



**NANO-YAPI TAKVİYELİ KOMPOZİT YAPIŞTIRICI
İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARIN TAM
DEĞİŞKEN YORULMA PERFORMANSLARININ
İNCELENMESİ**

Kübra DEMİR

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

**2021
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**NANO-YAPI TAKVİYELİ KOMPOZİT YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ
BAĞLANTILARIN TAM DEĞİŞKEN YORULMA PERFORMANSLARININ
İNCELENMESİ**

Kübra DEMİR

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Salih AKPINAR

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Erzurum

2021

Her hakkı saklıdır

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

**NANO-YAPI TAKVİYELİ KOMPOZİT YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ
BAĞLANTILARIN TAM DEĞİŞKEN YORULMA PERFORMANSLARININ
İNCELENMESİ**

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

Başkan : Prof. Dr. Ali Fatih Yetim *İmza* :

Üye : Doç. Dr. Salih AKPINAR *İmza* :

Üye : Doç. Dr. Ahmet ÇALIK *İmza* :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. Arzu GÖRMEZ

Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 1002-119M666 no'lu proje kapsamında desteklenmiştir.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

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

15 / 12 / 2020

Kübra DEMİR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NANO-YAPI TAKVİYELİ KOMPOZİT YAPIŞTIRICI İLE BİRLEŞTİRİLMİŞ BAĞLANTILARIN TAM DEĞİŞKEN YORULMA PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Kübra DEMİR

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Salih AKPINAR

Havacılık, uzay ve otomotiv sektörlerinde kullanılan yapıştırma bağlantıları statik yüklemelerden ziyade genellikle dinamik ve çevresel etkilere maruz kalmaktadır. Dinamik ve çevresel etkilere maruz kalan yapıştırma bağlantılarının performanslarını artırmak oldukça önemlidir. Bu çalışmada, havacılık alanında kullanılan yapısal yapıştırıcının yorulma dayanımını iyileştirmek için yapıştırıcı içerisine karbon nanoyapılar ilave edilerek elde edilen tek tesirli bindirme bağlantısının hem tam değişken çeki hem de dört nokta eğme yorulma sonrası mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Bu inceleme için, çift bileşenli DP460 yapısal yapıştırıcıya ağırlıkça %1 oranında Grafen, Karbon Nanotüp-COOH ve Fulleren C60 nanoyapılar ilave edilerek elde edilen nanokompozit yapıştırıcı kullanılarak tek tesirli bindirme bağlantısı üretilmiştir. Yapıştırılan malzemeler olarak havacılıkta sıklıkla kullanılan AA2024-T3 alüminyum alaşımı ve karbon fiber takviyeli kompozitler kullanılmıştır. Üretilen bu bağlantılara öncelikle statik çeki yükü uygulanmış ve hasar yükleri elde edilmiştir. Daha sonra bu bağlantılara sinüsoidal dalga formu, sabit yük genliği, 20 Hz frekans ve $R = -1$ yükleme oranı altında tam değişken çeki ve dört nokta eğme yorulma testi uygulandı. Yorulma yükü uygulanmış bu bağlantıların statik çeki hasar yükü elde edilerek, yorulmaya maruz kalan ve kalmayan bağlantıların hasar yükündeki değişim incelenmiştir.

Gerçekleştirilen çalışma sonucunda; nanoyapı katkısız bağlantılara göre nanoyapı katkılı bağlantıların tam değişken yorulma sonrası statik performansları arttığı görülmüştür. Ayrıca hasar yüklerindeki bu artış oranları, yapıştırıcı içerisine ilave edilen nanoyapı türüne ve yapıştırılan malzeme cinsine bağlı olarak değişmektedir.

2021, 62 sayfa

Anahtar Kelimeler: Nano Kompozitler, Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar, Statik test, Dinamik test, Yorulma davranışı.

ABSTRACT

MS. Thesis

INVESTIGATION OF FULLY VARIABLE FATIGUE PERFORMANCE OF JOINTS BONDED WITH NANO-STRUCTURE REINFORCED COMPOSITE ADHESIVE

Kübra DEMİR

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Salih AKPINAR

Bonding joints used in the aerospace and automotive industries are often exposed to dynamic and environmental influences rather than static loading. It is very important to improve the performance of bonded joints exposed to dynamic and environmental influences. In this study, both fully variable tensile and four-point bending post fatigue mechanical properties of the single-lap joint obtained by adding carbon nanostructures into the adhesive to improve the fatigue strength of the structural adhesive used in the aviation field were experimentally investigated. By using 1% by weight of Graphene, Carbon Nanotube-COOH and Fulleren C60 nanostructures, a single effect lap joint was produced using the nanocomposite adhesive. AA2024-T3 aluminum alloy and carbon fiber reinforced composites, which are frequently used in aviation, are used as bonding materials. Static draft load was applied to these produced connections and damage loads were obtained. Then, sinusoidal waveform, constant load amplitude, 20 Hz frequency and $R = -1$ loading ratio were applied to these joints with fully variable tensile and four-point bending fatigue test. By obtaining the static tensile failure load of these joints on which fatigue load is applied, the change in the failure load of the joints that are exposed to fatigue and not have been examined.

As a result of the work carried out; compared to nanostructured joints, it has been observed that the static performances of nanostructured joints increase after fully variable fatigue. In addition, these increase rates in damage loads vary depending on the type of nanostructure added to the adhesive and the type of material bonded.

2021, 62 page

Keywords: Nanocomposites, Adhesively bonded joints, Static test, Dynamic test, Fatigue behavior

TEŞEKKÜR

“ *Nano-Yapı Takviyeli Kompozit Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Bağlantıların Tam Değişken Yorulma Performanslarının incelenmesi*” başlıklı bu çalışma, Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Mekanik Bilim Dalı'nda Yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

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

Manevi desteklerinden dolayı aileme ve tez çalışmam sırasında tecrübelerinden ve desteklerinden yararlandığım arkadaşlarım Simay BAYRAMOĞLU ve Resul Şahin'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kübra DEMİR

Ocak 2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. Yapıştırma Bağlantıları.....	2
1.2. Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Gerilme Çeşitleri.....	3
1.3. Yapıştırma Bağlantılarında Hasar Çeşitleri.....	4
1.4. Yorulma.....	5
1.5. Yapıştırma Bağlantılarında Yorulma.....	6
1.6. Yapıştırma Bağlantıların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	7
1.6.1. Deneysel yöntemler.....	8
1.6.1.1. Çekme testi.....	8
1.6.1.2. Kayma testi.....	9
1.6.1.3. Soyulma testi.....	10
1.6.1.4. Kırılma Tokluğu testi.....	10
1.6.1.5. Ayrılma testi.....	11
2. LİTERATÜR ÖZETİ	12
3. MATERYAL ve YÖNTEM	19
3.1. Malzeme.....	19
3.2. Yapıştırıcının Hazırlanması.....	20
3.2.1. Nanoyapı katkılı yapıştırıcının hazırlanması.....	20
3.2.2. Nanoyapı katkısız yapıştırıcıların hazırlanması.....	21
3.3. Bağlantı Numunelerin Hazırlanması.....	21
3.3.1. Tek Tesirli (Single-Lap Joint) Bindirme Bağlantısının Hazırlanması.....	22
3.4. Bağlantı Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	26
3.4.1. Çeki hasar yüklerinin belirlenmesi.....	26
3.4.2. Dört nokta eğme hasar yüklerinin belirlenmesi.....	26

3.4.3. Çeki ve dört nokta eğme yorulma yüklerinin uygulanması	28
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	30
4.1. Çeki Yüküne Maruz Tek Tesirli Bindirme Bağlantı (Single-Lap Joint) Numunelerden Elde Edilen Deneysel Sonuçlar	30
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	52
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ.....	62



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
B	Yapıştırma bağlantıların genişliği
D	İki kuvvet hattı arasında mesafe (mm)
E	Elastisite Modülü (GPa) (kN/mm ²)
E _{COH}	Molekülleri sonsuz bir mesafeye ayırmak için gereken enerji
EI	Eğilme rijitliği (N*mm ²)
F	Kuvvet (N)
Hz	Frekans birimi
I	Atalet momenti (kalınlık yönünde) mm ⁴
M	Eksantriklikten dolayı oluşan moment
mm	Milimetre
P	Maksimum yük (N)
R	Gerilme oranı
t	Malzeme kalınlığı
V	Molar hacim
δ	Çözünürlük parametresi
σ ₁	1. Asal gerilme bileşeni
σ ₂	2. Asal gerilme bileşeni
σ ₃	3. Asal gerilme bileşeni
σ _a	Gerilme genliği
σ _m	Ortalama gerilme
σ _{max}	Maksimum gerilme
σ _{min}	Minimum gerilme
σ _x	x yönündeki normal gerilme bileşeni
σ _y	y yönündeki normal gerilme bileşeni
σ _z	z yönündeki normal gerilme bileşeni
τ	Kayma gerilmesi

Kısaltmalar

AA2024	Havacılık Alüminyum Alaşımı (2000 serisi)
ASTM	The American Society for Testing and Materials(Amerikan test ve malzeme kurumu)
ISO	International Organization for Standardization (Uluslararası standartlar Örgütü)
KEY	Kohezif enerji yoğunluğu
SiC	Silisyum karbür
SLJ	Single lap Joint (Tek tesirli yapıştırma bağlantısı)
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
USA	United States of America (Amerika birleşik devletleri)
YÜTAM	Erzurum Teknik Üniversitesi Yüksek Teknoloji ve Araştırma Merkezi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1. Yaygın olarak kullanılan yapıştırma bağlantı çeşitleri, (a) tek tesirli bindirme, (b) çift tesirli bindirme, (c) boyun bindirme, (d) açılı bindirme, (e) teraslama, (f) tek takviyeli bindirme, (g) çift takviyeli bindirme, (h) alın bağlantı, (i) silindir.....	3
Şekil 1. 2. Yapıştırma bağlantılarında oluşabilecek gerilme durumları (Akpınar 2012)..	4
Şekil 1. 3. ISO 10365 standardında tanımlanan yapıştırma hasar modları.....	5
Şekil 1. 4. Yorulma da kullanılan gerilmeler (Pedersen 2018).....	5
Şekil 1. 5. Gerilme genliği ile ortalama gerilme arasındaki ilişki.	6
Şekil 1. 6. Punta kaynağı ve farklı tip yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların yorulma özellikleri (Kinloch 1987).....	7
Şekil 1. 7. ASTM standartlarında bir çekme numunesi ve ölçüleri (ASTM D897, ASTM D2095).....	9
Şekil 1. 8. Kayma testi için kullanılan bir numunenin şematik gösterimi.....	9
Şekil 1. 9. Çatlak başlangıcı ve ilerlemesinde gerçekleşen hasar modları.....	10
Şekil 1. 10. Mod-I ile ayrılma testinin şematik gösterimi.....	11
Şekil 3. 1. a. Ultrasonik karıştırıcı, b. Etüv, c. Elle karıştırma.....	21
Şekil 3. 2. Yapıştırma öncesi yüzey hazırlama işlemi yapılmış numuneler.	22
Şekil 3. 3. a) Bağlantı numunesi üretim kalıbı, b) Sıcak pres, c) Kürleşme sonrası bağlantı.....	23
Şekil 3. 4. a) Tek tesirli bindirme bağlantı (SLJ) numunelerin geometrik parametreleri, b) Alüminyum SLJ, c) Kompzit SLJ.....	24
Şekil 3. 5. Çekme yükü sınır şartları ve uygulanması.....	26
Şekil 3. 6. Dört nokta eğme aparatı.....	27
Şekil 3. 7. Dört nokta eğme yükü sınır şartları ve uygulanması.	27
Şekil 3. 8. a) Tam değişken çeki yorulma yükü uygulaması, b) Tam değişken dört nokta eğme yorulma yükü uygulaması.....	29
Şekil 4.1. Statik ve tam değişken çeki yorulma yüküne maruz alüminyum tek tesirli bindirme bağlantılardan elde edilen ortalama hasar yükleri.	31

Şekil 4.2. Alüminyum tek tesirli bindirme bağlantılardan elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri, a) Statik, b) ± 400 N tam değişken, c) ± 800 N tam değişken, d) ± 1200 N tam değişken.....	33
Şekil 4. 3. Statik ve tam değişken çeki yorulma yüküne maruz alüminyum tek tesirli bindirme bağlantıların hasar yüzeyleri.....	35
Şekil 4. 4. Statik ve tam değişken çeki yorulma yüküne maruz kompozit tek tesirli bindirme bağlantılardan elde edilen ortalama hasar yükleri.....	36
Şekil 4. 5. Kompozit tek tesirli bindirme bağlantılardan elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri, a) Statik, b) ± 400 N tam değişken, c) ± 800 N tam değişken, d) ± 1200 N tam değişken.....	38
Şekil 4. 6. ASTM D5573 standardında tanımlanan kompozit yapıştırma bağlantı hasar modları.	39
Şekil 4. 7. Statik ve tam değişken çeki yorulma yüküne maruz kompozit tek tesirli bindirme bağlantıların hasar yüzeyleri.	40
Şekil 4. 8. Statik ve tam değişken dört nokta eğme yorulma yüküne maruz alüminyum tek tesirli bindirme bağlantılardan elde edilen ortalama hasar yükleri.	42
Şekil 4. 9. Dört nokta eğme yüküne maruz alüminyum tek tesirli bindirme bağlantılardan elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri, a) Statik, b) ± 200 N tam değişken, c) ± 300 N tam değişken, d) ± 400 N tam değişken, e) ± 500 N tam değişken.	44
Şekil 4. 10. Statik ve tam değişken dört nokta eğme yorulma yüküne maruz alüminyum tek tesirli bindirme bağlantıların hasar yüzeyleri.....	45
Şekil 4. 11. Statik ve tam değişken dört nokta eğme yorulma yüküne maruz kompozit tek tesirli bindirme bağlantılardan elde edilen ortalama hasar yükleri.	47
Şekil 4. 12. Dört nokta eğme yüküne maruz kompozit tek tesirli bindirme bağlantılardan elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri, a) Statik, b) ± 200 N tam değişken, c) ± 300 N tam değişken, d) ± 400 N tam değişken, e) ± 500 N tam değişken.	49
Şekil 4. 13. Statik ve tam değişken dört nokta eğme yorulma yüküne maruz kompozit tek tesirli bindirme bağlantıların hasar yüzeyleri.....	51

TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. AA2024-T3 alüminyum alaşım malzemenin mekanik özellikleri.....	19
Tablo 3.2. Karbon fiber kumaş takviyeli kompozitin malzeme özellikleri.....	19
Tablo 3.3. Yapısal yapıştırıcının kürleşme şartları.....	20
Tablo 3.4. Çeki ve dört nokta eğme için geçerli olan deneysel parametreler.	25



1. GİRİŞ

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar; cıvata, perçin, kaynak gibi geleneksel birleştirme yöntemlerine nazaran büyük avantajlar ve yaygın bir kullanım alanı sunmasına karşın, yapısal yapıştırıcıların ve yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi, güvenilirliği ve tekrarlanabilirliğinde büyük zorluklarla karşılaşmaktadır. Ayrıca, yapısal yapıştırıcıların ve bağlantıların mekanik özelliklerinin doğru olarak belirlenmesinin dışında, verilen bir yükleme durumu için yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantısı mukavemetinin tahmini başka faktörlerin anlaşılmasını da zorunlu kılar. Bu faktörler; materyal seçimi, yük ve yükün büyüklüğü, yapısal geometri, seçilen materyaller için uygun hasar kriterlerinin belirlenmesi ve yapıştırılan malzemenin mekanik özellikleridir.

Bir önceki paragrafta belirtilen hususlar, birçok araştırmacının yapıştırıcılar ve yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışlarının belirlenmesi üzerine yoğunlaşmalarına yol açmıştır (Akpınar, 2012).

Yapıştırıcı, iki malzemenin yüzeylerine uygulandığında bunları birleştirebilen bir malzeme olarak tanımlanmaktadır. Yapıştırıcılar fiziksel ve kimyasal özelliklerine göre değişmekte olup, yapıştırılan malzeme ve kullanım koşullarına göre sınıflandırılabilirler.

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

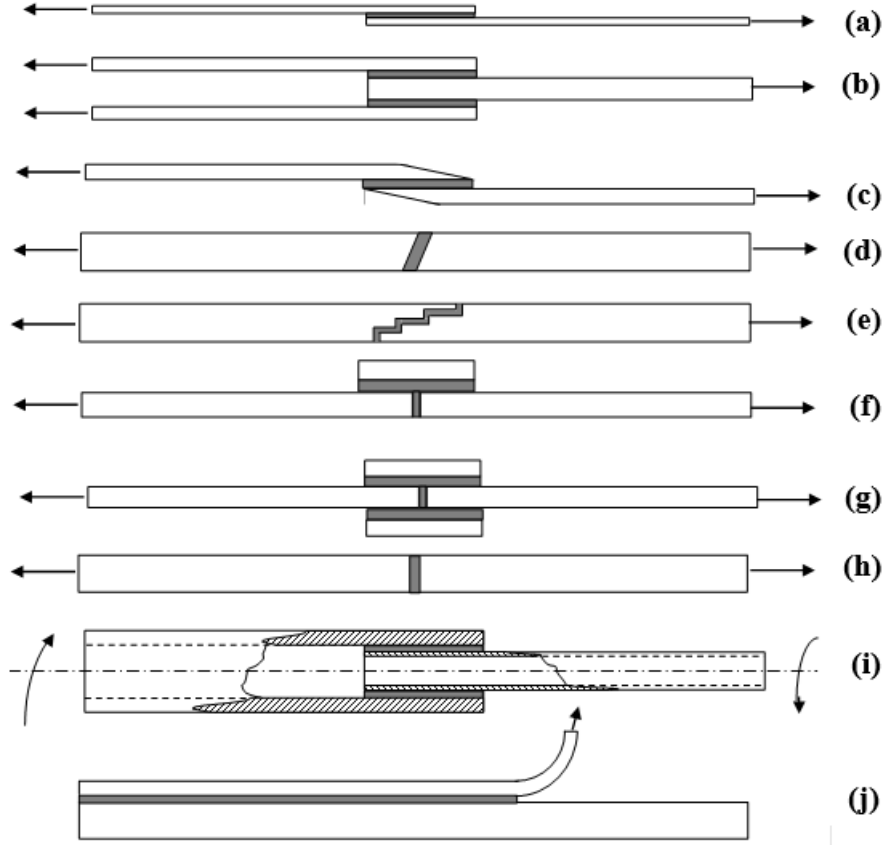
Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarında yapışma olayı, yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcı arasında bir ara yüzey teması ile oluştuğu göz önünde tutulmaktadır. Aslında yapıştırma bağlantılarında gerilme analizi ve sürekli kırılma mekaniklerinin yönleri tartışılmaktadır. Bu kavramlara bakıldığında bağlantının dayanımı bağlantı geometrisine, yapıştırıcının ve yapıştırılan malzemenin mekanik özelliklerine, test

sıcaklığı ve oranına bağlı olduğu söylenmektedir. Ancak yapıştırma olayını tamamen anlayabilmek için, yüzey ve ara yüzey yönlerinin detaylı olarak tartışılması gereklidir. Yapıştırma bağlantılarında genellikle hasar, yapıştırıcının kohezif kırılması veya yapıştırılan malzemede hasar oluşumuyla meydana gelmektedir. Yapıştırma bağlantılarında görülen bu hasar türlerini daha iyi anlayabilmek için mekanik kilitleme, elektrostatik, difüzyon ve yüzey etki gibi yapıştırma mekanizmaların incelenmesi gerekmektedir. Her bir yapıştırma mekanizmasının rolü farklı tür yapıştırıcı ile birleştirilmiş sistemler için değişiklik gösterir. (Bharti 2018)

1.1. Yapıştırma Bağlantıları

Yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemeden oluşan bir bağlantı sistemidir. Yapıştırma bağlantıları kullanıldığı yere göre farklı geometrilerde ve tasarımlarda olabilmektedir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların geleneksel yöntemlerden birçok avantajı bulunmaktadır. Bunlar; ince ve farklı tür malzemelerin birleştirilebilmesine olanak sağlaması, yorulma direnci, yapı ağırlığında azalma, sızdırmazlık ve titreşim sönümlenme özellikleri ve üretim maliyetlerinin azalması gibi avantajları vardır. Bununla birlikte, geleneksel birleştirme tekniklerinin yanında yapıştırma ile birleştirilmiş bağlantıların daha yaygın kullanımını önleyen birkaç husus vardır. Bunlar; yapıştırmayı sağlayabilmek için önceden yapışma yüzeyinin hazırlanması, zaman ve sıcaklığa bağımlı olarak yapıştırıcının mekanik özellikleri değişiklik göstermesi, yapıştırma bağlantısının ömrü maruz kaldığı çevresel şartlara bağımlı olması gibi dezavantajları vardır.

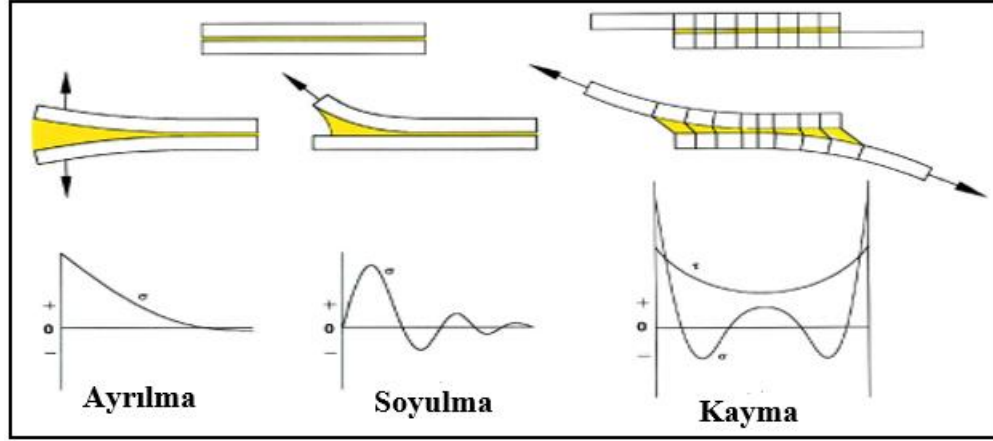
Günümüzde yapıştırma bağlantısının birçok tipi kullanılmaktadır. Ancak yaygın olarak kullanılan yapıştırma bağlantı tipleri Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Yaygın olarak kullanılan yapıştırma bağlantı çeşitleri, (a) tek tesirli bindirme, (b) çift tesirli bindirme, (c) boyun bindirme, (d) açılı bindirme, (e) teraslama, (f) tek takviyeli bindirme, (g) çift takviyeli bindirme, (h) alın bağlantı, (i) silindir bağlantı, (j) soyulma bağlantı.

1.2 Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Gerilme Çeşitleri

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar genellikle çekme, basma, kayma veya soyulma yüklemesi ile yüklenir (Şekil 1.2). Ayrıca bağlantılar bu yükleme durumlarının birkaçının birlikte olduğu bir yük kombinasyonu ile de yüklenebilir. Yapıştırıcılar çekme, basma özellikle kayma gerilmelerine karşı mukavemetleri oldukça iyidir. Ancak yapıştırıcıların soyulma gerilmelerine karşı mukavemetleri zayıftır. Bundan dolayı yapıştırıcının soyulma gerilmelerine karşı mukavemetlerinin artırılmasına yönelik çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Bir yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantı tasarımında bağlantının maruz kalacağı yük durumu göz önünü alınmalı ve yapıştırıcı hangi yükleme durumu için maksimum performans sergiliyorsa o yükleme durumuna uygun bağlantı tipi seçilmelidir.



