

HAVACILIK ALANINDA KULLANILAN NANOYAPI KATKILI YAPISAL YAPIŞTIRICILARIN MEKANIK ÖZELLIKLERININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESI

Kürşat GÜLTEKİN

Doktora Tezi Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Mekanik Bilim Dalı Prof. Dr. Adnan ÖZEL 2018 Her hakkı saklıdır

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

HAVACILIK ALANINDA KULLANILAN NANOYAPI KATKILI YAPISAL YAPIŞTIRICILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Kürşat GÜLTEKİN

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI Mekanik Bilim Dalı

ERZURUM 2018

Her hakkı saklıdır



T.C. ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

HAVACILIK ALANINDA KULLANILAN NANOYAPI KATKILI YAPISAL YAPIŞTIRICILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK **İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Adnan ÖZEL danışmanlığında, Kürşat GÜLTEKİN tarafından hazırlanan bu çalışma, 02/04/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Mekanik Bilim Dalı'nda doktora tezi olarak oybirliği (5/5) ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Adnan ÖZEL

Üve : Prof. Dr. Hamit AKBULUT

Üye : Prof. Dr. Murat Demir AYDIN

: Prof. Dr. Ali Fatih YETİM Üye

Üye : Doç. Dr. Habib UYSAL

İmza	Adrenget
İmza	Hobbely
İmza	Mume .
İmza	A fatyctj
İmza	: Malp

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu .05./04../2018 tarih ve .14.../..22........ nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ Enstitü Müdürü

Bu çalışma TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında desteklenmiştir. Proje No: 114M408

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

HAVACILIK ALANINDA KULLANILAN NANOYAPI KATKILI YAPISAL YAPIŞTIRICILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Kürşat GÜLTEKİN

Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Mekanik Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Adnan ÖZEL

Nanobilim ve nanoteknolojide meydana gelen gelişmeler, hızlı bir şekilde günümüz bilim ve teknolojisini etkilediği gibi mühendislik ve mekanik bilimlerini de derinden etkilemiştir. Son yıllarda, karbon nanoyapıların polimerlerle etkileşiminden olumlu sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiş ve yapıştırıcı içerisine nanopartikül ilavesiyle yapıştırma bağlantılarının tasarım ve analizine yeni bir boyut kazandırmıştır.

Sunulan çalışmada, yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerini geliştirmek için farklı karakterdeki yapıştırıcılara yeni bir yöntem ile farklı karbon nanopartiküller ilave edilerek elde edilen nanokompozit yapıştırıcıların mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca yapıştırıcı içerisine eklenen nanopartikülün türü ve katkı oranının etkisini incelemek için; üretilen nanokompozit yapıştırıcılar kullanılarak tek ve çift tesirli aluminyum ve kompozit bağlantı numuneleri üretilmiş, çekme ve eğme yükü altında mekanik özellikleri belirlenmiştir.

Deneysel sonuçlar incelendiğinde, geliştirilen yeni karıştırma yönteminin bağlantının güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini iyileştirerek standart sapmayı minimize ettiği görülmüştür. Ayrıca, yapıştırıcıya nanopartikül ilave edilerek elde edilen yapıştırıcıların bağlantı dayanımını artırdığı görülmüştür. Bununla birlikte bağlantı dayanımındaki artış oranı; yapıştırıcının yapısal özelliğine, nanopartikülün türüne ve oranına bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir.

2018, 122 sayfa

Anahtar Kelimeler: Yapısal yapıştırıcı, yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar, çekme, eğme, mekanik özellikler

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF NANOSTRCUTURE DOPED STRUCTURAL ADHESIVES USED IN AVIATION FIELD

Kürşat GÜLTEKİN

Atatürk University Graduate School of Natural and Applied Sciences Department of Mechanical Engineering Department of Mechanic

Supervisor: Prof. Dr. Adnan ÖZEL

Developments in nanoscience and nanotechnology have rapidly influenced today's science and technology as well as engineering and mechanical sciences. In recent years, it has been observed that carbon nanostructures interact with polymers positively and have added a new dimension to the design and analysis of adhesively bonded joints by adding nanostructures into the adhesive.

In the presented study, the mechanical properties of nanocomposite adhesives obtained by adding different carbon nanostructures to the adhesive of different character with a new method have been experimentally investigated in order to improve the mechanical properties of adhesive bonded joints. In addition, to investigate the effect of the nanoparticle addition ratio and nanoparticle type in the adhesive, nanocomposite adhesives were used to produce single and double lap aluminum and composite joint specimens and their mechanical properties under tensile and flexural loads were determined.

When the experimental results were examined, it was seen that the developed new mixing method reduces the standard deviation by improving the reliability and reproducibility of the adhesively bonded joints. It has also been found that the adhesive obtained by adding nanostructure to the adhesive increases the strength of joint. In addition, it has been determined that the rate of increase in the strength of joint varies depending on the structural property of the adhesive, nanoparticle and nanoparticle addition ratio.

2018, 122 pages

Keywords: Structural adhesive, adhesively bonded joints, tension, bending, mechanical properties

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımın her aşamasında katkıda bulunan, desteklerini benden esirgemeyen, değerli bilgilerini benimle paylaşan, ufkumu açan emeklerine asla karşılık veremeyeceğim saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Adnan ÖZEL'e minnet ve şükranlarımı sunmayı her zaman için bir borç bilirim.

Tez çalışmamın tamamlanması için katkıda bulunan, çalışma süresince bilgi ve tavsiyelerini paylaşan, Sayın Prof. Dr. Hamit AKBULUT'a, Sayın Prof. Dr. Ahmet GÜRSES'e ve Dr. Öğr. Üyesi Salih AKPINAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca yardımcı olan ekip arkadaşlarım Sayın Arş. Gör. Salim ÇAM'a, Sayın Zafer EROĞLU'na ve Makine Mühendisliği bölümündeki araştırma görevlisi arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na 114M408 numaralı araştırma projesini finansal olarak desteklediği için şükranlarımı sunarım.

Öğrenim hayatımın her aşamasında, her türlü maddi ve manevi desteğini eksik etmeyen değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kürşat GÜLTEKİN Mart, 2018

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	14
2.1. Yapışma	14
2.2. Yapışma Teorileri	15
2.2.1. Mekanik yapışma teorisi	15
2.2.2. Difüzyon teorisi	16
2.2.3. Adsorpsiyon (Yüzeye tutunma) teorisi	16
2.2.4. Elektrostatik teori	16
2.2.5. Zayıf sınır tabaka teorisi	17
2.3. Yapıştırıcıların Sınıflandırılması	17
2.4. Nanopartiküller ve Nanokompozit Yapıştırıcılar	18
2.4.1. Eş eksenli (Equi-Axed) nanopartiküller	19
2.4.2. Nanotüp ve Nanofiberler	21
2.4.3. Tabakalı Nanopartiküller	26
2.4.4. Diğer Nanopartiküller	29
2.5. Nanopartiküllerin Epoksi İçine Eklenmesi (Dispersiyon)	
2.6. Yapıştırma Bağlantıları	
2.6.1 Yapıştırma bağlantılarında oluşan gerilmeler ve analizi	35
2.7. Yüzey Hazırlama İşlemleri	
2.7.1. Genel yüzey hazırlama metotları	
2.7.2. Alüminyum alaşımlarına uygulanan yüzey işlemleri	45
2.8. Yapıştırma Bağlantılarında Hasar Türleri	46
2.9. Fourier Dönüşümlü İnfrared Spektroskopisi (FT-IR)	

3. MATERYAL ve YÖNTEM 49
3.1. Yapıştırılan Malzemeler ve Özellikleri
3.2. Yapıştırıcılar ve Özellikleri
3.3. Nanopartiküller ve Özellikleri
3.4. Nanopartikül Katkılı Yapıştırıcıların Hazırlanması51
3.4.1. Elle karıştırma yöntemi
3.4.2. Ultrasonik karıştırıcıyla karıştırma yöntemi
3.4.3. Yüksek parçalayıcı karıştırıcıyla (high shear mixer) karıştırma yöntemi53
3.4.4. Asetonlu ultrasonik karıştırma yöntemi
3.5. Nanopartikül Katkısız Yapıştırıcıların Hazırlanması
3.6. Nanopartikül Katkılı ve Katkısız Bulk Numunelerin Hazırlanması
3.7. Bağlantı Numunelerinin Yüzeyinin Hazırlanması
3.8. Tek Tesirli Bindirme Bağlantı Numunelerinin Hazırlanması
3.9. Çift Tesirli Bağlantı Numunelerinin Hazırlanması64
3.10. Bulk Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi65
3.11. Bağlantı Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi
3.12. Nanopartikül Katkısız Yapıştırıcıların FT-IR Analizi
3.13. Nanopartikül Katkılı Yapıştırıcıların FT-IR Analizi
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA71
4.1. Farklı Karıştırma Yöntemlerinden Elde Edilen Deneysel Sonuçlar71
4.2. Nanopartikül Katkılı ve Katkısız Bulk Numunelerinden Elde Edilen Sonuçlar.73
4.3. Çeki Yüküne Maruz Tek Tesirli Alüminyum Bindirme Bağlantılarından Elde
Edilen Deneysel Sonuçlar77
4.4. Çeki Yüküne Maruz Tek Tesirli Kompozit Bindirme Bağlantılarından Elde
Edilen Deneysel Sonuçlar85
4.5. Çeki Yüküne Maruz Çift Tesirli Bağlantılarından Elde Edilen Deneysel
Sonuçlar
4.6. Dört Nokta Eğme Yüküne Maruz Tek Tesirli Alüminyum Bağlantı
Numunelerinden Elde Edilen Deneysel Sonuçlar91
4.7. Dört Nokta Eğme Yüküne Maruz Tek Tesirli Kompozit Bağlantı
Numunelerinden Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

4.8 Dört Nokta Eğme Yüküne Maruz Çift Tesirli Bağlantı Numunelerinden	
Elde Edilen Deneysel Sonuçlar	96
4.9. Nanopartikül Katkısız Yapıştırıcıların FT-IR Analiz Sonuçları	
4.10. Nanopartikül Katkılı Yapıştırıcıların FT-IR Analiz Sonuçları	
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	107
KAYNAKLAR	113
ÖZGEÇMİŞ	123



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

°C	Santigrat derece
KHz	Kilohertz
E	Elastisite modülü
F	Yer değiştirmeye karşılık gelen yük
ΔL	Yer değiştirme
τ	Kayma gerilmesi
σ	Çekme gerilmesi
σ_{e_s}	Eşdeğer gerilme
ν	Poisson's oranı

Kısaltmalar

A.H.	Adhezyon Hasarı
ASTM	American Society for Testing and Materials
CFFR	Kumaş Takviyeli Düz Dokuma Kompozit
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
D.H.	Deleminasyon Hasarı
FEGSEM	Alan Taramalı Elektron Mikroskobu
GO	Grafen Oksit
IR	Infrared Spektroskopi
K.H.	Kohesiv Hasar
KNT	Karbon Nanotüp
KNTCOOH	Karboksil İle Fonksiyonize Edilmiş Karbon Nanotüp
K.Y.H.	Kohesiv Yapıştırılan Malzeme Hasarı
MWKNT	Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
Ö.K.H	Özel Kohesiv Hasar
RGO	İndirgenmiş Grafen Oksit
SEM	Taramalı Elekton Mikroskobu

S. E. Y.	Sonlu Elemanlar Yöntemi
SWKNT	Tek Duvarlı Karbon Nanotüp
TEM	Transmisyon Elektron Mikroskobu
Y.H.	Yapıştırılan Malzeme Hasarı



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Yapıştırma bölgesinde adhezyon ve kohezyon kuvvetleri	15
Şekil 2.2. Epoksi reçine içerisinde dağılmış nanosilika partiküllerinin TEM	
görüntüsü	20
Şekil 2.3. Fulleren (C60) molekülünün genel, SEM ve AFM görüntüsü	21
Şekil 2.4. Tek duvarlı (katmanlı) nanotüp	22
Şekil 2.5. Çok duvarlı (katmanlı) nanotüp	23
Şekil 2.6. Nanofiberler	26
Şekil 2.7. Grafitin ve elmasın hibritleşmesi ve yapısı	27
Şekil 2.8. Grafenin bal peteği yapısı ve SEM görüntüsü	28
Şekil 2.9. Karbon siyahı	29
Şekil 2.10. Karbon siyahı oluşum aşamaları	30
Şekil 2.11. Düşük ve yüksek parçalayıcı yöntemlerine ait SEM görüntüleri	32
Şekil 2.12. Yapıştırma bağlantı tipleri	34
Şekil 2.13. Yapıştırma bağlantılarında oluşan gerilme türleri	35
Şekil 2.14. Yapıştırma bağlantılarında oluşabilecek gerilme durumları	37
Şekil 2.15. Yüzeydeki kirlilik oranının soyulma mukavemetine etkisi	41
Şekil 2.16. Fosforik asitle anodize edilmiş alüminyum alaşımının yüzeyi	46
Şekil 3.1. Nanopartiküllerin SEM görüntüleri	51
Şekil 3.2. Yapıştırıcıların hazırlanması	52
Şekil 3.3. Deneme amaçlı bulk ve bağlantı numuneleri	54
Şekil 3.4. Bulk numunelerin kalıba yerleştirilmesi	55
Şekil 3.5. Bulk numunelerin hazırlanması	56
Şekil 3.6. AA2024-T3 bağlantı numunelerinin hazırlanması	58
Şekil 3.7. Kompozit bağlantı numunelerinin hazırlanması	59
Şekil 3.8. Alüminyum bağlantı numunesi geometrisi	59
Şekil 3.9. CFFR kompozit bağlantı numunesi geometrisi	60
Şekil 3.10. Tek tesirli bağlantı numunelerinin üretilmesinde kullanılan kalıp	61
Şekil 3.11. Tek tesirli bağlantı numunelerinin üretilmesi	62
Şekil 3.12. Çift tesirli bağlantı numunesi geometrisi	64

Şekil 3.13. Çift tesirli bağlantı numuneleri
Şekil 3.14. Bulk numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi
Şekil 3.15. Tek tesirli bağlantı numunelerinin sınır şartları ve çekme deneyi67
Şekil 3.16. Çift tesirli bağlantı numunelerinin sınır şartları ve çekme deneyi67
Şekil 3.17. Tek tesirli alüminyum bağlantı numunelerinin dört nokta eğme testi sınır
şartları68
Şekil 3.18. Tek tesirli kompozit bağlantı numunelerinin dört nokta eğme testi sınır
şartları68
Şekil_3.19. Çift tesirli bağlantı numunelerinin dört nokta eğme testi sınır şartları68
Şekil 3.20. Nanopartikül katkısız yapıştırıcıların FT-IR analizi
Şekil 4.1. DP270 yapıştırıcısına ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri74
Şekil 4.2. DP125 yapıştırıcısına ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri
Şekil 4.3. DP460 yapıştırıcısına ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri
Şekil 4.4. DP270 yapıştırıcısıyla birleştirilmiş katkılı ve katkısız bağlantıların hasar
yüzeyi
Şekil 4.5. DP125 yapıştırıcısıyla birleştirilmiş katkılı ve katkısız bağlantıların hasar
yüzeyi81
Şekil 4.6. DP460 yapıştırıcısıyla birleştirilmiş katkılı ve katkısız bağlantıların hasar
yüzeyi
Şekil 4.7. Katkısız ve %1 katkılı alüminyum bağlantı numunelerinin kuvvet-yer
değiştirme eğrileri
Şekil 4.8. DP270 yapıştırıcısına ait kuvvet-yer değiştirme eğrisi ve hasar yüzeyleri86
Şekil 4.9. DP125 yapıştırıcısına ait kuvvet-yer değiştirme eğrisi ve hasar yüzeyleri87
Şekil 4.10. DP460 yapıştırıcısına ait kuvvet-yer değiştirme eğrisi ve hasar yüzeyleri88
Şekil 4.11. Çeki yüküne maruz çift tesirli bağlantı numunelerinin hasar yüzeyleri90
Şekil 4.12. Dört nokta eğme yüküne maruz tek tesirli alüminyum bağlantı
numunelerinin hasar yüzeyleri92
Şekil 4.13. Kompozit malzemelerde meydana gelen hasar
Şekil 4.14. Dört nokta eğme yüküne maruz tek tesirli kompozit bağlantı
numunelerinin hasar yüzeyleri95
Şekil 4.15. Dört nokta eğme yüküne maruz çift tesirli bağlantı numunelerinin hasar
yüzeyleri97

Şekil 4.16.	Çift bileşenli yapıştırıcıların epoksi, hızlandırıcı ve epoksi-hızlandırıcı
	karışımlarına ait IR spektrumları99
Şekil 4.17.	Çift bileşenli yapıştırıcılar DP270, DP460 ve DP125'in
	karşılaştırılmasına ait FT-IR spektrumları101
Şekil 4.18.	DP270 yapıştırısıcına ait katkısız ve %1 nanopartikül katkılı
	yapıştırıcılara ait FT-IR spektrumu102
Şekil 4.19.	DP125 yapıştırısıcına ait katkısız ve %1 nanopartikül katkılı yapıştırıcılara
	ait FT-IR spektrumu103
Şekil 4.20.	DP460 yapıştırısıcına ait katkısız ve %1 nanopartikül katkılı yapıştırıcılara
	ait FT-IR spektrumu

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Bazı malzemelerin elastisite modülleri	.23
Çizelge 2.2.	Karbon nanotüp üretim yöntemleri ve karşılaştırılması	.25
Çizelge 2.3.	Aşındırıcı türü ve boyutları	.42
Çizelge 2.4.	Alüminyum alaşımlarına uygulanan yüzey işlemleri ve parametreleri	.45
Çizelge 2.5.	Temel hasar tipleri	.47
Çizelge 2.6.	Epoksi reçineye ait bağ titreşim değerleri	.48
Çizelge 3.1.	Alüminuum alaşımının mekanik özellikleri	.49
Çizelge 3.2.	CFFR kompozit malzemesinin mekanik özellikleri	.50
Çizelge 3.3.	Yapısal yapıştırıcıların kürleşme şartları ve bileşim oranları	.50
Çizelge 3.4.	Bulk numunelere ait deneysel parametreler	.56
Çizelge 3.5.	Çekme yüküne maruz tek tesirli alüminyum bağlantı numuneleri için	
	deneysel parametreler	.63
Çizelge 3.6.	Çekme ve eğme yüküne maruz kompozit bağlantı numuneleri için	
	deneysel parametreler	.64
Çizelge 4.1.	Dört farklı yöntem ile üretilen bağlantıların hasar yükleri ve standart	
	sapmaları	.71
Çizelge 4.2.	DP270 yapıştırıcısı ile elde edilen bağlantıların ortalama hasar yükleri	
	ve standart sapmaları	.78
Çizelge 4.3.	DP125 yapıştırıcısı ile elde edilen bağlantıların ortalama hasar yükleri	
	ve standart sapmaları	.80
Çizelge 4.4.	DP460 yapıştırıcısı ile elde edilen bağlantıların ortalama hasar yükleri	
	ve standart sapmaları	.82
Çizelge 4.5.	Çeki yüküne maruz tek tesirli kompozit bağlantıların ortalama hasar	
	yükleri ve standart sapmaları	.86
Çizelge 4.6.	Çeki yüküne maruz çift tesirli bağlantıların ortalama hasar yükleri ve	
	standart sapmaları	. 89
Çizelge 4.7.	Dört nokta eğme yüküne maruz tek tesirli alüminyum bağlantı	
	numunelerinden elde edilen deneysel sonuçlar	.91

Çizelge 4.8.	Dört nokta eğme yüküne maruz tek tesirli kompozit bağlantı	
	numunelerinden elde edilen deneysel sonuçlar9	4
Çizelge 4.9.	Dört nokta eğme yüküne maruz çift tesirli bağlantı numunelerinden elde	
	edilen deneysel sonuçlar9	6



1. GİRİŞ

Yüzey teması ile malzemeleri bir arada tutabilen maddeler ASTM (American Society for Testing and Materials) yapıştırıcı olarak tanımlanmaktadır. Yapıştırıcı alanında meydana gelen hızlı gelişmeler neticesinde, yapıştırma bağlantıları; bağlantı güvenirliğinin gerekli olduğu uçak, uzay ve otomotiv gibi sanayi sektörlerinde geleneksel yöntemlerin yerine alternatif olarak kullanılmaktadır (ASTM D4800-94; Higgins 2000; Grant *et al.* 2009; Gültekin 2014).

Uçak gövdesi ve kanatlarında yapıştırma bağlantıları kullanıldığı gibi, yapıştırıcılar motor bloğu sızdırmazlığının sağlanmasında ve birçok cam, plastik parçaların birleştirilmesinde otomotiv sektöründe de oldukça geniş kullanım alanına sahiptir (Tek 2011).

Yapıştırma bağlantılarının kullanımında ve tasarımında bazı avantaj ve dezavantajlar vardır. İnce ve kalın farklı malzemeleri birleştirmesi, üniform gerilme dağılımı sağlaması, darbe ve titreşim sönümleme kabiliyetinin iyi olması ve geleneksel birleştirme yöntemlerinden daha kolay ve kalitesi olması avantajları olarak sıralanabilir. Yapıştırma bağlantılarının dezavantajları ise; soyulma ve darbe mukavemetinin düşük olması, bağlantının nem ve kimyasal ortam gibi çevresel faktörlere bağlı olması, yüzey hazırlığı ve temizliği gerektirmesi ve bağlantının serbest uçlarında gerilme yığılmasının oluşmasıdır (Edwards 1998).

Katkısız yapısal yapıştırıcılarla birleştirilmiş tek veya çift tesirli bağlantı geometrileri basit olduğu ve kolayca üretilebildiği için geniş bir şekilde deneysel ve nümerik olarak analiz edilmiştir (Gültekin 2014).

Volkersen (1938) tarafından yapılan bir çalışmada, yapıştırıcı tabakasındaki kayma gerilmesi dağılımı analiz edilmiştir. Analizler sonucunda kayma gerilmesinin bindirme bölgesinin serbest uçlarında en yüksek değerde olduğunu ve bu bölgede eğilme

momentinin yapıştırma bağlantısının mukavemeti üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu ifade etmiştir.

He (2011) yaptığı üç boyutlu sonlu elemanlar analizinde bağlantının serbest uçlarında yüksek gerilmeler oluştuğunu, yapıştırma bölgesinin orta kısmında gerilmelerin daha az bir değerde olduğunu ifade etmiştir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalar incelendiğinde ve literatür araştırıldığında (Goland *et al.* 1944; Sayman 2012; Sayman *et al.* 2013) normal ve kayma gerilmelerin yapışma bölgesinin orta kısımları boyunca sabit, uçlarında ise yüksek bir değerde olduğu görülmektedir.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda yapışma bölgesinin serbest uçlarında oluşan gerilme yığılmasını ve soyulma gerilmelerini (peel stres) azaltmak hasarı önlemek için büyük önem taşımaktadır. Bahsedilen bu gerilmelerinin etkisini azaltarak, bağlantının dayanımını artırmak için birçok yöntem bulunmaktadır.

Bağlantının serbest uçlarına yapıştırıcı ile dolgu yapmak, serbest uçlarda oluşan gerilme yığılmalarını azaltarak bağlantının dayanımını artırmaktadır (Tsai 2000; Marques 2008; He 2011; Yang *et al.* 2011; Zhao *et al.* 2011; Akpınar *et al.* 2013a; Doru *et al.* 2014). Tsai (2000) yaptığı bir çalışmada, tek tesirli tabakalı kompozit bağlantılarda deneysel ve nümerik olarak dolgu yöntemini incelemiştir. Çalışma sonucunda, bindirme bölgesinin serbest uçlarında oluşan kayma ve soyulma gerilmelerinin dolgu yöntemiyle önemli miktarda azaldığını ifade etmiştir.

Doru *et al.* (2014) tarafından yapılan bir çalışmada ise deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi (S.E.Y.) ile dört farklı dolgu tipi incelenmiş ve dolgu kullanımının soyulma gerilmelerinin etkisini azaltarak, bağlantının yük taşıma kapasitesini artırdığı ifade edilmiştir.

Yapıştırma bağlantılarında soyulma gerilmelerininin etkisini azaltarak bağlantının mukavemetini artırmak için kullanılan bir diğer yöntem ise ikili yapıştırıcı (bi-adhesive, mixed adhesive) kullanmaktır (Pires *et al.* 2003; Fitton *et al.* 2005; Temiz 2006; Bouiadjra *et al.* 2007; Marques *et al.* 2015; Silva *et al.* 2016). Temiz (2006) tarafından yapılan çalışmada, yapışma bölgesinin serbest uçlarına esnek, orta kısmında ise sert özellikli yapıştırıcı kullanarak oluşturduğu tek tesirli bağlantı geometirisine sonlu elemanlar yöntemiyle gerilme analizi yapmıştır. Uç kısımlara esnek karakterli yapıştırıcı kullanımı, yükü bindirme bölgesinin orta kısmına transfer ederek gerilme yığılmalarını azaltarak, bağlantının mukavemetini artırmıştır.

Artık gerilme kullanımıyla da soyulma gerilmelerinin etkisi azaltılmaktadır (Temiz *et al.* 2013; Akpinar 2013b). Temiz *et al.* (2013) tarafından yapılan bir çalışmada, yapışma bölgesi kavislendirilmiş tek tesirli bağlantı numuneleri üretilerek, kürleşme esnasında basınç uygulanarak bağlantının düzleşmesi sağlanmıştır. Kürleşme işlemi sonrası kavislendirilmiş numune eski haline gelmek için yapışma bölgesinin serbest uçlarında bası artık gerilmesi oluşturarak, soyulma gerilmesinin etkisini azaltmış ve yük taşıma kapasitesini artırmıştır.

Uygulamalı ve temel bilimlerde meydana gelen gelişmeler, hızlı bir şekilde günümüz bilim ve teknolojisini etkilemekte ve farklı disiplinlerde kendilerine yer bulmaktadırlar. Temel bilimlerde elde edilen yenilikler, hali hazırda kullanılan tasarımların ve ürünlerin performansının arttırılması konusunda farklı fikirlerin doğmasına sebep olmuştur. Bu durumda, özellikle son on yılda nanobilim ve nanoteknolojide ortaya çıkan ve hızla gelişen bulgular, birçok disiplini etkilediği gibi malzeme ve mekanik bilimlerini de önemli derecede etkilemiştir.

Nanoteknoloji ifadesi; faydalı ürünler üretmeye ve yeni ürünler tasarlamaya yarayan bilgiler bütünüdür (Ayhan 2002). Başka bir ifadeyle nanoteknoloji, maddenin atomik boyutta yeni özelliklerinin belirlenmesi; nanometre boyutunda fiziksel ve kimyasal olayların anlaşılması, fonksiyonel malzemelerin ve cihazların geliştirilmesidir (Kut 2005).

Modern mühendislik sorunlarına yeni bir bakış açısı getiren nanoteknoloji, geleneksel malzemeleri yeni nano malzemelere bırakarak her alanda yerini almıştır. Günümüzde kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini geliştirmek için liflerin takviye malzemesi olarak kullanımının yerine, matris malzemesi içerisine nano boyutta partiküller katılarak çalışmaların yoğunlaştığı görülmektedir. İçerisinde nanopartikül içeren polimerler, nanokompozit malzemeler olarak yer bulmuş ve bu gelişmenin kompozit malzemelere uyarlanması verimli sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Bu yeni kompozit teknolojisi elektronik, uzay, otomotiv ve yenilenebilir enerji uygulamalarında gelecek vadetmektedir (Singh *et al.* 2011).

Bekyarova *et al.* (2007) tarafından yapılan bir çalışmada, epoksi reçine içerisine elektroforez yöntemiyle tek ve çok katmanlı karbon nanotüplerin eklenmesiyle karbon kumaş takviyeli nanokompozit malzemeler üretmişlerdir. Yapılan testler sonucunda nanokompozit malzemenin tabakalar arası kayma mukavemeti, karbon nanotüp katkısız kompozit malzemeye kıyasla % 30 daha yüksek değerde olduğu görülmüştür.

Yue *et al.* (2014) tarafından yapılan bir çalışmada epoksi matris içerisine farklı oranlarda karbon nanotüp ve grafen nanoplaka eklenerek elde edilen hibrit kompozit malzemelerin mekanik ve elektiriksel özelliklerini incelemişlerdir. Karbon nanotüp ve grafen nanoplakaların 8:2 oranında eklenmesiyle en iyi sonucun elde edildiğini ve bu oranda eğilme riijitliğinin artarak, elektriksel sızmanın azaldığını ifade etmişlerdir.

Tsai *et al.* (2010) tarafından yapılan bir çalışmada; ağırlıkça beş farklı oranda (%5, %10, %15, %20 ve %40) küresel silis nanopartiküller sol-jel tekniğiyle epoksi matris içine eklenerek kompozit malzemeler üretilmiştir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde kompozit malzemelerin elastisite modülünün partikül takviyesiyle arttığı ifade edilmiştir.

Liu *et al.* (2012) yaptıkları bir çalışmada; yeni bir yöntem ile grafen oksit (GO) katkılı nanokompozit malzemeler üreterek, üretilen nanokompozitlere eğme, darbe, termogravimetrik analiz ve dinamik mekanik testleri uygulamışlardır. Epoksi reçine

içerisine kütlece %1 oranında grafen oksit katkısının, kompozitin mukavemetini ve darbe dayanımı arttırdığını ifade etmişlerdir.

Soliman *et al.* (2012) epoksi reçine içerisine ağırlıkça %0,5, %1 ve %1,5 oranında karboksil gruplarıyla fonksiyonelleştirilmiş katmanlı karbon nanotüp (MWCNT) ekleyerek, polimer kompozitler üretmiş, çekme ve kayma (in-plane shear) özelliklerini belirlemişlerdir. Epoksi içerisine %1,5 oranında karbon nanotüp ilavesiyle elde edilen kompozit malzemenin şekil değiştirmesi %39, maksimum gerilmesi %51 ve tokluğu %121 oranında arttığı ifade edilmiştir.

Yang *et al.* (2013a) ekstrüzyon yöntemi kullanarak karbon fiber ve grafen tabaka katkılı kompozit malzemeler üreterek, mekanik ve termal özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan analizler sonucunda kompozitin mekanik ve termal özelliklerinde önemli miktarda artış ve iyileşme olduğu rapor edilmiştir.

Wan *et al.* (2014) tarafından yürütülen bir çalışmada, grafen oksit (GO) ve silan ile fonksiyonelleştirilmiş (silane-f-GO) grafen oksit katkılı epoksi kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerini incelemişlerdir. SEM ve TEM analizleri sonucunda, silan ile fonksiyonize edilmiş GO katkısı epoksi matris içerisinde daha homejen bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Ayrıca silan ilavesiyle kompozitin çekme ve eğilme rijitliği artmış, camsı geçiş sıcaklığı ve termal bozunması azalmıştır.

Abdullah and Ansari (2015), epoksi reçinenin içerisine hacimce %1,5-%6 oranında grafen oksit katarak döküm yöntemiyle kompozit malzemeler üretmiş ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Üretilen nanokompozitin elastisite modülü ve çekme dayanımında önemli miktarda artış sağlandığını ancak darbe mukavetinin düştüğünü ifade etmişlerdir.

Kwon *et al.* (2017) alüminyum alaşımı (AlMg5) matris içerisine grafen oksit katıp, toz metalurjisi yöntemiyle kompozit malzeme üretmişlerdir. Üretilen kompozitler, katkısız

kompozitlerle mukayese edildiğinde çekme dayanımı, uzaması ve eğilme rijitliğinin önemli derecede arttığını belirtmişlerdir.

