Safari et al. (2020), tarafından yapılan bir çalışmada, yüzey pürüzlülüğünün, tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının kesme dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. 2024-T3 alüminyum levhalar standart parçalar halinde kesilerek yedi farklı gözenekli zımpara kâğıdı ile zımparalanmış, dört farklı süre ve basınç altında kumlanmıştır. Hazırlanan yüzey çiftleri yüksek viskoziteli Araldite 2015 yapıştırıcı ve düşük viskoziteli HPL1012/HPH112 epoksi yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmıştır. Numunelere uygulanan zımpara işleminin kayma mukavemetini başlangıçta artırdığını daha sonra artan pürüzlülüğe bağlı olarak azaldığını gözlemlenmiştir. Ayrıca bilye ile dövülen ve kumlama yapılan numunelerin yüzey pürüzlülüğünün artmasıyla birlikte mukavemetinin de sürekli olarak arttığı gözlemlenmiştir (Safari et al. 2020).

Wang et al. (2020), tarafından yapılan bir çalışmada, 2A12 alüminyuma tercih edilen yüzey ön işlemleri zımparalama (P80, P120), kumlama (0,6 MPa basınçta 80 gözenekli kuvars kumu) ve lazer işlemi (50 W nominal güç, 30 mm * 35 mm alan ayarı, 4.000 mm/s hız, 2-12 saniye arasında uygulama) uygulandıktan sonra epoksi yapıştırıcıyla birleştirilerek çekme testinde incelenmiştir. Yüzeyin pürüzlendirilmesiyle

yapışma mukavemeti önemli ölçüde artmıştır. Kumlama ve lazer yüzey ön işlemlerinin yapışma mukavemeti zımparalamadan çok daha yüksek bir iyileşmeyle sonuçlanmıştır. Yapıştırma işlemi öncesinde oksit tabakasının çıkarılması, yüzeyin pürüzlendirilmesi ve temizliğin kolayca gerçekleştirilmesi alüminyum yapıştırma bağlantılarının performansını artırmak için yüzey üzerine lazer işleminin uygulanmasını önermiştir (Wang et al. 2020).

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılar birçok mühendislik alanında yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların güvenli bir şekilde kullanılması için mekanik olarak araştırılması oldukça önemlidir. Araştırmacılar tarafından yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerinin araştırılması amacıyla birçok çalışma bulunmaktadır. Son yıllarda yapısal yapıştırıcılara nanopartiküller eklenmesine büyük bir ilgi duyulmaktadır. Çünkü eklenen nanopartiküller hem yapıştırıcıların hem de bağlantıların mekanik özelliklerini iyileştirmektedir (Saraç et al. 2018).

Zhai et al. (2006), tarafından yapılan bir çalışmada, yüzey pürüzlülüğünün ve farklı nano partiküllerin epoksi yapıştırıcıya ilave edilmesinin düşük karbonlu çelik yapıştırma bağlantıları üzerindeki etkisi çekme-yapışma testleri ile incelenmiştir. Çekme-yapışma testlerinin sonuçları, üç tür nano partikülden nano- Al_2O_3 'ün yapıştırıcının yapışma mukavemetini etkileyen en uygun katkı maddesi olduğunu göstermiştir. %2 oranında nano- Al_2O_3 ilave edilmiş yapıştırıcının 150 silisyum karbür kağıtla aşındırılan yüzeye yapışma mukavemetini yaklaşık 5 kat kadar arttırdığını göstermiştir. Ancak %2'den daha fazla ilave edilmesinin yapıştırma bağlantıları üzerinde olumsuz etkilere neden olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeninin, ağırlıkça %2 nano- Al_2O_3 ilave edilmesinin kohezyon birleşimi ve ara yüzey yapısını değiştirmesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir (Zhai et al. 2006).

Gkikas et al. (2012), tarafından yapılan bir çalışmada, AA2024-T3 alüminyum alaşımı anodize edilmiş ve ağırlıkça %0,5 ve %1 çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) epoksi yapıştırıcıya eklenerek tek bindirmeli yapıştırma bağlantıları oluşturulmuştur. Ağırlıkça %1 çok duvarlı karbon nanotüp eklenmiş yapıştırma bağlantılarının, ekleme yapılmamış yapıştırma bağlantılarına kıyasla kesme

mukavemetinde yaklaşık %4'lük bir iyileşme gözlemlenmiştir. Ayrıca sonuçlar incelendiğinde (Gkikas et al. 2012).

Gültekin et al. (2016), tarafından yapılan bir çalışmada, AA2024-T3 alüminyum alaşımı farklı oranlarda (%0,5, %1, %2) grafen nanoplateletleri ilave edilmiş DP460 epoksi yapıştırıcı ile birleştirilerek tek bindirmeli bağlantılar oluşturulmuştur. Nanoyapıların yapıştırıcıya eklenmesiyle elde edilen nanokompozit yapıştırıcının çekme deneylerinden elde edilen kopma yükü, dört farklı teknik kullanılarak tek bindirmeli bağlantılarda deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde %0,5 grafen ilave edilmiş bağlantılarda ortalama hasar yükünün yaklaşık %15 olduğu, %1 grafen ilave edilmiş bağlantılarda bu oranın %20 olduğu bulunmuştur. Grafen ilavesi %2'ye çıkarıldığında ortalama hasar yükü %7 azalmıştır (Gültekin et al. 2016).

Akpınar (2016), tarafından yapılan bir çalışmada, farklı yapısal yapıştırıcılar içerisine Al_2O_3 (alüminyum oksit) ve TiO_2 (titanyum dioksit) katılarak elde edilen tek tesirli bindirme bağlantıların çeki yükü altında mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Yapıştırılan malzeme olarak AA2024-T3 alüminyum alaşımı, yapıştırıcı olarak DP460, DP270, Araldite2015 ve AV138, katkı maddesi olarak ağırlıkça %1 ve %2 oranında Al_2O_3 (alüminyum oksit) ve TiO_2 (titanyum dioksit) kullanılmış ve tek tesirli bindirme bağlantı numuneleri üretilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde; Al_2O_3 (alüminyum oksit) ve TiO_2 (titanyum dioksit) partikül katkılı yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların hasar yükünü artırdığı görülmüştür. Tek tesirli bindirme bağlantılarının ortalama hasar yüklerine bakıldığında, partikül ekleme oranının %1 olduğu ve ekleme oranının artmasıyla hasar yükündeki artış oranının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, bağlantı hasar yüklerindeki artış ile uyumlu olduğu görülmektedir (Akpınar 2016).

Akpınar et al. (2017), tarafından yapılan bir çalışmada, yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek bindirmeli kompozit bağlantıların hasar yükünü artırmak için yapıştırıcıya nanopartiküller eklenmiş ve bu bağlantıların çekme ve eğilme momenti hasar yükleri deneysel olarak incelenmiştir. Yapıştırıcı olarak karbon elyaf kumaş takviyeli kompozitlerin kullanılması, yapıştırıcı tipine bağlı olarak birleştirmenin hasar yükünü önemli ölçüde artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca deneylerden elde edilen kırılma

yükleri incelendiğinde, yapıştırıcıya nanopartikül ilavesinin, yapıştırıcı ve nanopartikül tipine bağlı olarak bağlantının çekme ve dört noktalı eğilme hasar yükünü arttırdığı gözlemlenmiştir (Akpınar et al. 2017).

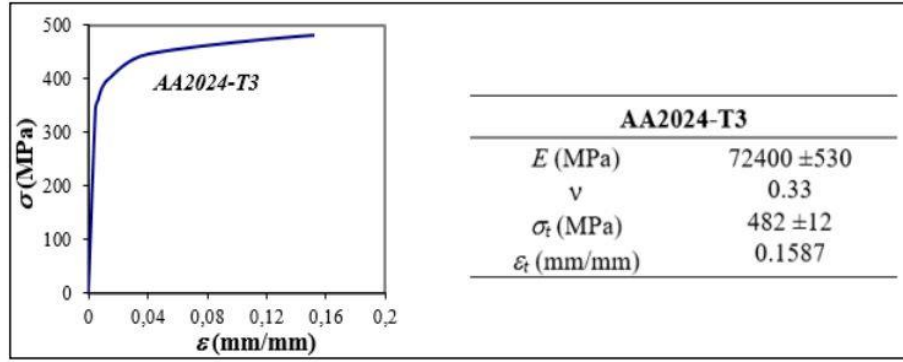
Reza Borghei et al. (2018), tarafından yapılan bir çalışmada, basit yapıştırıcı ve hibrit (perçinle bağlı) tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarına grafen nanopartikül katkı maddelerinin eklenmesinin bağlantıların mukavemeti üzerindeki etkisi incelenmiştir. Toplu numuneler üzerinde yapılan çekme testleri, saf yapıştırıcıya ağırlıkça %0,5 grafen eklendiğinde, saf yapıştırıcıya kıyasla iki grafen türü için nihai çekme mukavemetini neredeyse %24 ve %12 artırdığını göstermiştir. Taramalı elektron mikroskobu sonuçları grafen nanopartikülünün yüzey pürüzlülüğünü artırdığını göstermiştir. Hibrit yapılara grafen nanopartikülünün eklenmesi basit yapıştırılmalı bağlantılara göre bağlantı mukavemetinin daha yüksek olduğunu göstermiştir (Reza Borghei et al. 2018).

Çakır et al. (2021), tarafından yapılan bir çalışmada, epoksi yapıştırıcıya eklenen çeşitli oranlarda grafen nanopartikül (GNP) içerikleri ile cam elyaf takviyeli polimer plakalar (GFRP) yapıştırılarak oluşturulan bağlantıların kesme ve eğme davranışları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. GFRP yapıştırıcıya epoksi grafenin ağırlık içeriğine bağlı olarak, nanopartiküller ağırlıkça %0,1, 0,2, 0,3, 0,4 ve 0,5 oranında eklenmiştir. Yapıştırılan bağlantılar arasında daha iyi yük aktarımı sergileyen ağırlıkça %0,3 grafen nanopartikül ilavesinin, kayma mukavemetinde %145'lik iyileşmeler sağladığı görülmüştür. Ayrıca ağırlıkça %0,2 GNP içeren numunelerin eğilme mukavemetinde de %100 artış sağlanmıştır (Çakır et al. 2021).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

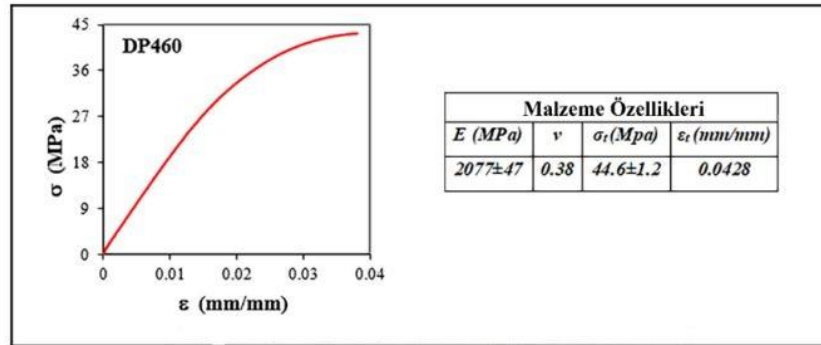
3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Bu tez çalışmasında; yapıştırılan malzeme olarak fiziksel ve mekanik özellikleri, yüksek korozyon dayanımı, hafifliği, işlenebilirliği ve düşük özgül ağırlığı gibi özelliklerinden dolayı havacılık, uzay ve otomotiv endüstrilerinde sıklıkla tercih edilen AA2024-T3 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Şekil 3.1’de yapıştırılan malzemeye ait mekanik özellikler verilmiştir.



Şekil 3.1. AA2024-T3 alüminyum alaşım malzemesinin mekanik özellikleri (Akpınar 2016).

Çalışmada, 3M firması (St. Paul, MN, USA) tarafından üretilen DP460 çift bileşenli epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Şekil 3.2’de yapıştırıcıya ait mekanik özellikler verilmiştir (Akpınar 2016).

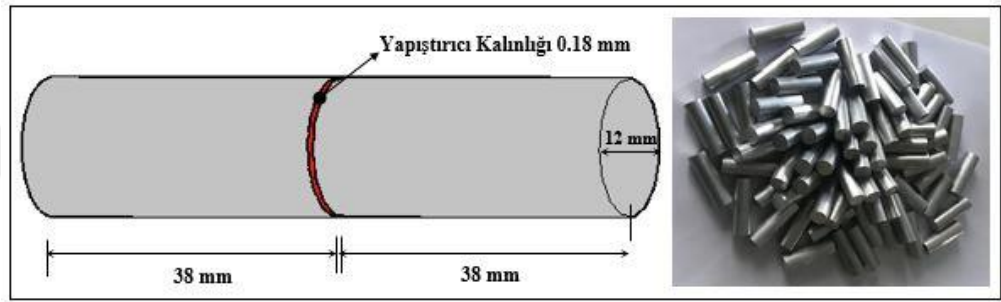


Şekil 3.2. DP460 yapıştırıcısının mekanik özellikleri (Akpınar 2016)

3.2. Yapıştırma Bağlantısı Numunelerinin Hazırlanması

3.2.1. Yapıştırılan numunelerin hazırlanması

Bu çalışmada Şekil 3.3’de verilen alın bağlantının geometrik modeli ve parametreleri göz önüne alınarak AA2024-T3 alüminyum alaşım çubukları elmas testere ile 12 mm çapında ve 38 mm uzunluğunda silindirik her bir bağlantı numune parametresi için iki adet parça kesilmiştir.