Şekil 1.2. Yapıştırma bağlantılarında oluşabilecek gerilme durumları (Akpınar 2012).

Yapıştırma bağlantılarında hasar diğer mekanik bağlantı türlerinde olduğu gibi dayanabileceği yüke ulaştığında hasar gerçekleşmektedir. Yorulma ve darbe yüklemelerine maruz yapıştırma bağlantılarda oluşan hasar doğrudan yapıştırıcının kopma (ayrılma) gerilmesi ile ilişkilidir. Yorulma yüklemelerinde uygulanan gerilme oranı, mekanik bağlantılardan çok yapıştırma bağlantılarında önemlidir. Havacılık sanayinde belirlenen yükmeden sonra belirli gerilme değerine ulaşacağı varsayıldığından kopmanın olacağı sıklıkla kullanılan bir arıza kriteridir.(Adams 1984).

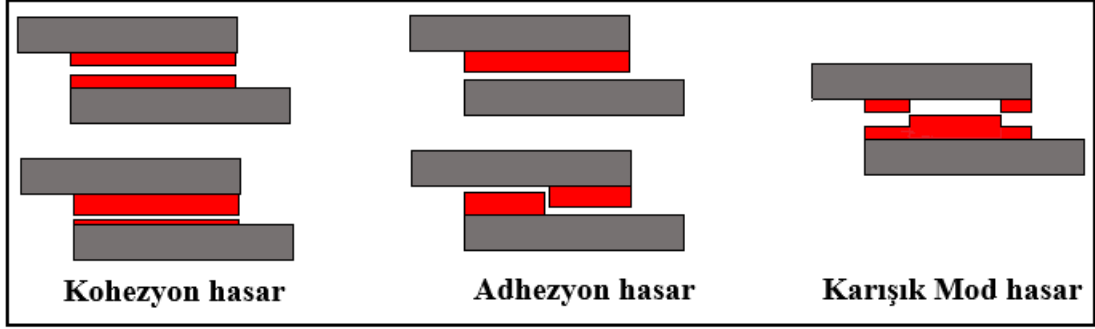
1.3 Yapıştırma Bağlantılarında Hasar Çeşitleri

Farklı yükleme şartlarında yapıştırma bağlantılarının veya yapıştırıcının mekanik özelliklerinin tamamıyla anlaşılabilmesi için, hasar tiplerinin bilinmesi gerekir. Yapıştırılan malzemenin metal olması durumunda oluşan hasar tipleri ISO 10365 standardında tanımlanmıştır. Bu standarda göre yapıştırma bağlantılarında genel olarak kohezyon, adhezyon ve karışık (adhezyon-kohezyon) tip hasar modlarıyla karşılaşılır. Yapıştırıcı-yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde gözle görülen ayrılmanın olduğu kopma olayı adhezyon hasar, yapıştırma bağlantısında yapıştırıcı tabakasında gözle görülen hasarın olduğu kopma olayı kohezyon hasar ve adhezyon ile kohezyon hasarın birlikte olduğu durum ise karışık karışık-mod hasar olarak tanımlanmaktadır (Şekil 1.3).

Yapıştırma bağlantılarında hasar genellikle yapışma veya kohezyon hasarının yüzde olarak ifade edilmektedir. Bu yüzde hesabı kohezif veya yapıştırma şeklinde gerçekleşmiş temas alanının hacimsel oranı üzerinden yapılır. Bir hasar gerçekleştiğinde

1. GİRİŞ

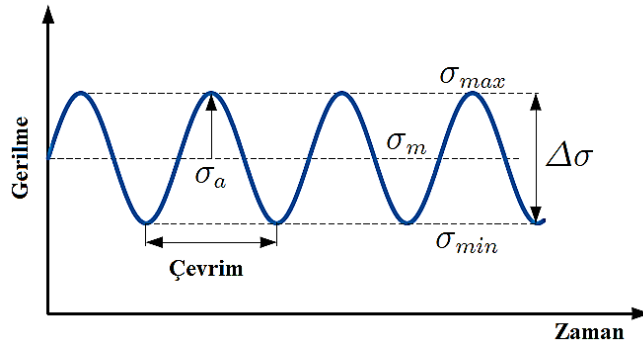
hasar modunun tam ve doğru şekilde belirlenmesi zaman ve para kazancı sağlarken aynı zamanda hasarın anlaşılmasına yardımcı olur (Bharti 2018).



Şekil 1.3. ISO 10365 standardında tanımlanan yapıştırma hasar modları.

1.4 Yorulma

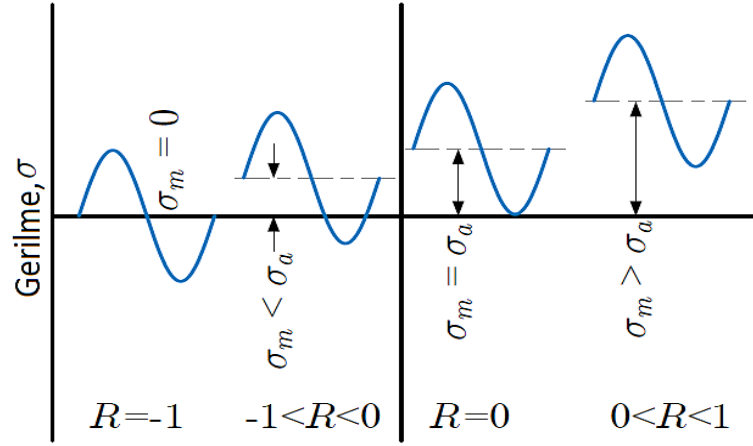
Yorulma, bir yapının veya bağlantının tekrarlı veya salınımlı yüklemeler altında kırılması olayıdır. Yorulmada bir malzemenin statik yüklemeye altındaki maruz kaldığı yüklemeye değerinin daha az yüklemeye seviyelerinde yapıda veya bağlantıda hasar oluşmasıdır. Mühendislikte kullanılan tüm yapılar statik yüklemelere maruz kalmaktan ziyade yorulma yüklemelerine maruz kalmaktadır. Bu nedenle yapının veya bağlantının yorulma direncinin belirlenmesi ve yorulma performansının artırılması oldukça önemlidir. Yorulma yükleri sabit veya değişken genlikli olmakla birlikte, yorulma yükleri yorulma gerilmelerini hesaplamak için kullanılır. Yorulma performansını etkileyen iki önemli gerilme bulunmakta olup, bu gerilmeler gerilme genliği (σ_a) ve ortalama gerilme (σ_m) dir (Şekil 1.4). (Pedersen 2018)



Şekil 1.4. Yorulmada kullanılan gerilmeler (Pedersen 2018)

1. GİRİŞ

Yorulma testlerinde R (gerilme oranı) değeri +1 ile -1 arasında değişim göstermekte olup, R değeri uygulanan minimum gerilmenin (veya kuvvet) maksimum gerilmeye (veya kuvvet) oranıdır. R değeri -1 olduğunda tam değişken yükleme (eğilmeli yorulma) durumunda, R değeri 0 olduğunda ise titreşimli çekme yükleme durumlarda yorulma testleri yapılmaktadır. R değeri 1 olduğunda statik yükleme durumu söz konusudur. Gerilme genliği ile ortalama gerilme arasındaki ilişki ve değişimler Şekil 1.5’ de gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Gerilme genliği ile ortalama gerilme arasındaki ilişki.

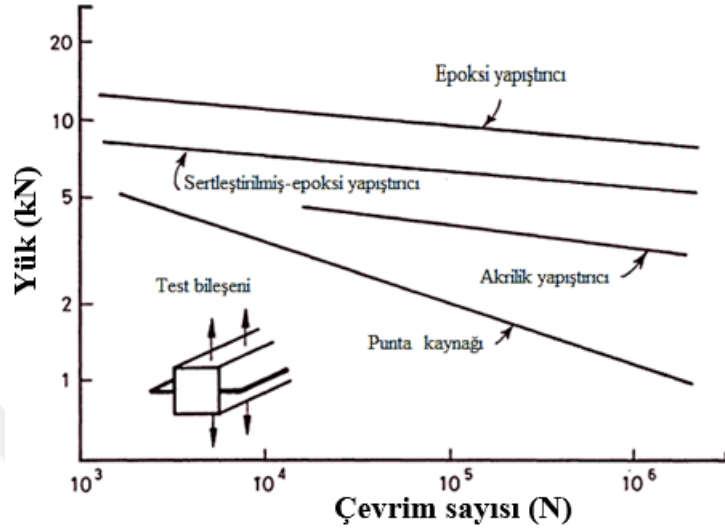
1.5 Yapıştırma Bağlantılarında Yorulma

Yapıştırma bağlantıları statik yüklemelerden ziyade genellikle dinamik ve çevresel etkilere (örneğin, uçak kanatlarında kullanılan yapıştırma bağlantıları rüzgar, türbülans, bulut gibi çevresel faktörlere maruz kalması durumu) maruz kalmaktadır. Dinamik ve çevresel etkilere maruz kalan yapıştırma bağlantıların mekanik özelliklerini belirlemek ve performanslarını artırmak oldukça önemlidir. Bu nedenle yapıştırma bağlantıların yorulma performanslarını artırmak için, farklı tip bağlantı geometrisi, nanoyapı ilave edilerek elde edilen nano kompozit yapıştırıcı kullanımı, yapıştırıcı kalınlığı ve bindirme uzunluğu gibi yöntemler kullanılmaktadır.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar, diğer geleneksel yöntemlerle birleştirilmiş bağlantılara (perçin, cıvata ve nokta kaynağı) göre yorulma performansları daha iyidir. Şekil 1.6’de verilen punta kaynağı ve farklı tip yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların

1. GİRİŞ

yorulma performansları incelendiğinde, yapıştırma bağlantıların performanslarının daha iyi olduğu görülmektedir. Ancak yapıştırıcı karakterinin değişmesi yapıştırma bağlantısının performansını etkilemektedir.



Şekil 1.6. Punta kaynağı ve farklı tip yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların yorulma özellikleri (Kinloch 1987)

Mühendislik yapılarında olduğu gibi yapıştırma bağlantılarında da yorulma davranışlarını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler gerilme konsantrasyonu, gerilme türü, ortalama gerilme, numune kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü, sıcaklık ve korozyon gibi faktörlerdir. Ancak bu faktörlerin yanı sıra yapıştırma bağlantılarında uygulanan kuvvetin şekli (sinüs veya kare), frekansı ve bağlantı geometrisi yorulma performansını etkilemektedir (Kinloch 1987).

1.6 Yapıştırma Bağlantıların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

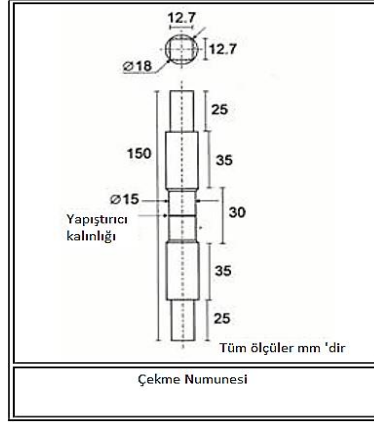
Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda en ideal tasarımı belirlemek için bağlantının mekanik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Yapıştırma bağlantıların mekanik özelliklerini belirlemek için iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler deneysel ve nümerik (sayısal) yöntemlerdir. Bu tez çalışması kapsamında yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerinin belirlenmesinde deneysel yöntemler kullanılmıştır.

1.6.1 Deneysel yöntemler

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

1.6.1.1. Çekme testi

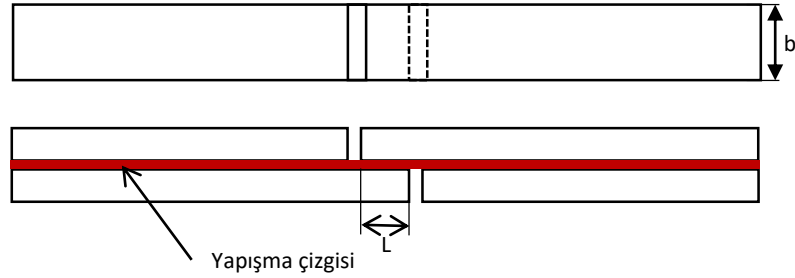
Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların çekme testinde yük doğrudan veya dolaylı olarak gerilmeler şeklinde uygulanmaktadır. Yapıştırıcının çeki testi ile mekanik özelliklerini belirlemede kullanılan bağlantı tipi Şekil 1.7’ de verilen alın bağlantı tipidir. Çekme testinde kullanılan silindirik alın bağlantısında belirli kalınlığa sahip yapıştırıcı tabakası teste tabi tutulur. Alın bağlantıda yapıştırıcı sadece çeki gerilmelerine maruz kalır. Test sonrasında yapıştırıcının ortalama mukavemet değeri, kopma anındaki yükün alın bağlantısının yapışma alanına bölünmesi ile elde edilir.



Şekil 1.7. ASTM standartlarında bir çekme numunesi ve ölçüleri (ASTM D897, ASTM D2095)

1.6.1.2. Kayma testi

Kayma testi, yapıştırıcının kayma mukavemeti değerlerini bulmak için kullanılan bir yöntemdir. Yapıştırıcının kayma mukavemet değerini bulmada en yaygın kullanılan yöntem kalın malzeme kayma testi (Thick Adherend Shear Test) yöntemidir. Bu yöntemde, kısa bir bindirme uzunluğuna sahip kalın ve sert (rijit) malzemeler kullanılarak elde edilen bağlantıya tek eksenli çekme veya basma yükü uygulanmaktadır (Şekil 1.8).



Şekil 1.8. Kayma testi için kullanılan bir numunenin şematik gösterimi

Bu tip bağlantılarda yapıştırıcının kayma mukavemeti aşağıdaki verilen formül 1.1 ile belirlenmektedir.

$$\tau = \frac{P}{bL} \quad (1.1)$$

1. GİRİŞ

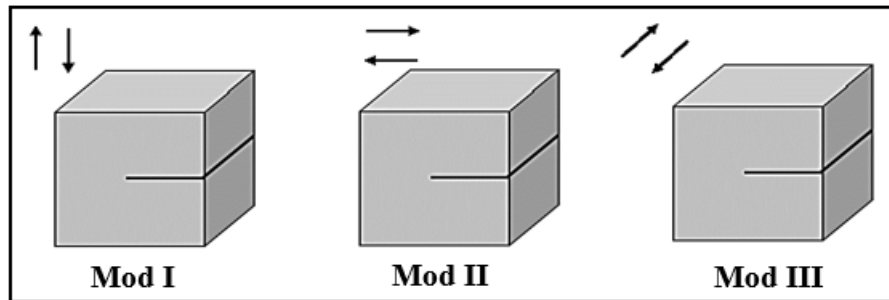
Burada P maksimum yük, b bağlantının genişliği ve L ise bağlantının bindirme uzunluğudur. Bu testlerde yapıştırılan malzemede herhangi bir yer değiştirme olmaması veya ihmal edilecek seviyede olması için yapıştırılan malzeme olarak sert çelik kullanılmakta olup, yapıştırılan malzemede yer değiştirme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

1.6.1.3. Soyulma testi

Soyulma testi genellikle bir malzemenin, tipik olarak bir yapışkanın yapışma mukavemetini ölçmek için kullanılır. Soyulma testinde yapıştırıcı malzemenin soyulma direnci belirlenir. Soyulma direnci, yapıştırma bağlantılarında yapıştırılan malzemeleri ayırmak için yapışma hattı boyunda ölçülen birim test genişliğindeki ortalama kuvvet değeri olarak tanımlanmaktadır. Soyulma direnci hem yapıştırılan malzeme ile hem de yapıştırıcı kalınlığı ile ilişkilidir. Yapıştırıcılar için en yaygın olarak kullanılan soyulma test yöntemleri, T-Soyulma yöntemi, yüzer silindir yöntemi, kasnak tırmanma soyulma yöntemidir.

1.6.1.4. Kırılma tokluğu testi

Kırılma tokluğu testi, Değişken yükleme koşulları altında çatlak başlmasına ve ilerlemesine karşı direnci belirlemek için yapılmaktadır. Bu testler, kırılma mukavemeti açısından yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme etkileşimlerini değerlendirmek için kullanılır. Çatlak ilerlemesi, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemedeki oluşan bağlantı sisteminin kırılma tokluk değeri aşıldığında meydana gelmektedir. Çatlak başlangıcı ve büyümesi durumu genellikle, çatlak açma (Mod I), kayma (Mod II) ve karışık (Mod III) mod koşullarında meydana gelmektedir.(Şekil 1.9)



Şekil 1.9. Çatlak başlangıcı ve ilerlemesinde gerçekleşen hasar modları

1.6.1.5. Ayrılma testi

Ayrılma testi, yapıştırıcıya dik olarak uygulanan konsantre çekme gerilmeleriyle yapılmaktadır. Bu test yöntemi, havacılık ve savunma endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmakta ve yapıştırılan malzemedeki yüzey işlemlerinin dayanıklılık özelliği üzerindeki etkilerini belirlenmek ve tahmin etmek için kullanılmaktadır. Ayrıca bu test yönteminin havacılık ve savunma endüstrileri tarafından güvenilir olduğu kanıtlanmıştır. Test metal-metal, metal-kompozit ve kompozit-kompozit bağlantılara uygulanabilir. Çift konsol kiriş (ÇKK) ve konik çift konsol kiriş (KÇKK) bağlantı tipleri ile yapıştırıcının Mod I' deki (çatlak açma) kırılma tokluğu özelliği belirlenmektedir. Şekil 1.10'da ayrılma testinin şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 1.10. Mod-I ile ayrılma testinin şematik gösterimi

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar, homojen gerilim dağılımlarının oluşumu, farklı malzemeleri birleştirme yeteneği, yüksek yorulma direnci ve sızdırmazlık gibi avantajları nedeniyle havacılık ve otomotiv endüstrilerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantı dayanımlarının geliştirilmesi üzerine çalışmalar genellikle, yapıştırıcı tipi, yapıştırma metodu ve hibrit bağlantılar (yapıştırırmalı-perçinli v.b.) üzerinedir. Ancak son yıllarda yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların performansını iyileştirmek için yapıştırıcı veya yapıştırılan malzemenin mukavemetini artırmaya yönelik çalışmalar hız kazanmaktadır. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda hem yapıştırıcının hem de yapıştırılan malzemenin mukavemetini artırmak için, malzeme içerisine karbon nanotüp, grafen, fulleren ve organik killer gibi nano yapılar ilave edilmektedir. Yapıştırıcıya nano yapılar ilave edilerek oluşturulan bağlantılar ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde, yapıştırıcıya uyumlu nano yapıların ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü artırdığı görülmüştür.

Akpınar vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, tek tesirli yapıştırma bağlantılarında farklı yapıştırıcı türlerine, farklı oranda ve yapıda nano yapı ilave ederek hasar yükünün değişimleri deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmada yapıştırıcı olarak DP460, DP270 ve DP125 yapısal yapıştırıcı, nano yapı olarak ise karbon nanotüp, fulleren ve grafen kullanılmıştır. Yapıştırıcıya ilave edilen nano katkı oranlar ise ağırlıkça % 0.25, 0.5, 1, 2 ve 3 kullanılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucuna göre, DP460 yapıştırıcı içerisine %1 ve %2 grafen ilave edildiğinde bağlantının hasar yükü arttığı, %1 fulleren ilave edildiğinde ise bağlantının hasar yükündeki artış grafen ilave edilen bağlantıların hasar yüküne göre düşük olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca bağlantıların hasar yükleri açısından nano yapı ilave oranının %1 olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Reza Borghei, Behjat ve Yazdani (2019) tarafından yapılan çalışmada nano yapı katkısının bağlantı türleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapıştırıcı ve civata kullanılarak elde edilen hibrit yapıştırma bağlantısında yapıştırıcı içerisine farklı grafen türleri ilave edilmiş olup, bu bağlantıların mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada nano yapı ilave oranı ağırlıkça % 0,5 kullanılmış olup, nano yapı katkılı ve katkısız

2. KAYNAK ÖZETLERİ

bağlantılar karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucuna göre; genel olarak nano yapı katkılı bağlantı türlerinin daha iyi mekanik özellik gösterdiği görülmüştür. Ayrıca düşük tabaka sayısı ve kalınlığa sahip grafenin yapıştırıcı malzeme içerisinde homojen bir şekilde dağıldığı ifade edilmiştir.

Nemati Giv vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, yapıştırma bağlantılarda yapıştırıcı içerisine ilave edilen farklı mesafelerde metal mikro fiberlerin bağlantının mekanik özelliklerine etkisi deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Çalışmada kullanılan mikro fiberlerin mesafeleri sırasıyla 0.5, 1 ve 1.5 mm olarak ele alınmıştır. Deneysel sonuçlar incelendiğinde; boyuna yönde yerleştirilen metal mikro fiberlerin sayısı arttığında bağlantının kayma dayanımı ve yer değiştirmesi açısından olumlu yönde gelişme gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca 1mm'lik mesafede ve boyuna yerleştirilen metal mikro fiberler en iyi mekanik özelliği göstermiştir. Ancak enine yönde yerleştirilen metal mikro fiberler yapıştırma bağlantıların mekanik özelliklerini kötüleştirdiği ifade edilmiştir.

Razavi vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, yapıştırıcı içerisine farklı tür ve oranlarda nano yapılar ilave edilerek elde edilen tek tesirli yapıştırma bağlantılarının ortalama uzama ve kayma mukavemeti incelenmiştir. Yapılan çalışmada silika nanopartikül, çok duvarlı karbon nanotüp ve hibrit (silika+carbon nanotüp) nano yapılar kullanılmış olup, nano yapı ilave oranları ise ağırlıkça 0,2 0,5 ve 0,8 olarak ele alınmıştır. Çalışmanın sonucunda, hibrit nano yapı katkısının, tek türdeki nano katkılı yapıştırma bağlantılarına göre mekanik özelliklerinin daha iyi olduğu belirtilmiştir. Ayrıca hibrit nano yapıların farklı ağırlık yüzdeleri arasında en iyi sonuç ağırlıkça %0,8 oranı olduğu ifade edilmiştir. Bu katkı oranında uzama ve kayma mukavemetlerinde sırasıyla % 36 ve %28 artış olduğu görülmüştür. Ayrıca nano yapı ilaveli yapıştırma bağlantılarının kırılma yüzeyleri ve hasar mekanizmaları incelenerek, deney sonuçları ve kırılma yüzeyleri arasında doğrudan bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir.

Saraç ve Temiz (2019) tarafından yürütülmüş olan bu çalışmada; yapıştırıcı içerisine ağırlıkça %2 ,%4 ve %6 oranlarında nano- Al_2O_3 , nano- SiO_2 ve nano- TiO_2 partiküller ilave ederek farklı bindirme uzunluğuna sahip (20-25-30-50-70 mm) tek tesirli bindirme bağlantılarının mekanik özellikleri incelenmiştir. Çalışmada yapıştırıcı

malzemesi olarak DP460 ve yapıştırılan malzeme olarak 2 mm kalınlığında AISI 304 paslanmaz çelik kullanılmış olup, üretilen yapıştırma bağlantıları 1mm/dk. çeki yüküne maruz bırakılmıştır. Deneysel bulgular incelendiğinde; nano katkı ilavesinin yapıştırma bağlantılarında ortalama hasar yükünü önemli ölçüde arttırmıştır. Bu artışın sebebi ise nano katkı ilavesinin yapıştırıcının fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkileyerek yapıştırıcı ve yapıştırılan arasındaki bağ mukavemetini artmasına neden olmaktadır. Yapıştırma bağlantılarında en yüksek hasar mukavemeti verileri ağırlıkça %4 nano- nano- Al_2O_3 , %4 nano- TiO_2 ve %6 nano- SiO_2 ilaveli bağlantılarda elde edilmiştir. Genellikle bindirme uzunluğunun artması bağlantının ortalama hasar yükü artar iken nano katkılı yapıştırıcı bağlantılarında bindirme uzunluğunun artması ile kayma gerilmesini azaltmıştır.