Moghanian *et al.* (2017) tarafından yapılan bir çalışmada, titanyum oksit partikülleri bakır matris içerisine eklenerek elde edilen kompozitlerin mekanik ve fiziksel özellikleri araştırılmıştır. Matris içerisine titanyum oksit eklenmesi sertlik, aşınma oranı ve elektrik direncini azaltmıştır.

Yukarıda belirtilen ve literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, nano boyutta karbon yapılar ve farklı katkı maddelerinin epoksi reçine içerisine eklenmesiyle elde edilen üstün nitelikli nanokompozit malzemeler, yapıştırıcı alanına da yeni bir bakış açısı kazandırmıştır.

Literatür araştırıldığında geleneksel katkı maddeleri ile güçlendirilmiş yapıştırma bağlantılarına rastlanılmakla birlikte, grafen benzeri karbon nanopartiküllerle güçlendirilmiş yapıştırıcı ve yapıştırma bağlantılarının pek yaygınlaşmadığı görülmüştür. C60 fulleren ve karbon nanotüp katkılı yapıştırıcı çalışmalarının yanı sıra, grafen katkılı nano yapıştırıcılar da incelenmiştir (Ogasawaraa *et al.* 2009; Rafiee *et al.* 2009; Avila *et al.* 2012; Siddiqui *et al.* 2011; Zaman *et al.* 2011).

Nanopartikül katkılı yapıştırıcıların hazırlanmasında ve uygulanmasındaki en önemli husus, partiküllerin yapıştırıcı içerisinde homojen bir şekilde dağılarak, birbirleri arasında topaklanma (agregasyon) yapmasının önlenmesidir. Bu nedenle, nanopartikül katkılı bulk numunelerin hazırlanması ile ilgili literatür araştırıldığında, birçok farklı yönteme raslanmıştır (Hsiao *et al.* 2003; Zhai *et al.* 2006; May *et al.* 2010; Gkikas *et al.* 2012; Neto *et al.* 2013).

Literatürde, yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda, farklı yöntemler ile yapıştırıcı içerisine nanopartikül eklenen araştırmalar aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

May *et al.* (2010) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı yapıştırıcılara sol-gel yöntemiyle çok duvarlı karbon nanotüp (MWKNT) ve alüminyum oksit eklenerek elde edilen yapıştırma bağlantılarının, kayma ve çeki dayanımları belirlenmiştir. Yapılan çalışmada; yapıştırıcıya eklenen nanopartikül; alüminyum alaşımı kullanılarak elde edilen bağlantının kayma dayanımını %140, orta sertlikte çelik kullanılarak elde edilen bağlantının kayma dayanımını ise %150 oranında artırmıştır.

Burkholder *et al.* (2011) tarafından yapılan bir çalışmada, çelik-kompozit ve kompozitkompozit yapıştırma bağlantısı uygulamalarında epoksi yapıştırıcıda karbon nanotüp katkısı kullanımı incelenmiştir. Ayrıca çeşitli KNT katkılarının Mod II kırılma dayanımını nasıl etkilediği ve bağlantı dayanımını yüksek derecede etkileyen nano partiküllerin homojen olarak dağıtılmasının nasıl işlevselleştirilebileceği üzerinde durulmuştur. Yapıştırıcıda kullanılacak sertleştiricinin amin temelli olması sebebiyle, nanotüplerin yapıştırıcıda daha daha iyi dağılmasını sağlamak amacıyla bir karboksil grup (COOH) eklenerek daha işlevsel hale getirilmiştir. Yapılan deneyler ve analizler sonucunda, bütün numunelerde karbon nanotüplerin yapıştırıcıdaki dağılımının, kırılma özelliklerine etki ettiği görülmüştür. Nanotüp katkısı bağlantıyı güçlendirse de zayıflatsa da; nanotüplerin karboksil ile işlevselleştirilmesi, dispersiyonu, yapısı, uzunluğu ve çapının önemli rol oynadığı ifade edilmiştir. Yapılan testler sonucunda; optimum nanotüp katkısının %1 oranı civarında olması gerektiği ifade edilmiş olup, numunelerdeki standart sapmanın yaklaşık %10 ile %20 arasında olduğu görülmüştür.

Literatürde incelendiğinde, yapıştırıcı içerisine nanopartikül ekleme yöntemlerinden biri olan yüksek hız kayma mikseri (High shear mixer) yöntemi ile yapıştırıcı içerisine nanoyapı ilave edilen çalışmalar bulunmaktadır. Gkikas *et al.* (2012) tarafından yürütülen bir çalışma incelendiğinde, yüksek hız kayma mikseri yöntemi ile yapıştırıcı içerisine %0,5 ve %1 oranında çok duvarlı karbon nanotüp (MWKNT) ilave edilerek 2250 devirde 2 saat karıştırılmıştır. Hazırlanan yapıştırıcı ile bağlantı numuneleri üretilmiştir. Çalışmada, nanopartikül katkılı yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantının kayma gerilmelerinde artışın yaklaşık %5 ile %10 arasında olduğu ifade edilmiştir.

Neto *et al.* (2013) tarafından yapılan bir çalışmada ise yapıştırıcı içerisine %1 ve %2 oranında grafen katılarak tam bir dağılım elde edilene kadar yüksek hız kayma mikseri ile 2 saat karıştırılmıştır. Üretilen partikül katkılı yapıştırıcı ile karbon fiber kompozitler yapıştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda grafen katkısıyla birlikte bağlantının hasar yükünde artış görülmüştür. %1 grafen katkısı hasar yükünü %21, %2 grafen katkısı ise hasar yükünü %57 oranında arttırmıştır. Çalışmanın sonuçları incelendiğinde, standart sapmanın yaklaşık %11-25 arasında olduğu anlaşılmaktadır.

Yapıştırıcı içerisine nanopartikül ilave etme yöntemlerinden bir diğeri ise, üç merdaneli hadde (three-roll mill) yöntemidir. Park *et al.* (2009) tarafından yürütülen bir çalışmada, üç merdaneli hadde yöntemi ile yapıştırıcı içerisine %1,5 oranında karbon tozu ilave edilerek çift tesirli bağlantı numuneleri üretilmiştir. Çalışmada bağlantının kayma mukavemetinde yaklaşık %48 çeki mukavemetinde ise yaklaşık %22 oranında artış gözlemlenmiştir.

Srivastava (2011), yapıştırılan malzeme olarak karbon/karbon ve karbon/karbonsilisyum karbür kompozit malzemeler, yapıştırıcı olarak ise %3 oranında çok duvarlı karbon nanotüp (MWKNT) katkılı yapıştırıcı kullanarak elde ettiği yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlanlantısının kayma özelliklerini incelemiştir. Yapılan bu çalışmanın sonucunda, karbon nanotüp katkısı epoksi reçinenin sertlik ve dayanımını arttırmıştır. Bunun sonucunda ise, yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların kayma deformasyonu ve çatlak oluşumuna karşı direncini artmıştır.

Kang *et al.* (2014), üç merdaneli hadde yöntemiyle ağırlıkça %2 oranında karbon nanotüp katkılı yapıştırıcı üreterek, kompozit-alüminyum tek tesirli bindirme bağlantısının statik ve dinamik dayanımı incelenmiştir. %2 oranında karbon nanotüp katkılı yapıştırıcıyla elde edilen bağlantıların, katkısız bağlantılara göre çeki hasar yükünde yaklaşık % 36 oranında azalma meydna geldiği görülmüştür. Hasar yükünde meydana gelen azalmanın nedeni olarak, karbon nanotüpün kompozit ve yapıştırıcı arasındaki tutunma kuvvetini azalttığı olarak ifade edilmiştir. Nanopartikül katkılı ve katkısız yapıştırıcılarla üretilen bağlantı numunelerinin yorulma dayanımı incelendiğinde ise, %2 karbon nanotüp katkılı yapıştırıcı katkısız olana göre %12,8 daha fazla dayanıklı olduğu görülmüştür. Karbon nanotüp katkılı yapıştırıcıyla hazırlanan numunelerin yorulma dayanımının neden arttığını tespit etmek amacıyla yapıştırma bağlantısının çatlak başlangıcı ve yayılımı CCD kamera yardımıyla ölçülmüştür. Sonuç olarak; karbon nanotüp katkılı numunelerin yorulma dayanımının artmasına, karbon nanotüpün çatlak bağlangıç ve ilerleme süresini uzatmasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir.

Hsiao *et al.* (2003) tarafından yürütlen bir çalışmada, %1 ve %5 oranlarında çok duvarlı karbon nanotüp partiküllerini epoksi yapıştırıcı içerisine eklenerek yapıştırıcı üretilmiştir. Üretilen güçlendirilmiş nano yapıştırıcıyla, tek tesirli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde; %1 oranında çok duvarlı karbon nanotüp katkısıyla hazırlanan yapıştırıcıların %31,2, %5 oranında katkının ise %45,6 oranında kayma dayanımını artırdığı görülmüştür.

Zhang *et al.* (2012) 3-aminpropyltriethoxysilane ile fonksiyonize edilmiş çok duvarlı karbon nanotüp kullanarak, yapıştırıcının mukavemet ve rijitliğini artırmış ve karbon/karbon kompozit bağlantıların mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yapıştırıcı içerisine ağırlıkça %0,2 oranında MWKNT katkısı ortalama kayma mukavemetini %31 oranında artırmıştır.

Guadagno *et al.* (2015) tarafından yürütülen bir çalışmada; ağırlıkça %,0,5, %1 ve %4 oranında karakterize edilmiş grafen katkılı nanokompozit yapıştırıcılar üretilerek, yapıştırma bağlantıların mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan bu çalışmanın sonucuna göre, yapıştırıcı içerisine ağırlıkça %1 oranında grafen katkısının mekanik özellikleri artırdığı görülürken, %4 oranında grafen katkısının önemli bir etki yaratmadığı ifade edilmiştir.

Sadigh and Marami (2016), yapıştırıcı içerisine %0,5 oranında indirgenmiş grafen oksit (RGO) nanopartikülü ekleyerek, tek tesirli bindirme bağlantısı ve bulk numuneler üreterek, numunelerin mekanik ve termal özellikleri üzerine araştırma yapmışlardır. Üç

farklı çekme hızında (0,005, 0,02 ve 0,05) numuneler test edilmiş olup, ağırlıkça %0,5 oranında RGO kullanımı bulk numunelerin çeki ve bası özelliklerini artırmıştır. Ayrıca çekme hızının artmasıyla, numunelerin mukavemetinde önemli oranda artış sağlandığını ifade etmişlerdir.

Marami *et al.* (2016) tarafından yapılan başka bir çalışmada, farklı oranlarda (%0,25, %0,5 ve %1) RGO katkısının etkisi incelenmiştir. Yapıştırıcı içerisine %0,5 oranında RGO nanopartikül katkısının çekme dayanımını %30 oranında artırırken, kayma mukavemetini %27 oranında artırdığı ifade edilmiştir. Cohesive zone model ile (CZM) yapılan nümerik analizlerle deneyler doğrulanmış ve sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Akpınar *et al.* (2017a) yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların hasar yükünü artırmak için yapıştırıcıya üç farklı oranda (%0,5, %1, %2 ve %3) grafen-COOH, karbon nanotüp-COOH ve fulleren nanopartikülleri ilave ederek yapıştırıcılar üretmişlerdir. Elde edilen nanokompozit yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli bağlantı numunelerinin hasar yükleri deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, hasar yükündeki artış oranı yapıştırıcının özelliğine, nanopartikülün türüne ve ağırlıkça katkı oranına bağlı olarak değiştiği ifade edilmiştir ve nanoyapı katkı oranın %1 olarak kullanılması en iyi sonucu verdiği belirtilmiştir.

Yapıştırıcıyla birleştirimiş bağlantılarda, yapıştırıcı içerisine karbon nano yapıların ilave edilmesi bağlantının mekanik özelliklerini etkilediği gibi, yapıştırıcıya farklı nano yapıların (nano kil, nano Al₂O₃, nano CaCO₃, nano SiO₂ vs.) ilave edilmesi de bağlantının mekanik özelliklerini etkilediği görülmektedir.

Zhai *et al.* (2006), yapıştırıcı içerisine nano partikül olarak 80 nm çapında Al₂O₃, 40-80 nm çapında CaCO₃, 10-20 nm çapında SiO₂ katılmasıyla elde edilen yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerini ve yüzey pürüzlülüğünün etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada, %2 Al₂O₃ katkılı bağlantıların katkısız bağlantılara göre; 150'lik zımpara ile zımparalama işlemi yapıldığında 5 katına kadar, 60'lık zımpara ile

yapıldığında ise 2 katına kadar bağlantı mukavemetinde artış sağladığı görülmüştür. Kaba yüzeylerin etkileşim alanını artırarak yapışma dayanımını arttıracağı göz önüne alınırsa, Al₂O₃ nano partiküllerinin benzer bir etkiye sebebiyet verdiği düşünülmüştür. Diğer taraftan, yapıştırıcı içerisine 80 nm çapında Al₂O₃, 40-80 nm çapında CaCO₃, 10-20 nm çapında SiO₂ nanoyapı ilave edilerek elde edilen yapıştırma bağlantılarında, nanoyapı bağlantı dayanımında oldukça büyük bir artış sağlamıştır. Bağlantı dayanımında en iyi sonucun yapıştırıcı içerisine Al₂O₃ nanoyapı ilave edilmesiyle elde edilen bağlantılarda oluştuğu ifade edilmiştir (Zhai *et al.* 2007).

Duduik *et al.* (2006) poliüretan termoset yapıştırıcı içerisine ağırlıkça üç farklı oranda (%1, %3 ve %5) fonksiyonize edilmiş üç farklı nanokil kullanarak ürettikleri yapıştırıcıların, mekanik ve kimyasal özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan analizler ve deneyler sonucunda; termo mekanik ve yapışma özelliklerinin nano kildeki fonksiyonel gruplara ve nanokilin konsantrasyona bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Kayma mukavemetinin modifiye edilme şekline bağlı olarak (hydroxyl, aminosilane ve hyperbranched) sırasıyla %170, %160 and 195% arttığı görülmüştür. Ayrıca yapıştırıcı içerisine üç farklı oranda nanokil katkısı, cam geçiş sıcaklığını önemli derecede artırmıştır.

Tüzün and Tunalıoğlu (2015), beş farklı çapta kalsiyum karbonatın (calcite) iki farklı yapıştırıcı üzerine etkisini araştırmak amacıyla, kayma ve soyulma testleri gerçekleştirmişlerdir. Eklenen kalsitin çapı azaldıkça, en yüksek soyulma ve kayma gerilmesi değerlerinin elde edildiğini ifade etmişlerdir.

Sancaktar and Kumar (2000), epoksi yapıştırıcının içerisine karboksil vinil siyanür bütadin kauçuk ilave ederek elde edilen farklı yapışma bölgesine sahip tek tesirli bindirme bağlantıları üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışma sonucunda; yapıştırıcı içerisine kauçuk ilave edilmesi, bağlantının yük taşıma kapasitesini önemli derecede artırdığı ifade edilmiştir.

Ayatollahi *et al.* (2016), %0,2, %0,5 ve %0,8 oranında silika nanopartikülleri ve çok duvarlı karbon nanotüp partiküllerinin yapıştırma bağlantıları üzerine etkisini incelemek için, nanokompozit yapıştırıcılarla bağlantı numuneleri üretmişlerdir. Ağırlıkça %0,8 oranında nanopartkül katkısının kayma mukavemetini artırdığı ifade etmişlerdir.

Khashaba *et al.* (2015) deneysel ve nümerik olarak yaptığı bir çalışmada; 5[°] ve 10[°] açılı kompozit bağlantıların yapıştırılması amacıyla, SiC and Al₂O₃ nanopartikül katkılı epoksi yapıştırıcılar üreterek, farklı sıcaklık (23 °C, 50 °C, 75 °C ve 100 °C) ve nem şartları altında mekanik özelliklerini incelemişlerdir. 5 derece açılı kompozit bağlantının mukavemeti; SiC katkısıyla %41,2 oranında artarken, Al₂O₃ katkısının etkisiyle %22,5 oranında artmıştır. 10 derece açılı kompozit bağlantının mukavemeti ise; SiC katkısıyla %8,4 oranında artarken, Al₂O₃ katkısının etkisiyle %26,5 oranında artmıştır.

Akpınar (2016) tarafından yapılan bir çalışmada; farklı özelliklerdeki epoksi yapıştırıcılar içerisine alüminyum oksit ve titanyum dioksit katılarak elde edilen yapıştırma bağlantılarının mekanik özellikleri, çekme yükü altında deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde; nanopartikül katkılı yapıştırıcıların kullanılmasıyla elde edilen bağlantılarda; hasar yükü ve yer değiştirme kapasitelerinde artış olduğunu ifade etmiştir.

Akpınar *et al.* (2017b); farklı karakterdeki (güçlendirilmiş, yumuşak, macun tipi ve sert) yapıştırıcılar içerisine, farklı özelliklerde ve farklı oranlarda nano kil katılarak elde edilen tek tesirli bindirme bağlantıları ve bulk numunelerin mekanik özellikleri üzerine yaptıkları deneysel çalışmada; hem yapıştırıcının güçlendirilmiş, yumuşak, macun veya sert olması, hemde yapıştırıcıya ilave edilen killerin farklı olması bağlantının hasar yükünü önemli derecede etkilediği ifade edilmiştir. Ayrıca yapıştırıcıya ilave edilen kil oranının artması veya azalması bağlantının hasar yükünü etkilemekte olup, en iyi sonucun %1 katkı oranında olduğu görülmüştür.

Bu tezin amacı, yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerini geliştirmek için farklı karakterdeki (sert, yumuşak, güçlendirilmiş) yapıştırıcılara, yeni

bir yöntemle, farklı oranlarda (%0,5, %1 ve %2) karbon nanopartiküller (Grafen-COOH, Karbon Nanotüp-COOH ve Fulleren) ilave ederek elde edilen nanokompozit yapıştırıcıların, mekanik ve kimyasal özelliklerini deneysel olarak incelemektir. Bu amaçla, yapıştırıcı içerisine nanopartikül katkı oranı ve farklı nanopartiküllerin etkisini incelemek için; üretilen nanokompozit yapıştırıcılar kullanılarak tek ve çift tesirli aluminyum ve tek tesirli kompozit bağlantı numuneleri üretilmiş, çekme ve eğilme yükü altında mekanik özellikleri belirlenmiştir.

Deneylerden elde edilen sonuçlar incelenip değerlendirildiğinde; geliştirilen yeni karıştırma yönteminin, bağlantının güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini iyileştirerek standart sapmayı minimize ettiği görülmüştür. Ayrıca, yapıştırıcıya nanopartikül ilave edilerek elde edilen yapıştırıcıların, bağlantının hasar yükünü artırdığı görülmüştür. Ancak hasar yükündeki artış oranının, yapıştırıcının yapısal özelliğine, nanopartikülün türüne ve katkı oranına bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Yapışma

Yapıştırıcı, aynı ya da farklı malzemeleri bir arada tutan madde olarak tanımlanmaktadır. Yapışma olayı ise yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemenin arasında iyonlar, moleküller ve atomlar arası etkileşimden kaynaklanan adhezyon ve kohezyon kuvvetleriyle bir arada tutturulması olarak tanımlanmaktadır (Kinloch 1987, Gültekin 2014). Yapıştırıcı ile yapıştırılacak malzeme birbirleriyle temas edince yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantı sistemi doğar. Bu bağlantı sistemininin doğasını daha iyi anlayabilmek için adhezyon ve kohezyon kuvvetlerini daha iyi anlamak gereklidir.

Adhezyon, farklı iki madde arasında var olan ve bu iki maddenin birbirine yapışmasını sağlayan çekim kuvvetidir. Van der Waals kuvvetleri olarakta bilinen çekim ve yüzeye tutunma kuvvetleri yapışma işleminde en önemli ve temel faktördür. Moleküller arasındaki kuvvetlerin güçlü olabilmesi için, yapıştırıcının malzeme yüzeyindeki pürüzlere nüfuz ederek temas etmesi gerekmektedir. Diğer bir ifadeyle yapıştırıcının bütün yüzeyi ıslatması gereklidir.

Kohezyon, yapıştırıcı molekülleri arasında bulunan ve yapıştırıcıyı bir arada tutmayı sağlayan molekül çekim kuvvettir. Moleküller arası çekim kuvveti olarak adlandırılan Van der Waals kuvvetleri ve polimer moleküllerinin kendi aralarında tutunmasını sağlayan kovalent bağ kuvvetleri kohezyona etki etmektedir. Yapıştırma işleminde adhezyon ve kohezyon kuvvetleri birbirine eşit olmalıdır. Kohezyon kuvveti ne kadar yüksek olursa, yapıştırıcının mukavemetide o kadar yüksek olur (Jacobs 1996; Yang *et al.* 2013b, Gültekin 2014). Şekil 2.1'de yapıştırma alanında meydana gelen adhezyon ve kohezyon kuvvetleri (Loctite Handbook 1998; Gültekin 2014).



Şekil 2.1. Yapıştırma bölgesinde adhezyon ve kohezyon kuvvetleri (Loctite Handbook 1998)

2.2. Yapışma Teorileri

Bugüne kadar yapışma olayını açıklamak için bilim adamları tarafından birçok teori ortaya konulmuştur. Ortaya konulan bu teorilerin hiç birisi tek başına yapışma olayını bütün yönleriyle izah edemez. Bu kısımda, bu teorilerden önemli olanlarından bahsedilecektir.

2.2.1. Mekanik yapışma teorisi

Mekanik yapışma teorisi; yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcının mekanik olarak birbirine tutunması ile yapışmanın olacağını ifade eder. McBain and Hopkins (1920) tarafından ortaya atılan bu teoride, yüzey üzerine sıvı yapıştırıcı uygulandığı zaman, yapıştırıcının gözeneklere girerek mekanik tutunma olacağını ve dolayısıyla iyi bir yapışma meydana geleceğini ifade etmiştir (Packham 2003). Yapıştırılacak malzeme yüzeyine, yüzey işlemi uygulayarak pürüzlendirmek ve yüzeydeki kirleri temizlenmesi sayesinde yapışma alanını artırarak yapıştırıcının yüzeye daha iyi yayıldığı ve ıslatma sağladığı görülmüştür (Jennings 1972). Ayrıca Mittal (1976) tarafından yapılan bir çalışmada ve benzeri çalışmalarda, pürüzsüz malzeme yüzeyleri kullanılarak iyi bir tutunma ve yapışmanın sağlanacağı ifade edilmiştir.

2.2.2. Difüzyon teorisi

Rus bilim adamı Voyutskii (1963) tarafından ortaya atılan bu teori mekanik tutunma teorisine benzer. Bu teori, iki faz arasında molekül alışverişini kabul ederek yapışmanın polimer zincirlerinin birbirleri içine dağılmasıyla (difuze olmasıyla) olacağını ifade eder. Bu teori sıklıkla benzer polimerler arasında gerçekleşir, polimer ve metal ara yüzeylerinde nadiren görülebilen bir durumdur (Aydın 2003; da Silva *et al.* 2011).

2.2.3. Adsorpsiyon (Yüzeye tutunma) teorisi

İki yüzey birbiriyle temas halinde ise, onları bir arada tutan kuvvetler olacaktır. Yüzeye tutunma teorisi; iki yüzeyin molekülleri arasıdaki Van der Walls kuvvetlerinin birbiriyle çekimiyle oluştuğunu ifade eder. Bu teori, yapıştırıcı alanında en fazla kabul edilen uygulanabilir bir teoridir. Yapıştırılacak malzeme ile yapıştırıcı arasında iyi bir temas sağlanması durumunda, ara yüzeyde moleküller ve atomlar arası kuvvetlerin oluşması neticesinde, yapışmanın meydana geldiğini ileri sürmektedir. Bu teoride, ara yüzeyde moydana gelen kuvvetler, yüksek (60–1050 KJ/mol) bağ enerjisine sahip (birincil kuvvet) ve düşük (0,08–40 KJ/mol) bağ enerjisine sahip (ikincil) olmak üzere iki kategoride gruplandırılmıştır. Bağlantı dayanımının deneysel ve teorik değerleri arasındaki farkın ve bağlantı dayanımının bu kadar yüksek değere sahip olmasının sebebi ikincil bağ kuvvetleridir (Kinloch 1987).

2.2.4. Elektrostatik teori

Elektrostatik teori, 1948 yılında Deryagin ve Krotova tarafından ortaya atılmıştır. Bu teoriye göre, çekim kuvvetinin farklı iki malzeme birbiriyle temas etmesi durumunda her zaman bir potansiyel fark oluşur ve oluşan elektrostatik kuvvet neticesinde yapışma meydana gelir. Elektrostatik kuvvetler, van der Waals kuvvetlerinin yanında çok küçüktür (Aydın 2003; da Silva *et al*.2011; Akpınar 2012). Dolayısıyla bu teori uygulanabilir bir teori değildir.

2.2.5. Zayıf sınır tabaka teorisi

Bu teori, yüzeyler arasında yağ, pas ve gres gibi kirler olduğunda sınır tabakaların oluşarak yapışma işleminin zayıflayacağını söylemektedir. Dolayısıyla bu teori temiz yüzeylerin yapıştırılmasında daha kuvvetli yapışma işlemi olacağını ifade eder. Temiz ve kuru malzeme yüzeyi, kuvvetli yapışma ve tutunma işleminin olmasına katkıda bulunur.

Yukarıda anlatılan bütün yapışma teorileri, yapışma olayının nasıl meydana geldiği hakkında bazı düşünceleri ifade etmektedir. Hali hazırda bu teoriler kullanılmakta olup, bu teorilerin hepsini kapsayan genel bir teori ortaya konulmamıştır.

2.3. Yapıştırıcıların Sınıflandırılması

Günümüzde kullanılan yapıştırıcılar; organik, inorganik veya karma formda farklı bileşenlerin karışımı şeklinde olup, yüzey teması ile malzemeleri bir arada tutarlar. Yapıştırılacak malzemenin türü, yapıştırıcının fiziksel özelliği, bağlantının mukavemet özellikleri ve çalışma şartları yapıştırıcıları sınıflandırmada rol oynayan en önemli faktörlerdir (Shields 1985). Günümüzde kullanılan yapıştırıcılar, kimyasal türleri ve formları açısından, iki temel ana grup şeklinde sınıflandırılmaktadır.

Yapısal yapıştırıcılar olarak bilinen kimyasal yapıştırıcılar, kimyasal reaksiyon ile sertleşerek çok güçlü bir yapışma sağlar. Aneorobikler, akrilikler, epoksiler, siyanoakrilatlar, silikonlar, fenolikler ve poliüretanlar sıkıkla kullanılan ve kimyasal reaksiyon ile sertleşen kimyasal yapıştırıcı türleridir (Aydın 2003; Temiz 2003).

Bu yapıştırıcılar dışında, daha düşük yapışma dayanımına sahip olan fiziksel değişim ile sertleşen (yapısal olmayan yapıştırıcılar) yapıştırıcılar da vardır. Sıcak eriyikler, ultraviyole ve kauçuk yapıştırıcılar, polivinil asetatlar yapısal olmayan yapıştırıcılar sınıfına girmektedir.

Yapıştırıcılar; sıvı, macun, film veya toz gibi çeşitli formlarda olabilirler. Kullanım yerine ve amacına bağlı olarak, farklı formlardaki yapıştırılar tercih edilmektedir. Formları açısından yapıştırıcılar; macun tipi, film tipi, düşük viskoziteli, düşük yoğunluklu yapıştırıcılar, reçineler ve köpükler olmak üzere sınıflandırılmaktadır.

2.4. Nanopartiküller ve Nanokompozit Yapıştırıcılar

Nanoteknolojinin ortaya çıkmasıyla birlikte, nanokompozit yapıştırıcılar havacılık, otomotiv ve medikal sektörlerindeki uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Yapıştırıcı içerisine nanopartikül eklenerek elde edilen nanokompozit yapıştırıcılar üzerine birçok çalışma yapılmış ve yapılan çalışmalar incelendiğinde; nanopartikül katkısının, yapıştırıcının fiziksel, kimyasal, mekanik ve termal özelliklerinde olumlu iyileşmeler yaptığı görülmüştür (Kim *et al.* 1999; Qian *et al.* 2000).

Nanopartikül, tanımı gereği çok küçüktür. Nanopartikül takviyeli polimerler için parçacıklar arası mesafenin, özellikle yüksek hacimlerde, çok küçük olduğuna dikkat edilmelidir. Bu mesafe, partikül ile etrafındaki yapılar veya partikül ile onu çevreleyen polimer arasındaki etkileşimi etkileyebilir ve polimerin yapısını değiştirebilir. Bu nedenle, partikül takviyeli modifiye polimerin özellikleri, nanopartiküllerin veya mikro-partiküllerin kullanılıp kullanılmadığına bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

Birçok nanopartikül ışığın dalga boyundan (yaklaşık 400-700 nm) daha küçük olduğu için, yarı saydam bir polimer üzerine ilave edildiğinde, yarı saydam görünürler. Bunun bir sonucu olarak, nanopartiküller optik mikroskop kullanılarak görüntülemek için çok küçüktürler. Ancak transmisyon elektron mikroskobu (TEM), atomik kuvvet mikroskobu (AFM) veya alan taramalı elektron mikroskobu (FEGSEM) gibi yüksek büyütme teknikleri ile görüntülenebilir. Nanopartiküllerin yapısı ayrıca X-ışını kırınımı veya diğer teknikler kullanılarak karakterize edilebilir (Wang 2001). Parçacıklar çok küçük olduğu için mekanik özelliklerini ölçmek mümkün değildir. Bu nedenle, mekanik özelliklerin bulk malzeme ile aynı veya benzer olduğu varsayılır.

Partikülün şekli ve en/boy oranı, nanopartikülle modifiye edilmiş malzemelerin mekanik özelliklerinin (sertlik, akış karakteristikleri, gerilme mukavemeti vb.) belirlenmesinde önemlidir. Partiküllerin toplanması ve homojen dağılması da önemlidir ve mekanik özellikleri etkiler. Nanopartiküller; eş eksenli (küresel), çubuk ve plaka benzeri gibi şekillerine göre sınıflandırılabilir.

2.4.1. Eş eksenli (Equi-Axed) nanopartiküller

Çoğu eş eksenli nanoparçacıklar küreseldir. Fakat düzensiz halde olan eş eksenli partiküller de mevcuttur. Genel olarak eş eksenli partiküller; metal (altın, gümüş), seramik (silika, alümina, titanyum) veya organik (kauçuk parçacıkları, fulleren) partiküllerdir. Seramik partiküller genel olarak olarak sol-jel veya alev püskürtme yöntemleriyle hazırlanır. Silika ve alümina nanopartikülleri yapıştırıcılarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Birkaç yıldır, yüzey modifiye edilmiş silika nanopartiküller, endüstriyel miktarlarda mevcuttur. Bu partiküller, epoksi reçineleri içinde 20 nm'lik bir parçacık boyutu dağılımı ile karakterize edilir (Şekil 2.2). Bu nanopartiküllerin boyutu şeffaf yapıda olduğu için, şeffaf kaplamaların çizilme direncinin arttırılmasında önemli bir uygulama sağlar. Ayrıca, klasik mineral dolguların yapılış biçiminde tortuya neden olmazlar. Bu işlevsel partiküller, viskozite artışı olmaksızın elastisite modülü, mukavemet, sertlik, basınç dayanımı gibi mekanik özellikleri artırmak için yapıştırıcılarda kullanılmaktadır. Ayrıca silika nanopartikülleri, yorulma özelliklerini önemli ölçüde geliştirir (Blackman *et al.* 2007; Deng *et al.* 2007). Kauçuk partiküller ise genel olarak, yumuşak bir çekirdek ve poli (metil metakrilat) gibi bir polimerin sert kabuğu olan çekirdek-kabuk parçacıklarıdır.