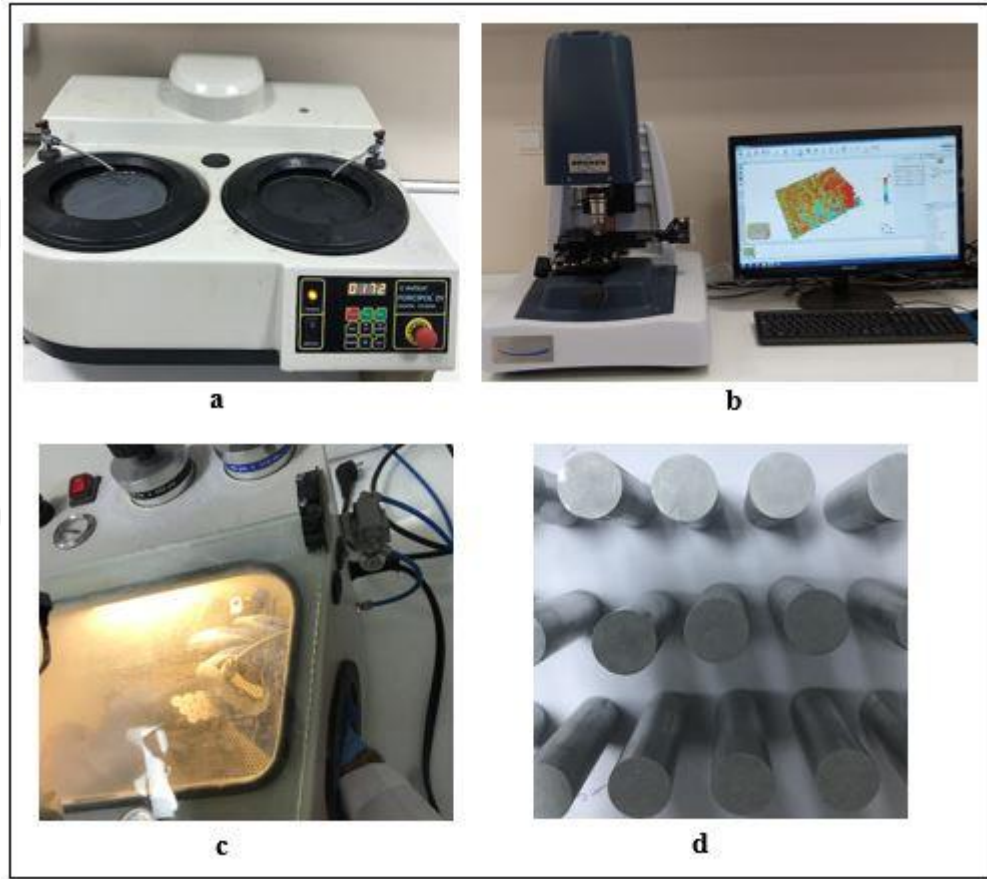
Şekil 3.3. Çalışmada kullanılan alın bağlantı geometrisi

Yapıştırma bağlantılarını toz, yağ, nem, korozyon gibi kirletici maddelerden arındırmak, daha sonra yüzey pürüzlülüğünü dolayısıyla teması artırarak bağlantıların yüksek performans göstermeleri için yapıştırılan malzemelere yapıştırma işlemi öncesinde yüzey ön işlemleri uygulanması gerekmektedir. AA2024-T3 numune parçalarına yapıştırma işleminden önce aşağıda anlatılan yüzey hazırlama işlemleri uygulanmıştır.

Her bir bağlantı parametresi için 3 bağlantı numunesi test edilmiştir. Bunun için kesilen 6 adet silindirik alüminyum alaşım parçalarının yüzeyleri yağ, kir, toz, çapak gibi atıklardan arındırılmak ve yüzeylere pürüzlülük kazandırılmak için 60, 180, 400 ve 800 numaralı SiC zımpara kağıdı ile Şekil 3.4a’da gösterilen zımparalama makinesi ile pürüzlendirilmiştir. Zımparalama işlemi sonrasında numunelerin yüzey pürüzlülükleri Şekil 3.4b’de gösterilen 3D profilometre ile ölçülmüştür. Kumlama işlemi yapılan silindirik alüminyum alaşım parçalarının yüzeylerine öncelikle 800 numaralı SiC zımpara kağıdı ile zımparalama işlemi yapılarak daha pürüzsüz bir yüzey elde edilmiştir. Sonrasında Şekil 3.4c’de gösterilen kumlama makinesi ile Al_2O_3 tozu kullanılarak 30°

3. MATERYAL ve YÖNTEM

püskürtme açısı ve 0,2, 0,3 ve 0,4 MPa'lık basınç altında numunelerin yüzeyi kumlanmıştır. Kumlama işlemi sonrasında alüminyum alaşım parçalarının yüzey pürüzlülükleri 3D profilometre ile ölçülmüştür. Daha sonra zımparalanmış ve kumlanmış tüm numuneler toz temizleyici kullanılarak musluk suyu altında yıkanmıştır. Numuneler yıkama işleminden sonra 20 dakika aseton içerisinde bekletilmiştir. Numune parçaları bunun ardından 60 °C' de sıcaklıktaki bir fırın içerisinde kurutularak yapıştırma işlemi öncesinde yüzey hazırlama işlemi tamamlanmıştır.



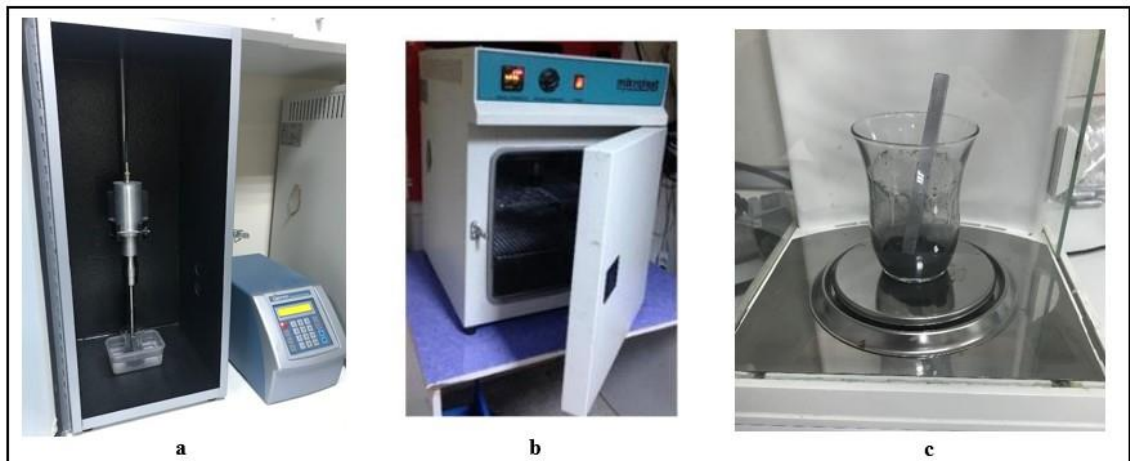
Şekil 3.4. a) Zımparalama cihazı, b) 3D profilometre cihazı, c) kumlama cihazı, d) yüzeyi hazırlanmış parçalar.

3.2.2. Yapıştırıcıların hazırlanması

Nanoyapı ilave edilmiş yapıştırıcının hazırlanması: Yapıştırıcıya ilave edilmiş nanoyapıların biri, ağırlıkça %1 Karbon Nanotüp-COOH (çap 10 ila 20 nm, uzunluk 10 ila 30 μm , saflık %95, yüzey alanı 200 m^2/g ve COOH kaplama oranı ağırlıkça %2) ve diğeri Grafen-COOH (kalınlık 5 ila 7 nm, çap 5 mikron ve yüzey alanı 120 ila 150 m^2/g)

olarak kullanılmıştır. Nanoyapı ilave edilmiş bulk numunelerin hazırlanmasında en önemli nokta, nanoyapıların yapıştırıcı içerisinde homojen bir şekilde dağılımıdır. Aksi takdirde, numunede topaklanmalar oluşarak istenmeyen sonuçlar ortaya çıkabilir. Nanoyapıları yapıştırıcılara ilave etmek için çok sayıda teknik bulunmaktadır. Bu çalışmada nanoyapı ilave edilmiş yapıştırıcılar hazırlama yöntemi olarak Gültekin et al. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada elde edilen yeni bir yöntem olan nanoyapı katkılı yapıştırıcı hazırlama yöntemi dikkate alınmıştır.

Bu yöntemde, boş ve temiz bir bardağa hassas terazi kullanılarak yapıştırıcı karışımın (epoksi ve sertleştirici) toplam miktarının ağırlıkça %1' i kadar nanoyapı ve yaklaşık 10 gram aseton eklenerek 10 dakika boyunca 30 kHz frekansında Şekil 3.5a' da gösterilen ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Daha sonra nanoyapı+aseton karışımına gerekli miktarda epoksi (iki bileşenli DP460 yapıştırıcının karışım oranı: epoksi 2 / sertleştirici 1) eklendikten sonra 30 kHz frekansında 30 dakika boyunca ultrasonik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Aseton+nanoyapı+epoksi karışımının içerisindeki aseton Şekil 3.5b' de gösterilen bir kurutma fırını içerisinde kurlleşme sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta (50 °C) tutulmasıyla buharlaştırılmıştır. Asetonun tamamen buharlaşması, Şekil 3.5c' de gösterilen hassas bir terazi kullanılarak epoksi ve nanoyapı miktarı ölçülerek kontrol edilmiştir. Daha sonra epoksi ve hızlandırıcı birleşim oranına göre hızlandırıcı eklenip 10 dakika elle karıştırılmıştır.



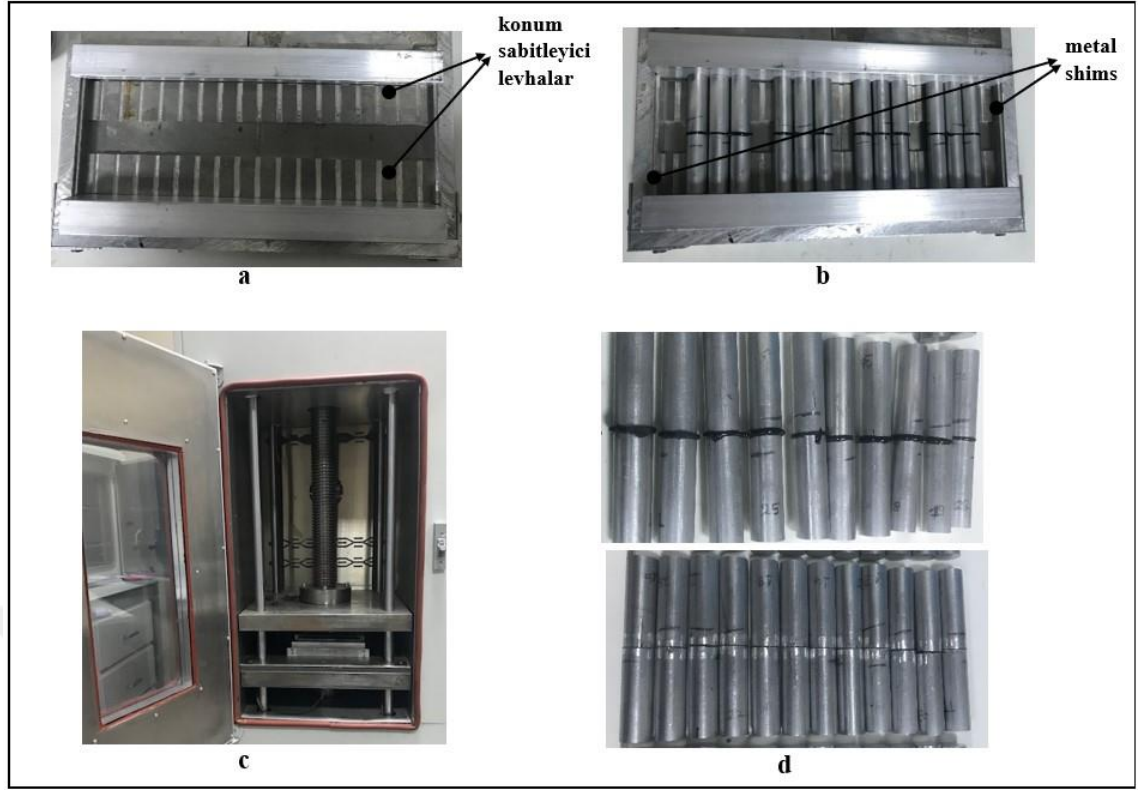
Şekil 3.5. a) Ultrasonik karıştırıcı ile epoksi ve nanoyapının karıştırılması, b) kurutma fırını, c) hassas terazi ile epoksi ve nanoyapı miktarının kontrolü.