Li vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada, yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların tokluğunu ve sünekliğini artırmak için yapıştırıcı içerisine fonksiyone edilmiş nano boyutlu silisyum oksit ilave edilmiş olup, nanoyapı bağlantının mekanik özelliklerine nasıl bir etki yaptığı incelenmiştir. Çalışmada kullanılan nano- SiO_2 yapıştırıcı içerisine ağırlıkça % 0 dan başlayarak % 1 kadar farklı oranlarda ilave edilmiş olup, yapıştırma bağlantısında oluşan hasar şekilleri, yapışma-kayma arasındaki ilişki ve yapıştırıcı dayanımı gibi parametreler irdelenmiştir. Nano katkısız yapıştırma bağlantısına göre nanoyapı katkılı bağlantılar karşılaştırıldığında, nanoyapı katkılı bağlantının tokluğu, kopma uzaması şekil değiştirme enerjisi ve kayma dayanımı değerlerinde artma olduğu deneysel sonuçlardan görülmüştür. Ayrıca yapıştırıcıya nano- SiO_2 ile edilmesi, yapıştırıcının gerilme şekil değiştirme eğrisini doğrusaldan doğrusal olmayan bir davranışa dönüştürdüğü ifade edilmiştir.

Hadjez ve Necib (2018) tarafından yapılan bu çalışmada yapıştırıcıya ağırlıkça %2 oranında grafen nanoyapı ilave edilerek elde edilen tek tesirli bindirme bağlantısında (single-lap joint SLJ) oluşan gerilme hasar yükü üzerine grafenin etkisi deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Yapıştırma bağlantısına nano katkı ilavesi bağlantının hasar yükünü arttırdığı ve bu artışın yapıştırıcının özelliğine ve nano yapının yapısına bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Ayrıca nanoyapı ilave edilmesi yapıştırma bağlantılarının yer değiştirme kapasitesini arttırdığı belirtilmiştir. Nanoyapı ilave edilmesinin bir başka avantajı ise, nanoyapının hasar sönümlenme kabiliyetini artırdığı ve buna bağlı olarak

bağlantının hasar yükünü kayda değer ölçüde artırmıştır. Yapılan çalışmanın nümerik analiz sonuçlarına göre, tek tesirli bindirme bağlantılarında gerilme bindirme bölgesinin uç kısımlarında meydana geldiği belirtilmiş olup, bu gerilmenin azaltılması bağlantının yük taşıma kapasitesini önemli derecede artıracığı belirtilmiştir.

Çevresel faktörler nedeniyle (örneğin uçakların kanatları rüzgar, türbülans, bulut ve sıcaklığın değişmesi gibi çevresel faktörlere maruz kalması) yapıştırıcıyla veya geleneksel yöntemler (perçin, kaynak, lehim vb.) ile birleştirilmiş bağlantılar sadece statik çekme veya eğme yüküne maruz kalması nadir bir durumdur. Bu bağlantılar düzenli veya düzensiz dinamik yüklemelere maruz kalmakta olup, bu bağlantıların yorulma davranışlarının araştırılması oldukça önemlidir. Yapılan literatür araştırmasında, yapıştırıcıya nano-yapı ilave edilerek elde edilen bağlantıların yorulma performansının incelendiği görülmüştür.

U.A. Khashaba (2017) tarafından yürütülen bu çalışmada, yapıştırıcı içerisine karbon nanotüp ilave edilerek elde edilen kompozit yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların 10° ve 5° eğim açılarında, 0.25 - 0.17 mm yapıştırıcı kalınlığında mekanik ve yorulma dayanım özellikleri deneysel ve analitik olarak araştırılmıştır. Yapılan çalışmaya göre, yapıştırıcıya nano yapı ilave edilmesi bağlantının mekanik dayanımı yaklaşık %15 ile %33 arasında artış olduğu ifade edilmiştir. Ancak nano yapı ilavesinin yorulma özelliklerine kayda değer bir katkı sağlamadığı sadece eğim açısının 10° den 5° ye ve yapıştırma kalınlığının 0.25-mm'den 0.17-mm'ye düştüğünde yorulma özelliklerinde iyileşme olduğu gözlemlenmiştir.

C. Wu vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada, çelik ve cam elyaf takviyeli kompozit malzemeden yapılmış bağlantının $R=0.2$ ve 0.6 yorulma yük oranlarında değişimi incelenmiştir. Çalışmada yorulma özelliklerine bakılarak farklı yorulma yük oranlarında yorulma sonrası statik dayanımları incelenmiştir. Bu tür bağlantıda hem statik hem de yorulma davranışlarının hasarı kompozit malzemede tabakaların ayrılması olarak görülmektedir. Yorulma yük oranı değeri arttığında yorulma sonrası statik dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir.

Sadigh ve Marami (2018) tarafından yapılan çalışmada, yapıştırma bağlantısında azaltılmış grafen oksit (RGO) kullanarak hem deneysel hem de sayısal olarak farklı bindirme uzunluklarında yorulma ömrü incelenmiştir. Çalışmada katkı oranı % 0.5 olan tek tesirli yapıştırma bağlantıları R 0.1, 12 Hz ve statik yükünün % 70'inden % 40'ı genliğinde yorulma yüklerine maruz bırakılmıştır. Katkı ilave edildiğinde yapıştırıcının daha sünek davranışından dolayı yorulma ömrünün her bindirme uzunluğu için arttığı görülmüştür.

Ladani vd. (2017) tarafından yürütülen bu çalışmada, karbon fiber kompozit malzemeden yapılmış yapıştırma bağlantılarına farklı oranlarda karbon nano fiberler kullanılarak yorulma ömrü direnci ve bağlantının ayrılması incelenmiştir. Çalışmada ağırlıkça %0.4, %0.7 ve %1.0 oranlarında karbon nano fiberler yapıştırıcı içinde rastgele dağıtılmış ve yorulma deneylerinde R=0.5 yük oranı ve 5 Hz frekans uygulanmıştır. Çalışma sonuçları incelendiğinde, katkı oranı arttığında Mod I'deki kırılma tokluğu değeri ve yorulma direnci arttığı sonucuna varılmıştır.

Y. Wu vd. (2016) sıcaklığa maruz kalan yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve yorulma dayanımları incelenmiştir. Çalışmada yapıştırma bağlantıları için uygulanan yorulma yük oranı R=0.1 ve çalışma frekansı 30 Hz'dir. Statik testlerden elde edilen bağlantı hasar yükünün %80, %60 ve % 40'ı göz önüne alınarak yorulma testleri yapılmıştır. Çalışma sonucuna göre 14 gün boyunca yapıştırma bağlantıları 80° sıcaklığa maruz bırakılmış ve sonrasında hasar yükünde %16 olarak bir azalma olduğu görülmüştür. Sıcaklığa maruz kalmadan önce yorulma ömrü 5.106 çevrim değerlerinde iken, sıcaklığa maruz kaldığında ise yorulma ömrü 106 çevrim değerine düşmektedir. Tek tesirli bindirme bağlantılarına sıcaklığa maruz kaldığında oksidasyon oluşmaktadır. Oksidasyona bağlı olarak yapıştırıcı malzemesinin hidrojen bağları zayıflar ve bundan dolayı hasar yükü ve yorulma değerleri azaldığı ifade edilmiştir. Ayrıca yapıştırıcıya ağırlıkça %1 oranında karbon nanotüp eklenmesi bağlantının yorulma dayanımını ve ömrünü iyileştirmektedir (Kubit, Bucior, and Zielecki (2016)).

Saraç, Adin, ve Temiz (2018) tarafından yapılan çalışmada, tek tesirli yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcı içerisine farklı oranlarda ve yapıda nano yapı ilave edilerek bağlantının ortalama yorulma hasarı ve mukavemeti deneysel olarak incelenmiştir. Bu

çalışma da yapıştırıcı malzemesi olarak DP460, nano yapı olarak ise nano- Al_2O_3 , nano- SiO_2 ve nano- TiO_2 kullanılmıştır. Yapıştırıcıya nano yapı ilave oranları ise ağırlıkça % 2, % 4 ve % 6 gibi farklı oranlar belirlenmiştir. Nano yapı katkılı ve katkisız yapıştırma bağlantılarının statik ve yorulma mukavemetleri karşılaştırılmıştır. Statik testlerde 1 mm/dk çeki yükü uygulanmış olup, yorulma deneylerinde ise $R=0,1$ yük oranı ve 10 Hz frekans uygulanmıştır. Yapıştırma bağlantılarında en yüksek hasar yükü ağırlıkça % 4 katkılı nano Al_2O_3 yapıştırma bağlantısında elde edilmiştir. Yorulma testi sonuçlarında ise, Al_2O_3 , SiO_2 nano yapı katkısı yapıştırma bağlantısının yorulma mukavemetini artırırken, TiO_2 nano yapı katkısı yapıştırma bağlantılarının yorulma mukavemetini azalttığı görülmüştür.

Koricho, Khomenko, vd. Mahmoodul Haq (2014) tarafından yapılan bu çalışmada cam kabarcık katkılı tek tesirli bindirme bağlantılarının yorulma davranışları incelenmiştir. Yapıştırıcı içerisine ağırlıkça %1 oranında yüksek mukavemetli ve düşük yoğunluklu küresel şekilli cam kabarcıklar takviye edilmiştir. Cam kabarcık katkılı ve katkisız yapıştırma bağlantılarının statik ve yorulma testleri $R=0.1$ gerilme oranında, 10 Hz sıklıkta ve sinüs dalgası formunda yapılmıştır. Çalışmanın sonuçları incelendiğinde, cam kabarcıkların yapıştırma bağlantılarına ilave edilmesi tek tesirli yapıştırıcı bağlantılarının mukavemetini ve yorulma ömrünü arttırdığı görülmüştür. Aynı zamanda ağırlıkça %1 cam kabarcık katkı oranının yapıştırıcı malzemesinin gerilme mukavemeti ve elastisite modülü üzerinde azda olsa olumsuz etki yaratmıştır. Nihai hasar yükünün % 45'inde sadece cam kabarcık katkılı yapıştırıcı bağlantılar 10^6 çevrime ulaşmıştır.

Zielecki vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, üç farklı yapıştırıcıya ağırlıkça %1 oranında saflaştırılmış çok duvarlı karbon nanotüp ilave edilerek elde edilen bağlantının yorulma mukavemeti özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışmada elektromanyetik titreşim indüktörü ile yorulma mukavemeti testi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmanın deneysel bulguları incelendiğinde; yapıştırıcıya multi walled carbon nanotüp ilave edilmesinin epoksi yapıştırıcıların yorulma ömrü ve yorulma mukavemeti üzerinde iyileştirici etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Yapıştırma bağlantılarının kırılma yüzeyleri incelendiğinde tüm parametreler için koheziv kırılma görülmüştür. Çalışmada elde edilen tüm sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, nano teknolojinin yapıştırma

bağlantılı yapıların iyileştirilmesine ve bu etki sebebiyle daha yaygın olarak kullanımına katkıda bulunabileceğini desteklemektedir.

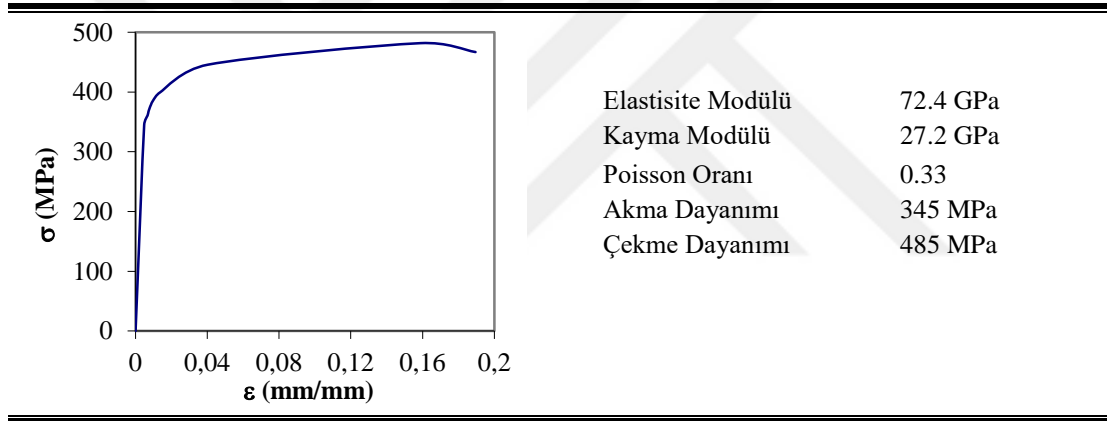
Yapılan bu tez çalışmasında; havacılık alanında kullanılan yapıştırıcıya nanoyapı ilave edilerek elde edilen nanokompozit yapıştırma bağlantıların, tam değişken çeki ve tam değişken eğme yüküne maruz kaldıktan sonra bağlantının hasar yükünde nasıl bir değişim olduğu kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Gerçekleştirilen incelemeler ve araştırmalar sonucunda; literatüre katkı yapacak ve gelecek çalışmalara temel oluşturacak özgün sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan çalışmada farklı yükleme durumlarında (çekme ve dört nokta eğme) yapıştırma bağlantılarının statik, yorulma özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Literatür araştırmaları, nano yapı ile takviye edilen yapıştırma bağlantıların tam değişken çeki ve dört nokta eğme yorulma performansları üzerine çalışmalarının henüz yaygınlaşmadığını göstermiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Malzeme

Bu çalışmada, yapıştırılan malzeme olarak hafifliği, işlenebilirliği, fiziksel ve mekanik özellikleri ve yüksek korozyon dayanımlarından dolayı havacılık ve otomotiv endüstrilerinde sıklıkla kullanılan AA2024-T3 alüminyum alaşım ve düz dokuma karbon fiber kumaş takviyeli kompozit $[0/90^\circ]_6$ malzemesi kullanılmıştır. AA2024-T3 alüminyum alaşım malzemeye ait mekanik özellikler Tablo 3.1’de ve karbon fiber kumaş takviyeli kompozitin malzeme özellikleri ise Tablo 3.2’de verilmiştir (Akpınar, 2012).

Tablo 3.1. AA2024-T3 alüminyum alaşım malzemenin mekanik özellikleri



Tablo 3.2. Karbon fiber kumaş takviyeli kompozitin malzeme özellikleri.

E_1 (GPa)	$72^{\pm 2.8}$
E_2 (GPa)	$72^{\pm 2.8}$
G_{12} (GPa)	$5^{\pm 0.3}$
ν_{12}	0.1
σ_{12} (MPa)	$650^{\pm 28}$
τ_{12} (MPa)	$90^{\pm 4.5}$
Tabaka kalınlığı	$0.25^{\pm 0.05}$

E: Elastisite modülü; ν : Poisson oranı; σ : Çekme mukavemeti; τ : Kayma mukavemeti.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda sıvı yapısal yapıştırıcılar oldukça sık kullanılırlar ve yüksek bağlantı dayanımı, düzgün gerilme dağılımı ve iyi boşluk doldurma gibi avantajlar sağlarlar. Bu çalışmada, yapıştırıcı olarak 3M (St. Paul, MN,

USA) firması tarafından üretilen çift bileşenli DP460 sıvı yapıştırıcısı kullanılmıştır. Bu yapıştırıcılara ait kürleşme şartları ve bileşim oranı Tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.3.Yapısal yapıştırıcının kürleşme şartları.

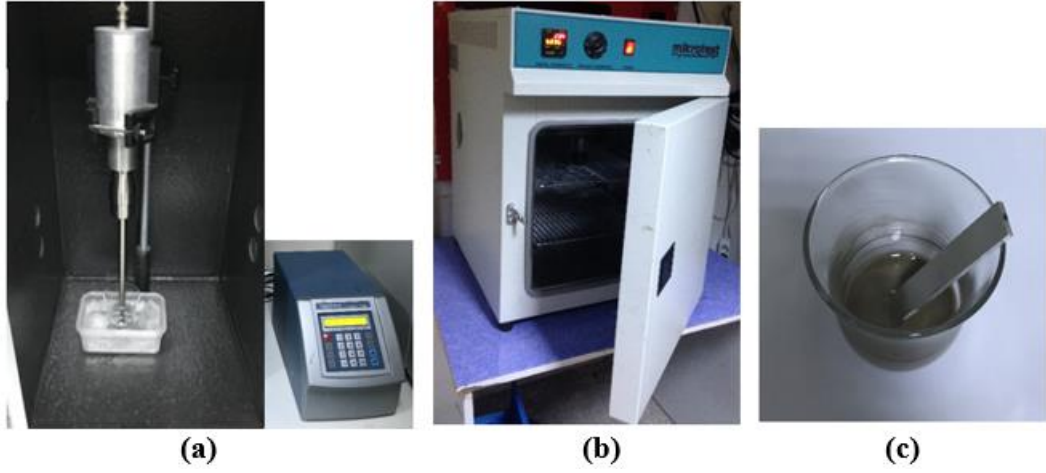
Yapıştırıcı	Bileşen Oranı (Epoksi: A / Hızlandırıcı: B)	Kürleşme sıcaklığı/zaman
3M™ DP-460	A:B=2:1	60°C/120 dakika

Karbon nanoyapı olarak ise, Pure Grafen (kalınlık 5-7 nm, çap 5 mikron, yüzey alanı 120-150 m²/g), Karbon Nanotüp-COOH (çap 10-20 nm, uzunluk 10-30 mm, saflık %95, yüzey alanı 200 m²/g ve COOH içeriği ağırlıkça %1) ve Fulleren C60 (saflık %99) kullanılmıştır.

3.2. Yapıştırıcının Hazırlanması

3.2.1 Nanoyapı katkılı yapıştırıcının hazırlanması

Nanoyapı katkılı bulk numunelerin hazırlanmasında en önemli nokta, karbon nanoyapılar yapıştırıcı içinde homojen olarak dağılmalı, birbirleri arasında kesinlikle topaklanma yapmamalıdır. Bu nedenle, 2014-2018 tarihleri arasında yürütülen 114M408 nolu Tübitak projesi kapsamında elde edilen yeni bir yöntem olan nanoyapı katkılı yapıştırıcı hazırlanma yöntemi ile nanoyapı katkılı yapıştırıcı hazırlanmıştır. Bu yöntemde, temizliği yapılmış boş bir çay bardağına hassas terazi yardımıyla yapılması planlanan yapıştırıcı karışım (epoksi+hızlandırıcı) miktarının ağırlıkça %1 kadar nanoyapı ve yaklaşık 10 gram aseton ilave edilerek ultrasonik karıştırıcı ile 30KHz frekans değerinde 10 dakika karıştırılmıştır (Şekil 3.1 a). Daha sonra aseton+nanoyapı karışımın içerisinde bulunan aseton buharlaştırılmadan karışıma planlanan miktarda epoksi eklenerek ultrasonik karıştırıcı ile 30 KHz frekansında 30 dakika karıştırılmıştır.



Şekil 3.1. a. Ultrasonik karıştırıcı, b. Etüv, c. Elle karıştırma

Aseton+nanoyapı+epoksi karışımı, kürleşme sıcaklığının altında bir sıcaklıkta (50°C’de) etüv içinde bekletilerek asetonun tamamen uçması sağlanmıştır (Şekil 3.1b). Asetonun tam uçurulmasının kontrolü hassas terazide epoksi ve nanoyapının miktarının ölçülmesiyle yapılmıştır. Daha sonra bu karışıma epoksi-hızlandırıcı bileşim oranına göre hızlandırıcı eklenerek 10 dakika elle karıştırılmıştır (Şekil 3.1c).

3.2.2 Nanoyapı katkısız yapıştırıcıların hazırlanması

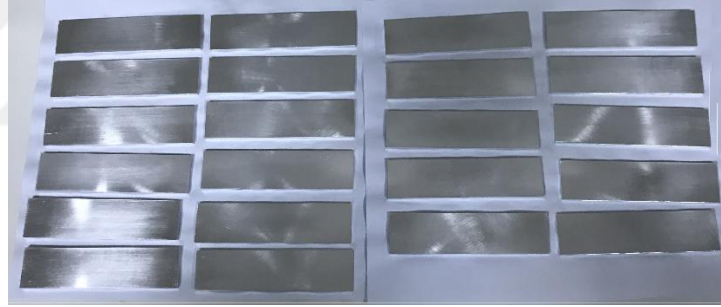
Nanoyapı katkılı ve katkısız yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin karşılaştırılması için, nanoyapı katkılı yapıştırıcı hazırlama yöntemi dikkate alınarak nanoyapı katkısız yapıştırıcılar üretilmiştir. Bu üretim yönteminde, temizliği yapılmış boş bir çay bardağına hassas terazi yardımıyla yapılması planlanan yapıştırıcı karışım (epoksi+hızlandırıcı) miktarının bileşim oranına göre epoksi ve yaklaşık 10 gram aseton ilave edilerek 30KHz frekans değerinde 30 dakika karıştırılmıştır. Aseton+epoksi karışımı, kürleşme sıcaklığının altında bir sıcaklıkta (50oC’de) etüv içinde bekletilerek asetonun tamamen uçması sağlanmıştır. Daha sonra bu karışıma epoksi-hızlandırıcı bileşim oranına göre hızlandırıcı eklenerek 10 dakika elle karıştırılmıştır.

3.3. Bağlantı Numunelerin Hazırlanması

Yapıştırma bağlantılarının yüksek dayanım sergileyebilmesi, kullanılacak yüzey hazırlama yöntemlerine bağlıdır. Bu yüzden istenilen ebatlara getirilmiş hem AA2024-

T3 hem de kompozit numune parçalarına yapıştırma işlemi öncesi aşağıda anlatılan yüzey hazırlama yöntemi uygulanmıştır.

- İstenilen boyutlara getirilmiş numune parçaların kesme işleminde oluşan çapakların ve numune üzerindeki yağ, gres, kir gibi atıkların temizlenmesi numuneler 600 grade SiC zımpara ile zımparalanmıştır.
- 600 grade SiC zımpara işleminden sonra numuneler üzerinde oluşan ince zımpara çiziklerin giderilmesi için 1000 grade SiC zımpara ile numuneler üzerinde pürüzsüz yüzey elde edilmiştir.
- Zımpara işleminden sonra numuneler toz temizleyici ile musluk suyunda yıkanmıştır.
- Yıkama işlemini takiben numuneler 20 dakika asetonda bekletilip ve numune parçaları 60oC sıcaklıktaki bir fırın içerisinde 30 dakika kurutularak yapıştırma öncesi yüzey hazırlama işlemleri tamamlanmıştır (Şekil 3.2).