Şekil 2.2. Epoksi reçine içerisinde dağılmış nanosilika partiküllerinin TEM görüntüsü (da Silva *et al*.2011)

Katı karbonun üçüncü allotropu olarak Kroto *et al.* (1985) tarafından bulunan fullerenler (Buckyballs), Kratschmer (1990) tarafından geliştirilen grafit ark tekniği yöntemiyle hızla gelişen bir araştırma konusu haline gelmiştir.

Fulleren, Şekil 2.3a'da görüldüğü gibi, karbon atomlarının bir araya toplanarak futbol topuna benzer küresel kafes bir yapı oluşturmasıyla meydana gelirler (Shishevan 2015). Fullerenler üzerine bir çok çalışma yapılmış olmasına rağmen kafes yapısının nasıl oluştuğunu açıklayan bir mekanizma bulunmamaktadır. Ebbesen *et al.* (1992) tarafından önerilen mekanizmada, fullerenlerin grafitik tabakaların kıvrılmaları ile oluştukları ifade edilmiştir. Ancak daha sonra yapılan çalışmalar, fullerenlerin küçük karbon parçacıklarından oluştuğunu göstermiştir (Ebbesen *et al.* 1992).

Günümüzde üzerinde en çok araştırma yapılan fulleren molekülleri, C60 ve C70 molekülleridir. Bu moleküller arasında en kararlı yapıya sahip olanı C60 molekülüdür. C60 ve diğer fullerenler maliyetinin yüksek olmasından dolayı ticari uygulamalarda geniş bir şekilde yer almamaktadır. Yapıştırıcı içerisine fulleren ilavesiyle yapıştırıcıların ve yapıştırma bağlantılarının performanslarını iyileştirmeye yönelik bir çok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda, fulleren nanopartikülü katkısıyla
yapıştırıcının mekanik, termal özelliklerinin iyileşiği görülmüştür (Philips *et al.* 2007; Wieland *et al.* 2014; Akpinar *et al.* 2017a).



Şekil 2.3. Fulleren (C60) molekülünün genel, SEM ve AFM görüntüsü *a. Fulleren molekülü, b. SEM görüntüsü (Sutradhar and Patnaik 2017), c. AFM görüntüsü (Philips *et al.* 2007)

2.4.2. Nanotüp ve Nanofiberler

Nanotüpler, silindirlerden oluşan fulleren tipi yapılardır. Nano teknolojinin en önemli konularından biri olan karbon nanotüpler, önemli elektronik ve mekanik özelliklere sahip nano yapılardır. Karbon nanotüpler, ilk kez 1991 yılında Iijima tarafından keşfedilen yapılardır. Karbon nanotüpler, karbon atomlarının bal peteği şeklinde (hekzagonal yapı) oluşturduğu levhanın silindirik şekilde sarılması ile oluştuğu ifade edilmektedir (Örs 2009). İdeal karbon nanotüp, düzgün silindir yapmak için yuvarlatılmış hegzagonal karbon atom ağı olarak düşünülebilir.

Karbon nanotüplerin keşfi, bilim dünyasında büyük bir devrime neden olarak, araştırmacıları bu maddenin özelliklerinin belirlenmesi ve incelenmesi konusuna yönlendirmiştir.

İki temel karbon nanotüp türü vardır. Bunlardan ilki grafen tabakasının kıvrılmasıyla ucu kapalı ya da açık, yarı küresel 1-2 nm çapına sahip tek duvarlı (katmanlı) nanotüplerdir. Tek sıra karbon atomundan oluşan bir grafen katmanının, silindir şeklinde bükülerek uçlarının birleştirildiği ve grafen içerisindeki bağların aynısından oluşturulduğu düşünülürse; bu yapı tek duvarlı bir karbon nanotüple (SWKNT) aynı yapı olur. Bir tek duvarlı karbon nanotüp, yaklaşık olarak 0,4 nm çapında ve 100 nm uzunluktadır (Yetim 2011). SWKNT'ler genelde altıgen paketlenmiş kristal demetler halinde bulunurlar. Bu demetler birbirlerine van der Waals kuvvetleri ile tutunurlar. Tek duvarlı karbon nanotüpler, çok duvarlı tiplerine göre daha esnek yapıda olup, bükülebilir, düzleştirilebilir ve kırılmadan küçük daireler haline getirilebilir.



Şekil 2.4. Tek duvarlı (katmanlı) nanotüp a. Tek katmanlı karbon nanotüplerin katlanış şekillerine göre çeşitleri, b. TEM mikroskobunda SWKNT görüntüsü (Yetim 2011)

İkincisi, birçok eş eksenli uçları açık grafen tüplerinden oluşan, çok duvarlı karbon nanotüplerdir. Diğer bir ifade ile; ikiden fazla grafen çepere sahip nanotüplerdir. Çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWKNT) dış çapı genel olarak 3-10 nm arasındadır. Çok duvarlı karbon nanotüplerin her iki katmanı arasındaki mesafe yaklaşık olarak 0,34 nm kadardır. Gerilme altında iç tabakalar arasındaki wan der Waals kuvvetleri, yük taşımada çok zayıf oldukları için, çok duvarlı karbon nanotüplerin dış kısmı yükü taşır (Lau *et al.* 2004). Ayrıca yapılan araştırmalarda, komşu duvarlar arası etkileşim az olduğu için, duvarların birbirlerinden bağımsız dönme ve öteleme hareketleri yapabileceği ifade edilmektedir (Sun *et al.* 1996).



Şekil 2.5. Çok duvarlı (katmanlı) nanotüp a. Çok duvarlı karbon nanotüp, b. TEM mikroskobunda MWKNT görüntüsü (Yetim 2011)

Çok duvarlı karbon nanotüplerin çapları büyük olduğundan dolayı, tek duvarlılara göre daha az eğilirler. Ayrıca en büyük avantajlarından birisi üretimlerinin düşük maliyette olmasıdır (Örs 2009). Çizelge 2.1 incelendiğinde karban nanotüplerin elastisite modülü, doğada bulunan en yüksek değerde, yaklaşık 1 TPa civarında olduğu görülmektedir (Popov 2004). Ayrıca, yoğunlukları oldukça düşük olup, yüksek ergime sıcaklığına sahiplerdir.

Malzeme	Elastisite Modülü (GPa)
Elmas	1000
Silikon	107
Demir	196
Düşük Alaşımlı Çelik	200-207
Naylon	3-3,4
Silikon Karbür (SiC)	450
Karbon Nanotüpler	1000-1250

Cizelge 2.1. Bazı malzemelerin elastisite modülleri (Popov 2004)

Karbon nanotüpler, mekanik özelliklerinin yanısıra termal özellikleri ile de büyük ilgi görmektedirler. Nanotüplerin termal özellikleri, hem terorik hem de deneysel olarak incelenmiştir. Teorik çalışmalara göre, oda sıcaklığında ısısal iletkenlikleri grafit ve elmasınkinden daha büyüktür. Ölçümler oda sıcaklığında ısısal iletkenliğin SWKNT'lerde 200 W/mK'in üstünde, MWKNT'lerde ise 300 W/mK'in üstünde olduğunu göstermiştir (Hone 2004).

İlk olarak 1991 yılında Iijima tarafından keşfedilen karbon nanotüpler, kimyasal buhar birikimi (CVD), ark boşalım veya lazer aşındırma işlemleriyle üretilirler. Bu yöntemler ile farklı uzunluklarda, doğrusallık ve saflıklarda nanotüpler üretilmektedir (Harris 2009).

Ark boşalım (buharlaşma) yöntemiyle, labaratuvar imkânlarında kolaylıkla karbon nanotüpler üretilmekte ve geniş kullanım alanı olmasına rağmen, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında daha az saf yapıda nanotüpler oluşmaktadır. Bu yöntemle üretilen karbon nanotüplerden Fe, Ni, Co gibi katalitik metallerin ayrılması gerekmektedir. Bu yöntemde, karbon atomumun buharlaşıp plazma formuna dönüşmesi için, yüksek sıcaklığa (3000 ⁰C) ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yöntem, tek ve çok duvarlı nanotüplerin sentezinde kullanılmaktadır.

Kimyasal buhar biriktirme yöntemi, diğer yöntemlere göre daha düşük maliyette ve basittir. Karbon nanotüplerin ticari üretim amacı için kullanılmaktadır. Buhar biriktirme işleminin temeli, karbon oranı yüksek gazların (metan, etan, karbon monoksit ve asetilen) yüksek sıcaklıklarda metal katalizörleri aracılığıyla pirolizi ve açığa çıkan parçalanma ürünlerinin karbon nanotüpe dönüştürülmesine dayanaktadır (Kingston and Simard 2003; Ando *et al.* 2004). Bu proses iki aşamadan oluşmaktadır. İlk olarak katalizör yüzeyi hazırlanır. Gaz halindeki karbon, Ni, Fe veya Co gibi bir katalizörle kaplanmış malzemeye doğru hareket eder. İkinci kısımda ise nanotüpler kimyasal olarak veya ısıl işlem (tavlama) ile aşındırılmış yüzeyden elde edilir. Günümüzde sıklıkla kullanılmaya başlanan karbon nanotüpler, 1200°C sıcaklıkta karbon atomunun lazer aşındırma yöntemiyle elde edilmeye başlanmıştır (Örs 2009).

Karbon nanotüp üretiminde kullanılan üretim yöntemleri oldukça farklı süreç özellikleri gösterdiği gibi, ortaya çıkan ürünlerde farklılık gösterir. Her bir yöntemin birbirine kıyasla, birçok avantaj ve dezavantajı vardır (Çizelge 2.2). Üretim yöntemlerinin karşılaştırıldığı çizelge aşağıda verilmiştir.

Üretim Yöntemi	Ark Boşalım	Lazer Aşındırma	Buhar Biriktirme
Verim Oranı	%30-%90	%20-%100	%70
Avantajları	 Ucuz ve basittir Katalizöre gerek yoktur 	 Oldukça yüksek saflıkta üretim Oda sıcaklığında üretim Çap kontrol edilebilir 	 Basit ve ucuzdur Düşük sıcaklık, Yüksek saflık, Yüksek verim, Çap kontrol edilebilir
Dezavantajları	 Yüksek sıcaklık gerektirir. Safsızlık oranı düşüktür 	1. Çok duvarlı nanotüp üretimi için uygun değildir	1. Pahalı bir yöntemdir
Uygunluk	Her ikisi için uygun	Tek duvarlı karbon nanotüp için uygun	Her ikisi için uygun

Çizelge 2.2. Karbon nanotüp üretim yöntemleri ve karşılaştırılması (Corrias et al. 2003)

Nanofiberler ise (nanolifler), genel olarak bir mikrondan daha düşük, nanometre mertebesinde çapa sahip olan lifler olarak tanımlanmaktadır. Genel anlamda fiberler söz konusu olduğunda, nano terimi fiber çapının büyüklüğü hakkında bilgi vermektedir. Nanofiberlerden oluşan yüksek yüzey alanına sahip ve gözenekli yüzeyler farklı özellikleri sebebiyle pek çok alanda kullanılmaktadır.

Nanofiberler, kompozit endüstrisinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Nanofiberlerin kullanılmasıyla güçlendirilen kompozitler, yüksek elastiklik modülü ve mukavemet/ağırlık oranı gibi önemli özelliler kazanmaktadırlar. Karbon nanofiberler, karbon nanotüplere kıyasla daha fazla kusura sahiptir. Bununla birlikte, çok daha ucuz maliyetlerle üretilmekte olup, kullanım alanı oldukça fazladır. Karbon nanofiberlerin, yüksek mukavemette olmaları, çelikten yüzlerce kat daha sağlam olması, düşük ağırlıkları gibi özellikleri sayesinde havacılık ve uzay sektörlerinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır (Çakmak 2011). Nanofiberler, genellikle 50-200 nm çapında, 30-100 µm uzunluğundadır (Green *et al.* 2006; Zhou *et al.* 2007).

Yapıştırıcı içerisine nanofiber eklenmesiyle üretilen nanokompozit yapıştırıcılar da araştırma konuları içinde yer bulmuştur. Nanofiber/epoksi kompozit yapıştırıcılarda

çekme ve kayma mukavemetinin yaklaşık %30 oranında arttığı görülmüştür (Xu *et al.* 2007)





*a. Epoksi matris içinde nanofiberlerin SEM görüntüsü, b. Nanoliflerin SEM görüntüsü (da Silva et al. 2011; Fabio et al. 2013)

2.4.3. Tabakalı Nanopartiküller

Silikat nanokiller (montmorillonit); grafen, grafit ve zirkonyum fosfat polimer matris içinde kullanılan tabakalı nanopartiküllerdir. Nanokiller (montmorillonit, hektorit), mikaya benzer istiflenmiş levhalı yapıya sahip silikatlardır. Tabaka kalınlığı yaklaşık 1 nm olup, plakaların yanal boyutları 30 nm ile 10 mikron arasında değişmektedir. Dolayısıyla tabakalar, yüksek bir en/boy oranına sahiptir. Katmanlar arasında ara katman veya galeri adı verilen düzenli bir van der Waals boşluğu bulunur (Alexandre ve Dubois 2000). Bu nanokiller hidrofiliktir ve dolayısıyla organofilik hale getirmek için uzun zincirli alkilamonyum bileşikleri kullanılır. Tabaka yığını organik moleküller tarafından kolayca arındırılabilir ve böylece arakatkılı veya pul pul dökülmüş bir yapı oluşturulur.

Grafen, iki boyutlu kabul edilen, tek atom inceliğinde olan, kovalent bağlarla bağlı karbon atomlarının altılı bal peteği örgüsünde kusursuz dizilimiyle oluşturduğu üstün özelliklere sahip bir nanomalzeme olarak tanımlanmaktadır (Bedeloğlu ve Taş 2016).

Diğer bir ifadeyle grafen, karbon atomunun bal peteği örgülü yapılarından bir tanesine verilen isimdir. Bal peteği kristal yapısında, sp² hibritleşmesi yapan grafitin, nanotübün ve fullerenin yapıtaşı olan grafen, ancak 2004 yılında sentezlenebilmiştir. Karbonun bal peteği örgülü yapıları olan grafen, grafit, karbon nanotüp ve fulleren sp² hibritleşmesi sonucu ortaya çıkar. Elmas ise sp³ melezleşmesi ve dört-yüzlü ağ örgüsü ile farklı bir yapıda değerlendirilir. Karbon atomları kendisine komşu olan diğer üç karbon atomlarıyla kovalent bağ yapar; buna üçlü döngü koordinasyonu denir ve sp² şeklinde gösterilir (Erbaş 2009).



Şekil 2.7. Grafitin ve elmasın hibritleşmesi ve yapısı (Arseven 2010) *a. Grafit, b. Elmas

Yüksek oranda refrakter malzeme özelliği taşıyan grafit, oksijen hariç diğer kimyasal ortamlara karşı dirençlidir ve termal şoktan etkilenmemektedir. Grafit oluşumu basit olup hidrokarbon gazının ayrışması temeline dayanmaktadır.

Grafen ise; grafitin tek tabakalı, karbon atomunun bal peteği örgülü yapısıdır (Geim *et al.* 2007; Katsnelson 2007). Grafen üzerine yapılan çalışmalar, bu malzemeyi çok önemli bir noktaya getirmiştir (Subagia *et al.* 2013). Tek tabakalı grafenin yüzey alanı 2600 m² /gr, kalınlığı 1-2 nm, termal iletkenliği 4840-5300 W/(m°K), yoğunluğu 2,25 g/cm³, elastisite modülü 1 TPa olup, çekme mukavemeti yaklaşık 130 GPa'dır (Zhan *et al.* 2011; Lee *et al.* 2012; Şenel *et al.* 2015).



Şekil 2.8. Grafenin bal peteği yapısı ve SEM görüntüsü *a. Grafenin bal peteği yapısı, b. Grafenin SEM görüntüsü

Grafen sahip olduğu üstün özellikleri sayesinde birçok uygulama alanında geniş bir şekilde yer bulmaktadır. Grafenin en önemli kullanım alanlarından biri, yüksek dayanıma sahip kompozit malzemelerin üretilmesi olarak görülmektedir. Grafen levhaların yüzey alanının büyük olmasından dolayı, bu malzemelerin kullanıldığı kompozitlerin mekanik, termal ve elektrisksel özelliklerinde olumlu iyileşmeler olduğu görülmüştür (Tapas *et al.* 2010; Chandra *et al.* 2012; Moriche *et al.* 2016).

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda yapıştırıcının mukavemeti, yapışma özelliği gibi özellikleri iyileştirmek için yapıştırıcılar içerisine grafen nanopartikülü katılmaktadır (Guadagno *et al.* 2015; Gültekin *et al.* 2016). Grafen nanolevhalar en kuvvetli (karbon-karbon) bağa ve yüksek spresifik yüzey alanına sahip olmasından dolayı, polimerin (yapıştırıcının) mekanik özelliklerini iyileştirmektedirler.

Grafen, birçok farklı yöntem kullanılarak sentezlenebilmektedir. Eksfoliasyon (mekanik olarak grafit tabakaların ayrılması), kimyasal buhar biriktirme, epitaksiyel büyütme, SiC ile termal bozunma, grafen oksitin indirgenmesi yöntemleri en yaygın olarak kullanılan sentez methotlarıdır (Kosynkin *et al.* 2009; Reina *et al.* 2009; Choi *et al.* 2010; Park *et al.* 2011; Kumskow *et al.* 2012).

2.4.4. Diğer Nanopartiküller

Karbon siyahı, kontrollü koşullar altında gaz veya sıvı hidrokarbonların tam yanması veya termal bozunması sonucu üretilen koloidal parçacıklar biçimindeki saf elemental karbondur. Fiziksel görünümü siyah, ince bölünmüş pelet veya toz şeklindedir. Karbon siyahı, yıllık tonaj bazında dünya çapında üretilen ilk 50 sanayi kimyasalı arasında yer almaktadır. Dünya genelinde üretilen yıllık üretim 8 milyon tondur. Mürekkep ve tonerlerde pigment olarak, lastik ve kauçuk ürünlerde dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Tamamen karbon atomlarından oluşur ve görünür ışık bandında hiç ışık yaymadığından siyah gözükmektedir (ASTM D3053-13a).



Şekil 2.9 Karbon siyahı *a. Karbon siyahının pelet hali, b. Karbon siyahının SEM görüntüsü (ICBA 2017)

Karbon siyahı, birincil parçacıklar, agregalar ve aglomeralardan oluşan bir morfolojik hiyerarşi sergiler. Karbon siyahının temel yapı taşı birincil parçacık olmasına rağmen, hemen hemen hiçbir zaman izolasyonda var olmazlar. Ancak kovalent bağlarla agregalara kuvvetle kaynaşırlar. Birincil parçacıklar doğada kavramsaldır, çünkü agrega oluştuğunda birincil parçacık artık mevcut değildir ve aralarında herhangi bir fiziksel bağ yoktur. Üretildikten sonra, aglomeraları oluşturmak için agregalar van der Waals kuvvetleri ile birleşirler. Aglomera, yeterli kuvvet uygulanmadığı zaman (kesme kuvveti) daha küçük parçalara bölünmez. Birincil parçacık ve agrega karbon karası sınıfına göre değişir. Birincil parçacık ve agrega boyutları belirli bir karbon karası sınıfı içinde büyük ölçüde değişirken, birincil partikül boyutu tek tek bir agrega içinde üniformdur (ICBA 2017).



Şekil 2.10 Karbon siyahı oluşum aşamaları

2.5. Nanopartiküllerin Epoksi İçine Eklenmesi (Dispersiyon)

Nanopartikülle modifiye edilmiş polimerin en iyi özelliklerinin elde edilmesi için, her bir nanopartikülün polimer tarafından uygun şekilde ıslatılması ve homojen bir şekilde dağılması gerekmektedir. Eğer yığılmalar (agregasyon) oluşursa, bunlar kusur gibi davranabilir ve herhangi bir iyileştirme yerine performansı düşürür. Nanopartikülle modifiye edilmiş yapıştırıcı hazırlanmasındaki en büyük zorluk; yığılmaları önleyerek, homojen bir dağılım sağlamaktır.

Nanopartikülleri epoksi içinde dağıtmak, yüksek yüzey alanı ve matris ile olan uyumsuzluk nedeniyle zordur. Genellikle bir yüzey işlemi veya kompatabilizer (uyumlaştırıcı) gereklidir ve kümelenme oluştuğunda topaklanmayı parçalamak çok zordur. Bu yüzden nanopartiküllerin ön dispersyonundan sonra yapıştırıcıya eklenmesi popülerdir. Fakat bu ön karıştırma işleminin, yapılan işlemlerden sonra homojen bir yapıda kalacağının garantisi yoktur. Küçük yığılmaların yapıştırıcının performansını etkilemediği ve homojen bir dağılım elde edildiği varsayılmaktadır (Mohammed 2007; Hsieh *et al.* 2010).

Nanopartiküllerin dispersiyonunun kalitesini değerlendirmek zordur. AFM ve TEM gibi tekniklerle yapıştırıcı içerisinde nano ölçekte partikülleri belirleyen analiz yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemler kullanılarak numunenin çok küçük bir kısmı incelenebilir,

dolayısıyla sonuçlar bir bütün olarak malzemeyi temsil etmeyebilir. Alternatif olarak, X-ışını kırınımı tekniği daha büyük bir hacmi analiz edebildiğinden kullanılabilir. Elde edilen veriler, partiküllerin ne kadar iyi dağılmış olduğunu karakterize etmez. Normalde dispersiyonun optik olarak, taramalı elektron mikroskopisi ve transmisyon elektron mikroskobu ile üç boyutlu ölçeklerde değerlendirilmesi önerilir. Her üç teknikten elde edilen sonuçlar, nanoparçacıkların iyi bir dağılımına işaret ediyorsa, durumun böyle olduğunu varsaymak oldukça güvenlidir. Birçok araştırmacı optik mikroskop kullanılarak nanoparçacıkların dağılımını araştırdığında, topaklanmanın varlığını vurgulayarak nanopartiküllerin görünmeyeceğini belirtmişlerdir (Hackman and Hollaway 2006; Brooker *et al.* 2008). Ayrıca, dağılımın nicel olarak değerlendirilmesi için yöntemler (görüntülerin gri skalası ve kare alan yöntemi) geliştirilmektedir (Brooker *et al.* 2010).

Nanopartiküllerin küçük hacimli oranları bile çok sayıda nanopartikül içerdiği ve parçacıklar arası mesafelerin çok küçük olduğuna dikkat edilmelidir. Küçük çaplı nanotüplerin tamamının ıslanması oldukça zordur. Tek cidarlı nanotüplerin %1'lik bir kısmı tüm polimer moleküllerinin, bir nanotüpün dönme yarıçapı (5 nm) içinde olmasını sağlar. Bu sonuç, tek duvarlı nanotüplerin yüksek oranda tam olarak ıslanmasının geleneksel yollarla zor olacağını ve matrisin kısıtlaması nedeniyle kırılgan ve işlemin zor olabileceğini ifade eder (Shaffer and Kinloch 2004).

Nanoparçacıkların yüzeyinin kimyasal olarak fonksiyonize edilmesi, topaklaşmayı azaltarak ve dispersiyonun iyileşmesine yardımcı olur. Ayrıca partikül ile matris arasındaki bağı güçlendirir (Gojny *et al.* 2003).

Yüksek parçalayıcı (high shear) karıştırma ve ultrasonik karıştırma (sonikasyon) gibi güçlü homojenizasyon yöntemleri, polimerlere nanoparçacıkların dağılımını iyileştirmenin en kolay yöntemidir (Xie *et al.* 2005).

Yapısal yapıştırıcılar gibi çok bileşenli epoksilerde, polimer içerisine nanopartikül katılması genellikle yapıda belirgin bir farklılığa neden olmaz. Bununla birlikte

morfoloji; kürleşme süresi ve sıcaklığına, karıştırma süresi ve sıcaklığına bağlı olabilir. Fiedler *et al.* (2006) karbon nanotüpler üzerine yaptığı bir çalışmada, karıştırıcının boyutu, şekli ve karıştırma hızının disperisyonu etkilediğini ifade etmiştir. Epoksi reçinesindeki MWKNT'lerin yoğun şekilde karıştırılması, nispeten iyi bir dağılım sağlar. Ancak sürtünme teması ve elastik kilitlenme mekanizmaları nedeniyle, yeniden topaklaşma oluşur. SWKNT'lerin MWKNT'lere göre yeniden topaklanmaya daha çok eğilimi vardır ve dolayısıyla iyi bir dağılım elde etmek için yüksek kayma kuvvetleri gereklidir (Schmid and Klingenberg 2000).

Yüksek parçalayıcı ile karıştırma, bir dizi teknik kullanılarak uygulanabilir. Hackman *et al.* (2006), düşük parçalayıcı karıştırmayı, 2 mm çaplı cam boncuklarla dolu bir öğütme değirmeni ile karşılaştırmıştır. Green ve arkadaşları (2006) ise düşük parçalayıcı karıştırma ile yüksek parçalayıcı karıştırmayı karşılaştırmıştır. Her iki çalışmada da, yüksek parçalayıcı karıştırma yönteminin daha iyi dağılma sağladığı ifade edilmiştir.





*a. Düşük parçalayıcı karıştırma yöntemi, b. Yüksek parçalayıcı karıştırma yöntemi

Üç silindirli öğütücü (three-roll mill) yapıştırıcı içerisine nanopartiküllerin homojen bir şekilde dağıtılması için kullanılan başka bir yöntemdir (Yasmin *et al.* 2003; Gonjny *et al.* 2004; Yasmin *et al.* 2006). Bu yöntem, yaygın olarak polimerlere mikroparçacıkları yaymak için kullanılır. Bu işlem kesintisiz bir proses olmadığı için, polimer ve nanopartiküller toplanır ve her geçişten sonra öğütücüye geri beslenir. Dispersiyon işlemi, parçacıkların daha küçük taktoid olarak dağıtılması arasında oluşan kesme kuvvetleri ile sağlanmaktadır. Bu işlem nispeten daha akışkan polimer gerektirir ve daha yüksek nanopartikül katkısı için uygundur. Bu yöntemin en büyük avantajı, nanopartikülle modifiye edilmiş polimerin işlem süresinin sadece birkaç dakika olması nedeniyle, daha büyük miktarlarda nanokompozit malzemelerin verimli bir şekilde üretilmesine olanak sağlamasıdır (Fiedler *et al.* 2006). Düşük parçalayıcı karıştırma yönteminde işlem saatlerce sürebilir.

Ultrasonik homojenizasyon işlemi temel olarak sıvı içerisindeki parçacıkların daha küçük boyutlara indirgenmesini sağlayan mekanik bir işlemdir. Bu parçacıklar katı veya sıvı halde olabilirler. Parçacıkların ortalama çapındaki bir azalma, parçacıkların sayısını arttırmaktadır ve bu da ortalama parçacık mesafesinin kısalmasına yol açmakta ve böylece partikül yüzey alanı elde edilmektedir. Ultrasonik homojenizatörler, yüksek parçalayıcılı mikserlere ve bilyalı öğütücülere karşı güçlü bir alternatiftir. Ultrasonik karıştırma işleminde ise; nanopartikülleri içeren polimer için bir ultrasonik banyo veya prob kullanılarak ses enerjisi uygulanmaktadır. Ultrasonik karıştırıcının ucu (probu) polimer ve nanopartikül karışımına ses enerjisi vererek, nanopartiküllerin polimer içerisinde homojen bir şekilde dağılmasını sağlar. Karıştırma süresi ve frekans değeri polimer içerisinde nanopartiküllerin dağılımını etkilemektedir (Lam *et al.* 2005). Bu işlem, karışımın lokal olarak ısınmasına sebep olur. Bu nedenle eğer karışım içinde sertleştirici mevcutsa; erken kürleşmeyi engellemek için, karışımın eş zamanlı olarak soğutulması gerekir (Lu *et al.* 1996).

2.6. Yapıştırma Bağlantıları

Bütün malzemeleri yapıştırıcı ile birleştirmek mümkündür. Uygun bir yapıştırma bağlantısı yapabilmek için, yapıştırma bağlantısındaki gerilme dağılımı hakkında yeterli bilgiye sahip olmak gerekir. Yapıştırma bağlantısının mukavemeti; uygulanan yüke, geometriye, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemenin mekanik özellikleri gibi bazı

parametrelere bağlı olduğu için bağlantının mekanik davranışını tahmin etmek zordur (Taib *et al.* 2006).

Yapıştırma işleminde temel prensip, malzemeler arasında yükün emniyetli bir şekilde aktarılmasını sağlamak ve yüksek mukavamet elde etmektir. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların yüksek mukavemete sahip olması için özel bağlantı tipleri kullanılmaktadır. Mühendislikte kullanılan bağlantı tiplerinden en yaygın olanları Şekil 2.12'de gösterilmiştir (Aydın 2003; Gültekin 2014).





*a. Tek tesirli bağlantı, b. Çift tesirli bağlantı, c. Alın bağlantı, d. Pah bağlantı, e. Çift takviyeli alın şerit bağlantı, f. Soyulma bağlantısı, g. Tüp şeklinde bağlantı, h. Kademeli bağlantı (Adams and Wake 1984; Aydın 2003; Akpinar 2012; Gültekin 2014)

2.6.1 Yapıştırma bağlantılarında oluşan gerilmeler ve analizi

Yapıştırma bağlantıları, genellikle çeki veya bası, kayma, soyulma ve ayrılma gibi yüklere maruz kalır. Bağlantı mukavemetinden en yüksek performans elde etmek için, bu yükleme türleri göz önünde bulundurulmalıdır. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda, hangi yükleme durumunda maksimum performans elde ediliyorsa, o yükleme durumuna uygun bağlantı türü seçilmelidir. Yapıştırma bağlantılarının, soyulma yüküne karşı dayanımları zayıf iken; çekme, basma ve kayma yüklerinin oluşturduğu gerilmelere karşı daha dayanıklıdırlar (Temiz 2003).



Şekil 2.13. Yapıştırma bağlantılarında oluşan gerilme türleri *a. Çekme veya basma, b. Kayma, c. Soyulma, d. Ayrılma (Temiz 2003)

Çekme veya basma kuvveti uygulandığında, kuvvet yapıştırıcı tabakasına dik olarak etki etmektedir ve bu yükleme durumunda gerilme üniform haldedir. Fakat bağlantıya sadece bu tür gerilmenin etki ettiğinden emin olmak her zaman mümkün değildir. Kuvvetler farklı eksenden etkidiği durumlarda, gerilmeler yapışma alanında eşit olmayacak ve dolayısıyla bağlantının bozulma ihtimali artacaktır. Ayrıca, bağlantının maruz kaldığı yük etkisinde bir eğilme meydana geliyorsa, gerilmeler düzgün bir şekilde dağılmayacaktır.

Soyulma türü yüklemede, bağlantıda oluşan gerilmeler oldukça yüksektir. Bu yükleme durumunda, bağlantı çok geniş veya yük düşük olmadıkça bağlantı kolayca hasara uğramaktadır. Yapıştırma bağlantılarında bu tür yükleme durumundan uzak durulmalıdır.