Nanoyapı ilave edilmemiş yapıştırıcının hazırlanması: Nanoyapı ilave edilmiş ve ilave edilmemiş yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin karşılaştırılması için, nanoyapı ilave edilmemiş yapıştırıcılar nanoyapı ilave edilmiş yapıştırıcı hazırlama yöntemi dikkate alınarak üretilmiştir. Boş ve temiz bir bardağa hassas terazi kullanılarak yapıştırıcı karışımın (epoksi ve sertleştirici) bileşim oranına göre epoksi ve yaklaşık 10 gram aseton eklenerek 30 dakika boyunca 30 kHz frekansında karıştırılmıştır. Aseton+epoksi karışımının içerisindeki aseton kurutma fırını içerisinde kurluşme sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta (50 °C) tutulmasıyla buharlaştırılmıştır. Daha sonra epoksi ve hızlandırıcı birleşim oranına göre hızlandırıcı eklenip 10 dakika elle karıştırılmıştır.

3.3. Yapıştırma Bağlantılarının Hazırlanması

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş silindirik alın bağlantıları üretmek için Şekil 3.6' da gösterilen özel yapıştırma kalıbı kullanılmıştır. Kullanılan kalıp ve yardımcı aparatlar ile yapıştırılan malzemelerin pozisyonları ve yapıştırıcı kalınlığının ayarlanması yapılmıştır. Ayrıca silindirik numunelerin alın altına gelebilmesi ve birkaç numunenin aynı şartlarda üretilmesi için önceden hazırlanmış konum sabitleyici levhalar kalıp içine yerleştirilmiştir (Şekil 3.6a).

Bağlantı numunelerinin yapıştırma bölgelerine yapıştırıcı uygulandıktan sonra bir mastar kullanılarak yüzeye yayılmıştır. Yapıştırıcı kalınlığını 0,18 mm olarak ayarlamak için alın bağlantı uzunluğunda (numune+yapıştırıcı+numune) metal shims kalıbın her iki kenarına yerleştirilmiştir (Şekil 3.6b). Çalışmada kullanılan DP460 yapıştırıcısının kurluşme şartı zamana ve sıcaklığa bağlıdır. Bu nedenle kurluşmenin sağlanabilmesi için kalıba yerleştirilen silindirik numuneler Şekil 3.6c'de gösterilen 70 °C'deki sıcak fırına yerleştirilmiş ve 120 dakika bekletilmiştir. Silindirik alın bağlantı numunelerinin kurluşmesinden sonra, numuneler kalıptan çıkarılmıştır. Alın bölgelerinin kenarlarında fazla kalan yapıştırıcılar kesici takım ile temizlenerek bağlantı numuneleri teste hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.6d). Testlerin öncesinde numunelerin yapıştırıcı kalınlıkları ayrı ayrı ölçülmüştür ve ortalama yapıştırıcı kalınlığı $0,18 \pm 0,01$ mm olarak bulunmuştur.



Şekil 3.6. a) Özel tasarlanmış üretim kalıbı ve konum sabitleyici levhalar, b) bağlantı numunelerinin yerleştirilmesi ve metal shims, c) sıcak fırın, d) kürleşme sonrası temizlenmiş bağlantı numuneleri.

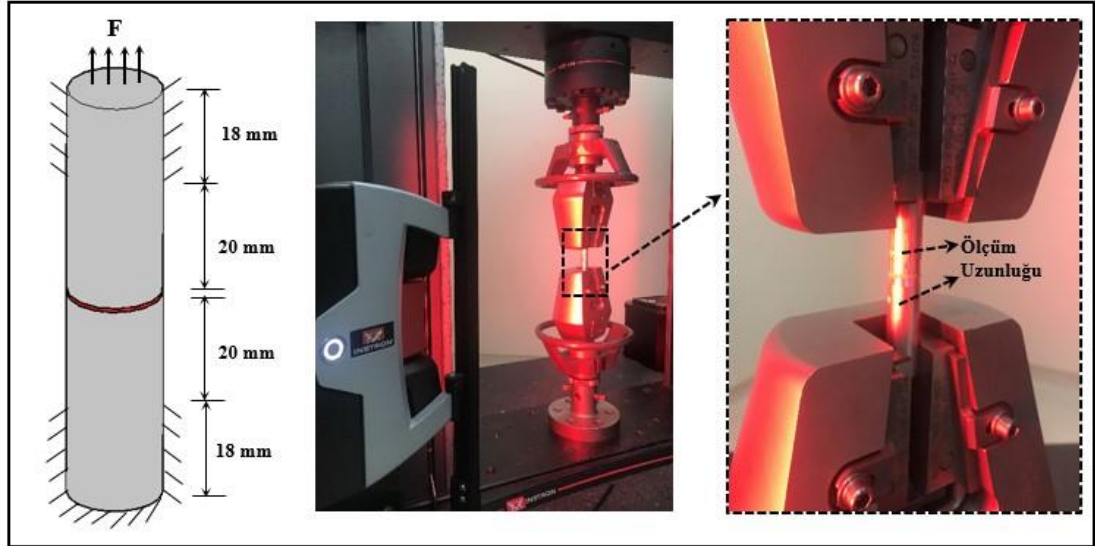
Bu çalışmada, bağlantı yüzeylerini pürüzleştirmek için dört farklı zımpara kağıdı ve üç farklı kumlama basıncı, pürüzleştirilen bağlantı yüzeylerine iki farklı nanoyapılı kompozit yapıştırıcı uygulanmıştır. Elde edilen silindirik alın bağlantıların mekanik davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Tüm bağlantı numunelerinde yapıştırılan malzemenin çapı, yapıştırıcı kalınlığı ve yapıştırıcı alanı aynıdır. Her parametre için üçer adet numune hazırlanarak 63 adet silindirik alın birleştirme numunesi hazırlanmıştır. Bu numunelerin deneysel parametreleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantı noktaları için deneysel parametreler

Bağlantı Tipi	Yüzey Pürüzlendirme	Numara/Basınç	Yapıştırıcı Nanoyapı Maddesi
BJ-sp-60	Zımpara Kağıdı	60 SiC	----
BJ-sp-180	Zımpara Kağıdı	180 SiC	----
BJ-sp-400	Zımpara Kağıdı	400 SiC	----
BJ-sp-800	Zımpara Kağıdı	800 SiC	----
BJ-sp-60-G	Zımpara Kağıdı	60 SiC	Grafen-COOH
BJ-sp-180-G	Zımpara Kağıdı	180 SiC	Grafen-COOH
BJ-sp-400-G	Zımpara Kağıdı	400 SiC	Grafen-COOH
BJ-sp-800-G	Zımpara Kağıdı	800 SiC	Grafen-COOH
BJ-sp-60-C	Zımpara Kağıdı	60 SiC	Karbon Nanotüp-COOH
BJ-sp-180-C	Zımpara Kağıdı	180 SiC	Karbon Nanotüp -COOH
BJ-sp-400-C	Zımpara Kağıdı	400 SiC	Karbon Nanotüp -COOH
BJ-sp-800-C	Zımpara Kağıdı	800 SiC	Karbon Nanotüp -COOH
BJ-sb-0.2	Kumlama	0.2 MPa	----
BJ-sb-0.3	Kumlama	0.3 MPa	----
BJ-sb-0.4	Kumlama	0.4 MPa	----
BJ-sb-0.2-G	Kumlama	0.2 MPa	Grafen-COOH
BJ-sb-0.3-G	Kumlama	0.3 MPa	Grafen-COOH
BJ-sb-0.4-G	Kumlama	0.4 MPa	Grafen-COOH
BJ-sb-0.2-C	Kumlama	0.2 MPa	Karbon Nanotüp -COOH
BJ-sb-0.3-C	Kumlama	0.3 MPa	Karbon Nanotüp -COOH
BJ-sb-0.4-C	Kumlama	0.4 MPa	Karbon Nanotüp -COOH

3.4. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantıların Test Prosedürü

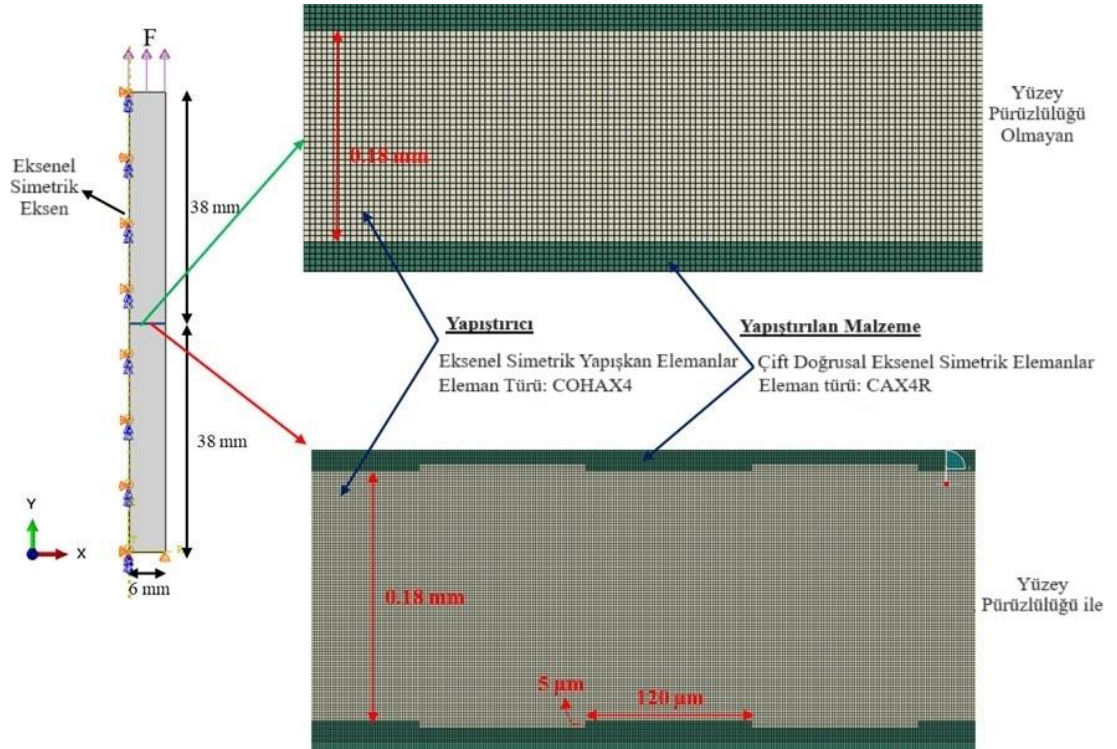
Tüm çekme deneyleri için bilgisayar kontrollü Instron-5982-100 kN (ABD) universal çekme cihazı kullanılmıştır. Deneyler 1 mm/dakika çekme hızıyla, 19 °C’de ve %28 nem oranında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan sınır koşulları ve yükleme Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Testlerden önce her numunenin iki nokta arasındaki ölçüm uzunluğu ve yapışkan tabaka kalınlığı ölçülmüş ve not edilmiştir. Deneyler sırasında her numune dikkatlice gözlemlenmiş ve arızanın türü kaydedilmiştir. Aynı zamanda numunelerin taşıyabilecekleri maksimum yük de kaydedilmiştir.



Şekil 3.7. Çekme testi sınır koşulları ve yükleme

3.5. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantıların Nümerik Analizi

ABAQUS/Standart yazılımı kullanılarak, çekme yüküne maruz kalan alın eklemine 2 boyutlu simetrik sonlu eleman modellemesi Şekil 3.8’de gösterildiği gibi oluşturulmuştur. İki farklı model ele alınmıştır. Birincisi yapıştırılan parçalardaki herhangi bir yüzey pürüzlülüğünü göz ardı ederken, ikincisi yapıştırılan parçanın yarıçapı boyunca 120 μm aralıklarla 5 μm ’lik bir yüzey pürüzlülüğünü tanımlamıştır. Modelin boyutları 3.2.1 başlığında belirtilenlerle aynıydı.



Şekil 3.8. Çekme yüklemesine maruz kalan alın bağlantısı için geliştirilen sonlu eleman modelinin detayları.