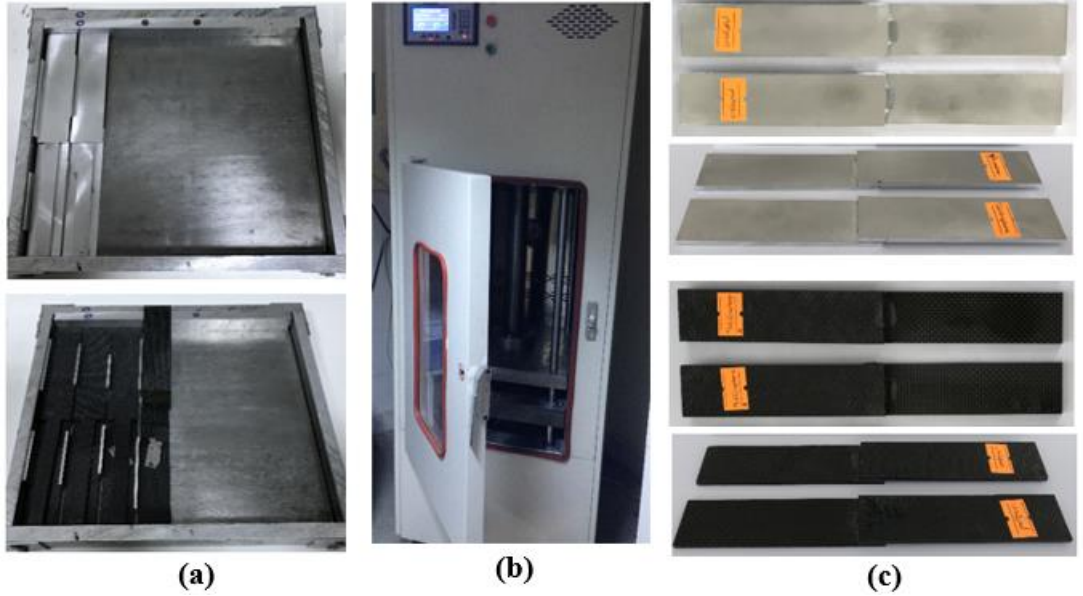
Şekil 3.2. Yapıştırma öncesi yüzey hazırlama işlemi yapılmış numuneler.

3.3.1 Tek tesirli (Single-Lap Joint) bindirme bağlantısının hazırlanması

Çalışmada kullanılan yapıştırıcıların küreşebilmesi basınç ve sıcaklık uygulanmasıyla mümkündür. Yapıştırılan malzemelerin konumunun korunabilmesi, yapıştırıcı tabaka kalınlığının ayarlanabilmesi ve aynı zamanda düzgün basınç uygulanabilmesi iyi tasarlanmış bir kalıbın kullanımını gerektirmektedir. Bu yüzden proje çalışmalarda Şekil 3.3a'da gösterilen kalıp kullanılarak çekme ve eğme deneylerinde kullanılacak tek tesirli bindirme bağlantı numuneler aşağıda anlatıldığı gibi hazırlanmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

- Bağlantı numunelerin kürleşme sonrası kalıptan kolayca ayrılması için, silikon yağlayıcı kalıp üzerine püskürtülerek çok ince bir film tabaka oluşturulmuştur.
- Bağlantı numunelerinin bindirme bölgelerine sıvı yapıştırıcı uygulanarak ve bir master yardımıyla yüzeylere yayılmıştır (Şekil 3.3a).
- Yapıştırıcı kalınlığının 0.18 mm olması için 0.18 mm kalınlığında metal parçalar numunelerin serbest uçlarına koyulmuştur.
- Numunelerin bindirme uzunluğunun korunması ve uniform basınç sağlanması için numune kalınlığında alüminyum kalıp aparatları yerleştirilmiştir (Şekil 3.3a).
- Daha sonra numunelerin bulunduğu proje kapsamında alınan sıcak prese yerleştirilmiştir.
- Yapıştırıcılar için verilen kürleşme şartları, sıcak presin kontrol paneli kullanılarak programlandı ve numunelerin kürleşmesi sağlanmıştır (Şekil 3.3b).
- Kürleşme işlemi sonrası numuneler oda şartlarında soğutularak kalıp içerisinden çıkarılmıştır.
- Kürleşme esnasında dışarı taşan kısımlar temizlenerek yapıştırma işlemi tamamlanmıştır (Şekil 3.3c).

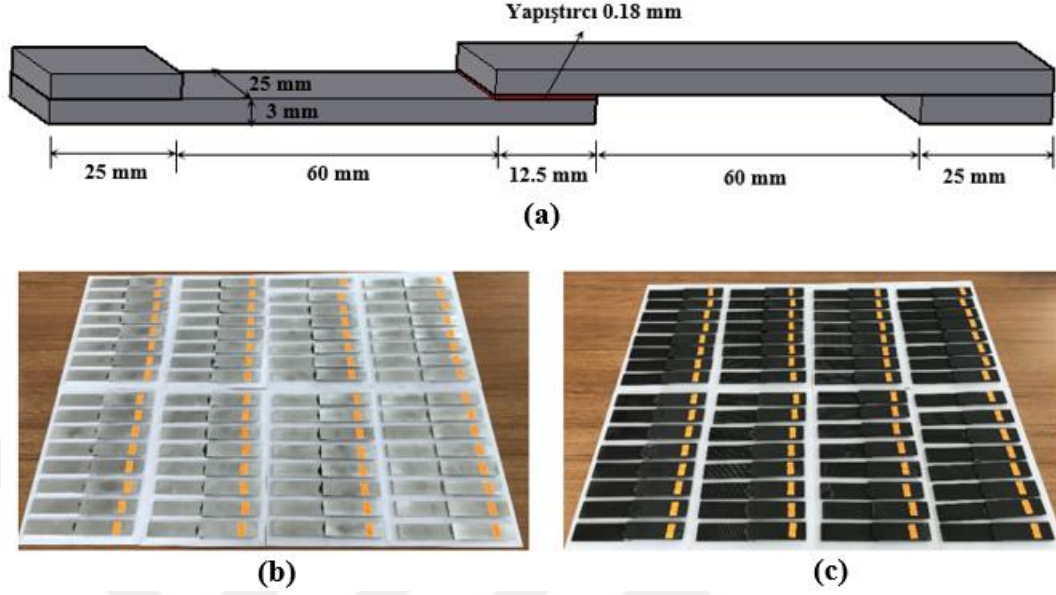


Şekil 3.3. a) Bağlantı numunesi üretim kalıbı, b) Sıcak pres, c) Kürleşme sonrası bağlantı

Geometrik parametreleri Şekil 3.4a’da verilen çeki ve dört nokta eğme yükü altında yapılacak deneyler için, nanopartikül katkılı veya katkısız yapıştırıcı ile elde

3. MATERYAL ve YÖNTEM

edilen alüminyum tek tesirli bindirme bağlantı (ASLJ) ve kompozit tek tesirli bindirme bağlantı (KSLJ) numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 3.4b ve 3.4c).



Şekil 3.4. a) Tek tesirli bindirme bağlantı (SLJ) numunelerin geometrik parametreleri, b) Alüminyum SLJ, c) Kompzit SLJ.

Ayrıca tez kapsamında yapılan çeki ve dört nokta eğme yükü altındaki deneysel parametreler Tablo 4’de verilmiştir. Tablo 3.4’de verilen deneysel parametreler hem çeki hemde dört nokta eğme için geçerli olup, her bir parametreden üçer numune test edilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

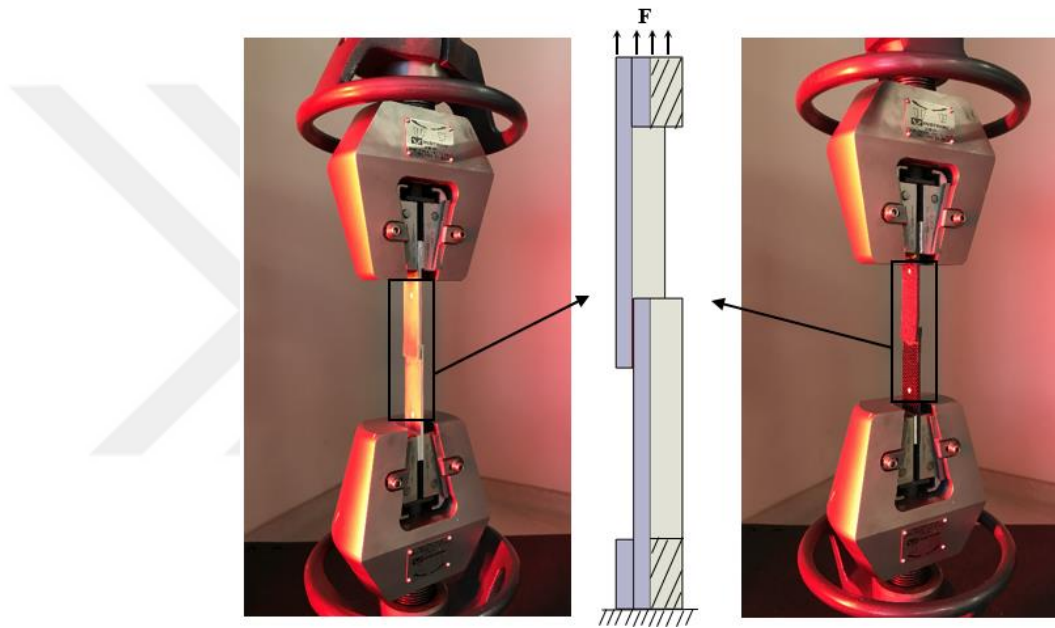
Tablo 3.4. Çeki ve dört nokta eğme için geçerli olan deneysel parametreler.

Tip	Yapıştırılan Malzeme	Nanopartikül	Statik Test Öncesi Uygulanan Tam Değişken Yük Oranı (10 ⁶ çevrim)
Al	Alüminyum	-----	-----
Al-400	Alüminyum	-----	±400
Al-800	Alüminyum	-----	±800
Al-1200	Alüminyum	-----	±1200
Al-G	Alüminyum	Pure Grafen	-----
Al-G-400	Alüminyum	Pure Grafen	±400
Al-G-400	Alüminyum	Pure Grafen	±800
Al-G-400	Alüminyum	Pure Grafen	±1200
Al-C	Alüminyum	Karbon nanotüp-COOH	-----
Al-C-400	Alüminyum	Karbon nanotüp-COOH	±400
Al-C-400	Alüminyum	Karbon nanotüp-COOH	±800
Al-C-400	Alüminyum	Karbon nanotüp-COOH	±1200
Al-F	Alüminyum	Fulleren	-----
Al-F-400	Alüminyum	Fulleren	±400
Al-F-400	Alüminyum	Fulleren	±800
Al-F-400	Alüminyum	Fulleren	±1200
Co	Kompozit	-----	-----
Co-400	Kompozit	-----	±400
Co-800	Kompozit	-----	±800
Co-1200	Kompozit	-----	±1200
Co-G	Kompozit	Pure Grafen	-----
Co-G-400	Kompozit	Pure Grafen	±400
Co-G-400	Kompozit	Pure Grafen	±800
Co-G-400	Kompozit	Pure Grafen	±1200
Co-C	Kompozit	Karbon nanotüp-COOH	-----
Co-C-400	Kompozit	Karbon nanotüp-COOH	±400
Co-C-400	Kompozit	Karbon nanotüp-COOH	±800
Co-C-400	Kompozit	Karbon nanotüp-COOH	±1200
Co-F	Kompozit	Fulleren	-----
Co-F-400	Kompozit	Fulleren	±400
Co-F-400	Kompozit	Fulleren	±800
Co-F-400	Kompozit	Fulleren	±1200

3.4. Bağlantı Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

3.4.1 Çeki hasar yüklerinin belirlenmesi

Çekme deneylerin (ASTM D1002) tümü bilgisayar kontrollü 100 kN yük hücresine sahip Instron-5982 (USA) üniversal çekme cihazında 19°C ve %30 nem oranında 1 mm/dak.'lık çeki hızında yapılmıştır. Sınır şartları ve numunelere uygulanan yükleme Şekil 3.5'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.5. Çekme yükü sınır şartları ve uygulanması.

Hesaplamalarda kullanılmak üzere test öncesi her numunenin bindirme uzunluğu ve yapıştırıcı tabaka kalınlığı ölçülerek kaydedilmiştir. Deneyler esnasında yer değiştirmeler video ekstansometre ile elde edilmiş olup, hasar sonrası hasar bölgesi incelenmiştir. Aynı zamanda, numunelerin taşıyabildikleri maksimum yük kaydedilmiştir.

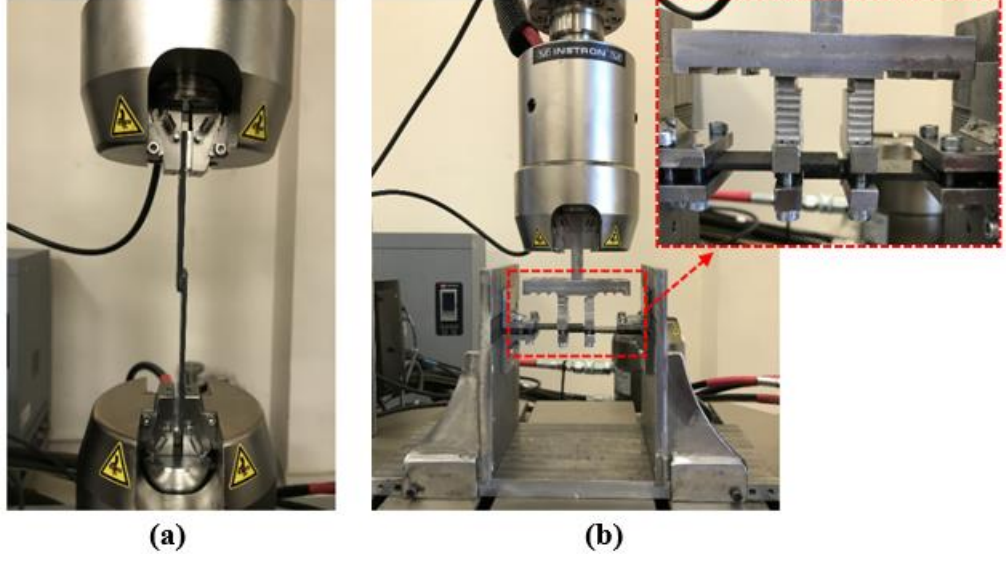
3.4.2 Dört nokta eğme hasar yüklerinin belirlenmesi

Dört nokta eğme deneylerin tümü bilgisayar kontrollü Instron 8844-25kN (ABD) üniversal statik/dinamik test cihazında 19°C ve %30 nem oranında 5 mm/dak.'lık eğme hızında yapılmıştır. Statik ve tam değişken dört nokta eğme yükünü uygulayabilmek için

Hesaplamalarda kullanılmak üzere test öncesi her numunenin bindirme uzunluğu ve yapıştırıcı tabaka kalınlığı ölçülerek kaydedilmiştir. Deneyler yapılırken her numune yakından gözlemlenmiş ve hasar sonrası hasar bölgesi incelenmiştir. Aynı zamanda, numunelerin taşıyabildikleri maksimum yük kaydedilmiştir.

3.4.3 Çeki ve dört nokta eğme yorulma yüklerinin uygulanması

Tam değişken çeki ve dört nokta eğme yorulma testleri, 25kN ve 20Hz frekanslı bilgisayar kontrollü Instron 8874 (ABD) üniversal yorulma cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.8a ve b). Yorulma testi prosedürleri ASTM D3166 tarafından önerilmektedir ve bazı araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır (Mactabi vd. 2013; Khashaba vd. 2018; ASTM D3166-99 2012). Bundan dolayı, tüm yorulma testleri için sinüsoidal dalga formu kullanıldı ve sabit yük genliğinde 20 Hz frekans ve $R = -1$ yükleme oranı altında gerçekleştirildi. Statik çeki deneylerden elde edilen hasar yükleri göz önüne alınarak 400N, 800N ve 1200 N yük oranlarında ve statik dört nokta eğme deneylerinden elde edilen hasar yükleri göz önüne alınarak 200N, 300N, 400N ve 500N yük oranlarında sonsuz ömür olarak kabul edilen 106 çevrim tam değişken çeki ve dört nokta eğme yorulma yükü uygulanmıştır. Tam değişken 106 çevrim çeki yükü uygulanmış bu bağlantıların statik çeki ve dört nokta eğme hasar yükü elde edilerek, yorulmaya maruz kalan ve kalmayan bağlantıların hasar yükündeki değişim incelenmiştir. Ayrıca test sonrası ISO 10365 standardı göz önüne alınarak bağlantıların hasar yüzeyleri incelenmiştir.



Şekil 3.8. a) Tam değişken çeki yorulma yükü uygulaması, b) Tam değişken dört nokta eğme yorulma yükü uygulaması.

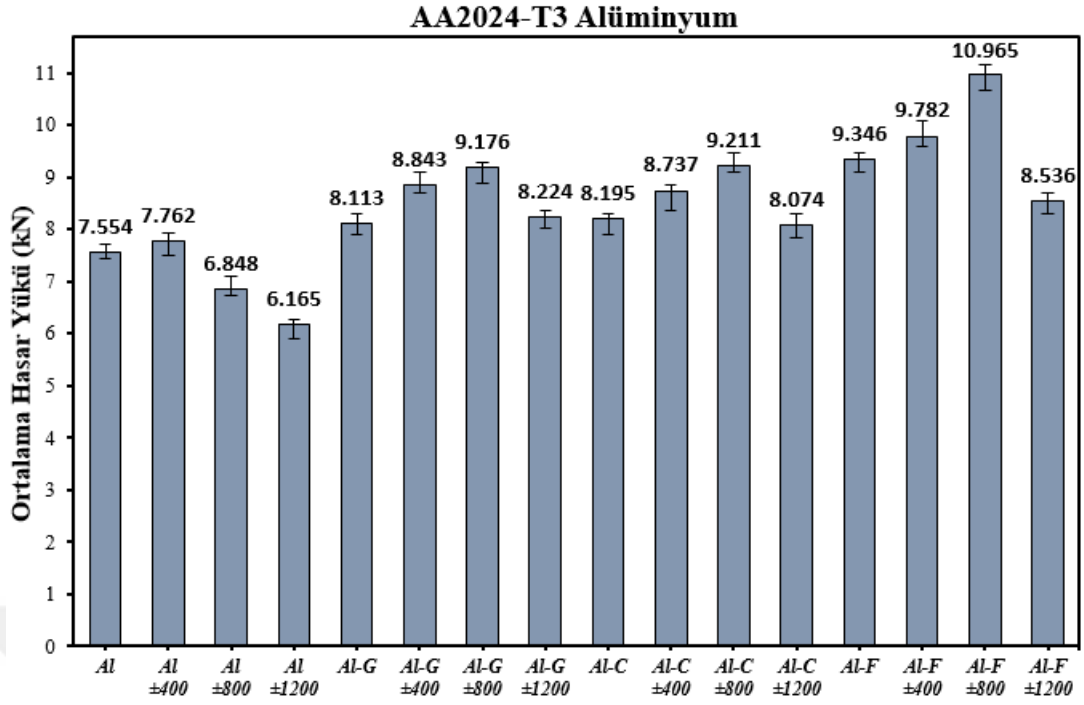
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde, tez çalışmasında kapsamında ele alınan nanoyapı katkılı yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli yapıştırma bağlantılarının statik ve yorulma sonrası statik bulgularından bahsedilmektedir. Araştırma bulguları ve tartışma kısmı iki ana başlık altında toplanmıştır.

DP460 yapısal yapıştırıcıya ağırlıkça %1 Pure Grafen, Karbon Nanotüp-COOH ve Fulleren nanopartiküller ilave edilerek elde edilen nano yapıştırıcılar ve katkısız yapıştırıcı ile birleştirilen tek tesirli bindirme bağlantıların statik çeki ve dört nokta eğme hasar yükleri elde edilmiştir. Ayrıca statik hasar yüklerinin belirli oranlarında 10^6 çevrim tam değişken çeki ve dört nokta eğme yorulma yüküne maruz bırakıldıktan sonra statik hasar yükleri elde edilmiştir. Bağlantı numunelerin her bir konfigürasyonundan üçer adet numune test edilerek ortalama maksimum hasar yükleri, kuvvet-yer değiştirme eğrileri ve hasar modelleri belirlenmiştir.

4.1. Çeki Yüküne Maruz Tek Tesirli Bindirme Bağlantı (Single-Lap Joint) Numunelerden Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

Yapıştırılan malzeme olarak AA2024-T3 alüminyum ve yapısal yapıştırıcı olarak ise DP460 kullanılarak elde edilen katkısız ve nanoyapı katkılı alüminyum tek tesirli bindirme bağlantı numunelerin her bir parametresi için üçer numune test edilmiş olup, bu üç numunenin ortalaması alınarak bağlantının hasar yükü elde edilmiştir (Şekil 4.1). Ortalama çeki hasar yükleri göz önüne alındığında, yapıştırıcıya %1 oranında grafen ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 7, karbon nanotüp-COOH ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 8 ve fulleren ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 24 artırdığı Şekil 13' den açıkça görülmektedir.



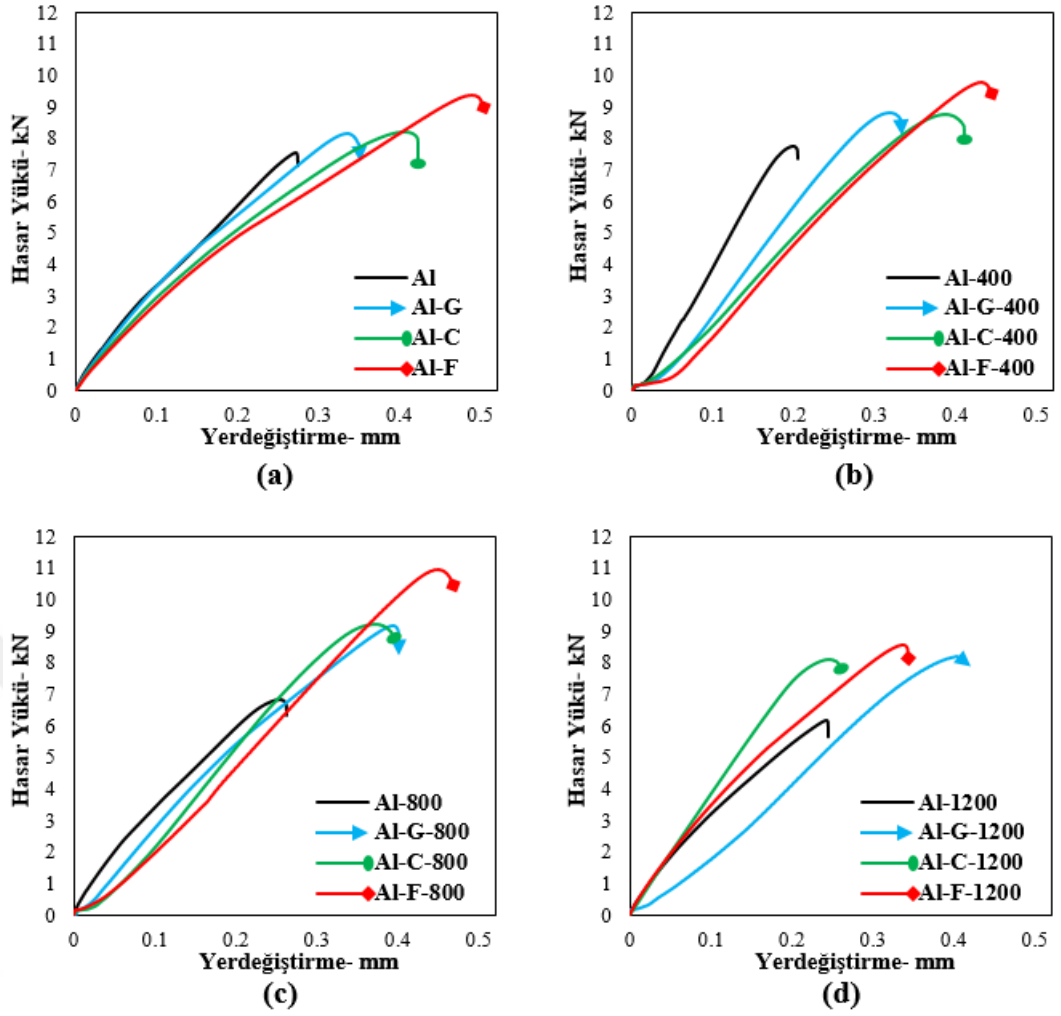
Şekil 4.1. Statik ve tam değişken çeki yorulma yüküne maruz alüminyum tek tesirli bindirme bağlantılardan elde edilen ortalama hasar yükleri.