Kesme (kayma) yükleri, yapıştırılan alanın tümüne üniform bir şekilde etki eder. Bu tür yükleme durumunda yapışma bağlantıları yüksek mukavemet gösterirler. Yapıştırma bağlantıları kayma yüküne maruz kalacak şekilde tasarlanmalıdır (Temiz 2003). Bağlantı kaymaya zorlandığında, gerilmeler uç kısımlarda yoğunlaşmaktadır (Şekil 2.14).

Ayrılma (clevage) tipi yükleme, eksenden kaçık çekme kuvvetinin veya momentin sonucu oluşmaktadır. Diğer gerilme türlerinin aksine; bu gerilme bağlantının bir tarafında yoğunlaşarak, yapışma alanına eşit bir şekilde etki etmemektedir (Kayacan 1988). Yapıştırma bağlantıları soyulma ve ayrılma yüklerine maruz kaldığında, gerilme dağılımı bağlantının serbest uçları arasında çok büyük farklılıklar göstermektedir (Şekil 2.14).

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda, genellikle kayma (kesme), ayrılma ve soyulma yükleriyle karşılaşılmaktadır. Çekme veya basma yükleri nadiren uygulanır. Bağlantının birleşme yerindeki gerilme dağılımı değişkendir ve hesaplaması zordur. Yapışma bölgesinin serbest uçları, orta kısma göre daha yüksek gerilmelere maruz kalır (Aydın 2003; Temiz 2003; Gültekin 2014)



Şekil 2.14. Yapıştırma bağlantılarında oluşabilecek gerilme durumları *a. Ayrılma, b. Soyulma, c. Kayma (Akpınar 2012)

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların dayanımının tahmini kolay olmamakla birlikte, gerilme dağılımları ve kırılma parametrelerinin belirlenmesi için etkin ve güvenilir yöntemlerin kullanımı gereklidir. Bağlantılarının analizinde, elastik ve elastik-plastik davranışı dikkate alan analitik ve sayısal olmak üzere iki temel yaklaşım vardır. Bu modeller; metallerin gerilme-şekil değiştirme davranışını tanımlamak için geliştirilmekle birlikte, plastikler ve yapıştırıcılara da uygulanabilir.

Karmaşık mühendislik problemleri beraberinde aynı karmaşıklıkta çözümler içermektedir. Sonlu elemanlar yöntemi, son yıllarda birçok karmaşık mühendislik probleminin çözümünde kullanılan etkili bir analiz methodudur. Yapıştırma bağlantılarının gerilme analizlerinde de sonlu elemanlar yöntemi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntem, karmaşık problemlerin daha basit yapılara ayırarak her birinin kendi içinde çözümlenmesiyle çözümün elde edildiği bir yöntemdir. Bağlantıların non-lineer sonlu elemanlar analizi, bulk numunelerin çekme deneyinden elde edilen malzemelerin elastik ve plastik gerilme ve şekil değiştirme değerlerinin kullanılmasıyla yapılmaktadır. Yapıştırıcı tabakası ve yapıştırılan malzemelerde oluşan eş değer gerilmelerin ($\sigma_{eş}$) hesaplanmasında, akma kırılma kriterleri kullanılır (Aydın 2003; Tın 2006; Akpınar 2012).

2.7. Yüzey Hazırlama İşlemleri

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda, iyi bir yapışma sağlamak için yüzey işlemlerinin uygulanması gerekir. Yapıştırma işleminden önce eğer yapısal bir bağlantı oluşturulacaksa uygun yüzey işlemi uygulanması önerilmektedir. Uygulanacak özel yüzey işlemi, bağlantının şartlarına ve gerçekleştireceği koşullara bağlıdır. Maliyet faktörleri de dahil olmak üzere; yapıştırıcı türü, geometri ve üretim şartları gibi faktörler, uygun yüzey işlemi seçilirken dikkate alınmalıdır (Temiz 2003; Gültekin 2014).

Mükemmel bir yapıştırma için, uygun bir yüzey hazırlama metodu parçaları birleştirme aşamasından önceki en önemli aşamadır. Yüzey hazırlamanın amacı; yüksek mukavemete sahip bir bağlantı için yapıştırılan malzeme yüzeylerinin oluşturulabilmesidir.

Yapışma işleminin gerçekleştirileceği yüzeylerin temiz olması gerekmektedir. Yüzey hazırlama, yalnızca yapıştırma bağlantısının başlangıçtaki dayanımı için değil, uzun süreli dayanımı için de oldukça önemlidir. Yapışma mekanizması, yapıştırıcının yüzeye yapışma kuvveti (adhezyon) ve yapıştırıcının iç kuvvetine (kohezyon) bağlıdır. Yapışma kuvveti, büyük ölçüde yapıştırılacak yüzeyler ile yapıştırıcı arasındaki adhezyon kuvveti tarafından belirlenir. Yapıştırıcı, yüzeyler arasında bir nevi köprü görevini yapar (Aydın 2003).

Herhangi bir yüzeye uygulanacak işlemin ana amacı, yüzeylere istenen fiziksel ve kimyasal özellikleri sağlamaktır. Yüzeylerde istenen temel özellikler ve yüzey işleminin amacı aşağıda belirtildiği gibidir:

 Yapıştırılacak yüzey üzerinde herhangi bir zayıf sınır tabakayı kaldırmak veya tabakanın oluşumunu önlemektir. Makine yağları, zayıf oksitler veya hidroksitler ve metaller üzerinde hava yoluyla bulaşan kirlenmeler zayıf sınır tabakasının oluşmasına neden olur. Bu tabakaları içeren malzemeleri yapıştırma yöntemiyle bir araya getirmek uygun değildir. Bu şartlar altında yapıştırıcı, yapıştırılacak yüzeyler ile temas halinde olmayacak ve yüzeyler üzerinde istenmeyen bu malzemeler yapışmanın kalitesini düşürecektir. Basit bir yağdan arındırma işlemi bu gereksinimi karşılayabilir. Parçalanabilir inorganik katmanlar mevcutsa, mekanik veya oksijen giderme işlemleri gerekebilir.

- Yapıştırıcı ve yapışan malzeme arasındaki moleküler temas derecesini en üst düzeye çıkarmaktır. Bu genellikle yüksek bir yüzey enerjisinin oluşturulmasını ve spesifik fonksiyonel grupların ortaya çıkmasını sağlar.
- Yapıştırılan yüzey üzerinde belirli bir yapı veya doku oluşturmak. Bu yapılar ayrıca geniş bir yüzey alanı oluşturur.
- Yapıştırma işleminden önce yapıştırılan maddenin yüzeyini pasifleştirmek. Yüksek enerjili yapıştırıcılar için bu çok önemlidir. Çünkü bunlar sadece yapıştırıcıya karşı değil aynı zamanda her türlü kirlenmeye karşı da duyarlıdır. Bu kirlenme organik veya inorganik olabilir. Pasifize işlemleri elektrokimyasal ve korozyon direnci sağlayarak yüzeyin korunmasını sağlar.

2.7.1. Genel yüzey hazırlama metotları

Bağlantının mukavemeti, yapıştırıcı ile temas halinde olan yüzeye bağlıdır. Yüzey hazırlama işlemi; kimyasal çözelti içerisine daldırma, mekanik aşındırma, dağlama ve kimyasal temizleme gibi birkaç yöntemin uygulanmasıyla yapılabilir.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda yüksek dayanım istendiği yerlerde, yüzey hazırlama işlemi yapılması gereklidir. Yüzey hazırlama işlemi seçilirken bağlantı dayanımı, süreklilik ve çevre, malzeme üzerindeki kirletici unsurların türü ve miktarı ve yapıştırılacak malzeme gibi parametreler dikkate alınmalıdır (Chaudhury and Pocius 2002, Davis 2006; Gültekin 2014).

Mekanik olarak sağlam bir yüzeye yapışmayı sağlamak için kirliliğin giderilmesi iyi yapışma oluşturulmasında temel bir gerekliliktir. Malzemelerin yüzeylerindeki oksit tabakası, yağ, boya tabakası gibi kirletici unsurların çıkarılması genellikle göz ardı edilmekle birlikte; aslında, anotlama gibi daha karmaşık işlemlerde de önemli bir aşamadadır.

Yüzey kirleri organik ve inorganik olmak üzere iki gruba ayrılır. İstenmeyen organik ve inorganik kirleticilerin malzeme yüzeyinden temizlenmesi, yapıştırma için ilk adımdır. Organik kirlenme; korozyon koruması için kullanılan yağ ve greslerden, işleme yağları ve imalat sırasında kullanılan ayırıcı faktörlerden ve atmosferden gelen kirlerden kaynaklanmaktadır. Bu tür kirlenmeler, ıslanma ve arayüz boyunca kuvvetli bağ oluşumunu engelleyerek bağlantının performansını düşürecektir. Organik bileşiklerin uzaklaştırılması genel olarak basit yağ giderme işlemleri ile sağlanabilirken; inorganik bileşikler, yağ giderme ve aşırı oksitleyici çözeltilerin bir kombinasyonunu gerektirebilir.

Mümkün olan en iyi yapışmayı elde etmek için; yağ alma ve mekanik aşındırma işlemi, kimyasal ve elektrokimyasal ön işlemlerinden biri veya birkaçının birlikte uygulanması gerekir.

a) Yağ alma işlemi

Yüksek dayanımlı yapıştırma bağlantısı elde etmek için yüzeylerin yağ, gres, toz ve diğer kirlerden buharlaşan çözeltiler kullanarak kalıntı bırakmadan temizlenmesi gerekir. Atomik olarak temiz yüzey, pozitif bir yayılma katsayısına sahip olacak ve böylece daha sonra uygulanacak bir yapıştırıcıyla ıslanma sağlanacaktır.

Organik çözücülerin kullanımını içeren en kolay yağ giderme işlemi, bağımsız bir prosess olarak ve çok aşamalı işlemlerin ilk aşaması olarak kullanılır. Yağ giderme yöntemleri; basit daldırma, silme teknikleri, buharla yağ giderilmesi veya ultrasonik temizleme gibi farklı şekillerde yapılabilir.

İzopropil alkol, aseton, metil etil keton, perkloroetilen, trikloroetilen veya 1,1,1 trikloroetan endüstriyel olarak kullanılan en iyi yağ çözücülerdir. Bu çözücüler kullanılarak, yüzeyler üzerindeki yağlar giderilir ve yüzeyler kurulanarak buharlaşmanın tamamlanması için bekletilir (da Silva *et al.* 2011; Gültekin 2014). Bu şekilde yüzeyler yağ, gres ve diğer kalıntılardan temizlenerek yapıştırma için uygun hale getirilmiş olur. Bu çözücüler ile yüzey temizliği yapılırken daha iyi sonuç almak amacıyla, bu işlem numune yüzeyini ovalamak yada fırçalamak gibi mekanik olarak desteklenebilir.

Buharla yağ giderme işlemi yüzey temizliğinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemde çözeltiler kaynama noktasına kadar ısıtılırarak buharlaştırılır. Soğuk numune yüzeyleri buharlaşmış çözelti ile temas ederek numune yüzeyleri üzerinde yoğuşur. Bu esnada yoğuşan sıvı, yüzeylerde kalmış kir ve yağları temizler.

Yapıştırılacak yüzeydeki kirler; deterjan, alkalin veya asit bazlı sulu temizleyiciler kullanılarak da temizlenebilir. Alkalin veya asit bazlı sulu temizleyiciler korozyon önleyici içerdiğinden, yapışma kuvvetinin azalmaması ve yapıştırıcının kürleşmesi için yüzey temizleme işlemi sonrasında yüzeyde bu maddelerin kalmaması gerekir. Bu temizleyiciler pas gibi kalıntıları temizleyemediğinden diğer yüzey hazırlama metodları ile birlikte kullanılması gerekir. Yüzeydeki kirletici unsurların bağlantının soyulma mukavemetini azalttığı Şekil 2.15'de görülmektedir (da Silva *et al.* 2011).



Şekil 2.15 Yüzeydeki kirlilik oranının soyulma mukavemetine etkisi (da Silva *et al.* 2011)

b) Mekanik aşındırma

Mekanik işlemler, ufalanan (friable) yüzey tabakalarını kaldırırarak metal yüzeylerde makro pürüzlü yüzey dokusu oluşturur. Genellikle öncesinde ve sonrasında basit bir yağ giderme işlemi yapılır. Kumlama, taşlama, zımparalama veya tel fırça ile fırçalama metal yüzeyindeki oksit tabakaları gibi kalıntıları temizlemede kullanılan genel mekanik işlemlerdir.

En basit mekanik işlem türü, aşındırma maddeleri veya zımpara kağıtları kullanarak zımparalama yapmak ve bunu takiben kalıntıların giderilmesine yardımcı olmak için bir solvent veya benzeri bir bez kullanmaktır. Bu işlem etkili bir yöntem olmasına rağmen kirlenmeye neden olabilir. Atomik ölçekte, yüzey kolayca çıkarılamayan atıkları veya zımpara kağıdından kalan kirletici artıkları tutabilir (Kinloch *et al.* 2006).

Yüzey pürüzlülüğü, yapıştırma bağlantılarının dayanımını etkileyen önemli bir parametredir. Yüzey pürüzlüğünü artırarak malzemenin yüzey alanı artırılmış olur ve yapıştırılan malzeme ile yapıştırıcı arasındaki bağın artarak güçlenmesi sağlanır. Zımparalama işlemiyle elde edilen pürüzlü yüzey iyi bir yapışma sağlar. Aşırı pürüzlü yüzeyler yapıştırma bağlantılarında boşluklar oluşturacağından yüzey pürüzlülük derecesinin doğru belirlenemsi gerekir. Aksi durumda bağlantının dayanımı olumsuz bir şekilde etkilenir. Zımpara şeklinin türü ve zımpara kâğıdının büyüklüğünün seçimi, zımparalanacak malzeme çeşitli faktörlere bağlıdır. Farklı malzemeler için önerilen aşındırıcı türü ve boyutları Çizelge 2.3'te verildiği gibidir (Gültekin 2014).

Malzeme	Zımpara Tipi	Aşındırıcı Boyutu	
Çelik Kuru zımparalama 80-100		80-100 mesh	
Paslanmaz çelik	Islak zımparalama	140-325 mesh	
Alüminyum	Islak zımparalama	140-325 mesh	
Prinç	Islak zımparalama	140-325 mesh	

Cizelge 2.3.	Aşındırıcı	türü ve	boyutları
, 7	•		

Islak zımparalama işlemi, metal malzemelerin aşındırlmasında kullanılıyorsa, yüzeyde korozyon oluşmaması için işlemden hemen sonra malzemeler kurutulmalıdır. Plastik malzemeler zımpara makinesinde aşındırılıyorsa, plastik malzemelerin ısıdan dolayı erimemesi için zımparalama süresinin kısa olması gereklidir.

Daha kontrollü bir yüzey işleme yöntemi ise kumlama yöntemidir. Kumlama işleminde, yüksek baınçlı hava ile metal yüzeyinde mikro boyutta pas ve korozyonu yok etmekle birlikte, yüzeyin özünü ortaya çıkarmaktadır. Uygulanan basınç, süre ve kumlama ortamı gibi parametreler istenen yüzey dokusunu üretmek üzere optimize edilebilir (da Silva *et al.* 2011).

Zımparalama veya kumlama işleminden önce ve sonra, parçalar üzerinde kalan tüm artıkların temizlenmesi amacıyla parçalara yağ alma işlemi uygulanmalıdır. Mekanik yüzey işlem yöntemleri yeterli yapışma kuvveti sağladığından ve pratikte uygulanması kolay olduğundan sıklıkla tercih edilmektedir.

c) Kimyasal işlem

Kimyasal işlemler, su bazlı tam daldırma yöntemiyle yapılan proseslerdir. Bu yöntem; yağ alma ve mekanik işlemlerin yeterli olmadığı yüzey işlemlerinde daha kaliteli bir yüzey elde etmek için sıklıkla kullanılan en etkili yöntemdir. Kimyasal işlemler dağlama olarak kabul edilebilir veya alternatif olarak kimyasal dönüşüm kaplaması oluşturmak için kullanılır.

Dağlama solüsyonları güçlü asitlerle hazırlanmakla birlikte, nadirde olsa alkalinler solüsyon hazırlamada kullanılmaktadır. Bu aşındırıcı maddelerin amacı; zayıf oksitler, hidratlı oksitler veya diğer korozyon ürünleri de dahil olmak üzere, organik veya inorganik katmanların uzaklaştırılması ve gelişmiş bir yüzey yapısı elde etmektir. Yapıştırma bağlantılarında maksimum dayanım elde edebilmek için yapıştırılacak metal malzeme yüzeylerine kimyasal ön işlem uygulanması gerekir. Kimyasal ön işlemden sonra asit kalıntılarını yok etmek için malzemeler saf suda iyice yıkanmalı ve kurutulmalıdır.

Metallere uygulanan kimyasal işlemler, işlemden önce var olan kırılabilir oksitler veya hidratlı oksitleri kaldırır ve bunu kontrollü film oluşumu izler. Filmler yüzey serbest enerjisini artırarak avantaj sağlar. Dönüşüm kaplama işlemleri bir takım mekanizmalar yoluyla korozyona karşı koruma sağlar (Crithlow *et al.* 2006).

Kimyasal işlemler sonucunda malzeme yüzeyine reaktif gruplar eklenerek yapıştırıcının mekanik olarak tutunabileceği gözenekler açılır. Bir dizi yüzey morfolojisi hem dağlama hem de dönüşüm kaplama işlemleri ile oluşturulabilir. Atomik kuvvet mikroskopisi (AFM) gibi tekniklerle, polimerin pürüzler içine nüfuz etmesini kolaylaştıracak optimize edilmiş yüzey dokusu görüntülenebilir. Kimyasal olarak işlenmiş yüzeyler yapışmayı arttıran bir dizi fizikokimyasal özellik sağlarken, elektrokimyasal işlemler genellikle alüminyum ve titanyum için iyi yapışma sağlar (ASTM D 2651-01; TSEN 13887)

d) Elektrokimyasal işlemler

Elektrokimyasal işlemler (anotlama işlemi) çoğunlukla alüminyum, titanyum ve bunların alaşımları gibi bir takım metallere uygulanmaktadır. Bu işlemler; karmaşık, zaman alıcı ve oldukça maliyetli olmakla birlikte etkili bir yüzey işleme yöntemidir. Bu yöntemde genellikle fosforik ya da kromik asit kullanılarak, elektrolitik olarak malzeme yüzeyinde koruyucu bir oksit tabakası oluşturulur (Crithlow *et al.* 2006).

Yapıştırma bağlantılarında optimum yapışma özelliklerinin sağlanabilmesi için, yüzey hazırlanmasında sırasıyla yağ alma, mekanik aşınma ve kimyasal işlem birlikte kullanılmalıdır (Aydın 2003; da Silva *et al.* 2011; Gültekin 2014).

2.7.2. Alüminyum alaşımlarına uygulanan yüzey işlemleri

Alüminyum alaşımları nem gibi ortamlara maruz kalıyorsa, alüminyum alaşımlarının yüzey hazırlığında korozyona karşı korunmasını sağlayacak yüzey işlemleri yapılması gereklidir. Yağ giderme ve mekanik işlemler gibi yüzey işlemleri korozyon direnci oluşturmadığından, kimyasal yüzey işlemlerinin uygulanması gerekir. Çoğunlukla havacılık uygulamalarında kullanılan ve uzun süreli çevre şartlarına maruz alüminyum ve alaşımlarının yüzey hazırlanmasında; asitli çözeltilerle aşındırma (dağlama) veya anotlama yöntemi kullanılmaktadır. Daha az dayanım gerektiği durumlarda, mekanik aşındırma yöntemi tek başına yeterli olabilir. Kromik /sülfürik asit ile dağlama, kromik, fosforik ve sülfirik asitle anotlama yöntemleri alüminyum yüzeylerin hazırlanmasında sıklıkla kullanılan kimyasal işlemlerdir. Bu yöntemlerde kullanılan çözeltiler ve işlem parametreleri Çizelge 2.4'te verilmiştir. Ayrıca sol-jel ve kumlama işlemleri de yüzey hazırlanmada kullanılan diğer yöntemlerdir.

İşlem	Solüsyon	İşlem Parametreleri
Fosforik asit anotlama	H ₃ PO ₄	20–25°C, 25 dakika, 10 V
Kromik asit anotlama	H ₂ CrO ₄	32–38°C, 55 dk, 8V/dk-40 V
Sülfirik asit anotlama	$H_2SO_4 + B_2O_3 + H_2O$	25–30°C, 20-25 dk,15 V
Kromik asit dağlama	Na ₂ CrO ₇ 2H ₂ O+H ₂ SO ₄ +H ₂ O	68°C, 15–30 dk

Çizelge 2.4. Alüminyum alaşımlarına uygulanan yüzey işlemleri ve parametreleri

Malzeme yüzeyinde koruyucu oksit tabakasının oluşturulduğu anotlama işlemi sadece alüminyum ve titanyum alaşımlarına uygulanır. Fosforik asitle anotlama ilk olarak Boeing tarafından bağlantılarda yüzeyin yapışma performansını artırmak için geliştirilmiştir. Bu anotlama yönteminde; alaşımlar fosforik asit çözeltisine tam daldırılıp korozyon direnci artırılarak yüzeyde kristal yapıda (çinko fosfat-demir fosfat) bir film tabakası oluşturulur (Şekil 2.16).



Şekil 2.16 Fosforik asitle anodize edilmiş alüminyum alaşımının yüzeyi (Venables *et al.* 1979; da Silva *et al.* 2011).

Kromik asit anodizasyonu alüminyum yüzeylerin korozyon direncini arttırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu işlemde non-kristal bir koruyucu film tabakası yapıştırılacak yüzeyde oluşturulur. Alüminyum üzerine korozyon koruyucu kaplamanın kullanılması, metal arayüzünü korur ve bağlantının dayanıklılığını artırır. Sülfürik asitdikromat işlemi de alüminyum alaşımlarının yüzey hazırlanmasında kullanılan etkili ve güvenilir bir yöntemdir. Bu yöntem, uygulandığı yüzeyin yapışma ve korozyon dayanımını artırır. Yüzey hazırlığı tamamlanan alüminyum alaşımlarını eğer hemen yapıştırılmayacak ise, toz ve kirden korunması için temiz bir ortamda veya desikatör içinde bekletilmesi gerekir. Alüminyum alaşımlarının yapışma öncesi yüzeyleri hazırlanırken aşağıdaki adımlar uygulanır:

- 1) Aseton ve ya perkloretilen buharıyla yüzeydeki yağ ve gres atıklarının temizlenmesi,
- 2) Sülfirik asit solüsyonuna belirli bir süre ve sıcaklıkta daldırma işlemi,
- 3) 40°C'deki saf suya birkaç dakika daldırma işlemi,
- 4) Oda sıcaklığındaki saf suya daldırma işlemi,
- **5**) 50-60°C'deki steril bir hava üflemeli etüvde kurutma işlemi.

2.8. Yapıştırma Bağlantılarında Hasar Türleri

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerinin bütünüyle anlaşılması için hasar türünün doğru belirlenmesi önem arz etmektedir. Yapıştırma bağlantılarında

adhezyon ve kohezyon olmak üzere iki farklı tür hasar modeli görülmektedir (ISO 10365). Temel hasar tipleri Çizelge 2.5'te gösterildiği gibidir.

Yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde gözle görülen ayrılmanın oluştuğu kopmaya adhezyon hasarı adı verilir. Yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında zayıf sınır tabakalar olduğu veya uygun yapıştırıcı seçilmediği zaman adhezyon hasarı görülmektedir. Kohezyon hasarı ise; yapıştırıcı veya yapıştırılan malzemede gözle görülebilir hasarın oluştuğu, yapıştırıcının malzemenin her iki yüzeyinde de bulunduğu hasar şeklidir. Normal şartlar altındaki yüklemelerde kohezyon hasarının oluşması istenir. Eğer adhezyon hasarı meydana geliyorsa yapıştırıcı ve geometri seçimi yapılarak adhezyon hasarı önlenebilir (da Silva *et al.* 2011; Akpınar 2012; Gültekin 2014).

	Hasar Türü	Tanımlanma Şekli
		Y.H: Yapıştırılan malzemelerin biri ya da ikisinde de hasarın oluşması
Yapıştırılan Malzeme		K.Y.H: Kohesiv yapıştırılan malzeme hasarı
		D.H: Kalkma (Deleminasyon) yoluyla hasar
		K.H: Kohezyon hasarı
Yapıştırıcı		Ö.K.H: Özel kohezyon hasarı
		A.H: Adhezyon hasarı

Çizelge 2.5. Temel hasar tipleri (ISO 10365)

2.9. Fourier Dönüşümlü İnfrared Spektroskopisi (FT-IR)

Infrared spektroskopisi (IR) yaygın olarak organik bileşiklerin tanımlanması ve güvenilir bilgi elde edilebilmesi için kullanılan yaygın analiz metodudur. Oksiran halkasının konumu ve yoğunluğu nedeniyle; bu metot epoksi sistemlerin kullanımında oldukça sınırlı olmasına rağmen, hem nicel hem de nitel bilgiler bu metotla elde edilebilir. Oksiran halkasının karakteristik pikleri 4000 cm⁻¹ ile 400 cm⁻¹ arasında gözlenebilir. IR spektrumunda ~830 cm⁻¹ de gözlenen pik oksiran grubunun C-O-C gerilmesine, ~815 cm⁻¹ de gözlenen pik oksiran grubunun C-O gerilmesi ve ~3060 cm⁻¹ de gözlenen pik oksiran grubunun C-O gerilmesi ve ~3060 cm⁻¹ (Dannenberg and Harp 1956; Gonzalez *et al.* 2012; Nikolic *et al.* 2010).

Epoksi reçinenin 4000 cm⁻¹ ve 400 cm⁻¹ arasındaki dalga sayısı değerlerine karşılık gelen bağ titreşim değerleri Çizelge 2.6'da verilmiştir (Gonzalez *et al.* 2012; Tripathi and Srivastava 2007; Nikolic *et al.* 2010).

Bağ titreşim değerleri (cm ⁻¹)	Bağ titreşimi	
~3500	O-H gerilmesi	
3057	Oksiran halkasının C-H gerilmesi	
2965-2873	Aromatik ve Alifatik CH ve CH ₂ 'nin C-H gerilmesi	
1608	Aromatik halkadaki C=C gerilmesi	
1509	Aromatik halkadaki C=C gerilmesi	
1454	CH ve CH ₂ 'nin C-H deformasyonu	
1363	C-(CH ₃) ₂ 'nin CH ₃ deformasyonu	
1036	Eterlerin C-O-C gerilmesi	
914	Oksiran grubunun C-O gerilmesi	
831	Oksiran grubunun C-O-C gerilmesi	
772	Sallanma (Rocking) CH2 gerilmesi	

Çizelge 2.6. Epoksi reçineye ait bağ titreşim değerleri

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Yapıştırılan Malzemeler ve Özellikleri

Alüminyum alaşımları; fiziksel ve mekanik özellikleri, hafif ve kolay işlenebilir olması, korozyon direncinin yüksek olması gibi sebeplerden ötürü havacılık ve otomotiv sektöründe sıklıkla kullanılmaktadır. AA2024-T3 alüminyum alaşımının yüksek dayanıma sahip olması, havacılık alanında sıklıkla kullanılması ve ayrıca uluslararası standartların yapıştırıcıların bağlantı performansını değerlendirmesinde tavsiye etmesi nedeniyle; bu çalışmada AA2024-T3 alüminyum alaşımı yapıştırılan malzeme olarak kullanılmıştır (ASTM D1002, ISO 4587). AA2024-T3 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.



Çizelge 3.1. Alüminuum alaşımının mekanik özellikleri (Akpınar 2012; Gultekin *et al.* 2016)

Ayrıca yapıştırılan diğer malzeme olarak karbon fiber kumaş takviyeli $(0-90^{0})$ düz dokuma kompozitler (CFFR) kullanılmıştır. Karbon fiberler düz dokuma konfigrasyonunda olup, karbon fiber oranı 245 g.m² 3k (Fiber başına 3000 filament) dır. Bu kompozit vakum infüzyon yöntemi ile Fibermak (İzmir, Türkiye) firması tarafından üretilmiş olup, kürleşmesi 100°C'de 1 saat bekletilerek sağlanmıştır. CFFR kompozit 12 tabaka olup toplam kalınlığı 3^{±0.2} mm'dir. CFFR kompozit malzemesinin mekanik özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

E ₁ (GPa)	$72^{\pm 2.8}$
E_2 (GPa)	$72^{\pm 2.8}$
G ₁₂ (GPa)	$5^{\pm03}$
V12	0,1
$\sigma_{11}=\sigma_{22}$ (MPa)	$650^{\pm 28}$
τ ₁₂ (MPa)	$90^{\pm 4.5}$
Tabaka Kalınlığı	$0,25^{\pm 0.05}$

Çizelge 3.2. CFFR kompozit malzemesinin mekanik özellikleri

E:Elastisite modülü; v:Poisson's oranı; σ :Çekme mukavemeti; τ :Kayma mukavemeti

3.2. Yapıştırıcılar ve Özellikleri

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların tasarımda yapıştırıcı olarak sıvı veya film yapıştırıcılar sıklıkla kullanılmaktadır. Sıvı yapısal yapıştırıcılar; yüksek bağlantı dayanımı, üniform gerilme dağılımı, iyi boşluk doldurma, farklı malzemeleri birleştirmeleri gibi avantajları nedeniyle daha çok tercih edilmektedir. Bu çalışmada yapıştırıcı olarak 3M (St. Paul, MN, USA) firması tarafından üretilen çift bileşenli sert (DP270), esnek (DP125) ve güçlendirilmiş (DP460) sıvı yapıştırıcılar kullanılmıştır. Bu yapıştırıcılara ait kürleşme şartları ve bileşim oranı Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Yapısal yapıştırıcıların kürleşme şartları ve bileşim oranları

Yapıştırıcı	Bileşen Oranı (Epoksi:A/Sertleştirici:B)	Kürleşme sıcaklığı/zaman
3M [™] DP270	A:B=1:1	80°C/60 dakika
3М [™] DP125	A:B=1:1	70°C/120 dakika
3М ^{тм} DP460	A:B=2:1	60°C/120 dakika

3.3. Nanopartiküller ve Özellikleri

Bu çalışmada epoksi reçine içerisine eklenecek olan nanopartikül olarak karboksil (COOH) ile fonksiyonize edilmiş grafen (Grafen-COOH), karboksil ile fonksiyonize edilmiş çok duvarlı karbon nanotüp (Karbon nanotüp-COOH) ve fulleren C60 kullanılmıştır. Grafen-COOH'un kalınlığı 5 nm, çapı 1-2 mikron, yüzey alanı 700 m²/g olup %99,8 saflıktadır. Karbon Nanotüp-COOH'un çapı 10-20 nm, uzunluğu 10-30 µm,

saflığı %95, yüzey alanı 200 m²/g ve COOH içeriği ağırlıkça %1'dir. Çalışmada kullanılan fulleren C60 ise 0,7 nm çapında ve %99,5 saflıktadır. Çalışmada kullanılan nanopartiküller, Grafen Chemical Industries (Ankara, Türkiye)'den tedarik edilmiş olup SEM görüntüleri Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Nanopartiküllerin SEM görüntüleri *a.Grafen-COOH, b. Karbon nanotüp-COOH, c. Fulleren C60 (Malikov *et al.* 2014; Therthagiri *et al.* 2015)

3.4. Nanopartikül Katkılı Yapıştırıcıların Hazırlanması

Nanopartikül katkılı yapıştırıcıların hazrlanmasında karbon nanopartiküllerin yapıştırıcı içinde homojen olarak dağılarak topaklanma yapmamasına dikkat edilmesi gerekir. Yapıştırıcı içerisinde nanopartiküllerin homojen olarak dağılmaması durumunda, elde edilen sonuçları doğru olarak değerlendirmek yanlış olur. Bu amaçla; nanopartikül katkılı yapıştırıcıların hazırlanmasında birkaç farklı yöntem denenmiş, yapıştırıcı içerisine nanopartiküllerin homojen olarak dağıldığı en ideal yöntem bulunarak bu çalışmada kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan yöntemler aşağıda detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

3.4.1. Elle karıştırma yöntemi

Bu yöntemde; önceden asetonla temizliği yapılmış boş bir beherglasa yapılması planan nanopartikül katkılı yapıştırıcı miktarına göre, ağırlıkça istenilen oranda nanopartikül eklenmiştir. Daha sonra nanopartiküller arası mesafeyi artırarak partiküller arasında agregasyonu engellemek için beherglasa eklenen nanopartiküllerin üzerine yapıştırıcı miktarının iki katı kadar ağırlıkta aseton eklenerek ultrasonik karıştırıcıda 30 KHz frekans değerinde 10 dakika karıştırılmıştır. Ultrasonik karışım esnasında açığa çıkan ısının nanopartikülleri etkilememesi için buzlu su karışımı beherglasın altına konulmuştur (Şekil 3.2a). Ultrasonik karıştırma işleminden sonra aseton+nanopartikül karışımı 70-80°C'de steril bir etüv içerisinde aseton tamamen buharlaşana kadar bekletilmiştir (Şekil 3.2b). Asetonun tamamen uçup uçmadığı hassas terazide ağırlık kontrolüyle yapılmıştır (Gultekin *et al.* 2016).