İlk modelde, yapıştırıcı katman ve yapıştırılan malzemeler sırasıyla 0,005 mm x 0,005 mm ve 0,002 mm x 0,002 mm eleman boyutları kullanılmıştır. İkinci modelde ise en az üç eleman yüksekliğinde pürüzlülüğü temsil edecek şekilde daha küçük eleman boyutu dikkate alınmıştır. Her iki modelde de kullanılan ağ boyutları ağ yakınsaması araştırmasını tahmin etmiştir. Bağlantının alt tarafı tüm serbestlik derecelerinde sabitlenirken, çekme yükü karşı tarafından uygulanmıştır.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda yapıştırıcı tabakanın ve yapıştırılan malzemelerin davranışları, sırasıyla yapıştırıcı bölge modellemesi (CZM) ve elasto-plastik malzeme davranışı kullanılarak modellenmiştir. Burada yapıştırıcı tabaka ile alüminyum ara yüz arasında herhangi bir temas belirtilmediği için yapıştırıcı tabakanın arızalanması, numunelerin arızalanmasına neden olmuştur. Çekme gerilmesi ve ayrılma yer değiştirmesi arasındaki ilişkiler çekme ayrılma yasası tarafından kontrol edildikten sonra yapıştırıcı üçgen çift doğrusal bir tepkiyle sonuçlanmıştır. Bu ifade, yapısal analizlerde yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin karmaşık davranışını anlamak için kullanılan analitik ve matematiksel yöntemleri açıklamaktadır. Hasar başlatma kriteri olarak ikinci dereceden ayırma yasası kullanılmıştır.

$$\left(\frac{\langle\sigma_n\rangle}{\sigma_n^{max}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_t}{\tau_t^{max}}\right)^2 = 1 \quad (3.1)$$

Burada $\langle*\rangle$, $(*+|*|)/2$ olarak tanımlanan Macaulay parantezini temsil eder. σ_n , τ_t çekme kuvvetlerini temsil ederken, σ_n^{max} ve τ_t^{max} sırasıyla normal (n) ve kesme (t) yönlerindeki dayanım değerleridir. Bu nominal gerilme oranları bir değerine ulaştığında hasarın başlayacağı varsayılmıştır. Daha sonra, aşağıdaki ikinci dereceden hasar evrimi denklemiyle her bir mod için çekişin sifıra indiği lineer bir zayıflama süreci başlamaktadır:

$$\left(\frac{G_n}{G_{c,n}}\right)^2 + \left(\frac{G_t}{G_{c,t}}\right)^2 = 1 \quad (3.2)$$

G_i , σ_i saf mod çekişine karşılık gelen ayrılma δ_i üzerinde yaptığı işi temsil ederken, her mod için kırılma tokluğu $\delta_{c,i} = 2G_{c,i}/\sigma_i^0$ formülüyle karakterize edilen çekme-ayırma eğrisi altındaki alanı ifade eder. Daha fazla ayrıntı başka bir yerde bulunabilir (Kadioglu et al. 2019). Yapıştırılan malzemeler ve DP460 yapıştırıcının yanı sıra farklı nanoyapılara sahip karışımı için malzeme parametreleri Çizelge 2 ve 3'te sunulmuştur. Yapıştırıcıların mukavemet ve kırılma enerjisi değerleri Kazaz et al. (2018) ve Kanar et al. (2018) yaptıkları çalışmalardan alınmıştır. Bu değerler Mod I ve Mod II deneyleri yapılarak elde edilmiştir. Sırasıyla çift konsol kiriş ve kalın yapışık kesme testi bağlantıları kullanılarak $G_{c,n}$ ve $G_{c,t}$ elde edilmiştir.

Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemenin mekanik özellikleri (Bayramoglu et al. 2021).

	AA2024-T3	DP460
E (MPa)	70410 ± 615	1984 ± 43
ν	0.33	0.37
σ_t (MPa)	476 ± 17	38.4 ± 1.1
ε_t (%)	16	4.7

E: Young modülü; ν : Poisson oranı; σ_t : Maksimum gerilme; ε_t : Maksimum şekil değiştirme

Çizelge 3.3. CZM modelleme için DP460 yapıştırıcının özellikleri (Kantar et al. 2018; Kazaz et al. 2018).

Katkı Maddesi	σ_n^{max} (MPa)	$G_{c,n}$ (N/mm)	τ_t^{max} (MPa)	$G_{c,t}$ (N/mm)
Nanoyapı katkısız	32.6	2.56	28.5	11.71
Grafen	35.6	1.65	23.7	10.52
Karbon Nanotüp-COOH	37.9	3.30	31.2	10.32

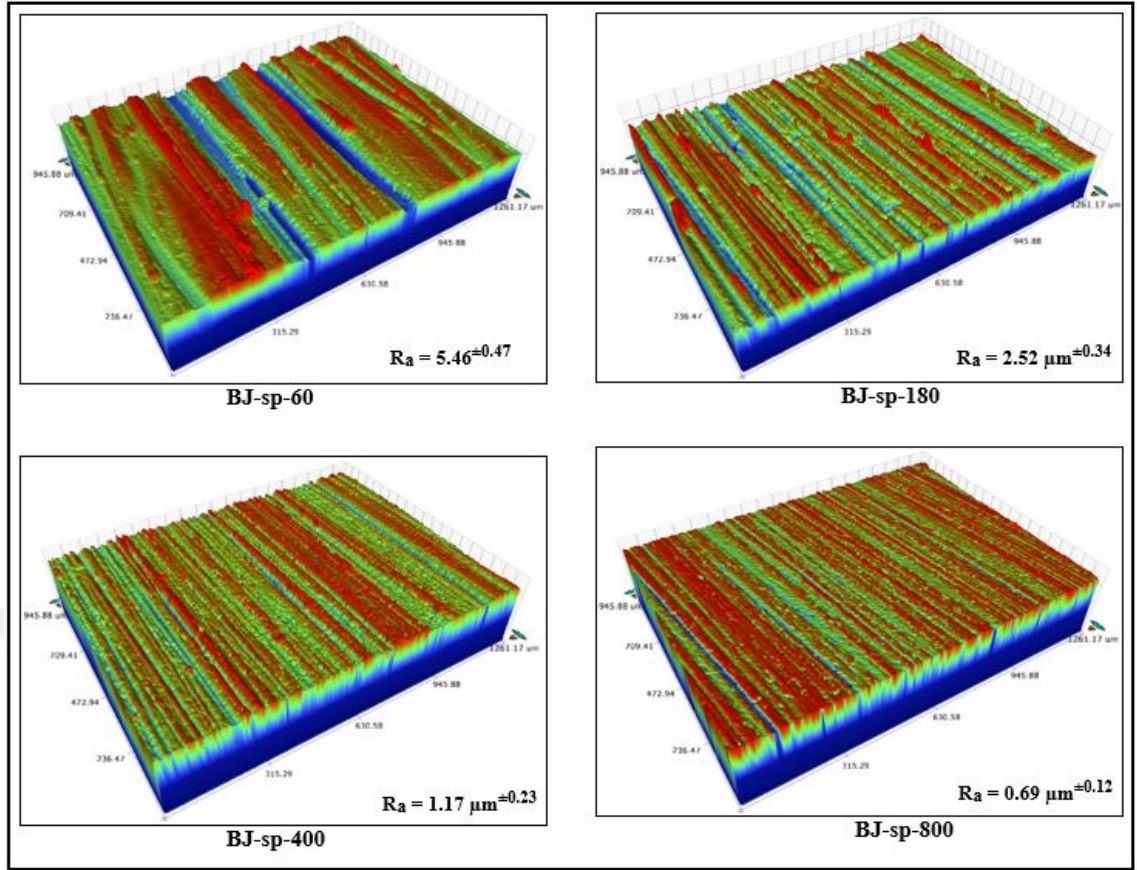
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında farklı yüzey pürüzlülüklerinin nanoyapı ilave edilerek yapıştırıcıyla birleştirilmiş silindirik alın bağlantılardaki mukavemeti üzerine etkisi incelenmiştir. Bu etkiyi araştırmak amacıyla üretilen üçer bağlantı numunesi kopuncaya kadar çeki yüküne maruz bırakılmıştır.

4.1. Zımparalama ve Kumlama Yüzey Ön İşlemlerinin Yapıştırılan Numune Üzerindeki Etkisinin Araştırılması

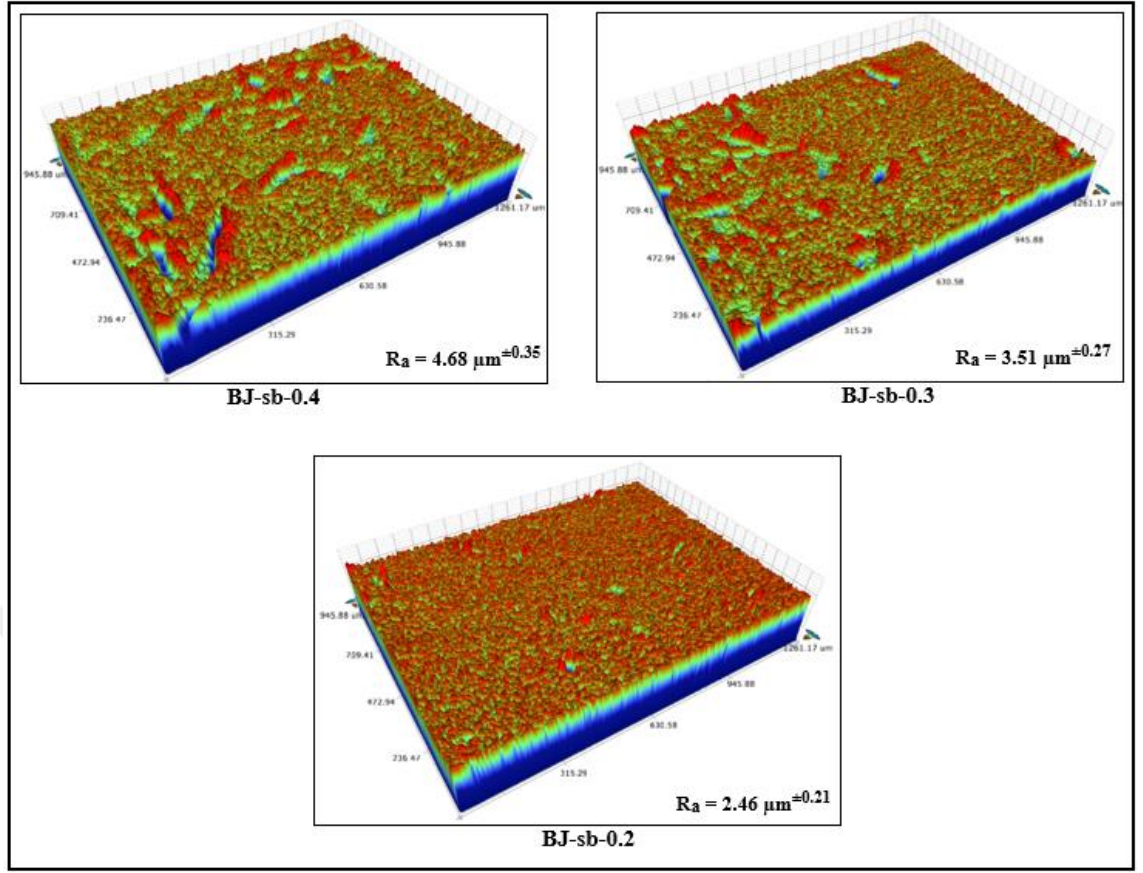
Zımparalama ve kumlama yüzey ön işlemleri sonrasında numunelerin yüzey kalitesi değerlendirme sonuçları Şekil 4.1 ve 4.2’de sunulmuştur. 3 boyutlu optik profilometre cihazı ile 60, 180, 400 ve 800 SiC zımpara kağıdı kullanılarak ve 0,2, 0,3 ve 0,4 MPa basınçlarda kumlama yapılarak oluşturulan 7 farklı yüzey topografyası analiz edilmiştir. Diferansiyel endüktans sensörlerinin kullanıldığı pürüzlülük dedektörü, yüzey analizleri için Ra (aritmetik ortalama yükseklik), Rq (ortalama kare pürüzlülük) ve Rz (10 noktalı yükseklik) parametrelerini sunmuştur. Bunların arasında yüzey pürüzlülüğü değeri olarak Ra (μm) parametresi dikkate alınmıştır. Şekil 4.1 ve 4.2’de gösterilen yüzey topografyalarından, yapıştırılacak numunelerin yüzeylerinin zımparalama veya kumlama sonucu bozulmadığı görülmektedir.

Zımparalama yöntemiyle yüzeyi pürüzlendirilen numunelerin Ra pürüzlülük değerleri değerlendirildiğinde 60 SiC zımpara (BJ-sp-60) ile oluşturulan yüzeylerde zımparalama sonucu oluşan pürüzlülük ve çizgiler daha belirgindir. Ancak zımparanın SiC değeri arttıkça yüzey pürüzlülük değeri ve zımparanın oluşturduğu çizgilerin derinliği azalmaktadır (Şekil 4.1). Öte yandan kumlama ile pürüzlendirilen numunelerin daha homojen bir yüzeye sahip olduğu, girinti ve çıkıntıların yoğun şekilde noktalandığı görülmüştür. Ayrıca kumlama basıncı azaldıkça yüzey homojenliği artar ve yüzey pürüzlülüğü azalır (Şekil 4.2).