Nanoyapı katkısız bağlantının statik çeki deneylerden elde edilen hasar yükünün yaklaşık %5 oranında (± 400 N) 10^6 çevrim tam değişken çeki yüküne maruz kalan bağlantının statik çeki hasar yükünde yaklaşık % 3 artış olurken, hasar yükünün yaklaşık %10 oranında (± 800 N) tam değişken çeki yorulma yüküne maruz kalan bağlantının statik çeki hasar yükünde yaklaşık % 9 ve hasar yükünün yaklaşık %15 oranında (± 1200 N) tam değişken çeki yorulma yüküne maruz kalan bağlantının statik çeki hasar yükünde ise yaklaşık %18 azalma olmaktadır. Yorulma yüküne maruz kalan katkısız bağlantının hasar yükündeki minimum artışın nedeni, yorulmada uygulanan yük oranının düşük olması (400 N) bağlantıda yorulma kaynaklı kılcal çatlakların oluşması için gerekli gerilme şiddetine henüz ulaşamaması ve uygulanan 10^6 çevrimin yapıştırıcıda post kürleşmeye neden olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Ancak yorulmada uygulanan yük oranının artması (± 800 N ve ± 1200 N) bağlantıda yorulma kaynaklı kılcal çatlakların oluşması ve muhtemelen farklı bölgelerde oluşan kılcal çatlakların bağlantının statik çeki hasar yükünü azalttığı düşünülmektedir.

Nanoyapı katkılı bağlantıların statik hasar yüklerine göre, bağlantılar 10^6 çevrim ± 400 N ve ± 800 N tam değişken yorulma yüküne maruz kaldıktan sonra statik hasar yüklerinde artış olduğu görülmektedir. Bu artış grafen katkılı bağlantılarda yaklaşık %9

ve %13 (± 400 N ve ± 800 N), karbon nanotüp-COOH katkılı bağlantılarda yaklaşık %7 ve %12 (± 400 N ve ± 800 N) ve fulleren katkılı bağlantılarda ise yaklaşık %5 ve %17 (± 400 N ve ± 800 N) olmaktadır. Ancak grafen ve karbon nanotüp-COOH katkılı bağlantılar 106 çevrim ± 1200 N tam değişken yorulma yüküne maruz kaldıktan sonra statik hasar yüklerinde yaklaşık %1 gibi minimum bir artma veya azalma olduğu, fulleren katkılı bağlantılarda ise yaklaşık %9 azalma olduğu görülmektedir (Şekil 4.1). Nanoyapı katkısız ve katkılı alüminyum tek tesirli bindirme bağlantı numunelerinden elde edilen en önemli sonuçlardan birisi, yorulmada uygulanan yük oranı ± 400 N olduğunda katkısız bağlantıların statik hasar yüklerindeki artışın %3 olduğu, ancak nanoyapı katkılı bağlantılarda ise bu artış yaklaşık %5 ile %9 olmaktadır. Ayrıca uygulanan yük oranı ± 800 N olduğunda katkısız bağlantıların statik hasar yükleri %9 azalırken, nanoyapı katkılı bağlantıların statik hasar yüklerinde yaklaşık %12 ile %17 arasında artış olmaktadır. Bu durum bağlantının statik hasar yükünün %5,10 ve 15 oranında yorulma yüküne maruz kalmasında, nanoyapı katkısının bağlantının hasar yükündeki olumlu etkisini açıkça göstermektedir. Bu sonuçlara göre, yapıştırıcı içerisine katılan nano katkıların yapısal özellikleri bağ yapılarının yapıştırıcı-katkı arayüzey tutunmasına göre hem statik hem de yorulma mukavemetini etkilediği, yapıştırıcı ile daha kuvvetli bağ yapmış nano yapıların daha iyi mekanik özellikler gösterdiği tespit edilmiştir.

Alüminyum tek tesirli bindirme bağlantısının statik çeki ve tam değişken yorulma sonrası statik çeki kuvvet-yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir (Şekil 4.2). Şekil 4.2’de nanoyapı katkılı ve katkısız bağlantı tipleri için verilen statik çeki kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, yapıştırıcıya grafen, karbon nanotüp-COOH ve fulleren ilave edilmesi bağlantıların hem yük taşıma kapasitesini hem de yer değiştirme kapasitesini önemli derecede artırmaktadır. Ayrıca kuvvet-yer değiştirme eğrisi altında kalan alan bağlantının absorbe ettiği enerjiyi verdiği göz önüne alındığında, nanoyapı katkısız bağlantıya göre nanoyapı katkılı bağlantı tiplerinin absorbe ettiği enerji önemli derecede artmaktadır.



Şekil 4.2. Alüminyum tek tesirli bindirme bağlantılardan elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri, a) Statik, b) ± 400 N tam değişken, c) ± 800 N tam değişken, d) ± 1200 N tam değişken.

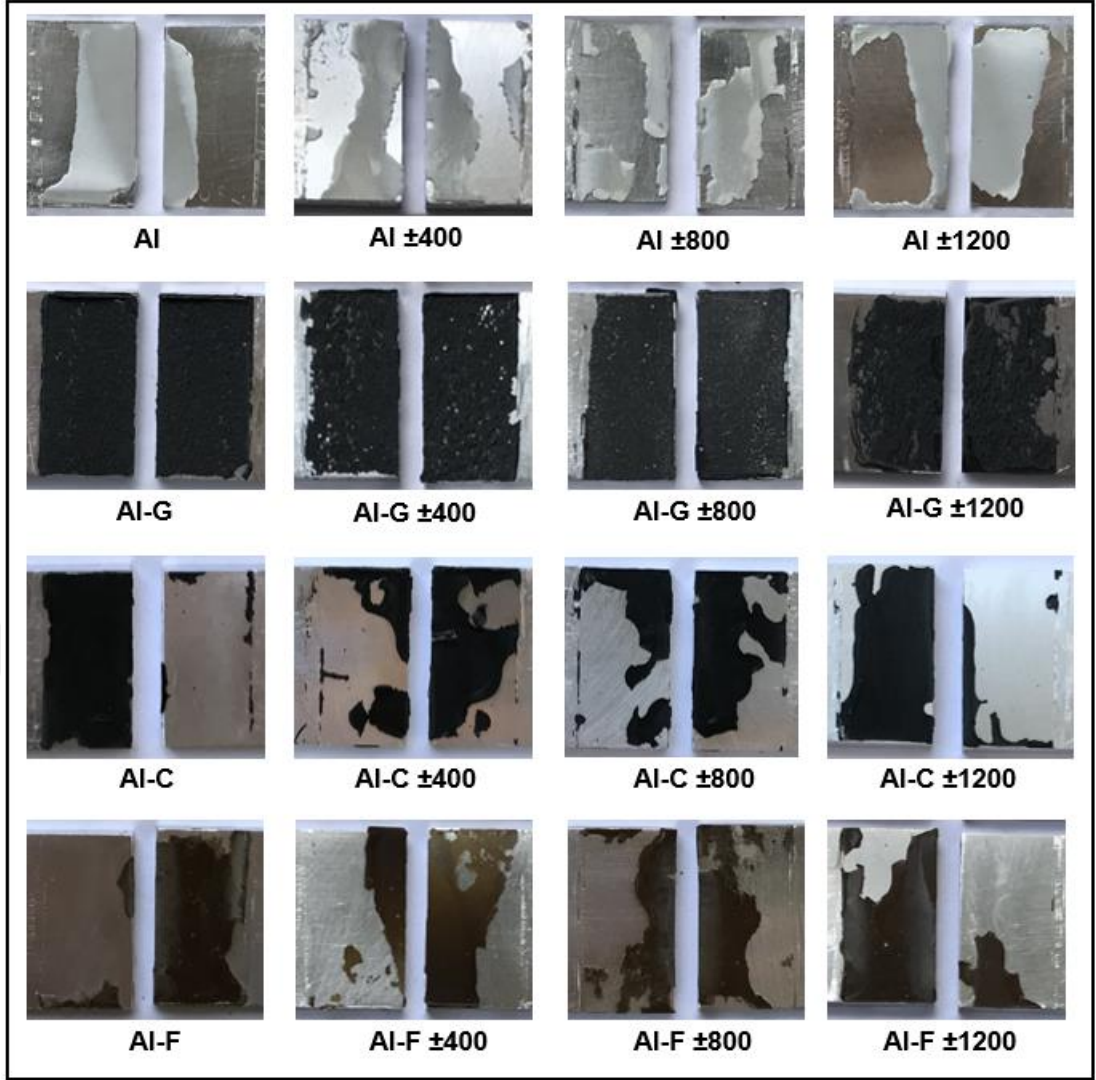
Nanoyapı katkılı ve katkısız alüminyum tek tesirli bindirme bağlantılar tam değişken yorulma yüküne maruz kaldığında, yer değiştirme kapasitesi azalmaktadır. Ancak bu azalma nanoyapı katkılı bağlantılara göre katkısız bağlantılarda daha fazla olmaktadır (Şekil 4.2 a,b,c ve d). Şekil 4.2’de verilen grafikler bağlantıların absorbe ettiği enerji bakımından incelenirse, hem statik çeki yükünde hem de tam değişken yorulma sonrası statik çeki yükünde en iyi sonucun fulleren katkılı bağlantılardan elde edildiği görülmektedir. ± 800 N tam değişken çeki yorulma yüküne maruz kalan nanoyapı katkısız bağlantı (Al-800) ile fulleren katkılı bağlantı (Al-F-800) karşılaştırıldığında, katkısız bağlantıya göre fulleren katkılı bağlantının mukavemeti yaklaşık %60 artarken absorbe ettiği enerji ise yaklaşık %198 artmıştır (Şekil 4.2c). Bu durum fulleren’in bağ yapısının katkılama ile yapıştırıcı matrikste hem tokluğu hem de şekil değiştirme yeteneğini iyileştirdiği görülmektedir.

Farklı yükleme şartlarında yapıştırma bağlantılarının veya yapıştırıcının mekanik özelliklerinin tamamıyla anlaşılabilmesi için, hasar tiplerinin bilinmesi gerekir. Yapıştırılan malzemenin metal olması durumunda oluşan hasar tipleri ISO 10365 standardında tanımlanmıştır (Şekil 1.3)

Şekil 4.3’da verilen alüminyum tek tesirli bindirme bağlantıların hasar yüzeyleri incelenirse, statik ve tam değişken yorulma yüküne maruz nanoyapı katkısız bağlantıların tümünde adhezyon hasar oluşmaktadır. Ancak bu hasar yüzeylerinden elde edilen en önemli sonuç, eksantrik yüklemeye dolayı statik çeki yüküne maruz bağlantılarda (Al) yapıştırıcı tabakası bindirme bölgesinin her iki ucunda kalırken, tam değişken yorulma yüküne maruz bağlantılarda (Al ± 400 N, Al ± 800 N) ise yapıştırıcı tabakası bindirme bölgesinin tamamına dağılmıştır. Bu durum yorulma kaynaklı yapıştırıcıda oluşan post kürleşmenin bir sonucu olduğu söylenebilir.

Alüminyum tek tesirli bindirme bağlantılarda yapıştırıcıya grafen ilave edilmesi (Al-G, Al-G ± 400 , Al-G ± 800 , Al-G ± 1200) bağlantılarda oluşan adhezyon hasarı kohezyon hasara dönüştürmektedir. Grafen yapısında bulunan sarkan bağlar (dangling bonds) sistem yük altında iken, düşük kayma gerilmelerine sebep olarak grafen lamelleri arasında kaymanın oluşmasına ve hasarın kohezyon hasarına dönüşmesine sebep olmuştur. Ayrıca grafen katkılı bağlantıların hasar yüzeyleri detaylı incelendiğinde, tam değişken yorulma yükü artırıldığında yüzeyde oluşan yorulma izlerinin daha belirgin olduğu görülmektedir (Şekil 4.3).

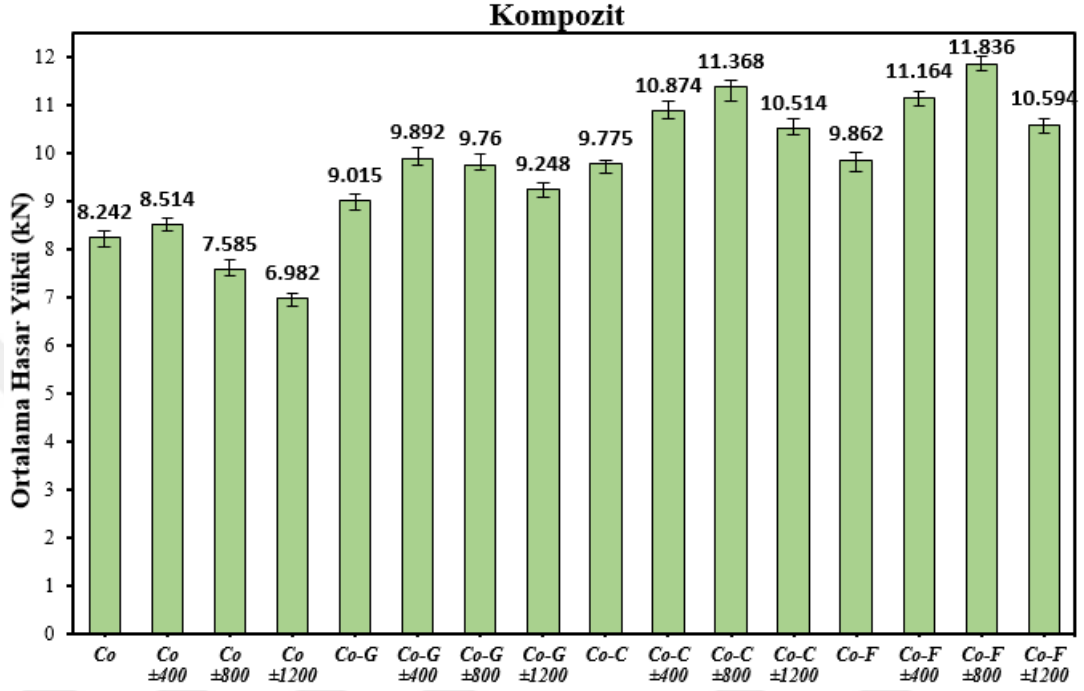
Karbon nanotüp-COOH ve fulleren katkılı bağlantıların tümünde adhezyon hasar oluşmaktadır. Statik çeki yüküne maruz bağlantılarda (Al-C ve Al-F) yapıştırıcı tabakası bindirme bölgesinin her iki ucunda kalırken, tam değişken yorulma yüküne maruz bağlantılarda (Al-C ± 400 , Al-C ± 800 , Al-F ± 400 ve Al-F ± 800) ise yapıştırıcı tabakası bindirme bölgesinin tamamına dağılmıştır. Bu durum bağlantının hasar yükünde artışa neden olmaktadır. Ancak tam değişken yorulma yükü ± 1200 N olduğunda (Al-C ± 1200 ve Al-F ± 1200) yapıştırıcı tabakası tekrar bindirme bölgesinin her iki ucunda kalmaktadır (Şekil 4.3). Bağlantıların hasar yüzeylerinden elde edilen sonuçlar ile bağlantıların hasar yükleri karşılaştırıldığında, sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 4.3. Statik ve tam değişken çeki yorulma yüküne maruz alüminyum tek tesirli bindirme bağlantıların hasar yüzeyleri.

Yapıştırılan malzeme olarak [0/90]₆ istifleme açısına sahip karbon fiber kumaş takviyeli kompozit ve yapısal yapıştırıcı olarak ise DP460 kullanılarak elde edilen katkısız ve nanoyapı katkılı kompozit tek tesirli bindirme bağlantı numunelerin her bir parametresi için üçer numune test ortalaması alınarak bağlantının hasar yükü elde edilmiştir (Şekil 4.4). Şekil 4.4’de verilen ortalama statik çeki hasar yükleri göz önüne alındığında, yapıştırıcıya %1 oranında grafen ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 9, karbon nanotüp-COOH ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 19 ve fulleren ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 20 artırmaktadır. Nanoyapı katkısız kompozit bağlantılar 106 çevrim ± 400 N, ± 800 N ve ± 1200 N tam değişken yorulma yüküne maruz kaldığında, kompozit bağlantıların hasar yüklerindeki değişim alüminyum bağlantıların da oluşan değişim ile benzerdir (Şekil 4.1 ve 4.4). Şöyle

ki statik çeki yüküne maruz bağlantıların hasar yüküne göre, ± 400 N yorulma yüküne yüküne maruz kalan bağlantının statik çeki hasar yükü %3 artmış olup, ± 800 N ve ± 1200 N yorulma yüküne maruz kalan bağlantıların hasar yükü ise sırasıyla % 8 ve %15 azalmıştır.



Şekil 4.4. Statik ve tam değişken çeki yorulma yüküne maruz kompozit tek tesirli bindirme bağlantılardan elde edilen ortalama hasar yükleri.

Ancak kompozit tek tesirli bindirme bağlantılarında yapıştırıcıya ağırlıkça %1 grafen, karbon nanotüp-COOH ve fulleren ilave edilmesi sonucu olarak, ± 400 N, ± 800 N ve ± 1200 N tam değişken yorulma yüküne maruz kalan bağlantıların statik hasar yükünde azlamanın aksine artış olmaktadır. Bu artış, grafen, karbon nanotüp-COOH ve fulleren katkılı bağlantılar ± 400 N yorulma yükü sonrası hasar yüklerindeki artış oranı sırasıyla %10, %11 ve %13, ± 800 N yorulma yükü sonrası hasar yüklerindeki artış oranı sırasıyla %8, %16 ve %20 ve ± 1200 N yorulma yükü sonrası hasar yüklerindeki artış oranı sırasıyla %3, %8 ve %7 olmaktadır.

Nanoyapı katkısız kompozit bağlantılar ± 400 N yorulma yükü sonrası hasar yükündeki artışın nedeni çevrim sonucu oluşan sıcaklığın yapıştırıcıda post kürleşme sebep olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak yorulma yükü artığında (± 800 N ve ± 1200 N) yapıştırıcıda birçok noktada mikro çatlakların oluşmasına neden olacak gerilme

şiddetine ulaşılması bağlantının hasar yükünü azaltmaktadır. Ancak tam değişken yorulma yüküne maruz nanoyapı katkılı kompozit bağlantıların hasar yüklerindeki artış ise, hem yapıştırıcıda oluşan post kürleşme hem de yapıştırıcı ile nanoyapıların sıkı bir bağ oluşturmamasından kaynaklandığı söylenebilir. Bu durumun yapının hem çatlak başlangıcının gecikmesinden hem de nano yapıların çatlak ilerlemesini geciktirici (crack retardation) etki yapmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

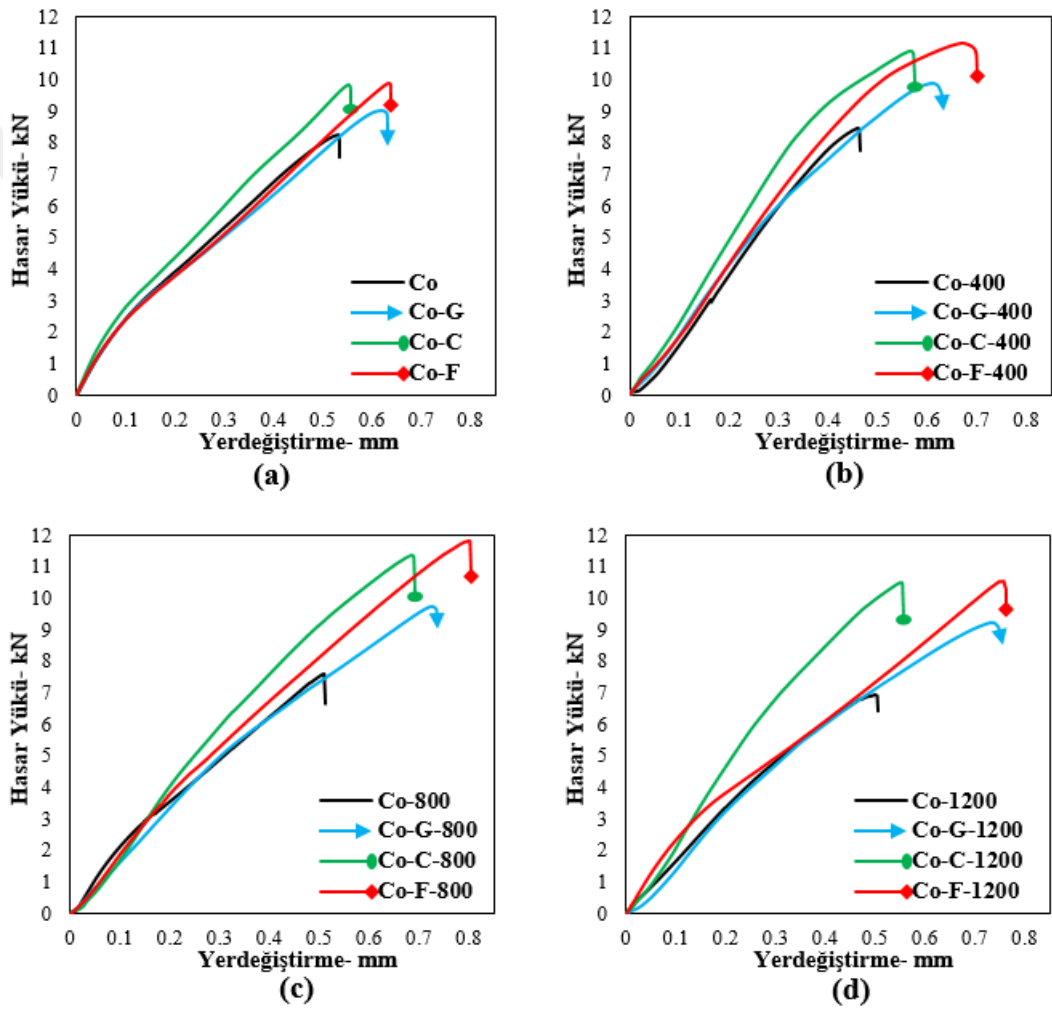
Diğer taraftan yapıştırılan malzemenin alüminyum veya kompozit olması bağlantının hasar yüklerini etkilemektedir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.4’de verilen hasar yükleri birlikte incelendiğinde, nanoyapı katkısız kompozit bağlantı alüminyum bağlantıya göre yaklaşık %9 daha fazla yük taşıdığı görülmektedir. Hasar yüklerindeki bu artış grafen katkılı bağlantılarda yaklaşık %11, karbon nanotüp-COOH katkılı bağlantılarda yaklaşık %19 ve fulleren katkılı bağlantılarda ise yaklaşık %5 olmaktadır. Çeki yüküne maruz tek tesirli bindirme bağlantılarında eksantrik yüklemeye dolayı bindirme bölgesinde eğilme momenti oluşur ve bu eğilme momenti bindirme bölgesinin her iki ucunda çatlak oluşmasıyla hasar oluşur. Bu durum göz önüne alındığında, yapıştırılan alüminyum plaklara göre kompozit plakların daha esnek olması bindirme bölgesinde oluşan momenti sönmeye kapasitesini artırmaktadır. Buda bağlantının maksimum mukavemetine olumlu etki yapmaktadır.