Şekil 3.2. Yapıştırıcıların hazırlanması *a. Ultrasonik karıştırıcı, b. Etüv, c. Elle karıştırma

Aseton tamamen uçtuktan sonra, beherglas içerisine yapılması planlanan yapıştırıcı miktarına göre epoksi eklenerek 45 dakika elle karıştırılmıştır. Daha sonra yapıştırıcının epoksi-sertleştirici bileşim oranına göre sertleştirici eklenerek, 10 dakika yine elle karıştırılarak yapıştırıcının hazırlanması tamamlanmıştır (Şekil 3.2c).

3.4.2. Ultrasonik karıştırıcıyla karıştırma yöntemi

Bu yöntemde, elle karıştırma yönteminde olduğu gibi nanopartiküllerin asetonda karıştırılmasından sonra, nanopartikül bulunan beherglasa yapılması planlanan miktarda epoksi eklenerek ultrasonik karıştırıcı ile 30 KHz frekansında 30 dakika karıştırılmıştır.

Bu yöntemde aşırı ısınma sorununu gidermek amacıyla beherglasın altına buzlu su konulur (Şekil 3.2a). Ultrasonik karıştırma işleminden sonra epoksi+nanopartikül karışımına bileşim oranına göre sertleştirici eklenerek 10 dakika elle karıştırılmıştır.

3.4.3. Yüksek parçalayıcı karıştırıcıyla (high shear mixer) karıştırma yöntemi

Bu yöntemde; diğer iki yöntemdeki gibi nanopartiküller asetonla ultrasonik karıştırıcıda karıştırılmasından sonra, nanopartikül bulunan beherglasa planlanan miktarda epoksi eklenerek yüksek parçalayıcı karıştırıcı ile 2250 devirde 120 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra, yapıştırıcının epoksi-sertleştirici bileşim oranına göre sertleştirici eklenerek 10 dakika elle karıştırılmıştır (Gultekin *et al.* 2016).

3.4.4. Asetonlu ultrasonik karıştırma yöntemi

Bu yöntemde, diğer yöntemlerde olduğu gibi temiz boş beherglasa yapılması planan nanopartikül katkılı yapıştırıcı miktarına göre ağırlıkça istenilen oranda nanopartikül eklenir. Daha sonra nanopartiküller arası mesafeyi artırarak agregasyonu engellemek için beherglasa eklenen nanopartiküllerin üzerine yapıştırıcı miktarının iki katı kadar ağırlıkta aseton eklenerek ultrasonik karıştırıcıda 30 KHz frekans değerinde 10 dakika karıştırılmıştır. Diğer yöntemlerde asetonun buharlaştırılması sonucunda, nanopartiküllerin daha güçlü bir bağ oluşturarak, birbirlerine daha sıkı tutunduğu ve yapıştırıcı içerisinde topaklanmanın (agregasyon) meydana geldiği görüldüğünden, aseton+nanopartikül karışımı içerisinde bulunan aseton buharlaştırılmadan karışıma planlanan miktarda epoksi eklenerek ultrasonik karıştırıcıyla 30 KHz frekansında 30 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra, nanopartikül+aseton+epoksi karışımı, yapıştırıcının kürleşme sıcaklığının altındaki bir sıcaklık değerinde, steril bir etüv içerisinde karışım içerisinden asetonun tamamen uçması için bekletilmiştir. Bu aşamadan sonra nanopartikül+epoksi karışımına, epoksi-sertleştirici bileşim oranına göre sertleştirici eklenerek 10 dakika elle karıştırılmıştır (Gultekin et al. 2016).

Tüm yöntemlerle üretilen nanokompozit yapıştırıcılar ile hem bulk hem de deneme amaçlı bağlantı numuneleri üretilmiş (Şekil 3.3) ve bağlantı numunelerinin çekme testleri yapılmıştır. Nanokompozit yapıştırıcılarla birleştirilmiş bağlantı numunelerinin testleri sonucunda hasar yüklerindeki yüzde standart sapma belirlenmiştir. Standart sapmanın en az olduğu yöntemde, yapıştırıcı ve nanopartikülün birbiri içerisinde homojen dağıldığını kabul edilerek, en uygun karıştırma yönteminin asetonlu ultrasonik karıştırma yöntemi olduğu belirlenmiştir. Belirlenen uygun karıştırma yönteminde belirtilen aynı prosedür uygulanarak, nanopartikül katkısız yapıştırıcılar da üretilmiştir.



Şekil 3.3. Deneme amaçlı bulk ve bağlantı numuneleri

3.5. Nanopartikül Katkısız Yapıştırıcıların Hazırlanması

Nanopartikül katkılı ve katkısız nanokompozit yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin karşılaştırılması için, nanopartikül katkılı yapıştırıcı hazırlama yöntemlerinden asetonlu ultrasonik karıştırma yöntemi dikkate alınarak nanopartikül katkısız yapıştırıcılar hazırlanmıştır. Bu amaçla, temizliği yapılmış boş bir behere hassas terazi yardımıyla yapılması planlanan yapıştırıcı karışım (epoksi+sertleştirici) miktarının bileşim oranına göre epoksi ve epoksi miktarının iki katı kadar aseton ilave edilerek 30KHz frekans değerinde 30 dakika karıştırılmıştır. Epoksi ve aseton karışımı, kürleşme sıcaklığının altında bir sıcaklıkta steril bir etüv içinde bekletilerek asetonun tamamen uçması sağlanmıştır. Daha sonra bu karışıma epoksi-sertleştirici bileşim oranına göre sertleştirici eklenerek 10 dakika elle karıştırılmıştır (Gultekin *et al.* 2016).

3.6. Nanopartikül Katkılı ve Katkısız Bulk Numunelerin Hazırlanması

Nanopartikül katkılı ve katkısız yapıştırıcıların bulk numuneleri ISO 15166 standardı dikkate alınarak yapılımıştır. Bu amaçla belirli kalınlığa sahip iki rijit levha, yapıştırıcı tabakasının kalınlığını ayarlamak amacıyla iki levha arasına yerleştirilmiş küçük parçalar ve bu parçaları bir arada tutmak için arasına yerleştirilmiş çerçeveden oluşan kalıp kullanılmıştır (Şekil 3.4a).



Şekil 3.4. Bulk numunelerin kalıba yerleştirilmesi *a. Yapıştırıcının kalıba dökülmesi, b. Kalıp

Yapıştırıcının kolay çıkarılabilmesi için, her iki rijit levhanın birer yüzü 3M firması tarafından üretilen 0,10 mm kalınlığında yanmaz ve yapışmaz bant ile kaplanmıştır. Nanopartikül katkılı ve katkısız çift bileşenli yapısal yapıştırıcılar alt tabla üzerine dökülmüş ve yapıştırıcı kalınlığını ayarlamak için küçük parçalar kalıbın dört köşesine yerleştirilmiştir (Şekil 3.4b). Daha sonra üst levha yardımıyla basınç uygulanarak yapıştırıcı istenilen kalınlığa getirilmiştir. Nanopartikül katkılı ve katkısız yapıştırıcı istenilen kalınlığa getirilmiştir. Nanopartikül katkılı ve katkısız yapıştırıcı istenilen kalınlığa getirilmiştir. Nanopartikül katkılı ve katkısız yapıştırıcı altı tabakaları elde edilmiştir (Şekil 3.5a). Daha sonra bulk tabakalar ISO 2818'de tanımlanan şartlara uygun olarak çekme numunesi boyutlarında kesilmiştir (Şekil 3.5b) ve desikatör içinde deneyler yapılıncaya kadar saklanmıştır (Şekil 3.5c).



Şekil 3.5. Bulk numunelerin hazırlanması *a. Kürleşmiş yapıştırıcı tabakaları, b. Standart çekme deneyi numunesi (ISO 2818), c. Bulk numuneler

Yapılan çalışmada farklı özelliklere sahip (sert, yumuşak ve güçlendirilmiş) yapısal yapıştırıcı (DP270, DP125, DP460), farklı karbon nanopartiküller (Grafen-COOH, Çok Duvarlı Karbon Nanotüp-COOH ve Fulleren C60) ve farklı nanopartikül katkı oranlarında (%0,5, %1 ve %2) asetonla ultrasonik karıştırma yöntemi kullanılarak nanokompozit yapıştırıcılar üretilmiştir. Üretilen nanokompozit yapıştırıcılar kulanılarak bulk numuneler üretilmiştir. Üretilen bulk numunelere ait deneysel parametreler Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Тір	Yapıştırıcı	Partikül Türü	Katkı Oranı
Tip-I	DP270	Katkısız	-
Tip-Ia-0.5	DP270	Grafen-COOH	% 0,5
Tip-Ia-1	DP270	Grafen-COOH	% 1
Tip-Ia-2	DP270	Grafen-COOH	% 2
Tip-Ib-0.5	DP270	Karbon Nanotüp-COOH	% 0,5
Tip-Ib-1	DP270	Karbon Nanotüp-COOH	% 1
Tip-Ib-2	DP270	Karbon Nanotüp-COOH	% 2
Tip-Ic-0.5	DP270	Fulleren C60	% 0,5
Tip-Ic-1	DP270	Fulleren C60	% 1
Tip-Ic-2	DP270	Fulleren C60	% 2

Çizelge 3.4. Bulk numunelere ait deneysel parametreler
Tip-II	DP125	Katkısız	-
Tip-IIa-0.5	DP125	Grafen-COOH	% 0,5
Tip-IIa-1	DP125	Grafen-COOH	% 1
Tip-IIa-2	DP125	Grafen-COOH	% 2
Tip-IIb-0.5	DP125	Karbon Nanotüp-COOH	% 0,5
Tip-IIb-1	DP125	Karbon Nanotüp-COOH	% 1
Tip-IIb-2	DP125	Karbon Nanotüp-COOH	% 2
Tip-IIc-0.5	DP125	Fulleren C60	% 0,5
Tip-IIc-1	DP125	Fulleren C60	% 1
Tip-IIc-2	DP125	Fulleren C60	% 2
Tip-III	DP460	Katkısız	-
Tip-IIIa-0.5	DP460	Grafen-COOH	% 0,5
Tip-IIIa-1	DP460	Grafen-COOH	% 1
Tip-IIIa-2	DP460	Grafen-COOH	% 2
Tip-IIIb-0.5	DP460	Karbon Nanotüp-COOH	% 0,5
Tip-IIIb-1	DP460	Karbon Nanotüp-COOH	% 1
Tip-IIIb-2	DP460	Karbon Nanotüp-COOH	% 2
Tip-IIIb-2 Tip-IIIc-0.5	DP460 DP460	Karbon Nanotüp-COOH Fulleren C60	% 2 % 0,5
Tip-IIIb-2 Tip-IIIc-0.5 Tip-IIIc-1	DP460 DP460 DP460	Karbon Nanotüp-COOH Fulleren C60 Fulleren C60	% 2 % 0,5 % 1

Çizelge 3.4. (devam)

3.7. Bağlantı Numunelerinin Yüzeyinin Hazırlanması

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların dayanımı, yapıştırılan malzemenin yüzeyinin kusursuz olmasına yani yüzey hazırlama methoduna bağlıdır. Bu amaçla ilk olarak alüminyum ve kompozit levhalar hassas kesme yöntemiyle istenilen boyutlara getirilerek, alüminyum alaşımlarına aşağıda anlatılan yüzey hazırlama methodu uygulanmıştır (Gultekin *et al.* 2016; Akpinar *et al.* 2017a)

- Kesme işleminde alüminyum parçaların etrafında oluşan çapaklar 220 grade SiC zımpara ile giderildikten sonra, numune üzerinde kesme veya üretim esnasında oluşan yağ, gres, kir gibi atıklar asetonla temizlenmiştir.
- Daha sonra alüminyum alaşımlarının yüzeyleri sırasıyla 240, 400 ve 600 grade SiC zımpara ile zımparalandıktan sonra, numune yüzeyinde oluşan ince zımpara

çiziklerinin giderilmesi için 1000 grade SiC zımpara ile zımparalanarak daha pürüzsüz numune yüzeyleri elde edilmiştir (Şekil 3.6a).

- Zımparalama işlemininin ardından numune yüzeyleri musluk suyunda yıkanmış ve alkalin esaslı toz deterjan ile temizlenmiştir.
- Numune üzerinde temizleyici artıkları kalmaması için alüminyum alaşımları sırasıyla musluk suyunda ve saf suda yıkanmıştır.
- Yıkama işlemininden sonra numuneler 10 dakika asetonda bekletilmiş ve daha sonra numune parçaları 60°C sıcaklıktaki steril bir etüv içerisinde 20 dakika bekletilerek kurutulmuş ve yapıştırma öncesi yüzey hazırlama işlemleri tamamlanmıştır (Şekil 3.6b).



Şekil 3.6. AA2024-T3 bağlantı numunelerinin hazırlanması *a. Zımparalama, b. Hazırlanan alüminyum alaşımları

Karbon fiber kumaş takviyeli (0-90°) düz dokuma kompozitlerin (CFFR) yüzey hazırlığında ise ilk olarak kesme esnasında oluşan çapaklar 240 grade SiC zımpara ile giderilmiştir. Daha sonra kompozit malzemelerin yüzeyindeki yağ ve gres gibi atıklar asetonla temizlendikten sonra alkalin esaslı toz deterjanla temizlenmiştir. Temizlenen

numuneler; sırasıyla musluk suyu ve saf su ile durulandıktan sonra, asetonda 10 dakika bekletilmiştir. 60°C sıcaklıktaki steril bir etüv içerisinde 20 dakika bekletilerek kurutulan numunelerin yüzey hazırlama işlemleri tamamlanmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Kompozit bağlantı numunelerinin hazırlanması

3.8. Tek Tesirli Bindirme Bağlantı Numunelerinin Hazırlanması

Yapılan çalışmada çekme ve eğme yüklerine maruz farklı yapıştırıcı (DP270, DP125 ve DP460), farklı nanopartikül (Grafen-COOH, Karbon Nanotüp-COOH ve Fulleren C60) ve farklı nanopartikül katkı oranlarında (%0,5, %1 ve %2) yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli alüminyum ve kompozit bağlantı numuneleri üretilmiştir. Çalışmada kullanılan çekme ve eğme yüküne maruz tek tesirli alüminyum bağlantı numuneleri geometrisi Şekil 3.8'de, kompozit bağlantı numuneleri ise Şekil 3.9a ve Şekil 3.9b'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Alüminyum bağlantı numunesi geometrisi



Şekil 3.9. CFFR kompozit bağlantı numunesi geometrisi *a. Çekme yüküne maruz, b. Eğme yüküne maruz

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıları hazırlarken, malzemelerin kalıp içinde kaymayarak sabit kalması ve istenilen yapıştırıcı kalınlığının ayarlanabilmesi için özel tasarlanmış bir kalıbın kullanılması gerekmektedir. Şekil 3.10a'da gösterilen kalıp kullanılarak çekme ve eğme deneylerinde kullanılacak tek tesirli alüminyum ve kompozit bağlantı numuneleri aşağıda anlatıldığı gibi hazırlanmıştır.

• Tek tesirli bağlantı numunelerin kürleşme sonrası kalıptan kolayca çıkarılması amacıyla, silikon yağlayıcı (3M Scotch[™] 1600) kalıp üzerine püskürtülmüştür.

• Bağlantı numunelerinin yapışma bölgesine, hazırlanan nanokompozit yapıştırıcı bir mastar yardımıyla sürülmüştür (Şekil 3.10b).

• Yapıştırıcı kalınlığının 0,16 mm olması için, 0,16 mm kalınlığında metal parçalar (shim) bağlantı numunelerinin serbest uçlarına konularak, numunelerin bindirme uzunluğunun korunması ve üniform basınç sağlanması için numune kalınlığında alüminyum kalıp aparatları yerleştirilmiştir (Şekil 3.10b).



Şekil 3.10. Tek tesirli bağlantı numunelerinin üretilmesinde kullanılan kalıp *a. Kalıp, b. Kalıp aparatları

• Daha sonra numunelerin bulunduğu kalıp sıcak prese konulmuştur (Şekil 3.11a).

• Yapıştırıcılar için Çizelge 3.3'te verilen kürleşme şartları uygulanarak numunelerin kürleşmesi sağlanmıştır.

• Kürleşme işlemi tamamlanan numuneler sıcak presten çıkarılarak oda şartlarında soğuması için bekletilmiştir (Şekil 3.11b).

• Kürleşme işlemi esnasında dışarı taşan fazla yapıştırıcılar temizlenerek, yapıştırma bağlantı numuneleri deney için hazırlanmıştır (Şekil 3.11c).



Şekil 3.11. Tek tesirli bağlantı numunelerinin üretilmesi *a. Sıcak pres, b. Kürleşme sonrası numuneler, c. Temizlenmiş numuneler

Geometrik parametreleri Şekil 3.9'da verilen çekme yükü altında tek tesirli alüminyum bağlantı numuneleri için deneysel parametreler Çizelge 3.5'te verilmiştir. Her bir parametreden 3 adet olmak üzere, çekme deneyi yapmak amacıyla toplamda 90 adet tek tesirli alüminum bağlantı numunesi hazırlanmıştır.

Тір	Yapıştırıcı	Partikül Türü	Katkı Oranı
Tip-I	DP270	Katkısız	-
Tip-Ia-0.5	DP270	Grafen-COOH	% 0,5
Tip-Ia-1	DP270	Grafen-COOH	% 1
Tip-Ia-2	DP270	Grafen-COOH	% 2
Tip-Ib-0.5	DP270	Karbon Nanotüp-COOH	% 0,5
Tip-Ib-1	DP270	Karbon Nanotüp-COOH	% 1
Tip-Ib-2	DP270	Karbon Nanotüp-COOH	% 2
Tip-Ic-0.5	DP270	Fulleren C60	% 0,5
Tip-Ic-1	DP270	Fulleren C60	% 1
Tip-Ic-2	DP270	Fulleren C60	% 2
Tip-II	DP125	Katkısız	-
Tip-IIa-0.5	DP125	Grafen-COOH	% 0,5
Tip-IIa-1	DP125	Grafen-COOH	% 1
Tip-IIa-2	DP125	Grafen-COOH	% 2
Tip-IIb-0.5	DP125	Karbon Nanotüp-COOH	% 0,5
Tip-IIb-1	DP125	Karbon Nanotüp-COOH	% 1
Tip-IIb-2	DP125	Karbon Nanotüp-COOH	% 2
Tip-IIc-0.5	DP125	Fulleren C60	% 0,5
Tip-IIc-1	DP125	Fulleren C60	% 1
Tip-IIc-2	DP125	Fulleren C60	% 2
Tip-III	DP460	Katkısız	-
Tip-IIIa-0.5	DP460	Grafen-COOH	% 0,5
Tip-IIIa-1	DP460	Grafen-COOH	% 1
Tip-IIIa-2	DP460	Grafen-COOH	% 2
Tip-IIIb-0.5	DP460	Karbon Nanotüp-COOH	% 0,5
Tip-IIIb-1	DP460	Karbon Nanotüp-COOH	% 1
Tip-IIIb-2	DP460	Karbon Nanotüp-COOH	% 2
Tip-IIIc-0.5	DP460	Fulleren C60	% 0,5
Tip-IIIc-1	DP460	Fulleren C60	% 1
Tip-IIIc-2	DP460	Fulleren C60	% 2

Çizelge 3.5. Çekme yüküne maruz tek tesirli alüminyum bağlantı numuneleri için deneysel parametreler

Yapıştırıcıların bulk ve çeki hasar yüklerinden elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, yapıştırıcılarda %1 nanopartikül katkı oranının en iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bu sebeple eğme yükü altında alüminyum, çekme ve eğme yükü altında tek tesirli kompozit ve çift tesirli alüminyum bağlantı numuneleri üretilirken yapıştırıcı içerisine %1 katkı oranında nanopartiküller eklenmiştir. Eğme yükü altında alüminyum, çekme ve eğme yükü altında tek tesirli kompozit bağlantı numuneleri için deneysel parametreler Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Tip	Yapıştırıcı	Partikül Türü	Katkı Oranı
DP270	DP270	Katkısız	-
DP270-G	DP270	Grafen-COOH	% 1
DP270-K	DP270	Karbon Nanotüp-COOH	% 1
DP270-F	DP270	Fulleren C60	% 1
DP125	DP125	Katkısız	-
DP125-G	DP125	Grafen-COOH	% 1
DP125-K	DP125	Karbon Nanotüp-COOH	% 1
DP125-F	DP125	Fulleren C60	% 1
DP460	DP460	Katkısız	-
DP460-G	DP460	Grafen-COOH	% 1
DP460-K	DP460	Karbon Nanotüp-COOH	% 1
DP460-F	DP460	Fulleren C60	% 1

Çizelge 3.6. Çekme ve eğme yüküne maruz kompozit bağlantı numuneleri için deneysel parametreler

3.9. Çift Tesirli Bağlantı Numunelerinin Hazırlanması

Yapılan çalışmada tek tesirli alüminyum ve kompozit bağlantı numunelerinin yanı sıra, yapıştırıcıyla birleştirilmiş çift tesirli alüminyum bağlantı numuneleri de üretilmiştir. Çalışmada kullanılan çekme ve eğme yüküne maruz çift tesirli alüminyum bağlantı numunesi geometrileri Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12. Çift tesirli bağlantı numunesi geometrisi *a. Çekme deneyi için, b. Eğme deneyi için

Çift tesirli bağlantı numunelerini hazırlamak için, tek tesirli bağlantı numunelerinin hazırlanmasında kullanılan prosedür uygulanmıştır. Bu amaçla çekme ve eğme yüklerine maruz farklı yapıştırıcı (DP270, DP125 ve DP460), farklı nanopartikül (Grafen-COOH, Karbon Nanotüp-COOH ve Fulleren C60) ve %1 nanopartikül katkı oranında yapıştırıcıyla birleştirilmiş çift tesirli alüminyum bağlantı numuneleri üretilmiştir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Çift tesirli bağlantı numuneleri

3.10. Bulk Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Bulk numunelerin mekanik özellikleri; plastikler için geliştirilmiş ISO 527-2 standardına uygun olarak hazırlanan numunelerin çeki yükü altında tek eksenli kuvvet uygulamasıyla belirlenebilir (ISO 527-1). Yapıştırıcı bulk numunelerinin kuvvet aralığı düşük olduğu için 5 kN'luk bir yük hücresinde deneyleri yapmak, elde edilecek gerilme-şekil değiştirme diyagramlarının belirlenmesinde güvenirlik sağlamaktadır. Bu amaçla, bulk numunelerinin çekme deneyleri Shimadzu AG-I üniversal çekme cihazında 5 kN'luk bir yük hücresi kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin serbest uçları çekme cihazının çenelerine eşit basınç uygulanarak bağlanmıştır (Akpinar *et al.* 2018).

Yapıştırıcıların şekil değiştirme kapasiteleri yüksek olduğu için, şekil değişiminin doğru olarak belirlenmesi amacıyla; numune ile temas halinde olmayan uzama ölçer (extenseometre) kullanılması gereklidir. Bu yüzden şekil değişimini ölçmek için çekme cihazına ait DVE 101/201 marka video extensometre kullanılmıştır. Nanopartikül

katkılı ve katkısız nanokompozit yapıştırıcıların bulk numuneleri 5 mm/dk şekil değiştirme hızında test edilmiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Bulk numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi

3.11. Bağlantı Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Tek tesirli alüminyum ve kompozit bağlantı numuneleri ile çift tesirli bağlantı numunelerinin çekme testleri bilgisayar kontrollü Shimadzu AG-I üniversal çekme cihazında 1 mm/dk çekme hızında yapılmıştır. Çekme deneyleri yapılırken numuneler yakından gözlemlenmiş ve deney sonunda bağlantı numunelerinin hasar yüzeyleri incelenmiştir. Ayrıca deney sonucunda her bir bağlantı için numunelerin taşıyabildikleri maksimum yük belirlenmiş ve her bağlantı konfigürasyonu için kuvvet-uzama (F- Δ L) eğrileri elde edilmiştir. Tek tesirli bağlantı numunelerine uygulanan sınır şartları ve kuvvetler Şekil 3.15'de gösterildiği gibidir. Çift tesirli bağlantı numunelerine uygulanan sınır şartları ve kuvvetler ise Şekil 3.16'da gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Tek tesirli bağlantı numunelerinin sınır şartları ve çekme deneyi *a. Sınır şartları ve uygulanan kuvvet, b. Çekme deneyi



Şekil 3.16. Çift tesirli bağlantı numunelerinin sınır şartları ve çekme deneyi: *a. Sınır şartları ve uygulanan kuvvet, b. Çekme deneyi

Tek tesirli alüminyum ve kompozit bağlantı numuneleri ile çift tesirli bağlantı numunelerinin dört nokta eğme deneyleri ise bilgisayar kontrollü Shimadzu AG-I üniversal çekme cihazında 5 mm/dk eğme hızında yapılmıştır. Tek tesirli alüminyum bağlantı numuneleri için sınır şartları ve numunelere uygulanan kuvvetler Şekil 3.17'de, tek tesirli kompozit bağlantı numunelerine uygulanan sınır şartları ve kuvvetler Şekil 3.18'de, çift tesirli bağlantılara uygulanan sınır şartları ve kuvvetler ise Şekil 3.19'da gösterildiği gibidir. Dört nokta eğme deneyini, yükün uygulandığı iki nokta arasında

sadece eğilme momentinin oluşması ve yapıştırma bölgesinin bu momente maruz bırakılması sebebiyle tercih edilmiştir.

Dört nokta eğme deneyleri yapılırken her numune yakından gözlemlenmiş ve deney sonunda hasar bölgeleri incelenmiştir. Ayrıca numunelerin taşıdıkları maksimum hasar yükleri kaydedilmiştir.



Şekil 3.17. Tek tesirli alüminyum bağlantı numunelerinin dört nokta eğme testi sınır şartları



Şekil 3.18. Tek tesirli kompozit bağlantı numunelerinin dört nokta eğme testi sınır şartları



Şekil 3.19. Çift tesirli bağlantı numunelerinin dört nokta eğme testi sınır şartları

3.12. Nanopartikül Katkısız Yapıştırıcıların FT-IR Analizi

Katkısız çift bileşenli karışım halindeki yapıştırıcıların epoksi ve hızlandırıcı bileşeninin FT-IR spektrumları ayrı ayrı alınmıştır. Karışım halindeki yapıştırıcıların FT-IR sprektrumlarını almak için, hazırlanan katkısız yapıştırıcı bulk numuneleri öğütülerek toz haline getirilmiştir (Şekil 3.20a). Daha sonra %1 oranında KBr (Potasyum Bromür) ile karıştırılarak 4 tonluk basınç altında pelet haline getirilmiştir (Şekil 3.20b). Pelet haline getirilmiş numunelerin FT-IR sprektrumları 4000-400 cm⁻¹ dalga sayısı aralığında Pelkin-Elmer Spectrum-One marka FT-IR cihazı ile alınmıştır.



Şekil 3.20. Nanopartikül katkısız yapıştırıcıların FT-IR analizi: *a. Toz haline getirilmiş yapıştırıcı, b. Pelet haline getirilmiş numuneler, c. CH₂Cl₂ çözeltisi içinde çözünmüş epoksi ve hızlandırıcı bileşenleri

Epoksi ve hızlandırıcı bileşenlerinin FT-IR sprektrumlarını almak için ise; bu bileşenler CH₂Cl₂ (Diklormetan) içerisinde çözülerek, %1 oranında KBr içerisine katılıp, 4 tonluk basınç altında pelet haline getirilmiştir (Şekil 3.20c). Pelet halindeki numuneler 50°C'de etüv içerisine bırakılarak CH₂Cl₂ çözücüsünün ortamdan ayrılması sağlanmıştır. Daha sonra bu numunelerin FT-IR sprektrumları, 4000-400 cm⁻¹ dalga sayısı aralığında Pelkin Elmer Spectrum-One cihazı ile alınmıştır.