Şekil 4.1. Zımparalanmış alüminyum yüzeylerin 3 boyutlu yüzey pürüzlülüğü ölçümleri

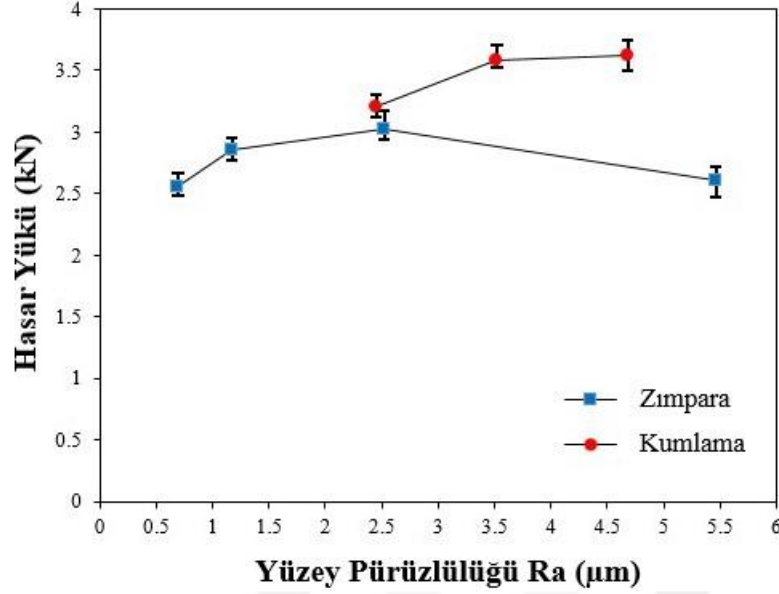
Mevcut araştırmanın amaçlarından biri, yüzeyleri iki farklı teknik (zımparalama ve kumlama yöntemleri) kullanılarak pürüzlendirilen numunelerden yapılan bağlantıların mekanik özelliklerinin incelenmesidir. İki farklı yöntem kullanılarak pürüzlendirilen yüzeylerin Ra değerleri birbirine yakın olacaktır. Beklendiği gibi, BJ-sp-60 ve BJ-sb-0.4' ün yanı sıra BJ-sp-180 ve BJ-sb-0.2 numunelerinin Ra' sı birbirine yakındır (Şekil 4.1 ve 4.2).



Şekil 4.2. Kumlanmış alüminyum yüzeylerin 3 boyutlu yüzey pürüzlülüğü ölçümleri

4.2. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Silindirik Alın Bağlantılarının Test Sonuçları

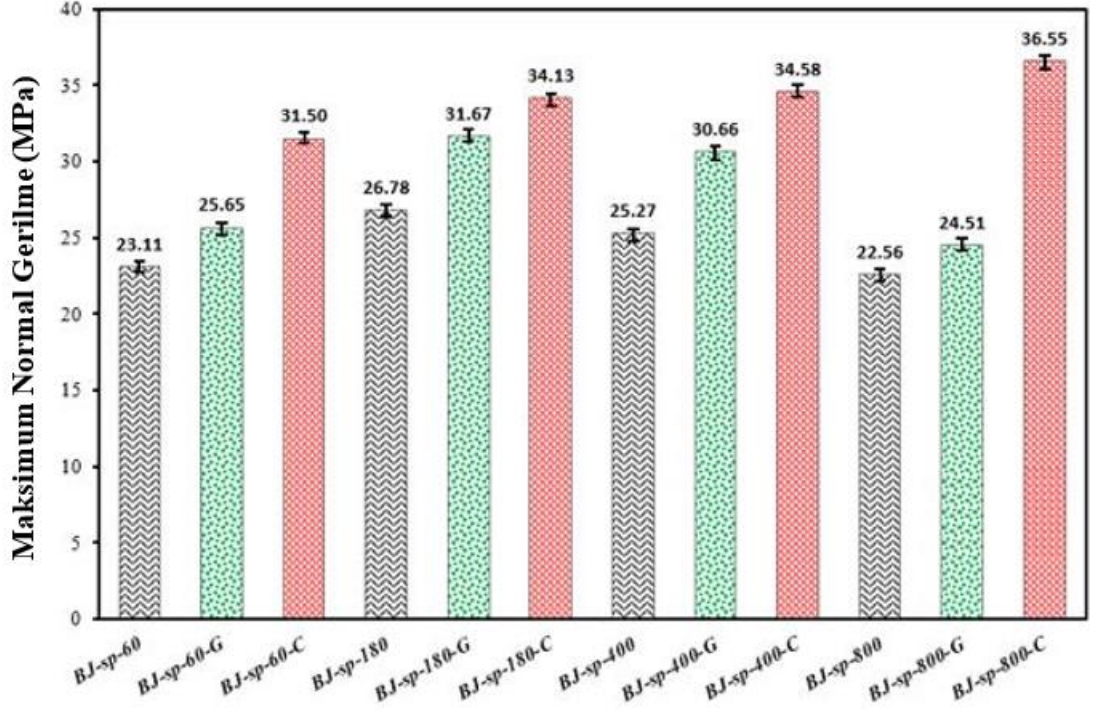
Yüzeyleri iki farklı şekilde pürüzlendirilen ve DP460 yapısal yapıştırıcı ile birleştirilen alın bağlantılarının statik hasar yükleri elde edilmiştir. Çeşitli yüzey pürüzlülüğü yöntemleri için alın bağlantı testleri esnasında elde edilen maksimum hasar yükleri Şekil 4.3’de gösterilen grafikte özetlenmiştir. Testlerden elde edilen sonuçlara göre; yüzey pürüzlülüğü arttıkça maksimum kuvvet değerlerinde de artan bir eğilim elde edilmiştir. Bununla birlikte, yüzey pürüzlülüğündeki artışla beraber bağlantı mukavemetindeki artış, pürüzlülük çok daha yüksek değerlere ulaştığında ters etki oluşturmaktadır. Bu durum şu şekilde açıklanabilir. Zımparalama ve kumlama işlemleriyle yüzeyler pürüzlendirildiğinde yüzeylerde oluşan boşluklara yapıştırıcı girerek mekanik kilitleme oluşturur. Bu kilitleme bağlantının mukavemetini artırmaktadır. Ancak yüzey pürüzlülüğünün aşırı artması, yapıştırıcının yüzeye nüfuz etmesini ve ıslatmasını zorlaştıracığı için bağlantı mukavemetini zayıflatır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Pürüzlülük değişiminin maksimum bağlantı kopma yüküyle karşılaştırılması

Silindirik alın bağlantıların statik çekme hasar yükleri, ağırlıkça %1 karbon nanotüp-COOH ve grafen nanoyapıların ilave edilmesi ile elde edilen nanoyapı katkılı yapıştırıcı ve katkısız saf DP460 yapısal yapıştırıcı kullanılarak ölçülmüştür. Bağlantıların statik normal gerilmeleri, test sonucu elde edilen statik hasar yüklerinin yapışma yüzey alanına bölünmesiyle hesaplanmıştır. Yüzeyleri zımparalama işlemi ile pürüzlendirilmiş nanoyapılı ve nanoyapısız silindirik alın bağlantıların ortalama normal gerilmeleri Şekil 4.4’de gösterilmektedir. Bu veriler incelendiğinde, saf yapıştırıcı ile oluşturulan silindirik alın bağlantıların normal gerilme değerleri, yüzey pürüzlülük değerleri 1,17 µm (BJ-sp-400), 2,52 µm (BJ-sp-180) ve 5,46 µm (BJ-sp-60) olanların 0,69 (BJ-sp-800) yüzey pürüzlülüğü değerine kıyasla sırasıyla yaklaşık olarak %12, %19 ve %2 oranında artış görülmektedir. Yapıştırıcıya ağırlıkça %1 oranında Grafen nanoyapısı eklendiğinde bağlantıların normal gerilmeleri %9 ila %21 oranında artmaktadır. Ancak yapıştırıcıya ağırlıkça %1 Karbon Nanotüp-COOH eklendiğinde bağlantıların normal gerilmeleri yaklaşık olarak %27 ila %62 oranında artmaktadır. Karbon Nanotüp-COOH nanoyapı ilavesi ile bağlantının normal gerilme değerindeki artış, yüzey pürüzlülüğü maksimum olan (BJ-sp-60) olan bağlantılardan minimum (BJ-sp-800) olan bağlantılara gidildikçe daha etkili olduğu görülmektedir. Bu durum nanoyapılı ve nanoyapısız bağlantıların karşılaştırılmasından elde edilen en önemli sonuçlardan biridir. Ayrıca orta yüzey pürüzlülüğü olan bağlantılarda (BJ-sp-180 ve BJ-sp-400) yapıştırıcıya Grafen ve Karbon Nanotüp nanoyapıları eklenen bağlantıların

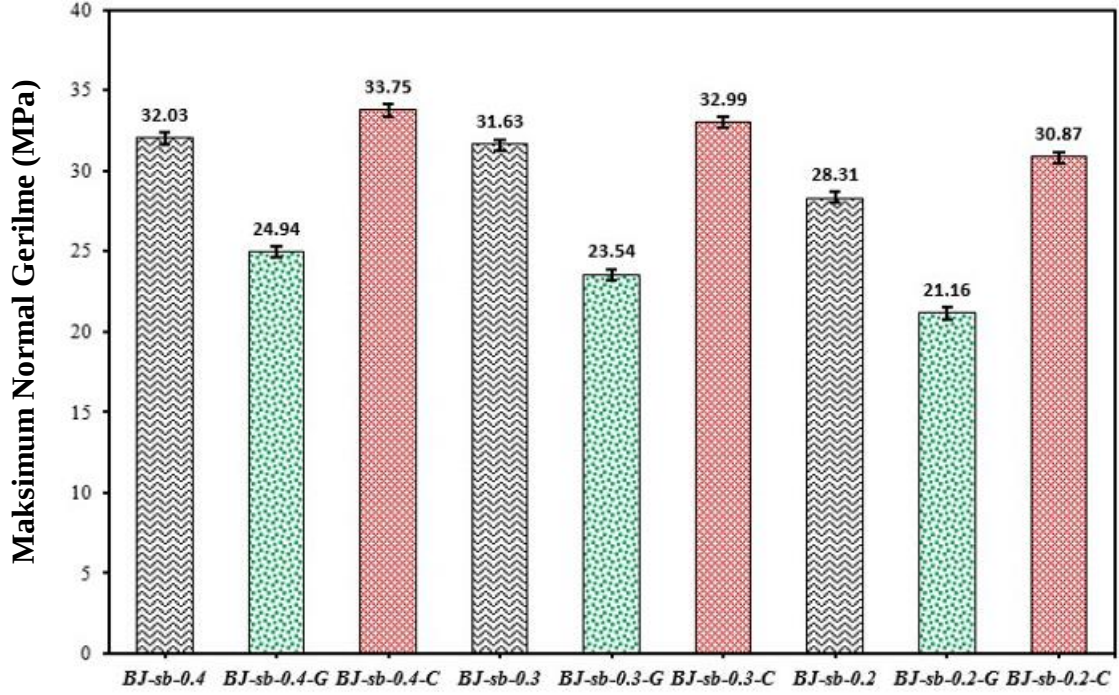
normal gerilmelerinin birbirine yakın olması bir diğer sonuçtur. Bu durumda yapıştırıcıya Karbon Nanotüp-COOH nanoyapısının eklenmesinin yalnızca yapıştırıcının direncini değil aynı zamanda yapıştırılan malzemenin yüzeyine yapışma direncini de artırdığı sonucuna varıldığı söylenebilir.



Şekil 4.4. Zımparalama yöntemiyle pürüzlendirilmiş bağlantılarda maksimum normal gerilme ile yüzey pürüzlülüğünün karşılaştırılması.

Yüzeyleri kumlama işlemiyle pürüzlendirilerek saf yapıştırıcı ile birleştirilen silindirik alın bağlantıların maksimum normal gerilmeleri karşılaştırıldığında, yapıştırılan malzemelerin yüzey pürüzlülüğünün $2,46 \mu\text{m}$ 'den (BJ-sb-0.2) $4,68 \mu\text{m}$ 'ye (BJ-sb-0.4) yükseldikçe bağlantıdaki gerilmelerin yaklaşık olarak %13 arttığı görülmektedir (Şekil 4.5). Ancak yapıştırıcıya ağırlıkça %1 grafen nanoyapı ilave edilen yapıştırıcıyla birleştirilen alın bağlantıların, nanoyapı katkısız saf bağlantılara göre soyulma gerilme değerleri yaklaşık %22 ile %26 arasında azalmaktadır. Bu durum, grafen nanoyapı eklendiğinde yapıştırıcının viskozitesinin artması ile açıklanabilir. Bu durum yapıştırıcıda boşluklar oluşturarak yapıştırıcının daha az homojen hale gelmesine neden olur. Dolayısıyla yapıştırılan yüzey tam olarak ıslanamaz. Deneysel gözlemler, grafen nanoyapı eklendiğinde yapıştırıcının viskozitesinin arttığı sonucunu desteklemektedir. Bununla birlikte, saf yapıştırıcıyla birleştirilmiş silindirik alın bağlantıların karşılaştırıldığında, yapıştırıcıya ağırlıkça %1 Karbon Nanotüp-COOH nanoyapısı

eklendiğinde alın bağlantılarının (BJ-sb-0.2-C, BJ-sb-0.3-C ve BJ-sb-0.4-C) normal gerilme değerleri %4 ila %9 oranında artmaktadır (Şekil 4.5). Yapıştırıcıya Karbon Nanotüp-COOH eklenmesi, yapıştırıcının viskozitesini azaltır ve yapıştırılan malzemenin yüzeyine yapışma direncini artırması bağlantının mukavemeti artırmaktadır.