Şekil 4.5’de verilen nanoyapı katkılı ve katkısız kompozit tek tesirli bindirme bağlantı tipleri için verilen statik çeki kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, yapıştırıcıya grafen ve fulleren ilave edilmesi bağlantıların hem yük taşıma kapasitesini hem de yer değiştirme kapasitesini önemli derecede artırmaktadır. Ancak karbon nanotüp-COOH katkılı bağlantılarda ise yük taşıma kapasitesi artarken yer değiştirme kapasitesinde aynı kalmaktadır.

Ayrıca Şekil 4.5’de verilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri bağlantının absorbe ettiği enerji bakımından analiz edilirse, ± 400 N, ± 800 N ve ± 1200 N tam değişken çeki yorulma yüküne maruz kalan nanoyapı katkısız bağlantı tiplerine göre nanoyapı katkılı bağlantı tiplerinin absorbe ettiği enerji önemli derecede artmaktadır. ± 400 N tam değişken çeki yorulma yüküne maruz kalan grafen, karbon nanotüp-COOH ve fulleren nanoyapı katkılı kompozit bağlantıların (Co-G-400, Co-C-400 ve Co-F-400) absorbe ettiği enerji

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

nanoyapı katkısız kompozit bağlantılara (Co-400) göre sırasıyla %55, %54 ve %91 daha fazla olmaktadır (Şekil 4.5b). Tam değişken çeki yorulma yükü ± 800 N olduğunda, grafen, karbon nanotüp-COOH ve fulleren nanoyapı katkılı kompozit bağlantıların (Co-G-800, Co-C-800 ve Co-F-800) absorbe ettiği enerji miktarlarındaki artış oranı sırasıyla yaklaşık %86, %106 ve %150 olmaktadır (Şekil 18c). Ayrıca tam değişken çeki yorulma yükü ± 1200 N olduğunda ise, grafen, karbon nanotüp-COOH ve fulleren nanoyapı katkılı kompozit bağlantıların (Co-G-1200, Co-C-1200 ve Co-F-1200) absorbe ettiği enerji miktarlarındaki artış oranı sırasıyla yaklaşık %97, %67 ve %131 olmaktadır (Şekil 4.5d).

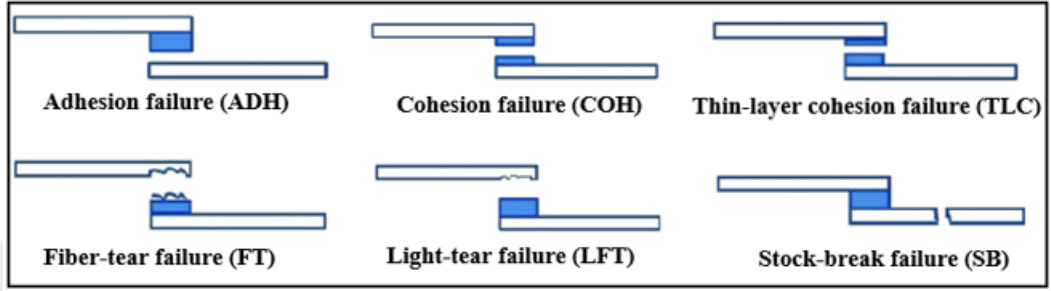


Şekil 4.5. Kompozit tek tesirli bindirme bağlantılardan elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri, a) Statik, b) ± 400 N tam değişken, c) ± 800 N tam değişken, d) ± 1200 N tam değişken.

Yapıştırılan malzemenin kompozit olan tek tesirli kompozit bindirme bağlantısının kayma testlerindeki hasar modlarını tanımlamak için, ASTM D5573

standardında belirtilen hasar modları dikkate alınmıştır. Bu standart tarafından önerilen ana hasar modları Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

Bir kompozit bağlantı numunesinin arıza modunu belirleyen faktör, kohezyon ve adhezyon direnci ile yapıştırılan malzeme direnci arasındaki farktır. Hasar ilk olarak en az direnç noktasında ortaya çıkmaktadır.



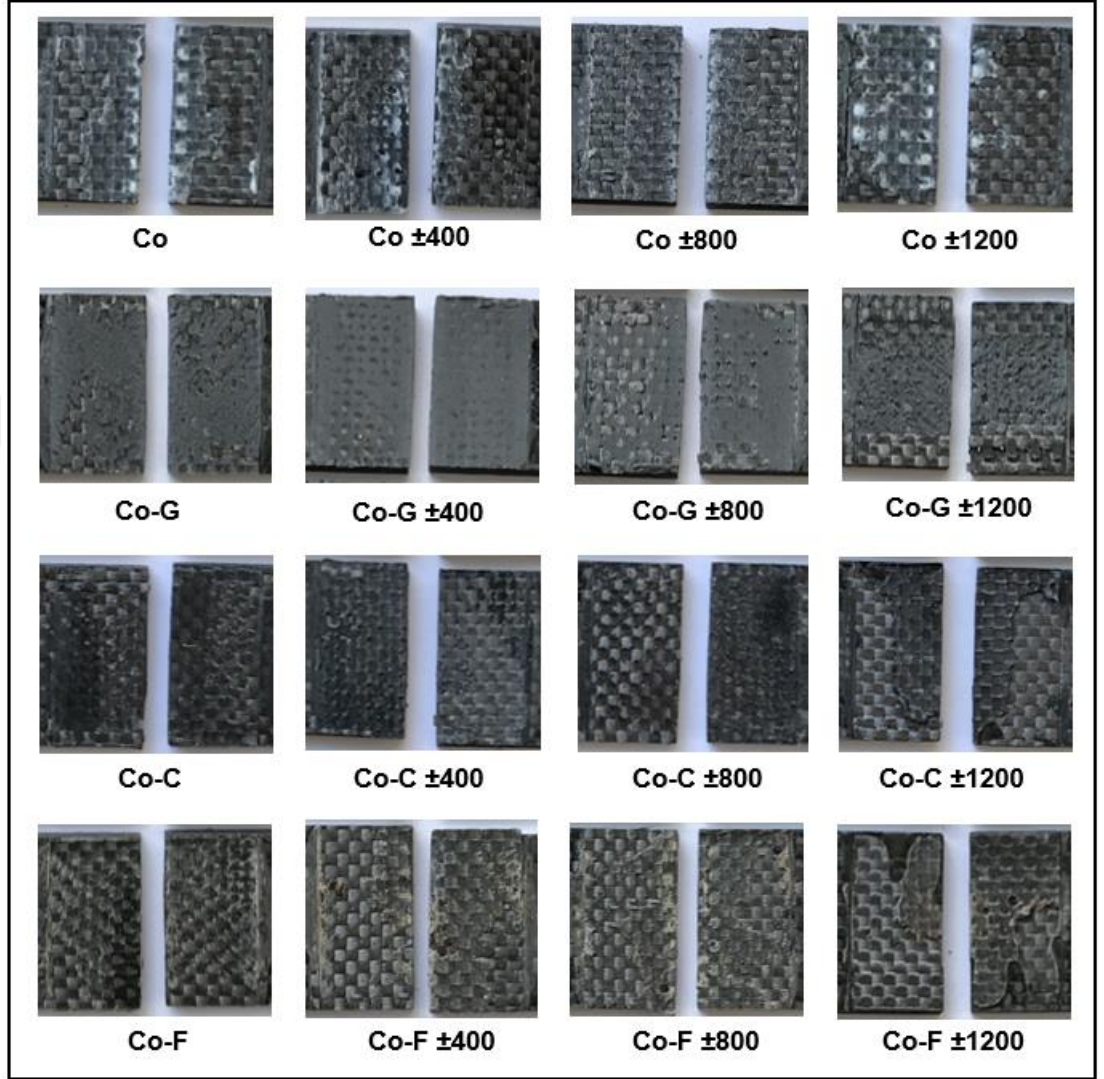
Şekil 4.6. ASTM D5573 standardında tanımlanan kompozit yapıştırma bağlantı hasar modları.

Şekil 4.7'de verilen tek tesirli kompozit bindirme bağlantılarının hasar yüzeyleri incelendiğinde, statik, ± 400 N ve ± 1200 N tam değişken yorulma yüküne maruz nanoyapı katkısız kompozit bağlantılarda (Co, Co ± 400 ve Co ± 1200) adhezyon hasar oluşurken, tam değişken yorulma yükü ± 800 N olduğunda (Co ± 800) hasar modu kohezyon hasara dönüşmektedir. Grafen katkılı kompozit tek tesirli bindirme bağlantılarının tümünde (Co-G, Co-G ± 400 , Co-G ± 800 ve Co-G ± 1200) kohezyon hasar oluşmaktadır. Ancak bu kohezyon hasar, ± 800 ve ± 1200 N tam değişken yorulma yüküne maruz bağlantılarda ince-tabaka kohezyon hasara dönüşmektedir (Şekil 4.7).

Statik, ± 400 N ve ± 800 N tam değişken yorulma yüküne maruz karbon nanotüp-COOH ve fulleren katkılı kompozit bağlantılarda (Co-C, Co-C ± 400 , Co-C ± 800 , Co-F, Co-F ± 400 ve Co-F ± 800) ince-tabaka kohezyon hasar (TLC) oluşurken, ± 1200 N tam değişken yorulma yüküne maruz kompozit bağlantılarda hafif yırtılma hasarı (LFT) oluşmaktadır (Şekil 4.7). Ayrıca kompozit bağlantılarının hasar yüzeylerinden elde edilen sonuçlar ile bu bağlantıların hasar yükleri karşılaştırıldığında, sonuçların birbiriyle oldukça uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Şekil 4.3’da verilen alüminyum bağlantılar ile Şekil 4.7’de verilen kompozit bağlantıların hasar yüzeyleri karşılaştırıldığında, kompozit bağlantılarda yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde daha iyi tutunma olduğu görülmektedir.

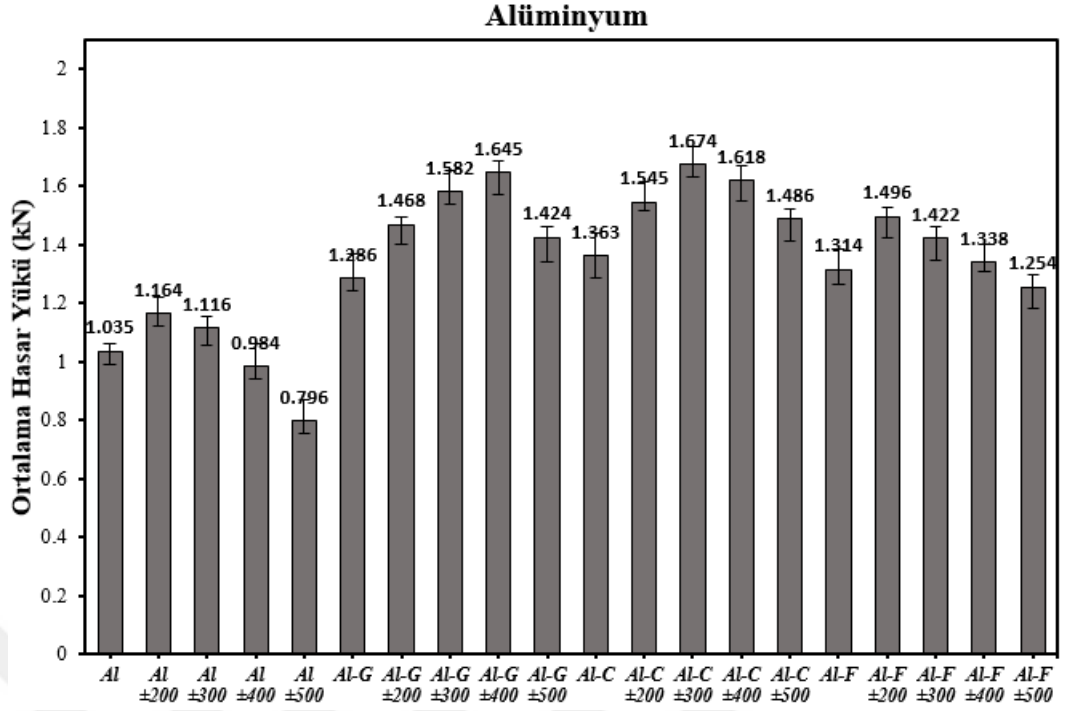


Şekil 4.7. Statik ve tam değişken çeki yorulma yüküne maruz kompozit tek tesirli bindirme bağlantılarının hasar yüzeyleri.

4.2. Dört nokta eğme yüküne maruz tek tesirli bindirme bağlantı (Single-Lap Joint) numunelerden elde edilen deneysel sonuçlar

Statik dört nokta eğme deneylerinden elde edilen hasar yükleri göz önüne alınarak 200N, 300N, 400N ve 500N yük oranlarında sonsuz ömür olarak kabul edilen 10^6 çevrim tam değişken dört nokta eğme yorulma yükü uygulanarak, yorulmaya maruz kalan ve kalmayan alüminyum tek tesirli bindirme bağlantılarının ortalama hasar yükleri elde edilmiştir.

Şekil 4.8’de verilen hasar yükleri incelendiğinde, statik dört nokta eğme yüküne maruz alüminyum bağlantının (Al) hasar yüküne göre, %1 grafen katkılı bağlantı (Al-G) yaklaşık %24, %1 karbon nanotüp-COOH katkılı bağlantı yaklaşık %32 ve %1 fulleren katkılı bağlantı ise yaklaşık %27 daha fazla yük taşımaktadır. Ayrıca nanoyapı katkısız alüminyum bağlantı (Al) ± 200 N ve ± 300 N tam değişken yorulma yüklerine maruz kalması bağlantıların hasar yüklerini yaklaşık % 9 ile %12 arasında artırırken, ± 400 N ve ± 500 N tam değişken yorulma yüklerine maruz kalması durumunda ise bağlantıların hasar yüklerini yaklaşık % 5 ile % 23 arasında azaltmaktadır. Tam değişken dört nokta eğme yorulma yüküne maruz kalan katkısız bağlantının hasar yükündeki bu artışın nedeni, yorulmada uygulanan 10^6 çevrimin sıcaklığa bağlı olarak yapıştırıcıda post kürleşmeye neden olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Ancak yorulmada uygulanan yük oranının artması ile (± 400 N ve ± 500 N) bağlantıda yorulma kaynaklı kılcal çatlakların oluşması bağlantının statik çeki hasar yükünün azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.8. Statik ve tam değişken dört nokta eğme yorulma yüküne maruz alüminyum tek tesirli bindirme bağlantılardan elde edilen ortalama hasar yükleri.

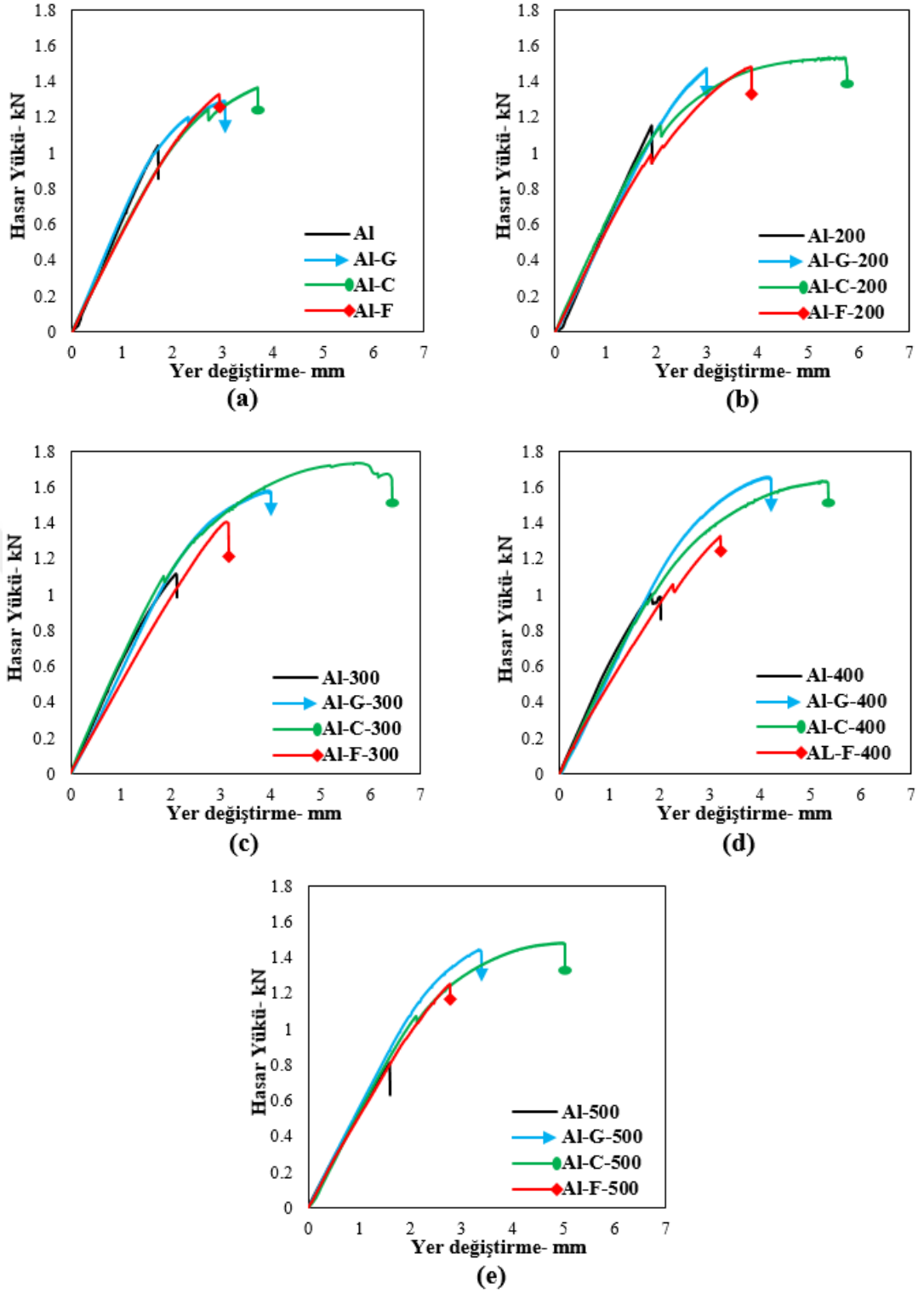
Ayrıca Şekil 4.8’de verilen nanoyapı katkılı statik ve tam değişken dört nokta eğme yükü sonrası elde edilen hasar yükleri incelendiğinde, bağlantıların statik hasar yüklerine göre ± 200 N, ± 300 N ve ± 400 N tam değişken yorulma yükü sonrası bağlantıların statik hasar yükleri artmaktadır. Bu artış grafen katkılı bağlantılarda yaklaşık % 14 ile % 28 arasında, karbon nanotüp-COOH katkılı bağlantılarda yaklaşık % 13 ile % 23 arasında ve fulleren katkılı bağlantılarda ise yaklaşık % 2 ile % 14 arasında olmaktadır. Tam değişken yorulma yükü ± 500 N olduğunda grafen katkılı bağlantılarda yaklaşık % 11 ve karbon nanotüp-COOH katkılı bağlantılarda ise yaklaşık % 9 artış olurken, fulleren katkılı bağlantılarda ise yaklaşık % 5 azalma olmaktadır.

Diğer taraftan Şekil 4.8’de verilen hasar yükleri üç bağlantı numunesinin ortalaması alınarak elde edildiği göz önünde tutularak standart sapmalar incelendiğinde, standart sapmaların yaklaşık %1 ile %2 arasında olduğu ve bu durum yapıştırıcı içerisine nanoyapının homojen dağıldığının bir göstergesidir.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar havacılık alanında kullanıldığından dolayı bu bağlantılar sıklıkla dinamik (yorulma) yüklemeye maruz kalmaktadır. Statik eğme yükünün belirli oranlarında dinamik yüklemeye maruz kalan bu bağlantılarda yapıştırıcı

içerisine kimyasal özeliğine göre nanoyapı ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü yaklaşık %70'e kadar artırmaktadır. Günümüzde hemen hemen tüm alanlarda mukavemeti iyi ve daha hafif malzemelerin (kompozit, alüminyum alaşımı) kullanılması ve bu malzemelerin birleştirilmesinde ise yapıştırıcı kullanılmasından dolayı bu sonuç oldukça önemlidir.

Şekil 4.9'da nanoyapı katkılı ve katkısız alüminyum bağlantı tipleri için verilen statik, ± 200 , ± 300 N, ± 400 ve ± 500 N tam değişken yorulma yükü sonrası bağlantıların statik dört nokta eğme kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, yapıştırıcıya grafen, karbon nanotüp-COOH ve fulleren ilave edilmesi bağlantıların hem yük taşıma kapasitesini hem de yer değiştirme kapasitesini önemli derecede artırmaktadır. Ayrıca kuvvet-yer değiştirme eğrisi altında kalan alan bağlantının absorbe ettiği enerjiyi verdiği göz önüne alındığında, nanoyapı katkısız bağlantıya göre nanoyapı katkılı bağlantı tiplerinin absorbe ettiği enerji önemli derecede artmaktadır. Bu durum nano katkılı bağlantılarda yük dağılımını homojen yaparak gerilme yığılmalarını engellediği ve böylece daha tok bir bağlantı elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4.9. Dört nokta eğme yüküne maruz alüminyum tek tesirli bindirme bağlantılardan elde edilen kuvvet-yerdeğitirme eğrileri, a) Statik, b) ± 200 N tam değişken, c) ± 300 N tam değişken, d) ± 400 N tam değişken, e) ± 500 N tam değişken.

Nanoyapı katkısız bağlantılara göre grafen, karbon nanotüp-COOH ve fulleren nanoyapı katkılı bağlantı tiplerinin absorbe ettiği enerji miktarlarındaki artış, statik dört nokta eğme yüküne maruz bağlantılarda yaklaşık % 113 ile % 185 arasında (Şekil 4.8a),

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

± 200 N tam değişken dört nokta eğme yüküne maruz bağlantılarda yaklaşık % 97 ile % 296 arasında (Şekil 4.8b), ± 300 N tam değişken dört nokta eğme yüküne maruz bağlantılarda yaklaşık % 90 ile % 355 arasında (Şekil 4.8c), ± 400 N tam değişken dört nokta eğme yüküne maruz bağlantılarda yaklaşık % 117 ile % 337 arasında (Şekil 4.8d) ve ± 500 N tam değişken dört nokta eğme yüküne maruz bağlantılarda yaklaşık % 169 ile % 484 arasında (Şekil 4.8e) olmaktadır.