3.13. Nanopartikül Katkılı Yapıştırıcıların FT-IR Analizi

%1 oranında nanopartikül katkılı yapıştırıcıların FT-IR analizleri için, Grafen-COOH, Karbon Nanotüp-COOH ve Fulleren nanopartikül katkılı DP270, DP125 ve DP460 yapısal yapıştırıcılarıyla üretilmiş bulk numuneler 2 mm²' lik boyutlara indirgenmiştir. Hazırlanan bu numuneler reflektans ünitesine yerleştirilmiştir. Spektrumlar, 4000–400 cm⁻¹ dalga sayısı aralığında Nicolet iS10 model FT-IR/ATR spektrofotometresi kullanılarak yapılmıştır (Akpinar *et al.* 2018)



4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Farklı Karıştırma Yöntemlerinden Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

Nanopartikül katkılı nanokompozit yapıştırıcıların hazırlanmasında en önemli husus, karbon nanopartiküllerin yapıştırıcı içinde homojen olarak dağılmasını sağlayarak, birbirleri arasında topaklanma (agregasyon) yapmasını engellemektir. Bu amaçla materyal ve yöntem kısmında bahsedilen dört yöntem (Elle karıştırma, ultrasonik karıştırıcıyla karıştırma, yüksek parçalayıcı karıştırıcı ile karıştırma, asetonlu ultrasonik karıştırıcıyla karıştırma) için DP460 yapıştırıcısı kullanılarak katkısız ve %1 grafen katkılı olmak üzere tek tesirli bağlantı numunelerinden üçer adet numune test edilerek, optimum karışımı sağlayacak yöntem belirlenmiştir. Dört yöntem ile üretilen bağlantı numunelerinin maksimum hasar yükleri ve standart sapmaları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Elle Karıştırma Yöntemi			Ultrasonik Karıştırıcıyla Karıştırma Yöntemi		
	Katkısız (N)	%1 Grafen Katkılı (N)		Katkısız (N)	%1 Grafen Katkılı (N)
Numune 1	15746	15915	Numune 1	14846	13712
Numune 2	15143	9893	Numune 2	15362	11107
Numune 3	14421	11323	Numune 3	14981	16214
Ortalama	15103	13277	Ortalama	15063	13677
Standart	663,4	3146,3	Standart	267,6	2553,7
Sapma (%)	(%4,3)	(%25,4)	Sapma (%)	(%1,7)	(%18,7)
Yüksek Parçalayıcı İle Karıştırma Yöntemi					
Yüksek Pa	rçalayıcı İle Yöntemi	e Karıştırma	Asetonlu U	ltrasonik K Yöntemi	Carıştırma
Yüksek Pa	rçalayıcı İle Yöntemi Katkısız (N)	e Karıştırma %1 Grafen Katkılı (N)	Asetonlu U	lltrasonik K Yöntemi Katkısız (N)	Carıştırma %1 Grafen Katkılı (N)
Yüksek Pa Numune 1	rçalayıcı İle Yöntemi Katkısız (N) 15232	e Karıştırma %1 Grafen Katkılı (N) 14523	Asetonlu U Numune 1	Itrasonik K Yöntemi Katkısız (N) 15051	Karıştırma %1 Grafen Katkılı (N) 16472
Yüksek Pa Numune 1 Numune 2	rçalayıcı İle Yöntemi Katkısız (N) 15232 14962	e Karıştırma %1 Grafen Katkılı (N) 14523 16307	Asetonlu U Numune 1 Numune 2	Itrasonik K Yöntemi Katkısız (N) 15051 15187	Xarıştırma %1 Grafen Katkılı (N) 16472 16827
Yüksek Pa Numune 1 Numune 2 Numune 3	rçalayıcı İle <u>Yöntemi</u> Katkısız (N) 15232 14962 14805	e Karıştırma %1 Grafen Katkılı (N) 14523 16307 12865	Asetonlu U Numune 1 Numune 2 Numune 3	Altrasonik K Yöntemi Katkısız (N) 15051 15187 14845	Xarıştırma %1 Grafen Katkılı (N) 16472 16827 16383
Yüksek Pa Numune 1 Numune 2 Numune 3 Ortalama	rçalayıcı İle Yöntemi Katkısız (N) 15232 14962 14805 14999	e Karıştırma %1 Grafen Katkılı (N) 14523 16307 12865 14565	Asetonlu U Numune 1 Numune 2 Numune 3 Ortalama	Katkısız (N) 15051 15187 14845 15027	Xarıştırma %1 Grafen Katkılı (N) 16472 16827 16383 16650,6
Yüksek Pa Numune 1 Numune 2 Numune 3 Ortalama Standart	rçalayıcı İle Yöntemi Katkısız (N) 15232 14962 14805 14999 216	e Karıştırma %1 Grafen Katkılı (N) 14523 16307 12865 14565 1721,4	Asetonlu U Numune 1 Numune 2 Numune 3 Ortalama Standart	Katkısız (N) 15051 15187 14845 15027 172,2	Xarıştırma %1 Grafen Katkılı (N) 16472 16827 16383 16650,6 234,9

Çizelge 4.1. Dört farklı yöntem ile üretilen bağlantıların hasar yükleri ve standart sapmaları

Çizelge 4.1 incelendiğinde; elle karıştırma yöntemiyle üretilen nanokompozit yapıştırıcı kullanılarak üretien tek tesirli bindirme bağlantılarının hasar yükündeki standart sapmanın yaklaşık %25 civarında olması, nanopartiküllerin yapıştırıcı içerisinde homojen olarak dağılmadığının önemli bir işaretidir. Bu yöntem ile üretilen yapıştırıcıların kullanıldığı bağlantı numunelerinin hasar yükündeki bu yüksek sapma sonuçların yanlış değerlendirilmesine sebep olur (Gultekin *et al.* 2016)

Ultrasonik karıştırıcıyla ve yüksek parçalayıcı (high shear mixer) ile karıştırma yöntemlerinde ise; standart sapmanın elle karıştırma yöntemine göre azaldığı ve sırasıyla %18,7 ve %11,8 olduğu görülmektedir. Standart sapmadaki bu azalma ile nanopartiküllerin yapıştırıcı içerisinde biraz daha homojen olarak dağıldığı anlaşılmaktadır. Bu iki yöntem ile elde edilen sonuçlar bağlantının güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini iyileştirmektedir. Ayrıca Neto ve arkadaşları tarafından yüksek parçalayıcı karıştırıcı ile yapılan nanopartikül katkılı yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarla ilgili bir çalışmanın sonuçları incelendiğinde; standart sapmanın yaklaşık %10-25 arasında olması, bulunan sonuçların literatür ile uyumlu olduğunu göstermektedir (Neto *et al.* 2013; Gultekin *et al.* 2016).

Katkısız ve %1 grafen katkılı bağlantı numunelerin maksimum hasar yükleri karşılaştırıldığında; yapıştırıcı içerisine grafen katkısının hasar yüküne etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için her üç yöntemde de (Elle karıştırma, ultrasonik karıştırıcıyla karıştırma, yüksek parçalayıcı karıştırıcı ile karıştırma) standart sapmaların yüksek olduğu görülmektedir. Standart sapmadaki bu yüksek değerler karbon nanopartikül katkısıyla elde edilen yapıştırıcı ve bağlantıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve katkısız numunelerle karşılaştırılmasında hatalara sebep olmaktadır. Çizelge 4.1'de verilen ve tez kapsamında geliştirilen asetonlu ultrasonik karıştırma yöntemiyle elde edilen nanopartikül katkılı ve katkısız numunelerin hasar yükleri incelediğinde, üç numunenin hasar yüklerinin birbirine yakın olduğu ve standart sapmanın yaklaşık %1,5'e kadar düştüğü görülmektedir. Elde edilen bu sonuç; yapıştırıcı içerisinde nanopartiküllerin homojen olarak dağıldığının bir göstergesi olup, tez çalışması kapsamında tüm numuneler asetonlu ultrasonik karıştırma yöntemiyle üretilmiştir.

4.2. Nanopartikül Katkılı ve Katkısız Bulk Numunelerinden Elde Edilen Sonuçlar

Nanopartikül katkılı ve katkısız yapıştırıcılarla elde edilen bulk numunelerin sergiledikleri gerilme-şekil değiştirme davranışlarını belirleyebilmek için numuneler kopma gerçekleşinceye kadar yüklenmiştir. Öncelikle, deneyler sonucunda kuvvetuzama eğrileri elde edilmiştir. Daha sonra bu eğrilerden, Denklem 1'de verilen formüller kullanılarak, yapıştırıcılar için gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme ($\sigma_g - \varepsilon_g$) eğrileri elde edilmiştir (Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3).

$$\varepsilon_g = \ln(1 + \varepsilon_m)$$
 $\sigma_g = \sigma_m(1 + \varepsilon_m)$ (1)

Sert yapıştırıcı olan DP270 yapıştırıcı içerisine Grafen-COOH, Karbon Nanotüp-COOH ve Fulleren C60 ilave edilmesi, yapıştırıcının gerilme-şekil değiştirme eğrisini (mekanik özelliklerini) değiştirmektedir. Şekil 4.1a'daki eğriler incelendiğinde yapıştırıcı içerisine %0,5 ve 1 oranında Grafen-COOH ilavesi yapıştırıcının gerilme değerini az da olsa artırırken, şekil değişimi üzerinde bir etkisi olmadığı görülmektedir. Ancak %2 oranında Grafen-COOH ilave edilmesi gerilme değerini yaklaşık %48 oranında azaltırken, şekil değiştirme değerini yaklaşık %550 oranında artırmaktadır.

Yapıştırıcı içerisine farklı oranlarda KNTCOOH ilave edilmesi ile sert olan yapıştırıcı daha sünek bir hale gelmiştir. Yapıştırıcıların gerilme değerleri azalırken, şekil değiştirmelerinin önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Şekil 4.1b'deki eğriler incelendiğinde yapıştırıcı içerisine %0,5, 1 ve 2 oranında KNTCOOH ilave edilmesiyle gerilme değerleri sırasıyla yaklaşık %15, %33 ve %48 oranında azalırken, birim şekil değişimini %105, %400 ve %860 oranında artırmaktadır.



Şekil 4.1. DP270 yapıştırıcısına ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri *a. Grafen-COOH, b. Karbon Nanotüp-COOH, c. Fulleren

DP270 içerisine %0,5 ve 1 oranında fulleren eklenmesiyle birim şekil değişimi yaklaşık %45 oranında artarken, %2 oranında fulleren ilave edilmesiyle şekil değişimi %185 oranında arttığı Şekil 4.1c'den görülmektedir. Maksimum gerilme değerleri ise %0,5 ve %2 oranda eklenmesiyle yaklaşık %5 oranında artarken, %1 oranında fulleren eklenmesiyle yaklaşık %3 oranında azalmıştır.



Şekil 4.2. DP125 yapıştırıcısına ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri *a. Grafen-COOH, b. Karbon Nanotüp-COOH, c. Fulleren

Esnek karakterdeki DP125 yapısal yapıştırıcı içerisine Grafen-COOH nanopartikül katkısı hariç diğer nanopartiküllerin ilave edilmesi yapıştırıcıyı sertleştirdiği ve gerilme değerini artırdığı görülmektedir (Şekil 4.2). En fazla etkinin yapıştırıcıya fulleren ilave edilmesiyle oluştuğu görülmektedir.

%0.5 oranında Grafen-COOH katkısıyla; yapıştırıcının maksimum gerilme değeri %45 oranında azalırken, KNTCOOH ve fulleren nanopartikül katkısıyla %36 ve %107

oranında artmaktadır. Şekil değiştirmeler ise grafen-COOH katkısıyla %19 oranında artarken, KNTCOOH ve fulleren katkısıyla %24 ve %35 oranında azalmıştır.

Bu grafikler gerilme açısından incelendiğinde; yapıştırıcı içerisine %1 oranında grafen-COOH, KNTCOOH ve fulleren ilave edilmesi, yapıştırıcının gerilme değerini yaklaşık olarak sırasıyla %12, %44 ve %130 oranında artırdığı anlaşılmaktadır. Şekil değiştirme açısından incelendiğinde ise; KNTCOOH ve fulleren ilave edilmesiyle yapıştırıcının şekil değiştirme değeri yaklaşık olarak sırasıyla %11 ve %52 oranında azalırken, grafen-COOH katkısında %6 oranında artmaktadır.

Yapıştırıcı içerisine %2 oranında grafen-COOH, KNTCOOH ve fulleren ilave edilmesiyle elde edilen nanokompozit yapıştırıcıların maksimum gerilme değerleri ise sırasıyla %107, %11 ve %115 oranında artmaktadır.

Şekil 4.3'te verilen güçlendirilmiş orta sertlikteki DP460 yapıştırıcı içerisine karbon nanopartürküllerin eklenmesi, yapıştırıcının hem gerilme hem de şekil değiştirme değerlerini artırmaktadır. DP460 yapıştırıcı içerisine %0,5 ve %1 oranında grafen-COOH ilave edilmesi yapıştırıcının gerilme-şekil değiştirme eğrisini çok fazla etkilememiştir. Fakat katkı oranı %2 olduğu durumda, gerilme değeri düşerken, şekil değiştirme kapasitesi artmaktadır.

Şekil 4.3b'de verilen eğriler incelendiğinde, DP460 yapıştırıcısına KNTCOOH eklenmesi nanokompozit yapıştırıcının gerilme şekil değiştirme kapasitesini artırmaktadır. Ayrıca en iyi artışın %1 katkı oranında olduğu görülmektedir. Şekil 4.3'te verilen grafikler bir bütün olarak değerlendirildiğinde; DP460 yapıştırıcısına fulleren katılması, diğer karbon nanopartikül katkılarına göre yapıştırıcının mekanik özelliklerini önemli derecede iyileştirdiği açıkça görülmektedir (Şekil 4.3c).



Şekil 4.3. DP460 yapıştırıcısına ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri *a. Grafen-COOH, b. Karbon Nanotüp-COOH, c. Fulleren

4.3. Çeki Yüküne Maruz Tek Tesirli Alüminyum Bindirme Bağlantılarından Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

DP270 sert yapısal yapıştırıcı kullanılarak elde edilen katkısız ve nanopartikül katkılı tek tesirli alüminyum bağlantı numunelerinden her bir parametre için üçer numune test edilmiş olup, bu üç numunenin ortalaması alınarak bağlantının hasar yükü elde edilmiştir (Çizelge 4.2). Ortalama hasar yükleri incelendiğinde, DP270 yapıştırıcısına nanopartikül ilave edilmesi Tip-Ic-1 bağlantı tipi hariç diğer bağlantı tiplerinde

bağlantının hasar yükünü önemli miktarda artırmaktadır. Ancak bu artış yapıştırıcıya eklenen nanopartikül katkı oranına ve nanopartilkül türüne göre değişmektedir. Rijit yapıştırıcıya %0,5, 1 ve 2 oranlarında Grafen-COOH ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü sırasıyla yaklaşık %27, %109 ve %276 artırdığı Çizelge 4.2'den açıkça görülmektedir.

Тір	Nanopartikül	Nanopartikül Katkı Oranı (%)	Ortalama Hasar Yükleri(N)	Standart Sapma (%)
Tip-I	Katkısız	-	$2085^{\pm 65}$	3,2
Tip-Ia-0.5	Grafen-COOH	0,5	$2664^{\pm 112}$	4,2
Tip-Ib-0.5	Karbon Nanotüp-COOH	0,5	3703 ^{±157}	4,2
Tip-Ic-0.5	Fulleren	0,5	$2526^{\pm 86}$	3,4
Tip-Ia-1	Grafen-COOH	1	$4363^{\pm 145}$	3,3
Tip-Ib-1	Karbon Nanotüp-COOH	1	$5185^{\pm 230}$	4,4
Tip-Ic-1	Fulleren	1	$1945^{\pm 83}$	4,3
Tip-Ia-2	Grafen-COOH	2	7850 ^{±135}	1,7
Tip-Ib-2	Karbon Nanotüp-COOH	2	$4810^{\pm 204}$	4,2
Tip-Ic-2	Fulleren	2	$2201^{\pm 73}$	3,3

Çizelge 4.2. DP270 yapıştırıcısı ile elde edilen bağlantıların ortalama hasar yükleri ve standart sapmaları

Ayrıca yapıştırıcıya %0,5 oranında KNTCOOH eklenmesi bağlantının hasar yükünü yaklaşık %78 oranında artırırken, katkı oranı %1 ve %2 olduğunda bağlantının hasar yükündeki artış oranı sırasıyla yaklaşık %148 ve %130 oranında artmaktadır.

Ancak rijit yapıştırıcıya fulleren C60 ilave edilmesi bağlantının hasar yükünde önemli bir artma veya azalmaya neden olmamaktadır. Yapıştırıcı içerisine %0,5 ve %2 oranında fulleren eklenmesiyle, bağlantının hasar yükü sırasıyla %22 ve %6 oranında artarken, %1 oranında fulleren eklenmesiyle çeki hasar yükü %5 oranında azalmaktadır.

Çizelge 4.2'de verilen standart sapmalar incelendiğinde ise, tüm bağlantı konfigürasyonlarında standart sapmanın yaklaşık %3-4 gibi minimum olması, yapıştırıcıya ilave edilen nanopartikülün yapıştırıcı içerisinde homojen dağıldığını göstermektedir (Akpinar *et al.* 2017a).



Şekil 4.4. DP270 yapıştırıcısıyla birleştirilmiş katkılı ve katkısız bağlantıların hasar yüzeyi

Şekil 4.4'te verilen DP270 yapıştırıcısıyla üretilmiş nanopartikül katkılı ve katkısız bağlantı numunelerinin hasar yüzeyleri ISO 10365 tanımlanan yapıştırıcılar için deformasyon tipleri göz önüne alınarak incelendiğinde; katkısız ve nanopartikül katkılı bağlantı numunelerinde özel kohesiv hasar (her iki malzemenin yapışma bölgesinde eşit yapıştırıcı kalınlığının olmaması) olduğu görülmektedir.

Esnek karakterdeki yapıştırıcı olan DP125 kullanılarak elde edilen katkısız ve nanopartikül katkılı tek tesirli alüminum bindirme bağlantılardan elde edilen ortalama hasar yükleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. KNTCOOH katkılı bağlantılar ile katkısız bağlantıların ortalama hasar yükleri karşılaştırıldığında; %0,5 oranında KNTCOOH katkılı bağlantılarda %2, %2 oranında KNTCOOH katkılı bağlantılarda ise %18 hasar yükünde düşüş olduğu görülmektedir. Ancak KNTCOOH katkılı bağlantılarda katkı oranı %1 olduğunda ise bağlantıların hasar yükünde yaklaşık %4,3 oranında artış olmaktadır. KNTCOOH nanopartikül katkılı bağlantıların hasar yüklerindeki artma ve

azalma oranları küçük olduğundan, esnek yapıştırıcılarda KNTCOOH'un etkisinin olmadığı söylenebilir (Akpinar *et al.* 2017a).

Тір	Nanopartikül	Nanopartikül Katkı Oranı (%)	Ortalama Hasar Yükleri(N)	Standart Sapma (%)
Tip-II	Katkısız	-	$6535^{\pm 223}$	3,4
Tip-IIa-0.5	Grafen-COOH	0,5	$6820^{\pm 325}$	4,8
Tip-IIb-0.5	Karbon Nanotüp-COOH	0,5	$6404^{\pm 312}$	4,9
Tip-IIc-0.5	Fulleren	0,5	$9118^{\pm 334}$	3,7
Tip-IIa-1	Grafen-COOH	1	$8362^{\pm 284}$	3,4
Tip-IIb-1	Karbon Nanotüp-COOH	1	$6818^{\pm 296}$	4,3
Tip-IIc-1	Fulleren	1	$10806^{\pm 318}$	2,9
Tip-IIa-2	Grafen-COOH	2	$6746^{\pm 257}$	3,8
Tip-IIb-2	Karbon Nanotüp-COOH	2	$5337^{\pm 242}$	4,5
Tip-IIc-2	Fulleren	2	$9815^{\pm 305}$	3,1

Çizelge 4.3. DP125 yapıştırıcısı ile elde edilen bağlantıların ortalama hasar yükleri ve standart sapmaları

Grafen-COOH katkılı bağlantılar ile katkısız bağlantıların ortalama hasar yükleri karşılaştırıldığında ise; sırasıyla %0,5 oranında Grafen-COOH katkılı bağlantılarda yaklaşık %4, %1 oranında Grafen-COOH katkılı bağlantılarda ise yaklaşık %3 hasar yükünde artış oranında Grafen-COOH katkılı bağlantılarda ise yaklaşık %3 hasar yükünde artış olduğu görülmektedir. Diğer taraftan, fulleren katkılı bağlantılar ile katkısız bağlantılar karşılaştırıldığında; sırasıyla %0,5 oranında fulleren katkılı bağlantılarda yaklaşık %40, %1 oranında fulleren katkılı bağlantılarda yaklaşık %65 ve %2 oranında fulleren katkılı bağlantılarda ise yaklaşık %65 ve %2 oranında fulleren katkılı bağlantılarda yaklaşık %40, %1 oranında fulleren katkılı bağlantılarda yaklaşık %65 ve %2 oranında fulleren katkılı bağlantılarda ise yaklaşık %50 bağlantıların ortalama hasar yüklerinde artış olmaktadır. Buradan esnek yapıştırıcılara fulleren nanopartikül ilave edilmesi tek tesirli bindirme bağlantıların hasar yüklerinde önemli artışa neden olduğu ve bu artışın nanopartikül katkı oranının %1 olduğunda maksimum olduğu sonucuna varılabilir .

Çizelge 4.3'de verilen standart sapmalar incelendiğinde ise; tüm bağlantı konfigürasyonlarında standart sapmanın yaklaşık %3-5 gibi minimum bir aralıkta olması nanopartiküllerin homojen dağıldığının bir işaretidir (Akpinar *et al.* 2017a).



Şekil 4.5. DP125 yapıştırıcısıyla birleştirilmiş katkılı ve katkısız bağlantıların hasar yüzeyi

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda hasar yapışma bölgesinin serbest uçlarından başlayıp merkeze doğru ilerlemektedir. Şekil 4.5'te verilen DP125 yapıştırıcısıyla birleştirilmiş nanopartikül katkılı ve katkısız bağlantıların hasar yüzeyleri incelendiğinde; katkısız (Tip-II), %0,5 ve %2 KNTCOOH katkılı (Tip-IIb-0.5, 2), %1 ve %2 katkılı Grafen-COOH (Tip-IIa-1, 2) ve %0,5 ve %2 fulleren katılı (Tip-IIc-0.5, 2) bağlantı numunelerinin yüzeyinde yapıştırıcı miktarları aynı olmayıp, üst malzemenin uç kısımlarında, alt malzemenin ise diğer kısımlarında yapıştırıcı kaldığı görülmektedir. Bu durumda bağlantıda hasara neden olan çatlağın bindirme bölgesinin bir ucundan başlayıp merkeze doğru ilerlediği sonucuna varılabilir. Bu durum bağlantının hasar yükünü artırmaktadır. Ayrıca tüm numunelerde özel kohesiv hasar (her iki yapıştırılan malzemenin bindirme bölgesinde eşit yapıştırıcı kalınlığının olmaması) oluştuğu görülmektedir.

Çizelge 4.4'te verilen güçlendirilmiş DP460 yapısal yapıştırıcısı kullanılarak elde edilen katkısız ve nanopartikül katkılı tek tesirli alüminyum bindirme bağlantılardan elde edilen ortalama hasar yükleri incelendiğinde; yapıştırıcıya grafen-COOH, KNTCOOH ve fulleren ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü artırmaktadır. Ancak bu artış nanopartikül ilave oranına ve nanopartikül oranına göre değişmekte olup, güçlendirilmiş yapıştırıcı için en iyi nanopartirkül katkı oranının %1 olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.4. DP460 yapıştırıcısı ile elde edilen bağlantıların ortalama hasar yükleri ve standart sapmaları

Тір	Nanopartikül	Nanopartikül Katkı Oranı (%)	Ortalama Hasar Yükleri(N)	Standart Sapma (%)
Tip-III	Katkısız	/	$14765^{\pm 114}$	0,8
Tip-IIIa-0.5	Grafen-COOH	0,5	$16653^{\pm 234}$	1,4
Tip-IIIb-0.5	Karbon Nanotüp-COOH	0,5	$17264^{\pm 202}$	1,2
Tip-IIIc-0.5	Fulleren	0,5	$18256^{\pm 267}$	1,5
Tip-IIIa-1	Grafen-COOH	1	17050 ^{±253}	1,5
Tip-IIIb-1	Karbon Nanotüp-COOH	1	$17547^{\pm 228}$	1,3
Tip-IIIc-1	Fulleren	1	$18915^{\pm 295}$	1,6
Tip-IIIa-2	Grafen-COOH	2	$16128^{\pm 284}$	1,8
Tip-IIIb-2	Karbon Nanotüp-COOH	2	$16750^{\pm 223}$	1,3
Tip-IIIc-2	Fulleren	2	$17909^{\pm 278}$	1,5

DP460 yapısal yapıştırıcısı içerisine %0,5 oranında grafen-COOH, KNTCOOH ve fulleren ilave edilmesiyle; tek tesirli alüminyum bağlantı numunelerinin hasar yükleri sırasıyla yaklaşık %12, %17 ve %23 oranında artmıştır.

%1 oranında üç farklı nanopartikül ilave edilerek elde edilen katkılı bağlantılar ile nanopartikül katkısız bağlantıların ortalama hasar yükleri karşılaştırıldığında, katkısız bağlantılara göre grafen-COOH katkılı bağlantılar yaklaşık %15, KNTCOOH katkılı bağlantılar yaklaşık %19 ve fulleren katkılı bağlantılar ise yaklaşık %28 daha fazla yük taşımıştır. Nanopartikül katkı oranının %2 olduğu durumda ise; grafen-COOH, KNTCOOH ve fulleren katkılı bağlantıların hasar yükleri sırasıyla yaklaşık %9, %14 ve %22 oranında arttığı görülmtekedir. Farklı nanopartikül ve farklı katkı oranlarında elde edilen deneysel sonuçlar bütün olarak değerlendirildiğinde, DP460 yapısal yapıştırıcısıyla birleştirilmiş bağlantılarda en iyi sonucun fulleren katkılı bağlantılarda olduğu görülmektedir.



Şekil 4.6. DP460 yapıştırıcısıyla birleştirilmiş katkılı ve katkısız bağlantıların hasar yüzeyi

Şekil 4.6'da verilen DP460 yapıştırıcısıyla birleştirilmiş bağlantıların hasar yüzey incelendiğinde, hasara neden olan çatlağın bindirme bölgesinin uç kısımlarından başlayıp merkeze doğru ilerlediği görülmektedir. Ayrıca ISO 10365 tanımlanan yapıştırıcılar için deformasyon tipleri göz önüne alındığında, tüm bağlantı tiplerinde özel koheziv hasar olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7. Katkısız ve %1 katkılı alüminyum bağlantı numunelerinin kuvvet-yer değiştirme eğrileri *a. DP270, b. DP125, c. DP460

Şekil 4.7a'da verilen katkısız ve %1 oranında nanopartikül katkılı bağlantılardan elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri incelendiğinde; sert bir yapıştırıcıya nanopartikül ilave edilmesi bağlantının yerdeğiştirme kapasitesini artırmaktadır. Yerdeğiştirme kapasitesinin artması demek; bağlantının hasar oluşumunu sönümleme kabiliyetinin daha iyi olduğu anlamına gelmektedir. Bu durum bağlantının hasar yükünü önemli derecede artırmaktadır.

Şekil 4.7b'de verilen kuvvet- yerdeğiştirme eğrileri incelendiğinde, Tip-IIa-1 ile Tip-IIc-1 bağlantı tiplerinde yerdeğiştirme kapasitesinin artması, bağlantıların hasar yüklerini artırmaktadır. Bu artış Tip-IIc-1 bağlantı tipinde daha fazla olması, deneylerden elde edilen ortalama hasar yükündeki artış oranını desteklemektedir.

DP460 yapıştırıcısıyla üretilmiş % 1 katkılı ve katkısız bağlantı numunelerinin kuvvetyer değiştirme eğrileri incelendiğinde de nanopartikül katkılı bağlantıların yer değiştirme kapasitesinin artmasıyla bağlantıların hasar yüklerinin arttığı görülmektedir.

4.4. Çeki Yüküne Maruz Tek Tesirli Kompozit Bindirme Bağlantılarından Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

Nanopartikül katkılı ve katkısız alüminyum bağlantı numunelerin çekme testinden elde edilen deneysel sonuçlara göre; bağlantıların hasar yükü açısından en iyi sonuçlar DP460, DP270 ve DP125 yapısal yapıştırıcılarına ağırlıkça %1 Grafen-COOH, Karbon Nanotüp-COOH ve Fulleren C60 nanopartiküllerİ katılarak elde edilen nanokompozit yapıştırıcılarda olduğu görülmüştür. Bu sebeple, üç farklı yapıştırıcı ve üç farklı nanopartikül kullanılarak elde edilen kompozit bağlantı numunelerin her bir konfigrasyonundan üçer adet numune test edilmiş ve ortalama maksimum hasar yükleri, kuvvet-yerdeğiştirme eğrileri ve hasar modelleri belirlenmiştir.

Çizelge 4.5'te verilen sert yapısal yapıştırıcı DP270 ile birleştirilmiş katkılı ve katkısız tek tesirli kompozit bağlantıların ortalama hasar yükleri incelendiğinde; sert yapıştırıcıya nanopartikül ilave edilmesi bağlantıların hasar yükünü artırmaktadır. Hasar yükündeki bu artış oranı ilave edilen nanopartikül türüne (GrafenCOOH, KNTCOOH ve Fulleren) göre değişmekte olup; yapıştırıcı içerisine grafen-COOH ilave edilmesiyle bağlantının ortalama hasar yükü yaklaşık %29 oranında artarken, KNTCOOH ve fulleren ilave edilmesiyle de bağlantıların hasar yükleri sırasıyla yaklaşık %16 ve %48 oranında artmaktadır. Standart sapmalar incelendiğinde ise, tüm bağlantılarda standart sapmanın yaklaşık %1-2 gibi minimum olduğu görülmektedir.

Тір	Nanopartikül	Nanopartikül Katkı Oranı (%)	Ortalama Hasar Yükleri(N)	Standart Sapma (%)
DP270	Katkısız	-	$6887^{\pm 52}$	0,7
DP270-G	Grafen-COOH	1	$8818^{\pm 131}$	1,5
DP270-K	Karbon Nanotüp-COOH	1	$7950^{\pm 87}$	1,1
DP270-F	Fulleren	1	$10272^{\pm 159}$	1,5
DP125	Katkısız	-	$9650^{\pm 113}$	1,2
DP125-G	Grafen-COOH	1	$12890^{\pm 171}$	1,3
DP125-K	Karbon Nanotüp-COOH	1	$14765^{\pm 167}$	1,1
DP125-F	Fulleren	1	$15418^{\pm 192}$	1,2
DP460	Katkısız	-	$16156^{\pm 63}$	0,4
DP460-G	Grafen-COOH	1	$18353^{\pm 102}$	0,5
DP460-K	Karbon Nanotüp-COOH	1	$20006^{\pm 107}$	0,5
DP460-F	Fulleren	1	19900 ^{±89}	0,4

Çizelge 4.5. Çeki yüküne maruz tek tesirli kompozit bağlantıların ortalama hasar yükleri ve standart sapmaları

Şekil 4.8'de, katkısız sert yapıştırıcı DP270 ve %1 oranında nanopartikül katkılı bağlantıların kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, fulleren nanopartikül katkısıyla yapıştırıcının yer değiştirme kapasitesinin önemli miktarda arttığı görülmektedir. Yer değiştirme kapasitesindeki artışla orantılı olarak, bağlantının hasar yükünde de önemli miktarda artış olduğu görülmektedir. Ayrıca bağlantıların hasar yüzeyleri incelendiğinde, tüm numunelerde özel kohesiv hasar oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.8. DP270 yapıştırıcısına ait kuvvet-yer değiştirme eğrisi ve hasar yüzeyleri *a. Kuvvet-yer değiştirme eğrisi, b. Hasar yüzeyleri



Şekil 4.9. DP125 yapıştırıcısına ait kuvvet-yer değiştirme eğrisi ve hasar yüzeyleri *a. Kuvvet-yer değiştirme eğrisi, b. Hasar yüzeyleri

Yumuşak karakterdeki yapısal yapıştırıcı DP125 kullanılarak elde edilen katkısız ve nanopartikül katkılı tek tesirli kompozit bindirme bağlantılardan elde edilen ortalama hasar yükleri (Çizelge 4.5 ve Şekil 4.9) incelendiğinde; katkısız bağlantılara kıyasla grafen-COOH nanopartikül katkılı bağlantılarda yaklaşık %35, KNTCOOH katkılı bağlantılarda yaklaşık %52 ve fulleren katkılı bağlantılarda ise yaklaşık %60 oranında hasar yükünde artış olmaktadır. Ayrıca ortalama hasar yüklerindeki standart sapmanın mimumum seviyede olması, katkısız ve de nanopartikül katkılı bağlantıların güvenilirliğini göstermektedir.