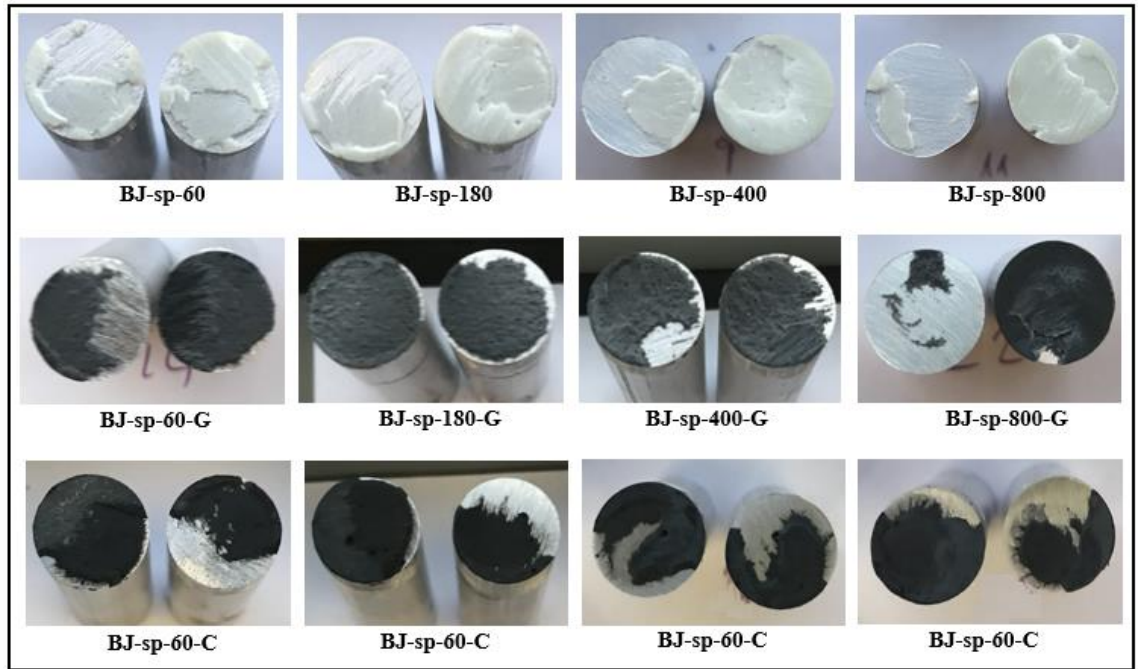
Şekil 4.5. Kumlama yöntemiyle pürüzlendirilmiş bağlantılarda maksimum normal gerilme ile yüzey pürüzlülüğünün karşılaştırılması.

Şekil 4.1 ve 4.2’de, 180 SiC zımpara kağıdı ile pürüzlendirilen (BJ-sp-180) ve 0,2 MPa kumlama basıncı ile pürüzlendirilen (BJ-sb-0.2) yüzeylerin birbirine oldukça yakın yüzey pürüzlülük değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. Bu durum göz önüne alınarak maksimum normal gerilimi değerleri karşılaştırıldığında, BJ-sp-180 bağlantının normal gerilme değerine göre BJ-sb-0.2 bağlantının normal gerilme değeri yaklaşık %6 artmaktadır. Ayrıca, kumlama basıncı 0,3’e ve ardından 0,4’e yükseltildiğinde (Şekil 4.4 ve 4.5, BJ-sb-0.3 ve BJ-sb-0.4 verilerine bakınız) bağlantıların normal değerlerindeki bu artışın daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, Şekil 4.1 ve 4.2’de gösterildiği gibi, kumlama yöntemi kullanılarak oluşturulan yüzey pürüzlülüklerinin zımparalama yöntemiyle elde edilenlere göre daha homojen olmasıdır.

Yapıştırma bağlantılarının veya yapıştırıcının mekanik özelliklerini anlamak için farklı hasar türlerinin bilinmesi gerekir. ISO 10365 standardı, yapıştırılan malzeme metal

olduğunda meydana gelebilecek hasar türlerini tanımlamaktadır. Bu standarda göre, adhezyon, kohezyon ve bunların kombinasyonu genellikle yapıştırma bağlantılarında arıza modlarına maruz kalmaktadır. Adhezyon hasarı, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde belirgin bir ayrılmanın olduğu arıza, kohezyon hasarı yapıştırıcı tabakasında görünür hasarın olduğu arıza ve karışık modlu hasar hem yapışma hem de kohezyon hasarının birlikte meydana geldiği arızadır.

Şekil 4.6’da gösterilen alüminyum silindirik alın bağlantılarının hasar yüzeyleri incelendiğinde, zımparalama yöntemiyle pürüzlendirilmiş ve nanoyapı ilavesi yapılmamış tüm bağlantılarda adhezyon hasarı olduğu görülmektedir. Ancak bu hasarlı yüzeylerden elde edilen en önemli bulgu, yapıştırıcıya ağırlıkça %1 grafen veya karbon nanotüp-COOH eklendiğinde bu alın bağlantılarının hasar modunun yüzeyin belirli bölgelerinde kohezyon hasar modu veya karışık moda dönüşmesidir. Başka bir deyişle, yapıştırıcıya nanoyapı eklendiğinde alüminyum yüzeye yapışması artmaktadır. Bağlantıların maksimum normal gerilmesindeki artış bu gözlemi desteklenmektedir.

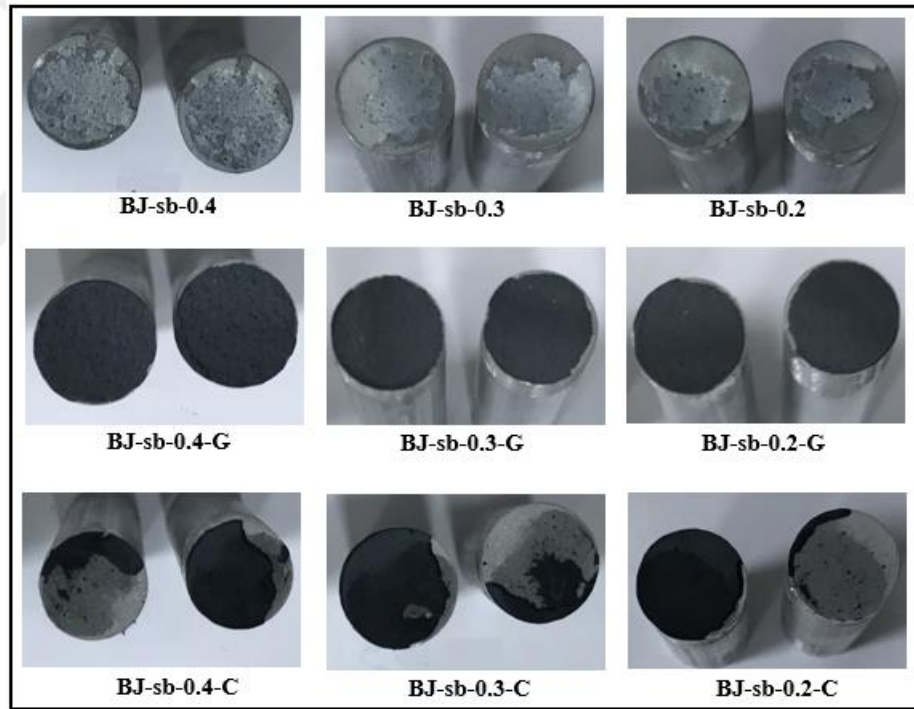


Şekil 4.6. Zımpara yöntemiyle pürüzlendirilmiş bağlantıların hasar yüzeyleri

Ancak, Şekil 4.7’de gösterilen kumlama yöntemiyle yüzeyleri pürüzlendirilen silindirik alın bağlantılarının hasar yüzeyleri incelendiğinde, kohezyon hasar modunun her bağlantıda olduğu görülmektedir. Daha yakından bakıldığında, yüksek pürüzlülüğe

sahip nanoyapı ilavesiz bağlantıların (BJ-sb-0.4) tamamen kohezyon hasar moduna sahip olduğu, düşük pürüzlülüğe sahip bağlantıların (BJ-sb-0.3 ve BJ-sb-0.2) ise karışık bir moda sahip olduğu görülmektedir. Bu durum bağlantının mukavemetini azaltmakta olup, bu sonuç deneysel sonuçlarla uyumludur.

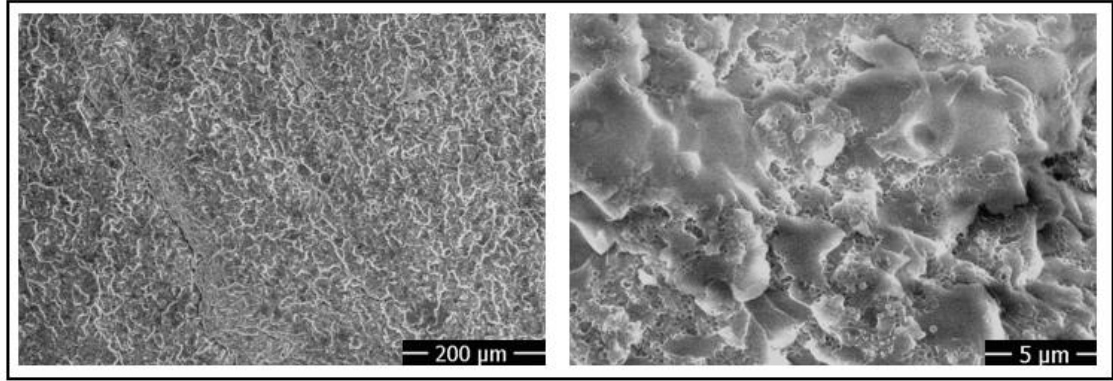
Grafen nanoyapısı eklenen yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcının iyi yüzey yapışması göz önüne alındığında, söz konusu üç numune (BJ-sb-0.4-G, BJ-sb-0.3-G ve BJ-sb-0.2-G) için gözlemlenen kohezyon hasarının bağlantının mukavemetini artırması beklenmektedir. Bununla birlikte, deneysel sonuçlar (Şekil 4.4) bunun tam aksine bir davranış göstermektedir. Bu tutarsızlığın sebebi, grafen nanoyapısının eklenmesiyle yapıştırıcının viskozitesinin artmasına, yapıştırıcıda boşlukların ortaya çıkması ve homojenliğin azalması ile yapıştırıcının iç mukavemetinin azalması ile açıklanabilir.



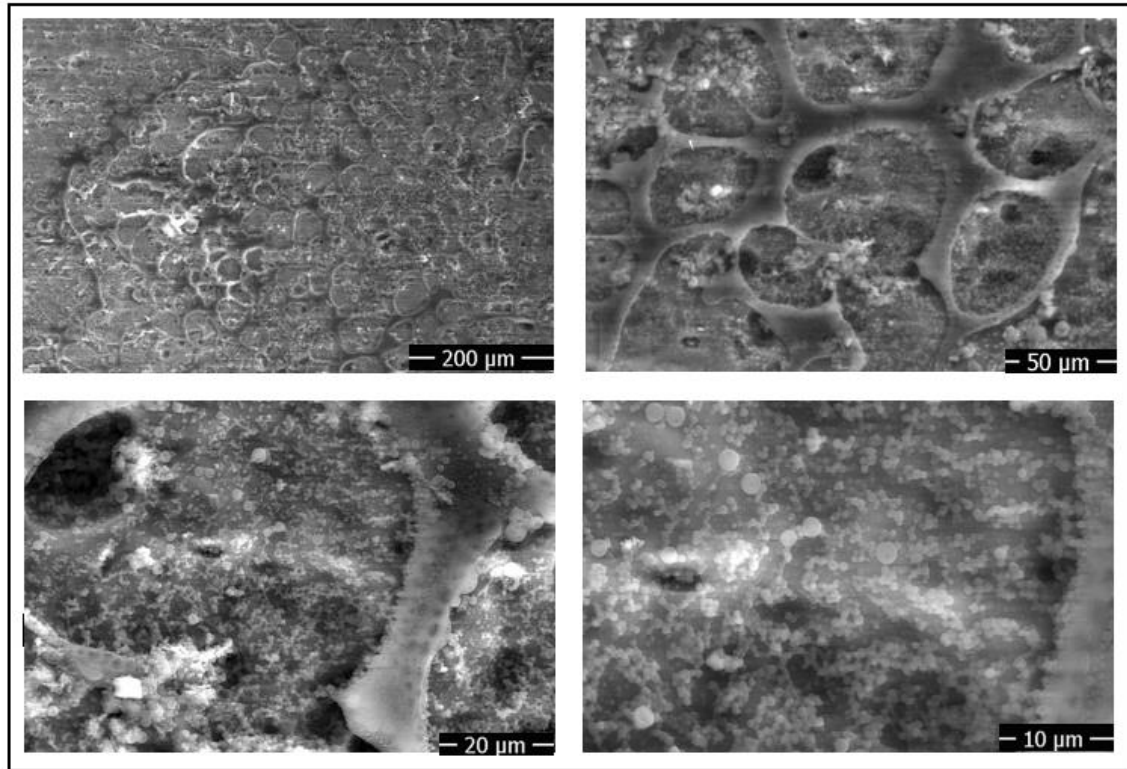
Şekil 4.7. Kumlama yöntemiyle pürüzlendirilmiş bağlantıların hasar yüzeyleri

Şekil 4.7’de Kumlama yöntemiyle yüzeyleri pürüzleştirilmiş bağlantılarda, yapıştırıcıya Karbon Nanotüp-COOH ilave edilmesi yapıştırıcının yapıştırılan alüminyum yüzeye tutunmasını artırdığı Şekil 4.7’de verilen hasar yüzeylerinden anlaşılmaktadır. Bu bağlantılarda hem hasar modunun kohezyon hasar modu olması hem de yapıştırıcının iç mukavemetinin artması, bağlantının mukavemetini artırmaktadır.