ISO 10365' de tanımlanan hasar modelleri göz önüne alınarak Şekil 4.9' de verilen alüminyum tek tesirli bindirme bağlantıların hasar yüzeyleri incelendiğinde, ± 300 , ± 400 ve ± 500 N tam değişken dört nokta eğme yüküne maruz grafen katkılı bağlantılar (Al-G ± 300 , Al-G ± 400 ve Al-G ± 500) hariç, statik ve tam değişken dört nokta eğme yorulma yüküne maruz nanoyapı katkılı ve katkısız bağlantıların tümünde adhezyon hasar oluşturuğu görülmektedir. Al-G ± 300 , Al-G ± 400 ve Al-G ± 500 bağlantı tiplerinde ise, kohezyon hasar oluşturmaktadır.



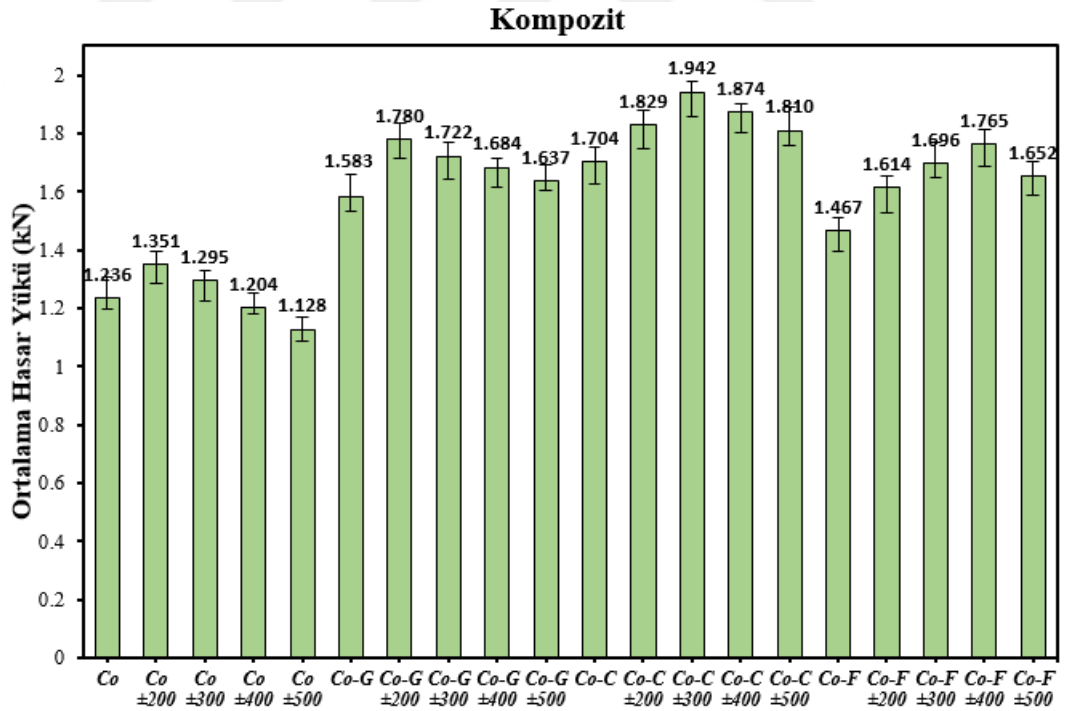
Şekil 4.10. Statik ve tam değişken dört nokta eğme yorulma yüküne maruz alüminyum tek tesirli bindirme bağlantıların hasar yüzeyleri.

Statik eğme yüküne maruz grafen nanoyapı katkılı alüminyum tek tesirli bindirme bağlantılarda adhezyon hasar oluşurken, bağlantılara uygulanan tam değişken yorulma yük oranı artıktça hasar modu adhezyon hasardan kohezyon hasara dönüşmektedir. Ayrıca grafen katkılı bağlantıların hasar yüzeyleri detaylı incelendiğinde, tam değişken yorulma yükü artırıldığında yüzeyde oluşan yorulma izlerinin daha belirgin olduğu görülmektedir (Şekil 4.10).

Fulleren nanoyapı katkılı bağlantıların hasar yüzeyleri incelendiğinde, statik, ± 400 ve ± 500 N yorulma yüküne maruz bağlantılara (Al-F, Al-F ± 400 ve Al-F ± 500) göre ± 200 ve ± 300 N yorulma yüküne maruz bağlantılarda (Al-F ± 200 ve Al-F ± 300) yapıştırıcı yüzeye tutunma kabiliyetinin daha iyi olduğu görülmektedir. Hasar yüzeylerindeki bu durum ile Şekil 4.7' de verilen hasar yükleri birlikte incelendiğinde, bağlantıların hasar yüzeyleri ile hasar yükleri bir biriyle uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

Yapıştırılan malzeme karbon elyaf takviyeli kompozit olan nanoyapı katkılı ve katkısız bağlantıların statik ve tam değişken yorulma sonrası statik dört nokta eğme Şekil 4.11' de verilmiştir. Şekil 4.11' de verilen bu hasar yükleri incelendiğinde, nanoyapı katkısız bağlantılar statik hasar yükünün yaklaşık %17 ve %25 isi kadar 10^6 çevrim tam değişken yorulma yüküne (± 200 ve ± 300 N) maruz kaldıktan sonra bağlantının statik hasar yükünde yaklaşık % 5 ile % 9 arasında artış olduğu görülmektedir. Fakat tam değişken yorulma yükü ± 400 ve ± 500 N olduğunda ise statik hasar yükünde yaklaşık % 3 ile % 9 arasında azalma olmaktadır. Bağlantıda oluşan bu artma ve azalmanın nedeni şu şekilde açıklanabilir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar yorulma yüküne maruz kaldıktan sonra statik hasar yüklerinde azalma olması beklenen bir sonuçtur. Çünkü yorulma yükü uygulaması esnasında tekrarlı yüklemelerin sebep olduğu lokal gerilme yığılmalarından kaynaklı malzemede mikro çatlaklar oluşmakta ve bu çatlaklar bağlantının statik hasar yükünü azaltmaktadır. Fakat bağlantıda kullanılan yapıştırıcı zamana ve sıcaklığa bağlı kürleşebilen bir yapıştırıcı olduğundan, yorulma yükü uygulanması esnasında yapıştırıcıda post kürleşme meydana gelmektedir. Bu post kürleşme bağlantının statik hasar yükünü artırmakta olup, yorulma yük oranı artırıldığında ise mikro çatlakların etkisiyle bağlantının statik hasar yükü düşmektedir.

Ayrıca Şekil 4.11’ de verilen nanoyapı katkılı kompozit bağlantıların hasar yükleri incelendiğinde, yapıştırıcıya %1 grafen, karbon nanotüp-COOH ve fulleren nano yapı ilave edilmesi, ± 200 , ± 300 N, ± 400 ve ± 500 N tam değişken yorulma sonrası statik hasar yüklerinde artışa neden olduğu görülmektedir. Bu artış oranları grafen katkılı bağlantılarda yaklaşık % 3 ile %12 arasında, karbon nanotüp-COOH katkılı bağlantılarda yaklaşık % 6 ile %14 arasında ve fulleren katkılı bağlantılarda ise yaklaşık % 13 ile % 20 arasında olmaktadır. Ancak burada dikkat edilmesi gereken bir nokta; nanoyapı katkısız bağlantılarda ± 200 , ± 300 , ± 400 ve ± 500 N tam değişken yorulma yükü bağlantının statik hasar yükünün yaklaşık %16, %25, %33 ve %40’ ına denk gelirken, grafen nanoyapı katkılı bağlantılarda statik hasar yükünün yaklaşık %13, %19, %25 ve %32’ isine, karbon nanotüp-COOH nanoyapı katkılı bağlantılarda statik hasar yükünün yaklaşık %12, %18, %23 ve %29’ una ve fulleren nanoyapı katkılı bağlantılarda statik hasar yükünün yaklaşık %14, %20, %27 ve %34’ üne denk gelmektedir. Bu durum göz önüne alınarak tam değişken yorulma yükü sonrası statik hasar yüklerindeki artış üzerine nanoyapı etkisi yaklaşık % 5 ile %15 arasında olmaktadır.



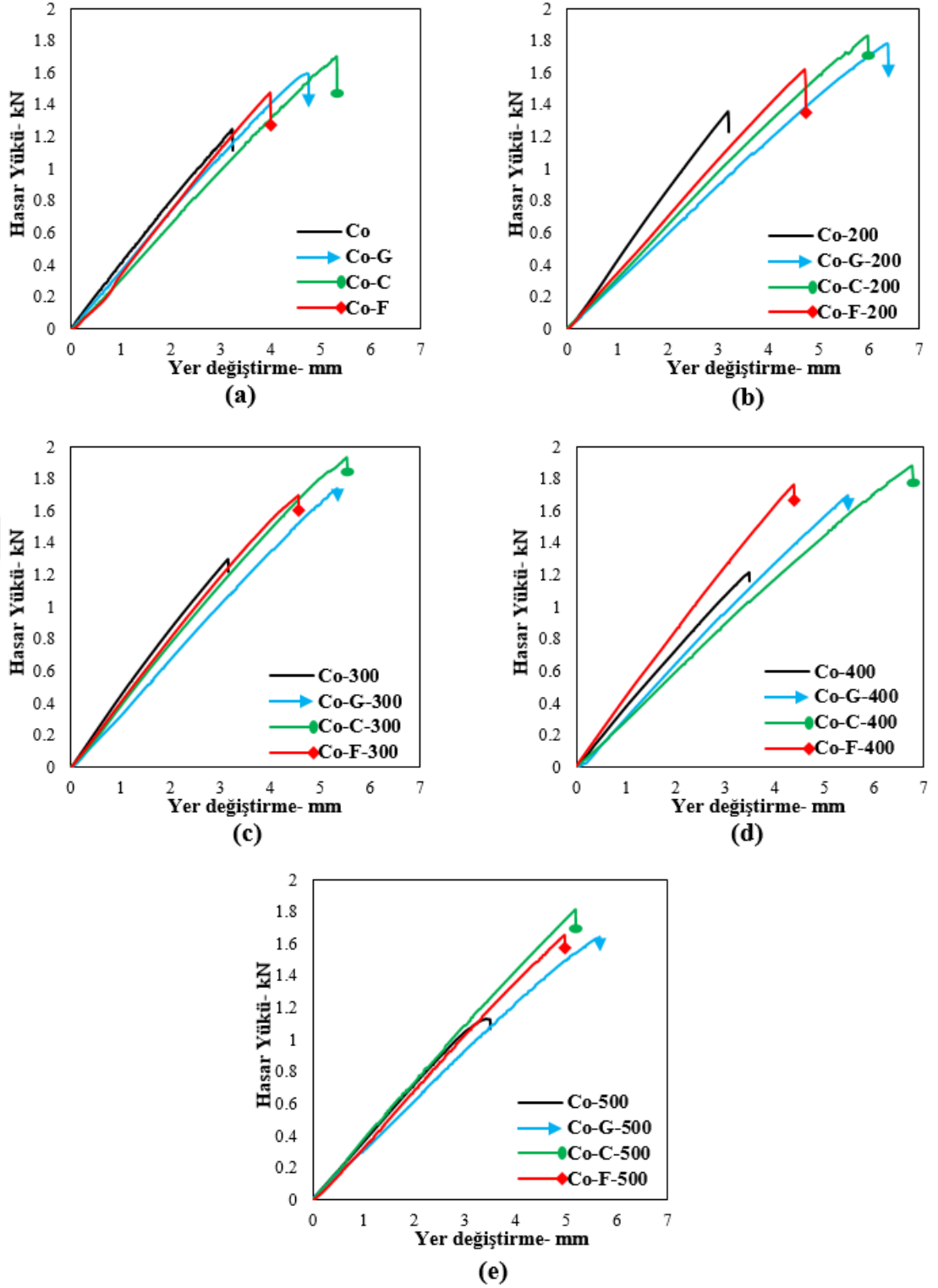
Şekil 4.11. Statik ve tam değişken dört nokta eğme yorulma yüküne maruz kompozit tek tesirli bindirme bağlantılardan elde edilen ortalama hasar yükleri.

Ayrıca nanoyapı katkılı ve katkısız bağlantıların hasar yüklerinden elde edilen en önemli sonuçlardan bir diğeri ise, nanoyapı katkısız bağlantı (Co) ± 500 N tam değişken

yorulma yüküne maruz kaldığında (Co \pm 500) bağlantının statik hasar yükü yaklaşık %9 azalırken, yapıştırıcıya %1 karbon nanotüp-COOH ilave edilmesi (Co-C \pm 500) bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 46 artırmaktadır (Şekil 4.11).

Şekil 4.12' de statik ve tam değişken dört nokta eğme yüküne maruz nanoyapı katkılı ve katkısız kompozit bağlantıların kuvvet-yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Bu kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, yapıştırıcıya nanoyapı ilave edilmesi bağlantının hem hasar yükünü hem de yer değiştirme kapasitesini artırmaktadır.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların kuvvet-yer değiştirme eğrisi altında kalan alan bağlantının absorbe ettiği enerjiyi verdiği göz önüne alındığında, statik dört nokta eğme yüküne maruz nanoyapı katkısız bağlantının absorbe ettiği enerjiye göre, grafen, karbon nanotüp-COOH ve fulleren nanoyapı katkılı bağlantı tiplerinin absorbe ettiği enerji sırasıyla yaklaşık % 88, %130 ve %47 artmaktadır (Şekil 4.12a).



Şekil 4.12. Dört nokta eğme yüküne maruz kompozit tek tesirli bindirme bağlantılardan elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrileri, a) Statik, b) ± 200 N tam değişken, c) ± 300 N tam değişken, d) ± 400 N tam değişken, e) ± 500 N tam değişken.

Ayrıca ± 200 N tam değişken dört nokta eğme yorulma yüküne maruz kalan grafen, karbon nanotüp-COOH ve fulleren nanoyapı katkılı kompozit bağlantıların (Co-

G-200, Co-C-200 ve Co-F-200) absorbe ettiği enerji nanoyapı katkısız kompozit bağlantılara (Co-200) göre sırasıyla %163, %154 ve %76 daha fazla olmaktadır (Şekil 4.12b). Tam değişken dört nokta eğme yorulma yükü ± 300 N olduğunda, grafen, karbon nanotüp-COOH ve fulleren nanoyapı katkılı kompozit bağlantıların (Co-G-300, Co-C-300 ve Co-F-300) absorbe ettiği enerji miktarlarındaki artış oranı sırasıyla yaklaşık %123, %163 ve %89 olurken, yorulma yükü ± 400 N olduğunda bağlantıların (Co-G-400, Co-C-400 ve Co-F-400) absorbe ettiği enerji miktarlarındaki artış oranı sırasıyla yaklaşık %120, %205 ve %86 olmaktadır (Şekil 4.12c ve d). Tam değişken dört nokta eğme yorulma yükü ± 500 N olduğunda ise, grafen, karbon nanotüp-COOH ve fulleren nanoyapı katkılı kompozit bağlantıların (Co-G-500, Co-C-500 ve Co-F-500) absorbe ettiği enerji miktarlarındaki artış oranı sırasıyla yaklaşık %133, %138 ve %110 olmaktadır (Şekil 4.12e).

Diğer taraftan yapıştırılan malzemenin alüminyum olduğu duruma göre (Şekil 4.8), yapıştırılan malzeme kompozit olduğunda (Şekil 4.11) bağlantının hem statik hem de yorulma sonrası statik hasar yüklerinde yaklaşık %15 ile %30 artış olmaktadır. Bu artışın nedeni, yapıştırılan kompozit plakların alüminyum plaklara göre daha esnek olması ve bu kompozit plakların dört nokta eğme yüküne maruz bağlantıların bindirme bölgesinde oluşan eğilme momentinin yapıştırıcı üzerinde etkisini azaltmaktadır. Bu durum bağlantının taşıyabileceği maksimum mukavemetini artırmaktadır.

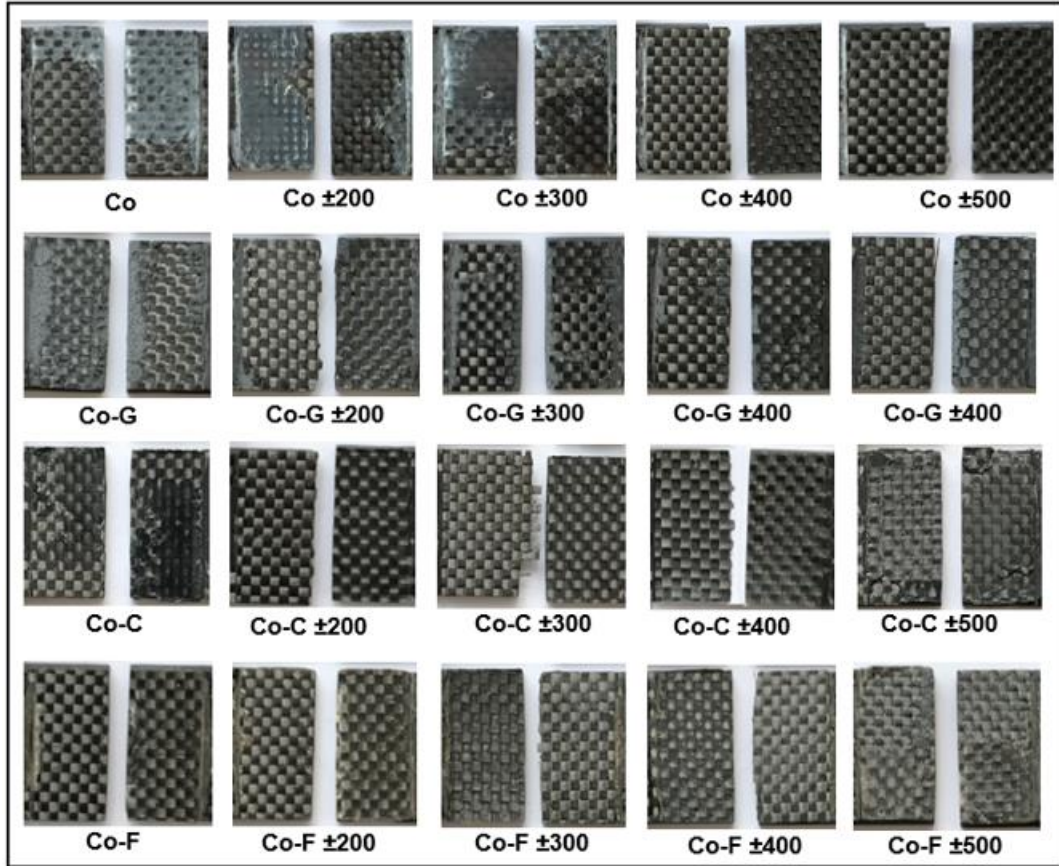
Şekil 4.13' de statik ve tam değişken dört nokta eğme kompozit bağlantıların hasar yüzeyleri verilmiştir. Bu hasar yüzeylerinde oluşan hasar modlarını tanımlamada ASTM D5573 standardında belirtilen hasar modları dikkate alınmıştır. ASTM D5573 standart tarafından önerilen ana hasar modları Şekil 4.6' da gösterilmiştir.

Nano yapı katkısız tek tesirli kompozit bindirme bağlantıların hasar yüzeyleri incelendiğinde, statik, ± 200 ve ± 300 N tam değişken yorulma yüküne maruz kompozit bağlantılarda (Co, Co ± 200 ve Co ± 300) adhezyon hasar oluşurken, tam değişken yorulma yükü ± 400 ve ± 500 N olduğunda (Co ± 400 ve Co ± 500) fiber-yırtılma hasarı (FT) oluşmaktadır. Statik dört nokta eğme yüküne maruz grafen katkılı kompozit tek tesirli bindirme bağlantılarda (Co-G) kohezyon hasar (COH) oluşurken, ± 200 , ± 300 ,

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

± 400 ve ± 500 N yorulma yükü sonrası statik yüke maruz bağlantılarda (Co-G ± 200 , Co-G ± 300 , Co-G ± 400 ve Co-G ± 1200) fiber-yırtılma hasarı (FT) oluşmaktadır (Şekil 4.13).

Statik, ± 200 N tam değişken yorulma yüküne maruz karbon nanotüp-COOH ve fulleren katkılı kompozit bağlantılarda (Co-C, Co-C ± 200 , Co-F ve Co-F ± 200) ince-tabaka kohezyon hasarı (TLC) oluşurken, ± 300 , ± 400 ve ± 500 N tam değişken yorulma yüküne maruz kompozit bağlantılarda (Co-C ± 300 , Co-C ± 400 , Co-C ± 500 , Co-F ± 300 , Co-F ± 400 ve Co-F ± 500) fiber-yırtılma hasarı (FT) oluşmaktadır (Şekil 4.13). Kompozit bağlantılarda oluşan fiber-yırtılma hasarı (FT) veya hafif yırtılma hasarı (LFT), tam değişken yorulmadan dolayı tabakalar arası meydana gelen deliminasyondan kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.13. Statik ve tam değişken dört nokta eğme yorulma yüküne maruz kompozit tek tesirli bindirme bağlantılarının hasar yüzeyleri.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez kapsamında, havacılık şartlarında çalışabilen, karbon nano yapılar ihtiva eden tek tesirli bindirme bağlantılarının kapsamlı mekanik ve dinamik özellikleri incelenmiştir. Karbon nano yapılar olarak; grafen, karbon nanotüp ve fulleren nano yapıları kullanılmış olup yapıştırılan malzeme olarak ise AA2024-T3 alüminyum ve karbon fiber takviyeli tabakalı kompozit kullanılmıştır. Nano yapıştırıcı bağlantılarının temel mekanik performanslarının (çekme ve eğilme) incelenmesinin yanı sıra, havacılık zorlanmalarında sıklıkla karşılaşılan yorulma performansları incelenmiştir. Gerçekleştirilen testler sonrasında elde edilen sonuçlar; bulgular kısmında tartışmalı olarak ele alınıp, detaylı olarak açıklanmıştır. Yapılan deneysel sonuçlar iki temel başlıkta sunulmuştur.

5.1. Statik ve Tam Değişken Çeki Yüküne Maruz Tek Tesirli Bindirme Bağlantılarının Deneysel Sonuçları

Yapıştırılan malzeme olarak AA2024-T3 alüminyum ve yapısal yapıştırıcı olarak ise DP460 kullanılarak elde edilen alüminyum tek tesirli bindirme bağlantılarının statik çeki hasar yüklerine göre, yapıştırıcıya %1 oranında grafen ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 7, karbon nanotüp-COOH ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 8 ve fulleren ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 24 artırmıştır.

Nanoyapı katkısız alüminyum bağlantının statik çeki deneylerden elde edilen hasar yükünün yaklaşık %5 oranında (± 400 N) 10^6 çevrim tam değişken çeki yüküne maruz kalan bağlantının statik çeki hasar yükünde yaklaşık % 3 artış oluşurken, hasar yükünün yaklaşık %10 oranında (± 800 N) tam değişken çeki yorulma yüküne maruz kalan bağlantının statik çeki hasar yükünde yaklaşık % 9 ve hasar yükünün yaklaşık %15 oranında (± 1200 N) tam değişken çeki yorulma yüküne maruz kalan bağlantının statik çeki hasar yükünde ise yaklaşık %18 azalma olmuştur.