Şekil 4.9a'da verilen kuvvet- yerdeğiştirme eğrileri incelendiğinde; esnek bir yapısal yapıştırıcı olan DP125'e nanopartikül katılmasıyla yapıştırıcının daha esnek hale geldiği görülmektedir. Ayrıca nanopartikül ilave edilmesiyle yapıştırıcının yer değiştirme kapasitesinin artması hasarı sönümleme kabiliyetini artırmakta ve böylece bağlantının ortalama hasar yükü artmaktadır.

DP125 yapıştırıcısıyla elde edilmiş bağlantıların hasar yüzeyleri incelendiğinde ise; katkısız ve grafen-COOH katkılı bağlantılarda kohesiv (üst malzeme ile alt malzemenin yapışma bölgelerinde yapıştırıcı miktarının aynı olması) hasar görülürken, KNTCOOH ve fulleren katkılı bağlantı tiplerinde ise özel kohesiv hasar (her iki yapıştırılan malzemenin bindirme bölgesinde eşit yapıştırıcı kalınlığının olmaması) oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.10. DP460 yapıştırıcısına ait kuvvet-yer değiştirme eğrisi ve hasar yüzeyleri *a. Kuvvet-yer değiştirme eğrisi, b. Hasar yüzeyleri

Çizelge 4.5'te DP460 yapısal yapıştırıcısı ile üretilen bağlantıların ortalama hasar yükleri incelendiğinde; güçlendirilmiş DP460 yapıştırıcısına nanopartikül ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü artırmaktadır. Ancak bu artış nanopartikül türüne göre değişmekte olup; %1 oranında grafen-COOH ilave edilmesi bağlantının hasar yükünü yaklaşık %14 oranında artırırken, KNTCOOH ve fulleren ilave edilmesiyle hasar yükü sırasıyla yaklaşık %24 ve %23 oranında artmaktadır.

Şekil 4.10a'da verilen kuvvet-yer değiştirme eğrisi incelendiğinde; nanopartikül katkılı bağlantılar katkısız bağlantı ile kıyaslandığında, kuvvet-yer değiştirme kapasitesinin arttığı görülmektedir. Yer değiştirme kapasitesinin artmasıyla bağlantının hasar yükü önemli miktarda artmaktadır. Ayrıca bağlantıların hasar yüzeyleri incelendiğinde (Şekil 4.10b); katkısız bağlantı numunesinde özel kohesiv hasar oluştuğu görülmektedir. Oluşan kohesiv hasar neticesinde yapıştırıcının her iki malzeme yüzeyine de iyi bir tutunma sağlayarak hasar yükünü artırdığı sonucuna varılabilir (Akpinar *et al.* 2007c)

4.5. Çeki Yüküne Maruz Çift Tesirli Bağlantılarından Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

DP270, DP125 ve DP460 yapısal yapıştırıcılar kullanılarak üretilen katkısız ve nanopartikül katkılı çift tesirli bağlantı numunelerinden her bir parametre için üçer numune test edilmiş olup ortalama hasar yükleri Çizelge 4.6'da verilmiştir. Çizelge 4.6 incelendiğinde, yapıştırıcıya nanopartikül katılmasında çift tesirli bağlantıların hasar yükleri önemli miktarda arttığı görülmektedir.

Тір	Nanopartikül	Nanopartikül Katkı Oranı (%)	Ortalama Hasar Yükü (N)	Standart Sapma (%)
DP270	Katkısız		$2712^{\pm 66}$	2,4
DP270-G	Grafen-COOH	1	$10125^{\pm 133}$	1,3
DP270-K	Karbon Nanotüp-COOH	1	$5446^{\pm 98}$	1,8
DP270-F	Fulleren	1	$3990^{\pm 107}$	2,7
DP125	Katkısız	-	$4275^{\pm 84}$	2
DP125-G	Grafen-COOH	1	$7053^{\pm 136}$	1,9
DP125-K	Karbon Nanotüp-COOH	1	$7995^{\pm 112}$	1,4
DP125-F	Fulleren	1	$7650^{\pm 148}$	1,9
DP460	Katkısız	-	$16400^{\pm 175}$	1,1
DP460-G	Grafen-COOH	1	$19378^{\pm 242}$	1,2
DP460-K	Karbon Nanotüp-COOH	1	$19612^{\pm 215}$	1,1
DP460-F	Fulleren	1	$21640^{\pm 268}$	1,2

Çizelge 4.6. Çeki yüküne maruz çift tesirli bağlantıların ortalama hasar yükleri ve standart sapmaları

Çizelge 4.6'da verilen DP270 sert yapısal yapıştırıcısına üç farklı nanopartikül eklenerek elde edilen katkılı bağlantılar ile katkısız çift tesirli bağlantıların ortalama çeki hasar yükleri karşılaştırıldığında; grafen-COOH katkılı bağlantılar yaklaşık %270, KNTCOOH katkılı bağlantılar yaklaşık %101 ve fulleren katkılı bağlantılar ise yaklaşık %47 oranda katkısız bağlantılara göre daha fazla yük taşımıştır.

Yumuşak yapıştırıcı DP125 ile elde edilen nanopartikül katkılı bağlantıların hasar yükleri, katkısız bağlantıların ortalama hasar yükleriyle karşılaştırıldığında; grafen-

COOH katkılı bağlantılar yaklaşık %66, KNTCOOH katkılı bağlantılar yaklaşık %85 ve fulleren katkılı bağlantılar ise yaklaşık %80 oranında daha fazla yük taşımıştır.

Güçlendirilmiş DP460 yapısal yapıştırıcısına ait Çizelge 4.6'da verilen sonuçlar incelendiğinde ise; katkısız bağlantılara göre grafen-COOH katkılı bağlantılar yaklaşık %18, KNTCOOH katkılı bağlantılar yaklaşık %20 ve fulleren katkılı bağlantılar ise yaklaşık %33 oranında daha fazla yük taşıdığı görülmektedir.



Şekil 4.11. Çeki yüküne maruz çift tesirli bağlantı numunelerinin hasar yüzeyleri *a. DP270, b. DP125, c. DP460

Şekil 4.11a'da verilen katkısız ve %1 oranında grafen-COOH, KNTCOOH ve fulleren katkılı çift tesirli bağlantıların hasar yüzeyleri ISO 10365 tanımlanan deformasyon tipleri dikkate alınarak incelendiğinde, tüm bağlantı tiplerinde adhezyon hasarının meydana geldiği görülmektedir. DP125 yapısal yapıştırıcısıyla birleştirilmiş bağlantılarda ise özel kohesiv hasar meydana gelmiştir. Şekil 4.11c'de verilen DP460

yapıştırıcısına ait hasar yüzeyleri incelendiğinde ise, grafen-COOH katkılı (DP460-G) bağlantı tipinde kohesiv hasar meydana gelirken, diğer bağlantı tiplerinde (DP460, DP460-K ve DP460-F) özel kohesiv hasarın oluştuğu görülmektedir.

4.6. Dört Nokta Eğme Yüküne Maruz Tek Tesirli Alüminyum Bağlantı Numunelerinden Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

Çeki hasar yüklerinden ve bulk numunelerden elde edilen sonuçlar neticesinde, nanopartikül katkı oranının %1 olduğu durumda en iyi sonuçların elde edildiği göz önüne alınarak, dört nokta eğme deneyleri üç farklı yapıştırıcıya (güçlendirilmiş yapıştırıcı DP460, esnek yapıştırıcı DP125 ve sert yapıştırıcı DP270) %1 oranında üç farklı nanopartikül (grafen-COOH, KNTCOOH ve fulleren) ilave edilerek elde edilen bağlantı numunelerinde yapılmıştır. Her bir numuneden üçer parametre test edilmiş olup, elde edilen ortalama hasar yükleri ve standart sapmalar Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Dört nokta eğme yüküne maruz tek tesirli alüminyum bağlantı numunelerinden elde edilen deneysel sonuçlar

Тір	Nanopartikül	Nanopartikül Katkı Oranı (%)	Ortalama Hasar Yükü (N)	Standart Sapma (%)
DP270	Katkısız	-	$534^{\pm 36}$	6,7
DP270-G	Grafen-COOH	1	$865^{\pm 54}$	6,2
DP270-K	Karbon Nanotüp-COOH	1	$1310^{\pm 73}$	5,6
DP270-F	Fulleren	1	$685^{\pm 42}$	6,1
DP125	Katkısız	-	$1150^{\pm 58}$	5
DP125-G	Grafen-COOH	1	$1559^{\pm 86}$	5,5
DP125-K	Karbon Nanotüp-COOH	1	$1454^{\pm 82}$	5,6
DP125-F	Fulleren	1	$1615^{\pm 97}$	6
DP460	Katkısız	-	$1331^{\pm 67}$	5
DP460-G	Grafen-COOH	1	$1465^{\pm 94}$	6,4
DP460-K	Karbon Nanotüp-COOH	1	$1596^{\pm 101}$	6,3
DP460-F	Fulleren	1	$1518^{\pm 96}$	6,3

Çizelge 4.7'de verilen dört nokta eğme hasar yükleri incelendiğinde, nanopartikül katkısının bağlantıların hasar yükünü artırdığı görülmektedir. Güçlendirilmiş yapıştırıcı olan DP460 içerisine üç farklı nanopartikül ilave edilerek elde edilen katkılı bağlantılar

ile katkısız bağlantıların ortalama hasar yükleri karşılaştırıldığında, katkısız bağlantılara göre grafen-COOH katkılı bağlantılar yaklaşık %10, KNTCOOH katkılı bağlantılar yaklaşık %20 ve fulleren katkılı bağlantılar ise yaklaşık %14 daha fazla yük taşıdığı görülmektedir.

Esnek yapıştırıcı DP125 ile üretilmiş nanopartikül katkılı ve katkısız bağlantıların ortalama hasar yükleri karşılaştırıldığında; katkısız bağlantılara göre grafen-COOH katkılı bağlantılar yaklaşık %36, KNTCOOH katkılı bağlantılar yaklaşık %26 ve fulleren katkılı bağlantılar ise yaklaşık %40 daha fazla yük taşımıştır. Sert yapıştırıcı olan DP270 kullanılarak elde edilen nanopartikül katkılı ve katkısız bağlantılar incelendiğinde ise; katkısız bağlantılara göre grafen-COOH katkılı bağlantıların yaklaşık %62, KNTCOOH katkılı bağlantıların yaklaşık %145 ve fulleren katkılı bağlantıların ise yaklaşık %28 daha fazla yük taşıdığı görülmektedir.



Şekil 4.12. Dört nokta eğme yüküne maruz tek tesirli alüminyum bağlantı numunelerinin hasar yüzeyleri
Şekil 4.12'de verilen DP460 yapıştırıcısının katkısız ve nanopartikül katkılı bağlantı numunelerinin hasar yüzeyleri incelendiğinde; grafen-COOH katkılı (DP460-G) bağlantı tipi hariç diğer bağlantı tiplerinde (DP460, DP460-K ve DP460-F) özel kohesiv hasar meydana gelmiştir. Grafen katkılı bağlantı tipinde ise kohesiv hasar meydana gelmiştir. DP125 yapıştırıcısının hem katkısız ve hemde nanopartikül katkılı bağlantı numunelerinde ise özel kohesiv hasar meydana gelmiştir. Ayrıca DP270 yapıştırıcısıyla birleştirilmiş katkısız bağlantıda adhezyon hasarı meydana gelirken, nanopartikül katkılı bağlantı tiplerinde ise (DP270-G, DP270-K ve DP270-F) özel kohesiv hasar meydana gelmiştir. Bu bağlantı tiplerinde özel kohesiv hasar meydana gelmesi, hasara neden olan çatlağın bindirme bölgesinin her iki uçundan başlayıp merkeze doğru ilerlediği sonucu çıkarılabilir.

4.7. Dört Nokta Eğme Yüküne Maruz Tek Tesirli Kompozit Bağlantı Numunelerinden Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

Çeki yüküne maruz tek tesirli kompozit bağlantı numuneleri bindirme uzunluğu 25 mm olarak üretilirken, dört nokta eğme yüküne maruz bağlantı numunelerinin bindirme uzunluğu 12.5 mm olarak üretilmiştir. Bunun sebebi; dört nokta eğme yüküne maruz kompozit bağlantılarda bindirme uzunluğu 25 mm olduğu zaman kompozit malzemelerde Şekil 4.13'te gösterilen kompozit malzemenin kırılmasıyla hasarın oluşmasıdır.



Şekil 4.13. Kompozit malzemelerde meydana gelen hasar

Üç farklı yapısal yapıştırıcı kullanılarak elde edilen katkısız ve nanopartikül katkılı tek tesirli kompozit bağlantı numunelerin her bir parametresi için üçer numune test edilmiş

olup, bu üç numunenin ortalaması alınarak bağlantının hasar yükü elde edilmiş ve Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Тір	Nanopartikül	Nanopartikül Katkı Oranı (%)	Ortalama Hasar Yükü (N)	Standart Sapma (%)
DP270	Katkısız	-	$420^{\pm 23}$	5,5
DP270-G	Grafen-COOH	1	$765^{\pm 44}$	5,8
DP270-K	Karbon Nanotüp-COOH	1	$983^{\pm 63}$	6,4
DP270-F	Fulleren	1	$589^{\pm 32}$	5,4
DP125	Katkısız	/	$662^{\pm 28}$	4,2
DP125-G	Grafen-COOH	1	$681^{\pm 36}$	5,3
DP125-K	Karbon Nanotüp-COOH	1	$1181^{\pm 48}$	4,1
DP125-F	Fulleren	1	$618^{\pm 42}$	6,8
DP460	Katkısız		$909^{\pm 46}$	5,1
DP460-G	Grafen-COOH	1	$1093^{\pm 73}$	6,7
DP460-K	Karbon Nanotüp-COOH	1	$1178^{\pm 69}$	5,8
DP460-F	Fulleren	1	$1084^{\pm 62}$	5,7

Çizelge 4.8. Dört nokta eğme yüküne maruz tek tesirli kompozit bağlantı numunelerinden elde edilen deneysel sonuçlar

Sert yapıştırıcı olan DP270 kullanılarak elde edilen nanopartikül katkılı ve katkısız bağlantılar incelendiğinde; katkısız bağlantılara göre grafen-COOH katkılı bağlantıların yaklaşık %82, KNTCOOH katkılı bağlantıların yaklaşık %134 ve fulleren katkılı bağlantıların ise yaklaşık %40 oranda daha fazla yük taşıdığı görülmektedir.

Diğer taraftan esnek yapıştırıcı olan DP125 kullanılarak üretilmiş nanopartikül katkılı ve katkısız bağlantıların ortalama hasar yükleri karşılaştırıldığında; katkısız bağlantılara göre grafen-COOH katkılı bağlantılar yaklaşık %3, KNTCOOH katkılı bağlantılar yaklaşık %78 daha fazla yük taşırken, fulleren katkılı bağlantılar ise yaklaşık %7 daha az yük taşımıştır. DP460 yapıştırıcısıyla birleştirilmiş nanopartikül katkılı bağlantılar katkısız bağlantılar yaklaşık %20, KNTCOOH katkılı bağlantılar yaklaşık %29 ve fulleren katkılı bağlantılar ise yaklaşık %19 oranda daha fazla yük taşıdığı görülmektedir (Çizelge 4.8).



Şekil 4.14. Dört nokta eğme yüküne maruz tek tesirli kompozit bağlantı numunelerinin hasar yüzeyleri

Şekil 4.14'te verilen hasar yüzeyleri incelendiğinde; DP270 yapıştırıcısının fulleren katkılı bağlantı tipinde adhezyon hasarı (yapıştırılan malzemelerde sadece birinin bindirme bölgesinde yapıştırıcının olması) meydana gelirken, katkısız ve diğer nanopartikül katkılı bağlantı tiplerinde ise özel kohesiv hasar meydana gelmiştir.

DP460 yapıştırıcısının katkısız ve nanopartikül katkılı bağlantı tiplerinin hasar yüzeyleri incelendiğinde; DP460 ve DP460-F bağlantı tipleri hariç diğer bağlantı tiplerinde (DP460-G ve DP460-K ve DP460-F) özel kohesiv hasar meydana gelmiştir. DP460 ve DP460-F bağlantı tiplerinde ise kohesiv hasar meydana gelmiştir. DP125 yapıştırıcısının hem katkısız ve hemde nanopartikül katkılı bağlantı numune yüzeylerinde ise özel kohesiv hasar meydana gelmiştir.

4.8 Dört Nokta Eğme Yüküne Maruz Çift Tesirli Bağlantı Numunelerinden Elde Edilen Deneysel Sonuçlar

DP270, DP125 ve DP460 yapıştırıcıları kullanılarak elde edilen katkısız ve grafen-COOH, KNTCOOH ve fulleren nanopartikül katkılı çift tesirli bağlantı numunelerin dört nokta eğme yükü altındaki performanslarını incelemek amacıyla her bir parametre için üçer numune test edilmiş olup, bu üç numunenin ortalaması alınarak bağlantıların ortalama hasar yükü belirlenmiştir (Çizelge 4.9).

Тір	Nanopartikül	Nanopartikül Katkı Oranı (%)	Ortalama Hasar Yükü (N)	Standart Sapma (%)
DP270	Katkısız		$406^{\pm 25}$	6,2
DP270-G	Grafen-COOH	1	$525^{\pm 37}$	7
DP270-K	Karbon Nanotüp-COOH	1	$451^{\pm 42}$	9,3
DP270-F	Fulleren	1	$343^{\pm 31}$	9
DP125	Katkısız	-	$1871^{\pm 72}$	3,8
DP125-G	Grafen-COOH	1	$2304^{\pm 96}$	4,2
DP125-K	Karbon Nanotüp-COOH	1	$3650^{\pm 137}$	3,8
DP125-F	Fulleren	1	$3753^{\pm 128}$	3,4
DP460	Katkısız	-	$2584^{\pm 59}$	2,3
DP460-G	Grafen-COOH	1	$2696^{\pm 92}$	3,4
DP460-K	Karbon Nanotüp-COOH	1	$2803^{\pm 116}$	4,1
DP460-F	Fulleren	1	$3006^{\pm 141}$	4,7

Çizelge 4.9. Dört nokta eğme yüküne maruz çift tesirli bağlantı numunelerinden elde edilen deneysel sonuçlar

Çizelge 4.9'da verilen eğme yüküne maruz çift tesirli bağlantı numunelerinin ortalama hasar yükleri incelendiğinde; DP270 yapıştırıcısı içerisine grafen-COOH ve KNTCOOH ilave edilmesiyle bağlantıların hasar yükleri sırasıyla %29 ve %11 oranında artarken, fulleren ilave edilmesiyle yaklaşık %18 oranında azalmaktadır.

Diğer taraftan esnek yapıştırıcı olan DP125 yapıştırıcısının nanopartikül katkılı ve katkısız bağlantıların ortalama hasar yükleri karşılaştırıldığında, nanopartikül katkısıyla bağlantıların ortalama hasar yüklerinin arttığı görülmektedir. Esnek yapıştırıcı içerisine grafen-COOH, KNTCOOH ve fulleren ilave edilmesiyle bağlantıların hasar yükleri

sırasıyla %24, %95 ve %100 oranda arttığı Çizelge 4.9'dan görülmektedir. Güçlendirilmiş yapıştırıcı olan DP460 yapıştırıcısına üç farklı nanopartikül ilave edilerek elde edilen katkılı bağlantılar ile nanopartikül ilave edilmeyen katkısız bağlantıların ortalama hasar yükleri karşılaştırıldığında ise; katkısız bağlantılara göre grafen-COOH katkılı bağlantılar yaklaşık %4, KNTCOOH katkılı bağlantılar yaklaşık %8 ve fulleren katkılı bağlantılar ise yaklaşık %16 oranda daha fazla yük taşımıştır.



Şekil 4.15. Dört nokta eğme yüküne maruz çift tesirli bağlantı numunelerinin hasar yüzeyleri

Şekil 4.15'te verilen hasar yüzeyleri incelendiğinde; DP270 yapıştırıcısı ile elde edilen katkısız (DP270), grafen katkılı (DP270-G) ve karbon nanotüp katkılı (DP270-K)

bağlantıda özel kohesiv hasar meydana gelirken, fulleren katkılı (DP270-F) bağlantılarda ise adhezyon hasar (yapıştırılan malzemelerde sadece birinin bindirme bölgesinde yapıştırıcının olması) meydana gelmiştir. DP125 yapıştırıcısıyla elde edilen katkısız ve nanopartikül katkılı bağlantılarda da özel kohesiv hasar meydana gelmiştir. DP460 yapıştırıcının katkısız ve nanopartikül katkılı bağlantının hasar yüzeyi incelendiğinde; grafen-COOH katkılı bağlantı tipinde kohesiv hasar meydana gelirken, diğer tüm bağlantı tiplerinde ise (DP460, DP460-K ve DP460-F) özel kohesiv hasar (her iki yapıştırılan malzemenin bindirme bölgesinde eşit yapıştırıcı kalınlığının olmaması) meydana gelmiştir.

4.9. Nanopartikül Katkısız Yapıştırıcıların FT-IR Analiz Sonuçları

Çift bileşenli yapısal yapıştırıcılar DP270, DP125 ve DP460'ın saf epoksi, hızlandırıcı (sertleştirici) ve epoksi-hızlandırıcı karışımlarına ait IR spektrumları sırasıyla Şekil 4.16'da verilmiştir.

Şekil 4.16a'ya göre; DP270 çift bileşenli yapısal yapıştırıcının FT-IR spektrumu yapıştırıcının Bisfenol A Epiklorhidrin karışımı tipik bir epoksi reçine olduğunu göstermektedir. Spektrumda; 3056 cm⁻¹ de oksiran halkasının C-H gerilim piki, ~2900 cm⁻¹ bandında aromatik halka CH ve CH₂'nin C-H titreşimine karşılık gelen dublet, 1600-1500 cm⁻¹ bant aralığında aromatik halkadaki C=C gerilimi ve aromatik halkadaki C-C titreşimlerine ait pikler yer almaktadır. 831 cm⁻¹ bandında oksiran halkasına ait C-O-C gerilim piki, 1100-1385 cm⁻¹ aralığında CH₂ ve C-(CH₃)₂ ne ait gerilme pikleri bulunmaktadır. Ayrıca 1700 cm⁻¹ civarında karbonil piki ortaya çıkmıştır. Aynı yapıştırıcı ile kullanılan tipik bir diamin hızlandırıcısına ait 3291-3058 cm⁻¹ de ortaya çıkan dublet, sekonder amin gerilmesine karşılık gelmektedir. 3029 cm⁻¹ ve 3064 cm⁻¹ de doymamış zincirin C-H gerilimleri, 1600-1500 cm⁻¹ aralığında aromatik siklik yapıları yansıtan pikler, 829 cm⁻¹ ve 967 cm⁻¹ de eterik oksijene ait gerilme pikleri ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.16. Çift bileşenli yapıştırıcıların epoksi, hızlandırıcı ve epoksi-hızlandırıcı karışımlarına ait IR spektrumları *a. DP270, b. DP125, c. DP460

DP125 kodlu bir Bisfenol A Epiklorhidrin karışımı olan epoksi reçine, hızlandırıcı ve karışıma ait spektrumlar Şekil 4.16b'de verilmiştir. Saf epoksiye ait spektrumda, geniş O-H gerilim piki (1348cm⁻¹), oksiran grubunun C-H gerilim piki (3056cm⁻¹), alifatik ve aromatik CH ve CH₂'nin C-H gerilim piki, aromatik halka pikleri, oksiran grubuna ait C-O-C gerilim piki (830cm⁻¹) ve muhtemelen modifikasyon sonucu oluşmuş C=O (1700-1800 cm⁻¹ bant aralığı) gerilim piki ve hızlandırıcıya ait spektrumunda ise sekonder amin piki, tersiyer amin piki, aromatik ve alifatik CH ve CH₂'nin C-H gerilim piki, C-C ve C=C gerilim pikleri ortaya çıkmıştır. Karışıma ait spektrumda ise hidrojen bağlarının etkinliğini gösteren O-H gerilim pikinin önemli ölçüde sağa kaydığı, karbonil grubuna ait pikin sağa kayarak belirgin bir şekilde ortaya çıktığı, eterik C-O bağlarının etkisini gösteren piklerde kaymalar olduğu ve C-(CH₃)₂'nin CH₃ deformasyon pikinin sağa doğru kaydığı gözlenmiştir. Hızlandırıcıya ait spektrumda ortaya çıkan N-H pikinin karışım halinde gözlenmemesi, kürleşme esnasında azot üzerinden çapraz bağlanmaların başarıyla gerçekleştiğinin işaretidir. Buna göre diamin esaslı hızlandırıcı ile epoksi zincirlerinin azot köprüleriyle çapraz bağlanmalar yaparak kafes bir yapının oluşumuna yol açtığı söylenebilir.

Şekil 4.16c'ye göre; DP460 yapıştırıcısının epoksi kısmına ait spektrum, Bisfenol A Epiklorhidrin reçinesine ait karakteristik pikleri sergilemektedir. Bu yapıştırıcının hızlandırıcısına ve karışıma ait spektrumlarda da karakteristik amin pikleri ortaya çıkmıştır. Karışımın spektrumunda sekonder amin pikinin yanı sıra, karakteristik C-N gerilim pikinin 1260 cm⁻¹ bandında sarp bir pik olarak ortaya çıktığı görülmekte, 3381cm⁻¹ bandındaki sekonder amin pikinin ise hızlandırıcıdan gelen ve tersiyer yapılanmaya girmemiş amin grubuna ait olduğu tahmin edilmektedir. Diğer yandan, 1731 cm⁻¹ bandında gözlenen karbonil pikinin ise epoksi reçinenin modifikasyonundan kaynaklandığı düşünülmüştür. Bu, kürleşme esnasında belli düzeyde azot merkezli çapraz bağlanmaların gerçekleştiğini gösterir.

Çift bileşenli yapısal yapıştırıcılar DP270, DP125 ve DP460'ın epoksi ve hızlandırıcı kısımlarının karşılaştırılmasına ait FT-IR spektrumları Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.17. Çift bileşenli yapıştırıcılar DP270, DP460 ve DP125'in karşılaştırılmasına ait FT-IR spektrumları ***a.** Epoksi **b.** Hızlandırıcı.

Şekil 4.17a'daki FT-IR spektrumlarından, üç farklı epoksi polimerin Bisfenol A ve Epiklorhidrinin reaksiyonuyla nispeten benzer bir polimer matrisine sahip oldukları anlaşılmaktadır. Reçinelerin kısmi farklılıklarını yansıtan spesifik pikler, parmak izi bölgesinde ortaya çıkmıştır. Özellikle ~1730 cm⁻¹'de gözlenen pik; epoksi reçinenin modifikasyonundan kaynaklanan C=O pikidir.

Şekil 4.17b'ye göre; üç farklı yapıştırıcının hızlandırıcılarına ait spektrumlarda ortaya çıkan karakteristik pikler, kullanılan hızlandırıcıların tipik diamin maddeleri olduğunu gösterir. Buna göre özellikle 2300-2100 cm⁻¹ aralığında gözlenen pikler, hızlandırıcı maddeyi işaret ettiği söylenebilir (Akpinar *et al.* 2018).

4.10. Nanopartikül Katkılı Yapıştırıcıların FT-IR Analiz Sonuçları

Çift bileşenli yapısal yapıştırıcılara (DP270, DP125 ve DP460) %1 oranında nanopartikül (Grafen-COOH, Karbon Nanotüp-COOH, Fulleren) ilavesiyle elde edilen nanokompozitlere ait FT-IR spektrumları Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.18. DP270 yapıştırısıcına ait katkısız ve %1 nanopartikül katkılı yapıştırıcılara ait FT-IR spektrumu

Şekil 4.18'de, DP270 çift bileşenli yapıştırıcıya %1 oranında Grafen-COOH ilavesiyle elde edilen spektrumda olası etkileşimlerin grafen tabakalarındaki π elektronlarıyla, polimer zincirlerindeki aromatik gruplar arasında gerçekleştiği ve buna dayalı konformasyonel değişimlerin hem O-H hem de C-O-C gerilimlerini düşük enerjili bölgeye kaydırdığı söylenebilir. Grafen ilave edilmiş karışım halinde gözlenen 1731-1616 cm⁻¹ bant aralığında C=C gerilimlerinin grafenin polimerik matriste iyi bir şekilde dağıldığını işaret eder. Ancak bu dağılımın yapıştırıcının mukavemet özelliklerinde kısmi iyileşmeye, yapışma özelliklerinde ise olumsuz bir etkiye yol açması beklenebilir. Diğer yandan, bu yapıştırıcının aromatik halkalarıyla grafen tabakaları arasındaki yoğun etkileşmeler ve bunlara bağlı olarak fonksiyonel grupların daha serbest hareketi, grafen tabakalarının agregasyonunu engellemiş ve muhtemelen grafen tabakalarının polimerik matriste eksfoliye olmalarını sağlamıştır. %1 oranında Karbon Nanotüp-COOH (KNTCOOH) ilavesi; yapıştırıcıda grafen ilavesiyle elde edilen karışımın spektrumuna benzer pikler sergiler. Grafen ile polimer matrisi arasındaki etkileşimlere benzer şekilde KNTCOOH ilavesi ile de, söz konusu etkileşmeler üzerinde dispersiyonla sonuçlanmıştır. KNTCOOH'ların tübüler geometrisi, kürleşme esnasında oluşan kafesin yapısal ve topografik özelliklerini değiştirerek dengeli ve enerji olarak daha kararlı yönelimlere yol açsa da, polimer zincirlerinin difüzyonel engelle karşılaşma ihtimallerinden dolayı, grafene göre etkileşim için yüzey alanı daha yüksektir. Bu da yapıştırıcının katkısız hale göre hem mukavemet hem de yapışma özelliklerinde ciddi iyileşme anlamına gelebilir. Grafene kıyasla mekanik değerlerde bir miktar artma beklenebilir.

DP270 çift bileşenli yapıştırıcıya %1 oranında fulleren ilavesi ise; FT-IR spektrumları açısından katkılı ve katkısız epoksi arasında belirgin bir farklılığa yol açmamaktadır. Bu durum fulleren ve diğer karbonlu nanopartiküllerle (Grafen-COOH, KNTCOOH) polimer zincirleri arasında etkin çekim etkileşimlerinin gerçekleşmediğinin işaretidir. Bu muhtemel agregasyonlara dayalı olarak, kompozitin mekanik ve termal stabilitesi üzerinde olumsuz etkiler yapabilir.

Şekil 4.19'da verilen DP125 çift bileşenli yapıştırıcıya %1 oranında Grafen-COOH ilavesinde, grafen tabakalarıyla polimerik matristeki aromatik halkalar arasında belli oranda etkileşimlerin gerçekleştiği spektrumların karşılaştırılmasından anlaşılmaktadır. Buna göre, grafen tabakalarının polimerik matrisde disperse oldukları, ancak çapraz bağlı polimerik ağ yapısında konformasyonel değişimlere yol açmadığı ve bununda yapıştırıcının mukavemet ve yapışma değerlerinde kısmi değişmelere yol açabileceği tahmin edilebilir.



Şekil 4.19. DP125 yapıştırısıcına ait katkısız ve %1 nanopartikül katkılı yapıştırıcılara ait FT-IR spektrumu

KNTCOOH'un ilavesinde; nanopartiküllerle polimer zincirindeki aromatik halkalar arasında dipol-dipol etkileşimlerin varlığı spektrumların karşılaştırılmasından anlaşılmaktadır. Tübüler yapıdaki KNTCOOH partiküllerinin polimerik matriste nispeten iyi bir şekilde dispersiyonuna bağlı olarak kürleşme esnasında polimerik ağ yapısının topografyasındaki olası değişmeler beklenilebilir. Bu karışımın hem mukavement hem de yapışma özelliklerinde belirgin değişmelere yol açabilir.