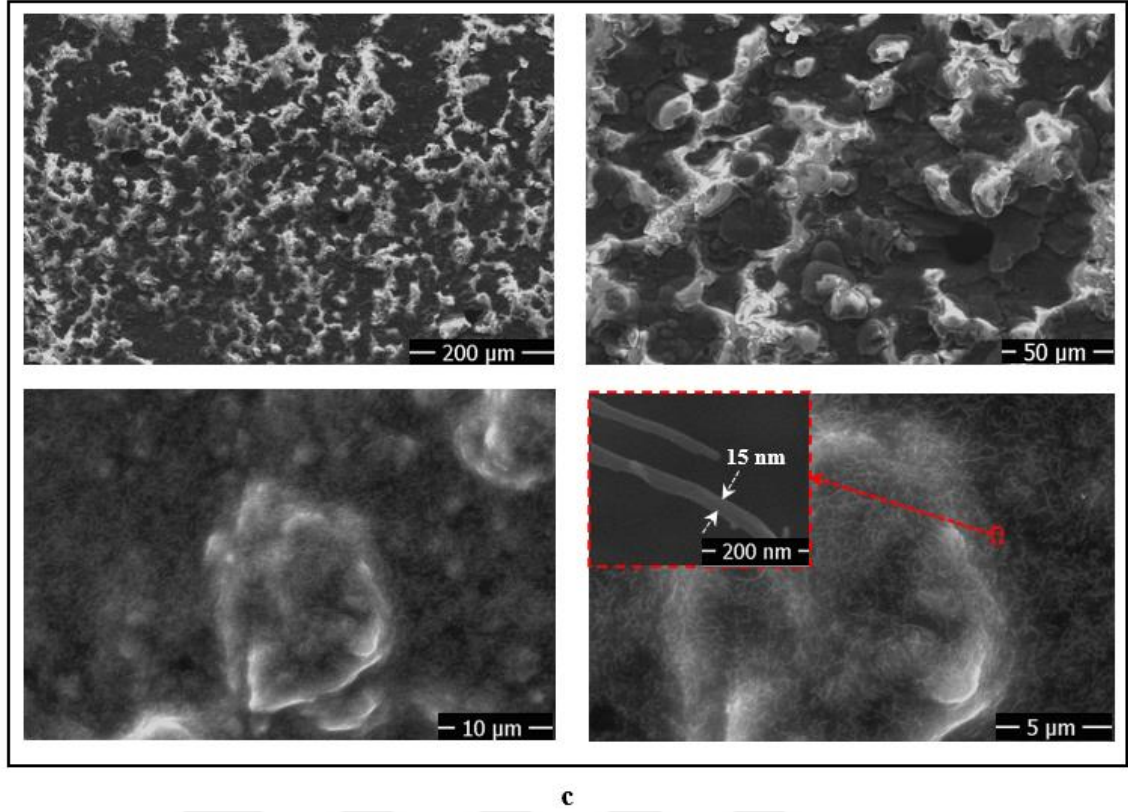
Şekil 4.8’de verilen karbon nanotüp-COOH katkılı ve saf bağlantıların yüzeyinden çekilen taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri incelendiğinde, grafen ve karbon nanotüp COOH nanoyapılarının epoksi yapıştırıcı içerisinde neredeyse homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir. Ayrıca, Şekil 14.c’deki görüntü incelendiğinde, karbon nanotüp-COOH nanoyapılarının çaplarının 10 ila 20 nm arasında ve uzunluklarının 10 ila 30 μm arasında olduğu anlaşılmaktadır.



a



b



Şekil 4.8. Katkısız ve karbon nanotüp-COOH katkıli bağlantıların SEM görüntüsü, a) BJ-sp-400, b) BJ-sp-400-G, c) BJ-sp-400-C.

4.3. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Silindirik Alın Bağlantıların Test Sonuçlarının Sayısal Analiz ile Karşılaştırılması

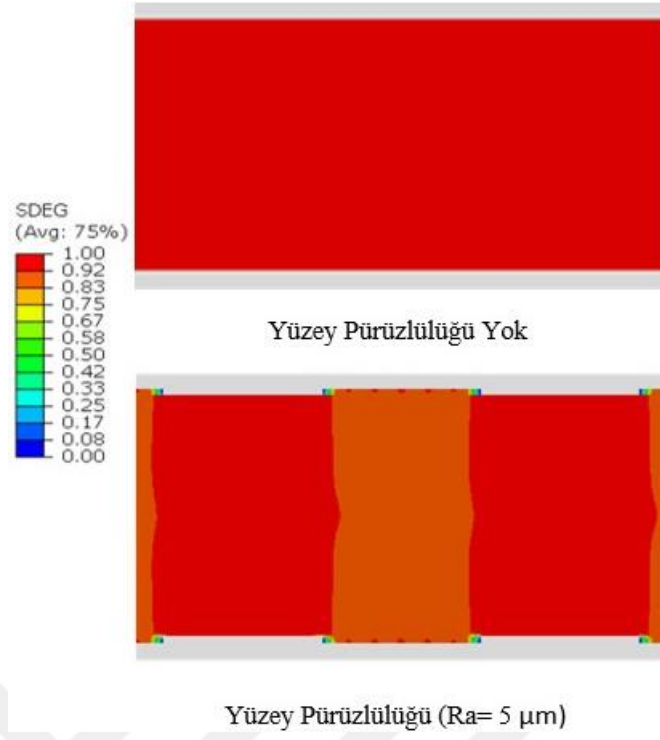
Çekme yükü altında silindirik alın bağlantılarda kullanılan çeşitli yapıştırıcı türleri için maksimum normal gerilmeleri Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Yük sadece normal gerilme yönünde uygulandığından, sonuçlar Çizelge 3.3’de gösterilen normal gerilme mukavemeti (σ_n^{max}) değerleriyle iyi bir şekilde eşleşmiştir. Bu değerler, yüzeylerin zımparalandığı ve kumlandığı deneysel olarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Burada farklı pürüzlülük derecelerinde deneysel olarak elde edilen değerlerin ortalaması dikkate alınmıştır. Sayısal analiz simülasyonlarına karşılık gelen maksimum normal gerilme değerleri deneysel olarak elde edilen değerlerden daha büyüktür. Bunun nedeni, sayısal analiz simülasyonları yapıştırıcılar arasında mükemmel bir yapışma olduğunu varsaymaktadır. Ancak, yapıştırıcıya ağırlıkça %1 grafen veya karbon nanotüp-COOH nanoyapıları eklendiğinde tam tersi bir davranış gözlemlenmiştir. Saf DP460 yapıştırıcısı kullanıldığında, kumlanmış alüminyum silindirik alın bağlantıları çok daha güçlü olmuştur. Sonuçlara bakıldığında, yapıştırıcıya nanoyapılar eklendiğinde

zımparalamanın daha iyi sonuç verdiği, bağlantıda saf bir yapıştırıcı kullanıldığında ise kumlamanın daha iyi sonuç verdiği sonucuna varılabilmektedir.

Sayısal analiz simülasyonları, yapıştırılan yüzey pürüzlülüğünün alın bağlantılarının mukavemeti üzerindeki etkisini görmek için gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.1'e göre, modele yüzey pürüzlülüğünün eklenmesinin elde edilen maksimum normal gerilmesi üzerinde bir etkisi yoktur, çünkü her iki modelde de (pürüzlü ve pürüzsüz) yapıştırılan tabakanın kesiti aynıdır. Şekil 4.8, bağlantı arızasından hemen önce yapıştırıcı tabakasındaki hasar dağılımını, yapıştırılan yüzeyler üzerinde hem yüzey pürüzlülüğü varken hem de yokken göstermektedir. Belirgin bir fark, birincisinde yapışkan tabakanın modeldeki girinti ve çıkıntılardan kaynaklanan pürüzlülük nedeniyle homojen olmayan bir hasar dağılımına sahip olmasıdır; ancak ikinci durumda hasar dağılımı homojendir. Ancak, bu fark bağlantının mekanik performansını etkilememektedir.

Çizelge 4.1. Sayısal ve deneysel olarak elde edilen maksimum normal gerilmelerin karşılaştırılması.

	Nanoyapı katkısız (MPa)	Grafen (MPa)	Karbon Nanotüp-COOH (MPa)
Sayısal analiz simülasyonu – Yüzey pürüzlülüğü yok	32.60	35.60	37.90
Sayısal analiz simülasyonu – Yüzey pürüzlülüğü var	32.60	-	-
Deney (Zımparalanmış) (Ortalama)	24.43	28.12	34.19
Deney (Kumlanmış) (Ortalama)	30.65	23.21	32.53



Şekil 4.9. Yüzey pürüzlülüğü içermeyen ve içeren yapıştırılan malzemeler için yapıştırıcı tabakası üzerindeki hasar dağılımı.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, yapıştırılan malzeme yüzeyleri iki farklı yöntemle (zımparalama ve kumlama) pürüzlendirilerek ve yapıştırıcıya iki farklı nanoyapı (grafen ve karbon nanotüp-COOH) eklenerek silindirik alın bağlantılarının mekanik özellikleri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Numunelerin yüzeyinde kullanılan zımparanın kalınlığına bağlı olarak ince veya derin izler oluşur. Ancak kumlama yönteminde numunelerin yüzeyleri daha homojen olup yüzeylerdeki girinti ve çıkıntılar yoğun noktasal görünümündedir.
- Alın bağlantılarında, bağlantının taşıyabileceği maksimum kuvvet, yapıştırılacak yüzeyin yüzey pürüzlülüğüyle birlikte artmaktadır. Ancak pürüzlülük çok daha büyük değerlere ulaştığında bu durum tam tersi bir etki haline gelmektedir. Yapıştırıcı pürüzlü yüzeylerde oluşan boşluklara girdiğinde yüzeyler arasında oluşan mekanik bağlarla bağlantının mukavemetini artırmaktadır. Ancak pürüzlülüğün fazla olması yapıştırıcının yüzeye nüfuz etme ve ıslatma kabiliyetini azalttığı için yapışma mukavemetini de azaltmaktadır.
- Zımparalama yöntemiyle pürüzlendirilen bağlantılardaki normal gerilmeler, yapıştırıcıya ağırlıkça %1 grafen nanoyapısı eklendiğinde yaklaşık olarak %9'dan %21'e yükselmektedir. Ancak bu oranlar ağırlıkça %1 karbon nanotüp-COOH eklendiğinde %27'den %62'ye çıkmıştır.
- Zımparalama yönteminin oluşturduğu yüzey pürüzlülüğü azaldıkça, yapıştırıcıya karbon nanotüp-COOH ilave edilmesi, bağlantı değerinin normal gerilmesindeki artışı artırıcı bir etkiye sahiptir. Ayrıca, yapıştırıcıya grafen veya karbon nanotüp-COOH eklenmesi, orta düzeyde yüzey pürüzlülüğü olan bağlantılarda bağlantının normal geriliminde benzer bir artışa neden olmuştur.
- Yapıştırma yüzeylerinin yüzey pürüzlülüğü kumlama yöntemi kullanılarak artırıldığında normal gerilimi yaklaşık olarak %13 oranında artmaktadır. Ancak nanoyapı ilavesi olmayan bağlantılara kıyasla yapıştırıcıya ağırlıkça %1 oranında grafen nanoyapısı eklendiğinde %22 ila %26 arasında

azalmıştır. Bunun nedeni, yapıştırıcıya grafen nanoyapısının ilave edilmesinin yapıştırıcının daha viskoz hale gelmesine neden olması ve yapıştırıcıda boşluklar oluşturarak homojenliğin azalmasıyla yapıştırıcının iç mukavemetinin azalmasıdır.