Nanoyapı katkılı alüminyum bağlantılarının statik çeki hasar yüklerine göre, bağlantılar 10^6 çevrim ± 400 N ve ± 800 N tam değişken çeki yorulma yüküne maruz

kaldıktan sonra statik hasar yüklerinde yapıştırıcı içerisine ilave edilen nano yapının türüne bağlı olarak yaklaşık %5 ile %17 arasında artış olmuştur. Ancak grafen ve karbon nanotüp-COOH katkılı bağlantılar 10^6 çevrim ± 1200 N tam değişken çeki yorulma yüküne maruz kaldıktan sonra statik hasar yüklerinde yaklaşık %1 gibi minimum bir artma veya azalma olduğu, fulleren katkılı bağlantılarda ise yaklaşık %9 azalma olduğu görülmektedir

Nanoyapı katkılı ve katkısız alüminyum tek tesirli bindirme bağlantılar tam değişken çeki yorulma yüküne maruz kaldığında, yer değiştirme kapasitesi azalmaktadır. Ancak bu azalma nanoyapı katkılı bağlantılara göre katkısız bağlantılarda daha fazla olmaktadır.

± 800 N tam değişken çeki yorulma yüküne maruz kalan nanoyapı katkısız alüminyum bağlantı (Al-800) ile fulleren katkılı alüminyum bağlantı (Al-F-800) karşılaştırıldığında, katkısız bağlantıya göre fulleren katkılı bağlantının mukavemeti yaklaşık %60 artarken absorbe ettiği enerji ise yaklaşık %198 artmıştır.

Statik ve tam değişken çeki yorulma yüküne maruz nanoyapı katkısız alüminyum tek tesirli bindirme bağlantıların tümünde adhezyon hasar oluşmuştur. Ancak bu hasar yüzeylerinden elde edilen en önemli sonuç, eksantrik yüklemekten dolayı statik çeki yüküne maruz bağlantılarda (Al) yapıştırıcı tabakası bindirme bölgesinin her iki ucunda kalırken, tam değişken yorulma yüküne maruz bağlantılarda (Al ± 400 N, Al ± 800 N) ise yapıştırıcı tabakası bindirme bölgesinin tamamına dağılmıştır.

Statik ve tam değişken çeki yorulma yüküne maruz grafen nanoyapı katkılı alüminyum tek tesirli bindirme bağlantıların tümünde kohezyon hasar oluşmuştur. Ayrıca karbon nanotüp-COOH ve fulleren katkılı alüminyum bağlantıların tümünde adhezyon hasar oluşmaktadır.

Yapıştırılan malzeme olarak [0/90]₆ istifleme açısına sahip karbon fiber kumaş takviyeli kompozit ve yapısal yapıştırıcı olarak ise DP460 kullanılarak elde edilen nanoyapı katkısız kompozit tek tesirli bindirme bağlantısının statik çeki hasar yüklerine göre, yapıştırıcıya %1 oranında grafen ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü

yaklaşık % 9, karbon nanotüp-COOH ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 19 ve fulleren ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 20 artırmaktadır.

Nanoyapı katkısız kompozit bağlantıların statik çeki hasar yüküne göre, 106 çevrim ± 400 N çeki yorulma yüküne maruz kalan bağlantının statik çeki hasar yükü %3 artmış olup, ± 800 N ve ± 1200 N yorulma yüküne maruz kalan bağlantıların hasar yükü ise sırasıyla % 8 ve %15 azalmıştır.

Ancak kompozit tek tesirli bindirme bağlantılarında yapıştırıcıya ağırlıkça % 1 grafen, karbon nanotüp-COOH ve fulleren ilave edilmesi sonucu olarak, ± 400 N, ± 800 N ve ± 1200 N tam değişken çeki yorulma yüküne maruz kalan bağlantıların statik hasar yükünde artış olmaktadır. Bu artış, grafen, karbon nanotüp-COOH ve fulleren katkılı bağlantılar ± 400 N yorulma yükü sonrası hasar yüklerindeki artış oranı sırasıyla %10, %11 ve %13, ± 800 N yorulma yükü sonrası hasar yüklerindeki artış oranı sırasıyla %8, %16 ve %20 ve ± 1200 N yorulma yükü sonrası hasar yüklerindeki artış oranı sırasıyla %3, %8 ve %7 olmaktadır.

Nanoyapı katkılı ve katkısız kompozit tek tesirli bindirme bağlantı tipleri için elde edilen statik çeki kuvvet-yer değiştirme eğrilerine göre, yapıştırıcıya grafen ve fulleren ilave edilmesi bağlantıların hem yük taşıma kapasitesini hem de yer değiştirme kapasitesini önemli derecede artırmaktadır. Ancak karbon nanotüp-COOH katkılı bağlantılarda ise yük taşıma kapasitesi artarken yer değiştirme kapasitesinde aynı kalmaktadır.

± 400 N tam değişken çeki yorulma yüküne maruz kalan grafen, karbon nanotüp-COOH ve fulleren nanoyapı katkılı kompozit bağlantıların (Co-G-400, Co-C-400 ve Co-F-400) absorbe ettiği enerji nanoyapı katkısız kompozit bağlantılara (Co-400) göre sırasıyla %55, %54 ve %91 daha fazla olmaktadır. Tam değişken çeki yorulma yükü ± 800 N olduğunda, grafen, karbon nanotüp-COOH ve fulleren nanoyapı katkılı kompozit bağlantıların (Co-G-800, Co-C-800 ve Co-F-800) absorbe ettiği enerji miktarlarındaki artış oranı sırasıyla yaklaşık %86, %106 ve %150 olmaktadır. Ayrıca tam değişken çeki yorulma yükü ± 1200 N olduğunda ise, grafen, karbon nanotüp-COOH ve fulleren

nanoyapı katkılı kompozit bağlantıların (Co-G-1200, Co-C-1200 ve Co-F-1200) absorbe ettiği enerji miktarlarındaki artış oranı sırasıyla yaklaşık %97, %67 ve %131 olmaktadır.

Tek tesirli kompozit bindirme bağlantıların hasar yüzeyleri incelendiğinde, statik, ± 400 N ve ± 1200 N tam değişken çeki yorulma yüküne maruz nanoyapı katkısız kompozit bağlantılarda (Co, Co ± 400 ve Co ± 1200) adhezyon hasar oluşurken, tam değişken yorulma yükü ± 800 N olduğunda (Co ± 800) hasar modu kohezyon hasara dönüşmektedir. Grafen katkılı kompozit tek tesirli bindirme bağlantıların tümünde (Co-G, Co-G ± 400 , Co-G ± 800 ve Co-G ± 1200) kohezyon hasar oluşmaktadır. Ancak bu kohezyon hasar, ± 800 ve ± 1200 N tam değişken yorulma yüküne maruz bağlantılarda ince-tabaka kohezyon hasara dönüşmektedir.

Statik, ± 400 N ve ± 800 N tam değişken çeki yorulma yüküne maruz karbon nanotüp-COOH ve fulleren katkılı kompozit bağlantılarda (Co-C, Co-C ± 400 , Co-C ± 800 , Co-F, Co-F ± 400 ve Co-F ± 800) ince-tabaka kohezyon hasar (TLC) oluşurken, ± 1200 N tam değişken yorulma yüküne maruz kompozit bağlantılarda hafif yırtılma hasarı (LFT) oluşmaktadır.

5.2. Statik ve Tam Değişken Dört Nokta Eğme Yüküne Maruz Tek Tesirli Bindirme Bağlantıların Deneysel Sonuçları

Statik dört nokta eğme yüküne maruz alüminyum bağlantının (Al) hasar yüküne göre, %1 grafen katkılı bağlantı (Al-G) yaklaşık %24, %1 karbon nanotüp-COOH katkılı bağlantı yaklaşık %32 ve %1 fulleren katkılı bağlantı ise yaklaşık %27 daha fazla yük taşımaktadır.

Nanoyapı katkısız alüminyum bağlantı (Al) ± 200 N ve ± 300 N tam değişken dört nokta eğme yorulma yüklerine maruz kalması bağlantıların statik hasar yüklerini yaklaşık % 9 ile %12 arasında artırırken, ± 400 N ve ± 500 N tam değişken dört nokta eğme yorulma yüklerine maruz kalması durumunda ise bağlantıların statik hasar yüklerini yaklaşık % 5 ile % 23 arasında azaltmaktadır. Tam değişken dört nokta eğme yorulma yüküne maruz kalan katkısız bağlantının hasar yükündeki artışın nedeni, yorulmada

uygulanan 106 çevrimin sıcaklığa bağlı olarak yapıştırıcıda post kürleşmeye neden olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Nanoyapı katkılı statik ve tam değişken dört nokta eğme yükü sonrası elde edilen hasar yükleri göz önüne alındığında, bağlantıların statik hasar yüklerine göre, ± 200 N, ± 300 N ve ± 400 N tam değişken yorulma yükü sonrası alüminyum bağlantıların statik hasar yükleri artmaktadır. Bu artış grafen katkılı alüminyum bağlantılarda yaklaşık % 14 ile % 28 arasında, karbon nanotüp-COOH katkılı alüminyum bağlantılarda yaklaşık % 13 ile % 23 arasında ve fulleren katkılı alüminyum bağlantılarda ise yaklaşık % 2 ile % 14 arasında olmaktadır.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar havacılık alanında kullanıldığından dolayı bu bağlantılar sıklıkla dinamik (yorulma) yüklemeye maruz kalmaktadır. Statik eğme yükünün belirli oranlarında dinamik yüklemeye maruz kalan bu alüminyum bağlantılarda yapıştırıcı içerisine kimyasal özeliğine göre nanoyapı ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü yaklaşık %70'e kadar artırmaktadır. Günümüzde hemen hemen tüm alanlarda mukavemeti iyi ve daha hafif malzemelerin (kompozit, alüminyum alaşımı) kullanılması ve bu malzemelerin birleştirilmesinde ise yapıştırıcı kullanılmasından dolayı bu sonuç oldukça önemlidir.

Nanoyapı katkısız alüminyum bağlantılara göre grafen, karbon nanotüp-COOH ve fulleren nano yapı katkılı alüminyum bağlantı tiplerinin absorbe ettiği enerji önemli derecede artmaktadır. Bu artış, statik dört nokta eğme yüküne maruz bağlantılarda yaklaşık % 113 ile % 185 arasında, ± 200 N tam değişken dört nokta eğme yüküne maruz bağlantılarda yaklaşık % 97 ile % 296 arasında, ± 300 N tam değişken dört nokta eğme yüküne maruz bağlantılarda yaklaşık % 90 ile % 355 arasında, ± 400 N tam değişken dört nokta eğme yüküne maruz bağlantılarda yaklaşık % 117 ile % 337 arasında ve ± 500 N tam değişken dört nokta eğme yüküne maruz bağlantılarda yaklaşık % 169 ile % 484 arasında olmaktadır.

Grafen katkılı ± 300 , ± 400 ve ± 500 N tam değişken dört nokta eğme yüküne maruz alüminyum bağlantılar (Al-G ± 300 , Al-G ± 400 ve Al-G ± 500) hariç, statik ve tam değişken dört nokta eğme yorulma yüküne maruz nanoyapı katkılı ve katkısız alüminyum

bağlantıların tümünde adhezyon hasar oluşmaktadır. Al-G ± 300 , Al-G ± 400 ve Al-G ± 500 bağlantı tiplerinde ise, kohezyon hasar oluşmaktadır.

Yapıştırılan malzeme [0/90]₆ istifleme açısına sahip karbon fiber kumaş takviyeli kompozit olan nanoyapı katkısız kompozit bağlantılar statik dört nokta eğme hasar yükünün yaklaşık %17 ve %25'ine kadar 106 çevrim tam değişken yorulma yüküne (± 200 ve ± 300 N) maruz kaldıktan sonra kompozit bağlantının statik dört nokta eğme hasar yükünde yaklaşık % 5 ile % 9 arasında artış olmaktadır. Fakat tam değişken yorulma yükü ± 400 ve ± 500 N olduğunda ise statik dört nokta eğme hasar yükünde yaklaşık % 3 ile % 9 arasında azalma olmaktadır.

Yapıştırıcıya %1 grafen, karbon nanotüp-COOH ve fulleren nano yapı ilave edilerek elde edilen kompozit bağlantılar, ± 200 , ± 300 N, ± 400 ve ± 500 N tam değişken dört nokta eğme yorulma sonrası statik hasar yükleri artmaktadır. Bu artış grafen katkılı kompozit bağlantılarda yaklaşık % 3 ile %12 arasında, karbon nanotüp-COOH katkılı kompozit bağlantılarda yaklaşık % 6 ile %14 arasında ve fulleren katkılı kompozit bağlantılarda ise yaklaşık % 13 ile % 20 arasında olmaktadır.

Ayrıca nanoyapı katkılı ve katkısız kompozit bağlantıların dört nokta eğme hasar yüklerinden elde edilen en önemli sonuçlardan biri ise, nanoyapı katkısız kompozit bağlantı (Co) ± 500 N tam değişken dört nokta eğme yorulma yüküne maruz kaldığında (Co ± 500) bağlantının statik hasar yükü yaklaşık %9 azalırken, yapıştırıcıya %1 karbon nanotüp-COOH ilave edilmesi (Co-C ± 500) kompozit bağlantının hasar yükünü yaklaşık % 46 artırmaktadır.

Statik ve tam değişken dört nokta eğme yüküne maruz nanoyapı katkılı ve katkısız kompozit bağlantılardan elde edilen kuvvet-yer değiştirme eğrilerine göre, yapıştırıcıya nanoyapı ilave edilmesi bağlantının hem hasar yükünü hem de yer değiştirme kapasitesini artırmaktadır.

Diğer taraftan yapıştırılan dört nokta eğme yüküne maruz alüminyum bağlantılara göre, kompozit bağlantıların hem statik hem de yorulma sonrası statik hasar yüklerinde yaklaşık %15 ile %30 artış olmaktadır. Bu artışın nedeni, yapıştırılan kompozit plakların

alüminyum plaklara göre daha esnek olması ve bu kompozit plakların dört nokta eğme yüküne maruz bağlantıların bindirme bölgesinde oluşan eğilme momentinin yapıyı yıpratıcı etkisini azaltmasıdır.

Dört nokta eğme yüküne maruz nano yapı katkısız tek tesirli kompozit bindirme bağlantıların hasar yüzeyleri incelendiğinde, statik, ± 200 ve ± 300 N tam değişken yorulma yüküne maruz kompozit bağlantılarda (Co, Co ± 200 ve Co ± 300) adhezyon hasar oluşurken, tam değişken yorulma yükü ± 400 ve ± 500 N olduğunda (Co ± 400 ve Co ± 500) fiber-yırtılma hasarı oluşmaktadır.

Statik dört nokta eğme yüküne maruz grafen katkılı kompozit tek tesirli bindirme bağlantılarda (Co-G) kohezyon hasar oluşurken, ± 200 , ± 300 , ± 400 ve ± 500 N yorulma yükü sonrası statik yüke maruz bağlantılarda (Co-G ± 200 , Co-G ± 300 , Co-G ± 400 ve Co-G ± 1200) fiber-yırtılma hasarı oluşmaktadır. Statik, ± 200 N tam değişken dört nokta eğme yorulma yüküne maruz karbon nanotüp-COOH ve fulleren katkılı kompozit bağlantılarda (Co-C, Co-C ± 200 , Co-F ve Co-F ± 200) ince-tabaka kohezyon hasar oluşurken, ± 300 , ± 400 ve ± 500 N tam değişken dört nokta eğme yorulma yüküne maruz kompozit bağlantılarda (Co-C ± 300 , Co-C ± 400 , Co-C ± 500 , Co-F ± 300 , Co-F ± 400 ve Co-F ± 500) fiber-yırtılma hasarı oluşmaktadır. Kompozit bağlantılarda oluşan fiber-yırtılma hasarı veya hafif yırtılma hasarı, tam değişken yorulmadan dolayı tabakalar arası meydana gelen deliminasyondan kaynaklanmaktadır.

KAYNAKLAR

- 114M408 TÜBİTAK Projesi. Havacılık Alanında Kullanılan Yapısal Yapıştırıcıların Termal Çevrim Performanslarının Karbon Nanoyapı Katkısıyla İyileştirilmesi, 2018.
- Adams, R. D. 1984. Structural Adhesive Joints in Engineering Master thesis, University of Bristol, UK.
- Akpınar, I. A. Gültekin, K. S. Akpınar. Gürses, A. ve Özel, A. 2016. "An experimental study on composite adhesives reinforced with different types of organo-clays." The Journal of Adhesion 94(2): 124-142.
- Akpınar, S. Gültekin, K. ve Özel, A. 2014. "The effect of the adherend width on the strength of adhesively bonded single-lap joint_ Experimental and numerical analysis", Composites Part B: Engineering, 60: 736-745.
- Akpınar, S. 2012. "Yapıştırıcıyla birleştirilmiş T-bağlantılarda üç boyutlu gerilme analizi", Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.
- ASTM D3166-99. 2012. "Standard Test Method for Fatigue Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading"
- Aydin, M. D. Özel, A. ve Temiz, Ş. 2005. "The effect of adherend thickness on the failure of adhesively-bonded single-lap joints." Journal of Adhesion Science and Technology 19(8): 705-718.
- Azari, S. Ameli, A. Papini, M. and Spelt, J.K. 2013. "Adherend thickness influence on fatigue behavior and fatigue failure prediction of adhesively bonded joints", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 48: 181-91.
- Azari, S. Jhin, G. Papini, M. and Spelt, J. K. 2014. "Fatigue threshold and crack growth rate of adhesively bonded joints as a function of load/displacement ratio", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 57: 59-66.
- Bertin, L. 2014. "Tensile Strength of Automotive Aluminum Joints Using Resistance Spot Welding, Self-Piercing Riveting and Adhesive Hybrid Joining Master", University of Windsor.
- Bharti, S. 2018. "Adhesives and Adhesion Technologies: A Critical Review." American Journal of Polymer Science and Technology 4(1).
- Durmuş, M. ve Akpınar, S. 2020. "The experimental and numerical analysis of the adhesively bonded three-step-lap joints with different step lengths." Theoretical and Applied Fracture Mechanics 105.
- Ebnesajjad, S. 2014. Theories of Adhesion. Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding: 77-91.
- Gültekin, K. Akpınar, S. ve Özel, A. 2015. "The Effect of Moment and Flexural Rigidity of Adherend on the Strength of Adhesively Bonded Single Lap Joints." The Journal of Adhesion 91(8): 637-650.
- ISO 10365. 1992(E). "Adhesives- Designation of main failure patterns"

- Kadioglu, F. Avil, E. Ercan, M. E. ve Aydogan, T. 2018. "Effects of different overlap lengths and composite adherend thicknesses on the performance of adhesively-bonded joints under tensile and bending loadings." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 369.
- Kanar, B. Akpınar, S. Akpınar, I. A. Akbulut, H. ve Özel, A. 2018. "The fracture behaviour of nanostructure added adhesives under ambient temperature and thermal cyclic conditions", Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 97: 120-130.
- Karachalios, E. F. Adams, R. D. and Da Silva, L. F. M., 2013. "The behaviour of single lap joints under bending loading", Journal of Adhesion Science and Technology, 27: 1811-27.
- Katnam, K. B. Crocombe, A. D. Khoramishad, H. and Ashcroft, I. A. 2010. "Load Ratio Effect on the Fatigue Behaviour of Adhesively Bonded Joints: An Enhanced Damage Model", The Journal of Adhesion, 86: 257-72.
- Kazaz, I. Akpınar, S. ve Özel A. 2020. "The Effects of Thermal Cycle and Nanostructure Reinforcement on the Shear Load in Adhesively Bonded Joints", Mechanics of Advanced Materials and Structures, 27: 1627-1638.
- Khashaba, U.A. Najjar, I.M.R. 2018. "Adhesive layer analysis for scarf bonded joint in CFRE composites modified with MWCNTs under tensile and fatigue loads", Composites Structural, 184: 411–27.
- Khashaba, U.A. ve Najjar, I.M.R. 2018. "Adhesive layer analysis for scarf bonded joint in CFRE composites modified with MWCNTs under tensile and fatigue loads", Compos Struct, 184, 411–27.
- Khoramishad, H. Akhavan-Safar, A. Ayatollahi, M. R. and da Silva, L. F. M. 2016. "Predicting static strength in adhesively bonded single lap joints using a critical distance based method: Substrate thickness and overlap length effects", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 231: 237-46.
- Khoramishad, H. Crocombe, A.D. Katnam, K.B. and Ashcoft, I.A. 2010. "A generalised damage model for constant amplitude fatigue loading of adhesively bonded joints", International Journal of Adhesion and Adhesives, 30: 513-21.
- Khoramishad, H. Crocombe, A.D. Katnam, K.B. and Ashcroft, I.A. 2011. "Fatigue damage modelling of adhesively bonded joints under variable amplitude loading using a cohesive zone model", Engineering Fracture Mechanics, 78: 3212-25.
- Kinloch, A. J. 1987. "Adhesion and Adhesives Science and Technology" Springer Netherlands.
- Kuenzi, E. W. and Stevens, G. H. 1963. "Determination of mechanical properties of adhesives for use in the design of bonded joints".
- Lee, Dai Gil., Ki, Soo Kim., and Im, Yong-Taek., 1991. 'An Experimental Study of Fatigue Strength for Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joints', The Journal of Adhesion, 35: 39-53.
- Mactabi, R. Rosca, L.D. and Hoa, S.V. 2013. "Monitoring the integrity of adhesive joints during fatigue loading using carbon nanotubes", Compos Sci Technol, 78: 1–9.

- Mariam, M. Afendi, M. Abdul Majid, M.S. Ridzuan, M.J.M. and Gibson, A.G. 2018. 'Tensile and fatigue properties of single lap joints of aluminium alloy_glass fibre reinforced composites fabricated with different joining methods ', *Composites structure*, 200: 647-58.
- Özer, H. 2018. *Introductory Chapter: Structural Adhesive Bonded Joints. Applied Adhesive Bonding in Science and Technology.*
- Pedersen, M. M. 2018. *Introduction to Metal Fatigue - Concepts and Engineering Approaches*, 83: 98.
- Pereira, A. M. Reis, P. N. B., and Ferreira, J. A. M. 2015. 'Effect of the mean stress on the fatigue behaviour of single lap joints', *The Journal of Adhesion*, 93: 504-13.
- Rao, S. S. 2018. *The Finite Element Method in Engineering*, Katey Birtcher.
- Reis, P.N.B. Monteiro, J.F.R. Pereira, A.M. Ferreira, J.A.M. and Costa, J.D.M. 2015. 'Fatigue behaviour of epoxy-steel single lap joints under variable frequency', *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 63: 66-73.
- Sarfaraz, R. Anastasios-Vassilopoulos, P. and Keller, T. 2011. 'Experimental investigation of the fatigue behavior of adhesively-bonded pultruded GFRP joints under different load ratios', *International Journal of Fatigue*, 33: 1451-60.
- Shahani, A. R. and Pourhosseini, S. M. 2018. 'The effect of adherent thickness on fatigue life of adhesively bonded joints', *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 42: 561-71.
- Wu, Chao, Xiao Ling Zhao, Wing Kong Chiu, Riadh Al-Mahaidi, and Wen Hui Duan. 2013. 'Effect of fatigue loading on the bond behaviour between UHM CFRP plates and steel plates', *Composites Part B: Engineering*, 50: 344-53.
- Zamani, Pedram, L. F. M. Da Silva, Khalil Farhangdoost, and Abdolrahman Jaamialahmadi. 2019. 'An investigation on fatigue life evaluation and crack initiation of Al-GFRP bonded lap joints under four-point bending', *Composites structure*, 11.
- Zaroug, M. El, F. Kadioglu, M. Demiral, and D. Saad. 2018. 'Experimental and numerical investigation into strength of bolted, bonded and hybrid single lap joints_ Effects of adherend material type and thickness', *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 87: 130-41.