- Kumlama yönteminin normal gerilimi, aynı derecede pürüzlülüğe sahip bağlantılar için zımparalama yöntemine göre yaklaşık olarak %6 daha yüksektir. Bunun nedeni, kumlama yöntemiyle elde edilen yüzey pürüzlülüklerinin zımparalama yöntemiyle elde edilen yüzey pürüzlülüklerinden daha homojen olmasıdır.
- Bağlantıda saf yapıştırıcı kullanıldığında kumlama yöntemiyle, yapıştırıcıya nanoyapılar eklendiğinde zımparalama yöntemiyle pürüzlendirmek daha uygundur.

KAYNAKLAR

- Adams, R. and Coppedale, J. 1979. The stress-strain behaviour of axially-loaded butt joint. *The Journal of Adhesion*, 10(1), 49-62.
- Adams, R. D. and Wake, W. C. 1984. *Structural adhesive joints in engineering*. Elsevier Applied Science Publishers, 316, London.
- Adams, R. D. 2021. *Adhesive bonding: science, technology and applications*. Woodhead Publishing, 828, Cambridge.
- Adderley, C. 1988. Adhesive bonding. *Materials&Design*, 9(5), 287-293.
- Akpınar, S. 2008. Kaymaya maruz yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 82, Erzurum.
- Akpınar, S. 2012. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş T-bağlantılarda üç boyutlu gerilme analizi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 152, Erzurum.
- Akpınar, S. 2016. Alüminyum oksit ve titanyum dioksit partikül takviyeli yapıştırıcılarla birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi. Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5(2), 244-252.
- Akpınar, I. A., Gültekin, K., Akpınar, S., Akbulut, H. and Ozel, A. 2017. Research on strength of nanocomposite adhesively bonded composite joints. *Composites Part B: Engineering*, 126, 143-152.
- Anonim 2024. Web Sitesi: <https://pi404.com/sonlu-elemanlar-metodu-nedir-kullanim-olanlari/>, Erişim Tarihi: 15.10.2023
- Anonymous, 2024. Web Sitesi: <https://www.araymond-automotive.com/fr/news/how-can-i-choose-appropriate-adhesives-my-needs> , Erişim Tarihi: 06.03.2023.
- Atikah, N., Afendi, M., Hirmaliza, S., Abdul Majid, M. S., Amira, N. and Mazlee, M. N. 1994. Strength of ductile adhesive butt joint bonded with dissimilar adherents: effect of surface roughness. *Applied Mechanics and Materials*, 554, 366-370.
- Aydın, S., Solmaz, M. and Turgut, A. 2011. Epoksi ve akrilik bazlı yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 Mayıs 2011, 383-388, Elazığ.
- Baldan, A. 2012. Adhesion phenomena in bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 38, 95-116.
- Baldwin, T. 1986. Anaerobic adhesives. *Materials science and technology*, 2(1), 1-7.

- Banea, M. D. and Da Silva L. F. 2009. Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineerins, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 223(1), 1-18.
- Bayramoglu, S., Akpınar, S. and Çalık, A. 2021. Numerical analysis of elasto-plastic adhesively single step lap joints with cohesive zone models and its experimental verification. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(2), 641-649.
- Borghei, H. R., Behjat, B. and Yazdani, M. 2019. The impact of graphene nanoparticle additives on the strength of simple and hybrid adhesively bonded joints. *Journal of Composite Materials*, 53(23), 3335-3346.
- Bowditch, M. R. and Shaw, S. J. 1996. Adhesive bonding for high performance materials. *Advanced Performance Materials*, 3, 325-342.
- Brockmann, W., Geiß, P. L., Klingen, J. and Schröder, K. B. 2009. Adhesive bonding: materials, applications and technology. WILEY-VCH, 435, Weinheim.
- Broughton, W. R. and Lodeiro, M. J. 2002. Review of surface characterisation techniques for adhesive bonding. NPL report MATC (A) 66, 41, United Kingdom.
- Cognard, P. 2005. Handbook of adhesives and sealants: basic concepts and high tech bonding. Elsevier, 511, United Kingdom.
- Coover, H., Dreifus, D. and O'connor, J. 1990. Cyanoacrylate adhesives. In: *Handbook of adhesives*. Skeist, I. (eds), Springer, 463-477, The United States of America.
- Çakır, M. V., Erklığ, A. and Ahmed, B. F. 2021. Graphene nanoparticle effect on flexural and shear behaviors of adhesively bonded single lap joints of GFRP composites. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 43(4), 211(1-11).
- Da Silva, L. F., Öchsner, A. and Adams, R. D. 2011. Handbook of adhesion technology. Springer, 1568, Heidelberg.
- Demir, M. E. 2016. Tek bindirmeli yapıştırma bağlantılarının üç boyutlu gerilme analizi. Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 139, Batman.
- De Freese, J., Holtmannspötter, J., Raschendorfer, S. and Hofmann, T. 2018. End milling of carbon fiber reinforced plastics as surface pretreatment for adhesive bonding – effect of intralaminar damages and particle residues. *The Journal of Adhesion*, 1-19.
- Dunn, D. J. 2004. Enginnering and structural adhesives. *Rapra Review Reports*, 150, United Kingdom.
- Durmuş, M. 2019. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş kademeli bağlantılarda kademe uzunluğu ile bağlantının hasar yükü arasındaki ilişkinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi,

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

- Ebnesajjad, S. 2008. Adhesives technology handbook. William Andrew, 387, The United States of America.
- Ebnesajjad, S. 2010. Handbook of adhesives and surface preparation: technology, applications and manufacturing. William Andrew, 445, United Kingdom.
- Edwards, K. 1998. A brief insight into the selection and use of engineering adhesives for preliminary joint design. *Materials&Design*, 19(3), 121-123.
- Fourche, G. 1995. An overview of the basic aspects of polymer adhesion. Part I: Fundamentals. *Polymer Engineering&Science*, 35(12), 957-967.
- Gendler, Z., Rosen, A., Bamberger, M., Rotel, M., Zahavi, J., Buchman, A. and Dodiuk, H. 1994. Improvement of adhesive bonding strength in sealed anodized aluminium through excimer laser prebond treatment. *Journal of Material Science*, 29(6), 1521-1526.
- Ghanem, A., Lang, Y. 2017. Introduction to polymer adhesion. Department of process engineering and applied science.
- Gkikas, G., Sioulas, D., Lekatou, A., Barkoula, N. M. and Paipetis, A. S. 2012. Enhanced bonded aircraft repair using nano-modified adhesives. *Materials and Design*, 41, 394-402.
- Gursel, A., Mohamad, A. and Mohd Nazeri, M. F. 2019. Adhesion mechanism and failure modes in adhesively bonded joints, 4. International Conference on Material Science and Technology in Kızılcahamam/ANKARA (IMSTEC), 16-18 October 2019, 108-114, Ankara.
- Gültekin, K., Akpınar, S., Gürses, A., Eroglu, Z., Cam, S., Akbulut, H., Keskin, Z. and Ozel, A. 2016. The effects of graphene nanostructure reinforcement on the adhesive method and the graphene reinforcement ratio on the failure load in adhesively bonded joints. *Composites Part B: Engineering*, 98, 362-369.
- Hartshorn, S. R. 2012. Structural adhesives: chemistry and technology. Springer, 512, The United States of America.
- Hussey, R. and Wilson, J. 1996. Structural adhesives: directory and databook. Springer, 422, The United States of America.
- Hülagü, B. 2018. Grafen nanoyapı katkılı çift-yan takviyeli yapıştırma bağlantılarının dinamik davranışları. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 128, Erzurum.
- Janik, H., Sienkiewicz, M. and Kucinska-Lipka, J. 2014. Polyurethanes. In: Handbook of thermoset plastics. Dodiuk, H. and Goodman, S. H. (eds), William Andrew, 253-295, The United States of America.

- Kadioglu, F., Demiral, M. and El Zaroug, M. 2019. Effects of overlap length on the strength of bolted, bonded and hybrid single lap joints with different adherend materials and thicknesses. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 1-16.
- Kanar, B., Akpinar, S., Akpinar, I. A., Akbulut, H. and Ozel, A. 2018. The fracture behaviour of nanostructure added adhesives under ambient temperature and thermal cyclic conditions. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 97, 120-130.
- Kazaz, I., Akpinar, S. and Ozel, A. 2018. The effects of thermal cycle and nanostructure reinforcement on the shear load in adhesively bonded joints. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1-12.
- Kinloch, A. 1997. *Adhesives in Engineering*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 211(5), 307-335.
- Kodakoğlu, L. 1996. Yapıştırıcıların genel özellikleri ve çekme gerilmesine maruz yapışma birleşmesinin analitik ve nümerik olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 161, İstanbul.
- ISO 10365. 1992. *Adhesives-Designation of main failure patterns*.
- Mandolino, C., Lertora, E. and Gambaro, C. 2013. Effect of surface pretreatment on the performance of adhesive-bonded joints. *Key Engineering Materials*, 554-557, 996-1006.
- Mandolino, C., Lertora, E., Genna, S., Leone, C. and Gambaro, C. 2015. Effect of laser and plasma surface cleaning on mechanical properties of adhesive bonded joints. *Procedia CIRP*, 33, 458-463.
- Marques, E. A. S., Barbosa, A. S. Q., Carbas, R. J. C., Akhavan-Safar, A. and Da Silva, L. F. M. 2021. *Introduction to adhesive bonding*. WILEY-VCH, 260, Weinheim.
- MIL-HDBK-691B. 1987. *Military Standardization Handbook-Adhesive Bonding*. Department of Defense, 469, Washington, DC.
- Mittal, K. L. and Pizzi, A. 1999. *Adhesion promotion techniques: technological applications*. CRC Press, 417, Boca Raton.
- Ozenc, M. and Sekercioglu, T. 2014. Effect of surface pre-treatment and temperature on the adhesive strength of hybrid aluminium joints. *Kovove Materialy*, 52, 1-10.
- Özenç, M. 2007. Yapıştırma bağlantılarının darbe yükleri altındaki davranışlarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 71, Denizli.
- Petrie, E. M. 2000. *Handbook of adhesives and sealants*. McGraw-Hill, 884, The United States of America.

- Pizzi, A. and Mittal, K. L. 2017. Handbook of adhesive technology. CRC Press, 999, The United States of America.
- Pocius, A. V. 2012. Adhesion and adhesives technology: an introduction. Hanser, 378, Munich.
- Rao, S. S. 2017. The finite element method in engineering. Butterworth-Heinemann, 727, The United States of America.
- Rudawska, A., Danczak, I., Müller, M. and Valasek, P. 2016. The effect of sandblasting on surface properties for adhesion. International Journal of Adhesion and Adhesives, 70, 176-190.
- Safari, A., Farahani, M. and Ghabezi, P. 2020. Experimental study on the influences of different surface treatment processes and adhesive type on the aluminum adhesive-bonded joint strength. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 1-14.
- Saraç, İ., Adin, H. and Temiz, Ş. 2018. Experimental determination of the static and fatigue strength of the adhesive joints bonded by epoxy adhesive including different particles. Composites Part B: Engineering, 155, 92-103.
- Schneberger, G. L. 1983. Adhesives in manufacturing. Routledge, 697, Boca Raton.
- Shields, J. 1984. Adhesives handbook. Butterworth, 363, Great Britain.
- Strobech, C. 1990. Polyurethane adhesives. Construction and Building Materials, 4(4), 214-217.
- Wang, Y. T., Wang, C. S., Yin, H. Y., Wang, L. L., Xie, H. F. and Cheng, R. S. 2012. Carboxyl-terminated butadiene-acrylonitrile-toughened epoxy/carboxyl-modified carbon nanotube nanocomposites: Thermal and mechanical properties. Express Polymer Letters, 6(9), 719-728.
- Wang, W., Xu, J. W., Chen, X., Liang, Y. J. and Zhu, L. Z. 2020. The effect of laser surface treatment on the adhesive bonding performance of aluminum alloy. Journal of Physics: Conference Series, 1605, 1-9.
- Zhai, L., Ling, G., Li, J. and Wang, Y. 2006. The effect of nanoparticles on the adhesion of epoxy adhesive. Material Letters, 60(25-26), 3031-3033.
- Zhang, J., Li, H., Li, H. and Wei, X. 2019. Uniaxial ratchetting and low-cycle fatigue failure behaviors of adhesively bonded butt-joints under cyclic tension deformation. International Journal of Adhesion and Adhesives, 95, 1-8.

EKLER

EK-1

Yayınlar (SCI, SCI-Expanded)

The influence of combination of surface roughness and nanostructure of adhesive on the strength of adhesively bonded joints, Akpınar Salih, Kars Abdulsamet, Bayramoğlu Simay, Demiral Murat, International Journal of Adhesion and Adhesives, 133, 2024.