%1 oranında fulleren katılmış DP125 çift bileşenli yapıştırıcısında; özellikle nanopartiküllerle polimer zincirlerinin etkileşimine bağlı olarak aromatik ve alifatik CH ve CH₂'nin C-H gerilme pikleri incelendiğinde; saf epoksiye göre, pik konumlarının kısmen daha yüksek enerjili hale doğru kaydığı görülmektedir. Bu durum, söz konusu birimler ve fullereni oluşturan halkalı yapılar arasındaki etkileşimlerin varlığıyla açıklanabilir. Benzeri kaymalar farklı düzeylerde diğer karbonlu nanomateryallere (KNTCOOH ve Grafen) ait FT-IR spektrumlarında da gözlenmiştir. Buna göre,

polimerik matriste disperse olmuş nanopartiküllerin geometrik şekillerinin, etkileşimlerin etkinliği açısından belirleyici olduğu ve bunun karışımların mukavement ve yapışma özelliklerini de değiştirebildiği sonucu çıkarılabilir.

Şekil 4.20'ye göre; DP460 çift bileşenli yapıştırıcıya %1 oranında grafen-COOH ilavesiyle, grafenden kaynaklanan C=C gerilmelerine ait karakteristik piklerin 1700-1600 cm⁻¹ bant aralığında ortaya çıktığı ilgili spektrumlardan anlaşılmaktadır. Bu durum, grafen tabakalarının son derece homojen disperse olduklarını hatta eksfoliye tarzda dağıldığı şeklinde yorumlanabilir. Böyle bir dağılım mukavemet değerlerinde bir miktar azalmaya yol açmış olabilir. Bu durum, grafen tabaka dağılımının çapraz bağlanmalarda bir miktar sınırlamaya yol açtığı ve böylece yüzde uzamanın ciddi anlamda düşmesi şeklinde değerlendirilebilir. Ancak, bu karışımın yapışma karakteristiklerinin değişeceği anlamına gelmez.



Şekil 4.20. DP460 yapıştırısıcına ait katkısız ve %1 nanopartikül katkılı yapıştırıcılara ait FT-IR spektrumu

KNTCOOH nanopartiküllerin DP460 yapıştırıcısına eklenmesiyle, FT-IR spektrumunda belirli bir farklılık gözlenmemiştir. Bu KNTCOOH nanopartiküllerinin polimerik matriste iyi bir şekilde disperse olamadıkları ve kısmi agregasyonuna gerçekleştiği şeklinde yorumlanabilir.

Fullerenin DP460 yapıştırıcısına katılmasıyla; yapıştırıcının grafen ve fulleren varlığındaki FT-IR spektrumları, özellikle aromatik ve alifatik CH ve CH₂'nin C-H gerilme piklerinin konumları açısından benzerlik göstermektedir. Fullerenin geometrik yapısı ve nanopartikül ile polimer zincirleri arasındaki olası dipol-dipol etkileşmeler, homojen bir dispersiyon sağlamış ve böylece karışımın mekanik karekteristiklerinde anlamlı iyileşmeler gerçekleşmiş olabilir (Akpinar *et al.* 2018)

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerini geliştirmek için farklı karakterdeki (sert, yumuşak, güçlendirilmiş) yapısal yapıştırıcılara yeni bir yöntemle karbon nanopartiküller ilave edilerek elde edilen nanokompozit yapıştırıcıların mekanik ve kimyasal özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

Literatürde yapılan çalışmalar göz önüne alınarak; üretilen nanopartikül katkılı yapıştırıcılarla birleştirilmiş bağlantıların mekanik testlerinde, bağlantıların hasar yüklerinde standart sapmanın yüksek olduğu görülmüştür. Bu nedenle yapıştırıcılarda nanopartikül katkı etkisinin doğru tespit edilmesi için tez çalışması kapsamında yeni bir yöntem geliştirilmiş ve bu yeni yöntem (Asetonlu ultrasonik karıştırma) ile elde edilen nanopartikül katkılı yapıştırma bağlantılarında standart sapma yaklaşık %1'e kadar indirilmiştir. Buda katkılı ve katkısız bağlantıların hasar yüklerini daha hassas karşılaştırılmasına ve bağlantının güvenilirliğine olanak sağlamaktadır.

Bulk yapıştırıcı numuneleri kopma gerçekleşinceye kadar yüklenmiş ve hasar anına kadar sergiledikleri gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme ($\sigma_g - \varepsilon_g$) eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen bulk numune sonuçları incelendiğinde, yapıştırıcı içerisine nanopartikül ilave edilmesi; genelde yumuşak yapıştırıcılarda yapıştırıcının gerilme değerini artırırken, şekil değiştirmesini azalttığı görülmüştür. Sert yapıştırıcılarda ise; gerilme değeri azalırken, şekil değiştirme değerleri artmıştır. Genel olarak tüm yapıştırıcılarda %1 nanopartikül katkı oranının en iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Sert yapıştırıcı içerisine %0,5 ve 1 oranında Grafen-COOH katkısı yapıştırıcının gerilme değerini az da olsa artırırken, şekil değişimi üzerinde bir etkisi olmadığı görülmüştür. Ancak %2 oranında Grafen-COOH ilave edilmesi, gerilme değerini yaklaşık %48 oranında azaltırken, şekil değiştirme değerini yaklaşık %550 oranında artırmıştır. Ayrıca %0,5, 1 ve 2 oranında KNTCOOH ilave edilmesiyle gerilme

değerleri sırasıyla yaklaşık %15, %33 ve %48 oranında azaltırken, şekil değişimini %105, %400 ve %860 oranında artırmıştır.

Esnek karakterdeki DP125 yapısal yapıştırıcı içerisine Grafen-COOH nanopartikül katkısı hariç diğer nanopartiküllerin eklenmesi yapıştırıcıyı sertleştirdiği ve gerilme değerini artırdığı görülmüştür. Ayrıca en fazla etkinin yapıştırıcıya fulleren ilave edilmesiyle oluştuğu görülmüştür. Yapıştırıcı içerisine %0,5 oranında fulleren katılmasıyla maksimum gerilme değeri %107 oranında artarken, %1 ve %2 oranında katılması durumunda sırasıyla %130 ve %115 oranında artmıştır.

Güçlendirilmiş orta sertlikteki DP460 yapıştırıcı içerisine karbon nanopartürküllerin eklenmesi ile yapıştırıcının hem gerilme hem de şekil değiştirme değerlerini artırmıştır. DP460 yapıştırıcı içerisine %0,5 ve %1 oranında grafen-COOH ilave edilmesi yapıştırıcının gerilme-şekil değiştirme eğrisini çok fazla etkilememiştir. Fakat katkı oranı %2 olduğu durumda, gerilme değeri düşerken, şekil değiştirme kapasitesi artmıştır. DP460 yapıştırıcısına fulleren katılması, diğer karbon nanopartikül katkılarına göre yapıştırıcının mekanik özelliklerini önemli derecede iyileştirdiği görülmüştür.

Hem yapıştırıcının sert, esnek veya güçlendirilmiş olması, hemde yapıştırıcıya ilave edilen nanopartiküllerin farklı olması, bağlantının hasar yükünü önemli derecede etkilemiştir. Ayrıca, yapıştırıcıya ilave edilen nanopartikül oranının artması veya azalması bağlantının hasar yükünü etkilemiştir.

Çeki yüküne maruz tek tesirli alüminyum yapıştırma bağlantılarının hasar yükleri karşılaştırıldığında; sert yapıştırıcı (DP270) içerisine %0,5, %1 ve %2 oranında grafen-COOH katıldığında hasar yükleri sırasıyla %27, %109 ve %276 oranında artarken, KNTCOOH katkısında %78, %148 ve %130 oranında arttığı görülmüştür. Ancak rijit yapıştırıcıya fulleren C60 ilave edilmesi bağlantının hasar yükünde önemli bir artma veya azalmaya neden olmadığı görülmüştür. Esnek yapıştırıcı (DP125) içerisine %0,5, %1 ve %2 oranında grafen-COOH katılmasıyla elde edilen tek tesirli alüminyum bağantı numunelerinin hasar yükleri incelendiğinde; katkısız bağlantılara göre %4, %28 ve %3 oranında daha fazla yük taşıdığı görülmüştür. Diğer taraftan, fulleren katkılı bağlantılar ile katkısız bağlantılar karşılaştırıldığında; sırasıyla %0,5 oranında fulleren katkılı bağlantılarda yaklaşık %40, %1 oranında fulleren katkılı bağlantılarda yaklaşık %65 ve %2 oranında fulleren katkılı bağlantılarda ise yaklaşık %50 bağlantıların ortalama hasar yüklerinde artış olmuştur. KNTCOOH nanopartikül katkılı bağlantıların hasar yüklerindeki artma ve azalma oranları küçük olduğundan, esnek yapıştırıcılarda KNTCOOH'un etkisinin olmadığı görülmüştür.

DP460 yapısal yapıştırıcısı içerisine %0,5 oranında grafen-COOH, KNTCOOH ve fulleren ilave edilmesiyle; tek tesirli alüminyum bağlantı numunelerinin hasar yükleri sırasıyla yaklaşık %12, %17 ve %23 oranında artarken, katkı oranı %1 ve %2 olduğu zaman sırasıyla %15, %19, %28 ve %9, %14, %22 oranında arttığı görülmüştür. Deneysel sonuçlar bütün olarak değerlendirildiğinde, DP460 yapısal yapıştırıcısıyla birleştirilmiş bağlantılarda en iyi sonucun fulleren katkılı bağlantılarda olduğu görülmüştür.

ISO 10365 tanımlanan yapıştırıcılar için deformasyon tipleri göz önüne alınarak hasar yüzeyleri incelendiğinde, tek tesirli aluminyum bağlantı tiplerinde özel koheziv hasar meydana geldiği görülmüştür.

Tüm nanopartikül katkılı tek tesirli bağlantılardan elde edilen ortalama hasar yüklerine göre, standart sapmanın yaklaşık %1-5 gibi minimum bir aralıkta olması yapıştırıcıya nanopartikül katkı yönteminin doğruluğunu göstermektedir.

Sert yapısal yapıştırıcı DP270 ile birleştirilmiş katkılı ve katkısız tek tesirli kompozit bağlantıların ortalama hasar yükleri incelendiğinde; sert yapıştırıcıya nanopartikül ilave edilmesi, bağlantıların çeki hasar yükünü artırdığı görülmüştür. Hasar yükündeki bu

artış oranı ilave edilen nanopartikül türüne göre (Grafen-COOH, KNTCOOH ve Fulleren) değiştiği görülmektedir.

Yumuşak yapıştırıcı (DP125) içerisine %1 oranında grafen-COOH, KNTCOOH ve fulleren ilave edilmesi ile tek tesirli kompozit bağlantı numunelerin çeki hasar yükleri sırasıyla %35, %52 ve %60 oranında artmıştr.

DP460 güçlendirilmiş yapısal yapıştırıcı içerisine %1 oranında grafen-COOH ilave edilmesi; kompozitin bağlantının hasar yükünü yaklaşık %14 oranında artırırken, KNTCOOH ve fulleren ilave edilmesiyle çeki hasar yükleri sırasıyla yaklaşık %24 ve %23 oranında artmıştır.

Çeki yüküne maruz tek tesirli kompozit bağlantı tiplerinden DP125 ve DP125-G, DP460-G, DP460-K, DP460-F bağlantı tiplerinde kohesiv hasar meydana gelirken, diğer tüm bağlantı tiplerinde özel kohesiv hasar meydana gelmiştir.

DP270 sert yapısal yapıştırıcısıyla birleştirilmiş çift tesirli bağlantıların ortalama çeki hasar yükleri karşılaştırıldığında; grafen-COOH katkılı bağlantılar yaklaşık %270, KNTCOOH katkılı bağlantılar yaklaşık %101 ve fulleren katkılı bağlantılar ise yaklaşık %47 oranda katkısız bağlantılara göre daha fazla yük taşımıştır.

Yumuşak yapıştırıcı DP125 ile elde edilen nanopartikül katkılı çift tesirli bağlantıların hasar yükleri, katkısız bağlantıların ortalama hasar yükleriyle karşılaştırıldığında; grafen-COOH katkılı bağlantılar yaklaşık %66, KNTCOOH katkılı bağlantılar yaklaşık %85 ve fulleren katkılı bağlantılar ise yaklaşık %80 oranında daha fazla yük taşımıştır.

Güçlendirilmiş DP460 yapısal yapıştırıcısında ise; katkısız bağlantılara göre grafen-COOH katkılı çift tesirli bağlantılar yaklaşık %18, KNTCOOH katkılı bağlantılar yaklaşık %20 ve fulleren katkılı bağlantılar ise yaklaşık %33 oranında daha fazla yük taşıdığı görülmüştür. Çeki yüküne maruz çift tesirli bağlantılarda, DP270 yapıştırısıyla birleştirilmiş bağlantılarda adhezyon hasarı, DP125 yapıştırıcısısyla birleştirilmiş bağlantılarda özel kohesiv hasar meydana gelirken, DP460 yapıştırıcısında ise grafen-COOH katkılı bağlantı tipinde kohesiv, diğer bağlantı tiplerinde ise özel kohesiv hasar meydana gelmiştir.

Dört nokta eğme yüküne maruz alüminyum bağlantı numunelerinde nanopartikül katkısının hasar yükünü artırdığı görülmüştür. Sert yapıştırıcı (DP270) kullanılarak grafen-COOH, KNTCOOH ve fulleren katkılı bağlantılarda eğme hasar yükü katkısız bağlantıya göre, %62, %145 ve %28 oranında daha fazla yük taşırken, esnek yapıştırıcıda ise (DP125) %36, %26 ve %40 oranında daha fazla yük taşımıştır.

Dört nokta eğme yüküne maruz tek tesirli alüminyum bağlantılarında; DP460-G bağlantı tipinde kohesiv, DP270 bağlantı tipinde adhezyon hasarı meydana gelirken, diğer tüm bağlantı tiplerinde özel kohesiv hasar meydana gelmiştir.

DP270 yapıştırıcısı kullanılarak elde edilen tek tesirli kompozit bağlantı numunelerinde, grafen-COOH katkısıyla dört nokta eğme hasar yükü %82, KNTCOOH katkısında %134 ve fulleren katkılı bağlantılarda ise %40 oranında artmıştır.

Eğme yüküne maruz DP460 yapıştırıcısıyla birleştirilmiş nanopartikül katkılı kompozit bağlantılar, katkısız bağlantıyla karşılaştırıldığında ise; grafen-COOH katkılı bağlantılar yaklaşık %20, KNTCOOH katkılı bağlantılar yaklaşık %29 ve fulleren katkılı bağlantılar ise yaklaşık %19 oranda daha fazla yük taşıdığı görülmüştür.

Eğme yüküne maruz çift tesirli bağlantı numunelerinin ortalama eğme hasar yükleri incelendiğinde; DP270 yapıştırıcısı içerisine grafen-COOH ve KNTCOOH ilave edilmesiyle bağlantıların hasar yükleri sırasıyla %29 ve %11 oranında artarken, fulleren ilave edilmesiyle yaklaşık %18 oranında azalmıştır.

Esnek yapıştırıcı içerisine grafen-COOH, KNTCOOH ve fulleren ilave edilmesiyle çift tesirli bağlantıların eğme hasar yükleri sırasıyla %24, %95 ve %100 oranda artmıştır.

DP460 yapıştırıcısına üç farklı nanopartikül ilave edilerek elde edilen katkılı bağlantılar ile nanopartikül ilave edilmeyen katkısız çift tesirli bağlantıların ortalama dört nokta eğme hasar yükleri karşılaştırıldığında; katkısız bağlantılara göre grafen-COOH katkılı bağlantılar yaklaşık %4, KNTCOOH katkılı bağlantılar yaklaşık %8 ve fulleren katkılı bağlantılar ise yaklaşık %16 oranda daha fazla yük taşımıştır.

Dört nokta eğme yüküne maruz çift tesirli bağlantıların hasar yüzeyleri incelendiğinde; DP270 yapıştırıcısı ile elde edilen katkısız (DP270), grafen katkılı (DP270-G) ve karbon nanotüp katkılı (DP270-K) bağlantıda özel kohesiv hasar meydana gelirken, fulleren katkılı (DP270-F) bağlantılarda ise adhezyon hasar (yapıştırılan malzemelerde sadece birinin bindirme bölgesinde yapıştırıcının olması) meydana gelmiştir. DP460 ve DP125 yapıştırıcılarının katkısız ve nanopartikül katkılı bağlantıların hasar yüzeyi incelendiğinde; DP460-G bağlantı tipinde kohesiv hasar meydana gelirken, diğer tüm bağlantı tiplerinde ise özel kohesiv hasar meydana gelmiştir.

FT-IR spektrumlarına dayalı yapısal analizler, seçilen tüm iki kısımlı yapıştırıcıların epoksi reçine bileşeninin, karbonil (C=O) grubu taşıyacak şekilde modifiye edildiğini ve kürleşme esnasında çapraz bağlanmaların ağırlıklı olarak azot grupları üzerinden gerçekleştiğini göstermektedir.

%1 oranında farklı nanopartiküllerin ilavesiyle özellikle DP270 sert yapısal yapıştırıcının epoksi kısmındaki oksi gruplarının varlığının yapışma özelliklerinde ciddi iyileşmelere yol açtığı, buna karşılık mukavemet değerlerini interpartiküler etkileşmelerin belli ölçüde zayıflamasından dolayı kısmen düşürdüğü belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Abdullah, S.I., Ansari, M.N.M., 2015. Mechanical properties of graphene oxide (GO)/epoxy composites. HBRC Journal, 11, 151-156.
- Adams, R.D. and Wake, W.C., 1984. Structural Adhesive Joints. Elsevier Applied Science Publishers, London.
- Ando, Y., Zhao, X., Sugai, X., Kumar, M., 2004. Growing carbon nanotubes, Materials Today, 7,22-29.
- Alexandre, M., Dubois, P., 2000. Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials. Materials Science and Engineering R, 28,1-63.
- Akpınar, S., 2012. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş T-bağlantılarda Üç Boyutlu Gerilme analizi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Akpinar, S., Doru, M.O., Ozel, A., Aydın, M.D. and Ghaffarzadeh, H.J., 2013a. The Effect of the Spew Fillet on an Adhesively Bonded Single-Lap Joint Subjected to Bending Moment. Composites Part B, 55, 55-64.
- Akpinar, S., 2013b. Effects of Different Curvature Patches on the Strength of Double-Strap Adhesive Joints. The Journal of Adhesion, 89,937-947.
- Akpinar, S., 2016. Alüminyum oksit ve titanyum dioksit partikül takviyeli yapıştırıcılarla birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi, Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5,244-252.
- Akpinar, İ., Gültekin, K., Akpinar, S., Akbulut, H., Özel, A. 2017a. Experimental analysis on the single-lap joints bonded by a nanocomposite adhesives which obtained by adding nanostructures, Composite Part B, 110, 420-428.
- Akpinar, İ., Gültekin, K., Akpinar, S., Gürses, A., Ozel, A. 2017b. An Experimental Study on Composite Adhesives Reinforced with Different Types of Organo-Clays. The Journal of Adhesion, doi:10.1080/00218464.2016.1255606.
- Akpinar, İ., Gültekin, K., Akpinar, S., Akbulut, H., Ozel, A. 2017c. Research on strength of nanocomposite adhesively bonded composite joints. Composite Part B, 126, 143-152.
- Akpinar, İ., Akpinar, S., Gürses, A., Gültekin, K., Akbulut, H., Ozel, A. 2018. Investigation of mechanical and thermal properties of nanostructure-doped bulk nanocomposite adhesives. The Journal of Adhesion, doi: 10.1080/00218464.2017.1415809
- Arseven, M. 2010. Nanokarbon ve Formları. İleri Malzemeler Araştırma Grubu, NanoteknolojiandNanotıp Anabilim Dalı, Beytepe, Türkiye.
- ASTM D1002, 1983. Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Shear by Tension Loading (metal-to-metal).
- ASTM D2651-01, 2008. Standart Guide for Preparation of Metal Surfaces for Adhesive Bonding.
- ASTM D4800-94, 2015. Standard Guide for Classifying and Specifying Adhesives.
- ASTM D3053-13a Standard Terminology Relating to Carbon Black.
- Avila, A.F., Peixoto, L.G.Z., Neto, A.S., Junior, J.A., and Carvalho, M.G.R., 2012. Bending Investigation on Carbon Fiber/Epoxy Composites Nano-Modified by

Graphene, Journal of Brazilian Society Mechanical Science & Engineering, 34 (3), 269-275.

- Ayatollahi, M.R., Giv, A.N., Razavi, S.M.J., Khoramishad, H. 2016. Mechanical properties of adhesively single lap bonded joints reinforced with multi-walled carbon nanotubes and silica nanoparticles. The Journal of Adhesion, doi:10.1080/00218464.2016.1187069
- Aydın, M.D., 2003. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Tek Tesirli Bindirme Bağlantısının Mekanik Özelliklerinin Deneysel ve Teorik İncelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Ayhan, A. 2002. Dünden Bugüne Türkiye'de Bilim Teknoloji ve Geleceğin Teknolojileri. Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul, 455s.
- Bedeloğlu, A., Taş, M., 2016. Grafen ve Grafen Üretim Yöntemleri. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16,544-554.
- Bekyarova, E., Thostenson, E.T., Yu, A., Kim, H., Gao, J., Tang, J., 2007. Multiscale Carbon Nanotube-Carbon Fiber Reinforcement for Advanced Epoxy Composites. Langmuir, 23,3970-3974.
- Blackman, B.R.K., Kinloch, A.J., Sohn, J., Lee, A.C., Taylor, R., Agarwal, G., Schueneman, S., 2007. The fracture and fatigue behaviour of nano-modified epoxy polymers. Journal of Materials Science Letters 42, 7049 7051.
- Bouiadjra, B.B., Fekirini, H., Belhouari, M., Boutabout, B., Serier B., 2007. Fracture energy for repaired cracks with bonded composite patch having two adhesive bands in aircraft structures. Computational Materials Science, 40,20-26.
- Brooker, R.D., Blackman, B.R.K., Kinloch, A.J. 2008. Nano- Reinforcement of Epoxy/Thermoplastic Blends. 31st Annual Meeting of the Adhesion Society, Austin, USA, Adhesion Society, Blacksburg, USA.
- Brooker, R.D., Kinloch, A.J., Taylor, A.C. 2010. The morphology and fracture properties of thermoplastic-toughened epoxy polymers. The Journal of Adhesion, 86,726-741.
- Burkholder, G.L., Kwon, Y.W., Pollak, R.D., 2011. Effect of carbon nanotube reinforcement on fracture strength of composite adhesive joints of naval interest. Journal of Materials Science, 46,3370–3377.
- Chandra, Y., Chowdhury, R., Scarpa, F., Adhikari, S., Sienz, J., Arnold, C., Murmu, T. and Bould, D. 2012. Vibration Frequency of Graphene Based Composites: A Multiscale approach. Materials Science and Engineering B-Advanced Functional Solid-State Materials, 177, 303-310.
- Chaudhury, M., Pocius, A.V. 2002. Adhesion science and engineering-2 surfaces, chemistry and applications. Elsevier, Amsterdam.
- Choi, W., Lahiri, I., Seelaboyina, R., and Kang, Y. S. 2010. Synthesis of Graphene and Its Applications: A Review. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 35(1), 52-71.
- Crithlow, G., Yendall, K.A., Bahrani, D., Quinn, A., Andrews, F. 2006. Strategies for the replacement of chromic acid anodising for the structural bonding of aluminium alloys. International Journal of Adhesive and Adhesion, 26,417-423
- Corrias, M., Caussat, B., Ayral, B., Durand, J., Kihn, Y., kalck, P., Serp, P.H., 2003. Carbon nanotubes produced by fluidized bed catalytic CVD: first approach of the process. Chemical Engineering Science, 58, 4475-5582.
- Çakmak, S. 201. Nanofiberler. Nanobülten, Sayfa 12.

- Da Silva, L.F.M., Ochsner, A., Adams, R.D., 2011. Handbook of adhesion technology. Springer, e-ISBN 978-3-642-01169-6
- Dannenberg, H., Harp, W.R. 1956. Determination of cure and analysis of cured epoxy resins. Analytical Chemistry, 28(1), 86-90.
- Davis, G.D. 2006. Durability of adhesive joints. In: Mittal KL, Pizzi A (eds) Handbook of adhesive technology, 2nd edn. Marcel Dekker, New York, p 273.
- Deng, S., Ye, L., and Friedrich, K., 2007. Fracture behaviours of epoxy nanocomposites with nano-silica at low and elevated temperatures. Journal of Materials Science 42, 2766 2774.
- Dodiuk, H., Belinski, I., Dotan, A., Keni, S. 2006. Polyurethane adhesives containing functionalized Nanoclays. Journal of Adhesion Science and Technology, 20, 1345–1355.
- Doru, M.O., Ozel, A., Akpinar, S. and Aydın, M.D., 2014. The Effect of the Spew Fillet on Adhesively Bonded Single-Lap Joint Subjected to Tensile Loading: Experimental and 3-D Non-Linear Stress Analysis. The Journal of Adhesion, 90,195-209.
- Ebbesen, T.W., Tabuchi, J., Tanigaki, K., 1992. The Mechanistics of fullerene formation. Chemical Physical Letters, 191, 336-341.
- Edwards, K.L., 1998. A Brief Insight Into the Selection and Use of Engineering Adhesives for Preliminary Joint Design. Materials and Design, 19, 121-123.
- Erbaş, S.İ. 2009. Karbon esaslı filmlerin üretimi ve karakterizasyonu, Yükseklisans Tezi, Fenbilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Fabio, R., Khalid, M., Alessio, V., Michela B., Annalisa, A., Claudia, V., Giorgio, M., 2013. Adhesion enhancement of electrospun nanofiber mats to polypropylene nonwoven fabric by low-temperature oxygen plasma treatment. Surface & Coatings Technology 216, 178–184.
- Fiedler, B., Gojny, F.H, Wichman, M.H.G., Karl, S. 2006. Fundamental aspects of nano-reinforced composites. Composites Science and Technology, 66,3115-3125.
- Fitton, M.D., Broughton, J.G., 2005. Variable modulus adhesives: an approach to optimised joint performance. International Journal of Adhesion and Adhesives, 25, 329-336.
- Garrett, L.B., Young, W.K., Randall, D.P., 2011. Effect of carbon nanotube reinforcement on fracture strength of composite adhesive joints. Journal of Materials Science, 46,3370-3377.
- Geim, A.K. and Novoselov, K.S. 2007. The Rise of Graphene. Nature Materials, 6, 183-191.
- Gkikas, G., Sioulas, D., Lekatou, A., Barkoula, N.M., Paipetis, A.S., 2012. Enhanced bonded aircract repair using nano modified adhesives. Material and Design, 41,394-402.
- Gültekin, K., 2014. Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantılarda Malzeme Genişliğinin Ve Kalınlığının Bağlantının Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Gültekin, K., Akpinar, S., Gürses, A., Eroğlu, Z., Cam, S., Akbulut, H., Keskin, Z., Özel, A. 2016. The effects of graphene nanostructure reinforcement on the adhesive method and the graphene reinforcement ratio on the failure load in adhesively bonded joints, Composite Part B, 98, 362-369.

- Gojny, F.H., Wichmann, M.H.G., Kopke, U., Fiedlar, B., Schulte, K. 2004. Carbon nanotube- reinforced epoxy-composites: enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content. Composites Science and Technology, 64,2363-2371.
- Gojny, F.H., Nastalczyk, J., Roslaniec, Z:, Schulte, K. 2003. Surface modified multiwalled carbon nanotubes in CNT/epoxy composites. Chemical Physics Letters, 370,820-824.
- Goland, M. and Reissner, E., 1944. The Stresses in Cemented Joints, Journal of Applied Mechanics, 11, A17-A27.
- Gonzalez, M. G., Cabanelas, J. C., ve Baselga J. 2012. Applications of FTIR on Epoxy Resins –Identification, Monitoring the Curing Process, Phase Separation and Water Uptake. In Theophanides, T. (Ed.), Infrared Spectroscopy - Materials Science, Engineering and Technology (pp.261-284). Crotia: InTech Press.
- Grant, L.D.R., Adams, R.D. and da Silva L.F.M., 2009. Experimental and Numerical Analysis of Single-Lap Joints For the Automotive Industry. International Journal of Adhesion and Adhesives, 29 (4), 405-413.
- Guadagno, L., Maria, S., Vietri, U., Raimondu, M., Cirillo C., and Ciambelli P. 2015. Graphene-based structural adhesive to enhance adhesion performance. RSC Advances, 5,27874-86.
- Green, K., Dean, D. 2006. Aligned carbon nanofiber/ epoxy nanocomposites. Polymer Materials Science & Engineering, 94,53-61.
- Hackman, I., Hollaway, L. 2006. Epoxy-layered silicate nanocomposites in civil engineering. Composites Part A, 37,1161-1170.
- Harris, P.J.F. 2009. Carbon nanotube science: synthesis, properties and applications. Cambridge University Press, Cambridge.
- He, X., 2011. A Review of Finite Element Analysis of Adhesively Bonded Joints. International Journal of Adhesion and Adhesive, 31, 248–264.
- Higgins, A., 2000. Adhesive Bonding of Aircraft Structures. International Journal of Adhesion and Adhesives, 20 (5), 367-376.
- Hsiao, K.T., Alms, J., Advani, S.G., 2003. Use of epoxy/multiwalled carbon nanotubes as adhesives to join graphite fibre reinforced polymer composites. Nanotechnology, 14 (7), 791-793.
- Hsieh, T.H., Kinloch, A.J., Masania, K., Lee, J.S., Taylor, A.C., Sprenger, S. 2010. The toughness of epoxy polymers and fibre composites modified with rubber microparticles and silica nanoparticles. Journal of Materials Science, 45,1193-1210.
- Hone, J. 2004. Carbon nanotubes: Thermal properties. Dekker Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, DOI: 10.1081/E-ENN 120009128. Columbia University, NewYork.
- ISO 10365, 1992. Adhesives- Designation of main failure patterns.
- ISO 15166-1, 1998. Adhesives- Methods of preparing bulk specimens- Part 2: Two-part systems.
- ISO 527-1, 2002. Plastics: Determination of tensile properties- Part 1: General principles
- ICBA (2017) International Carbon Black Association. http://www.carbon-black.org. Retrieved 22 Mart 2017.
- Iijima, S. 1991. Helical microtubules of graphitic carbon. Nature 354,56-58.

- Iijima, S., Ichihashi, T., 1993. Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. Nature 363,603-605.
- Jacobs, B.A., 1996. Balancing adhesion and cohesion in WB packaging adhesives. Adhesives Age, 39, 40-44.
- Jennings, C.W., 1972. Surface Roughness and Bond Strength of Adhesives. The Journal of Adhesion, 4,25-38.
- Kang, M.H., Choi, J.H., Kweon, J.H., 2014. Fatigue life evaluation and crack detection of the adhesive joint with carbon nanotubes. Composite Structures, 108, 417-422.
- Katsnelson, M.I., 2007. Graphene: carbon in two dimensions, Materials Today, 10,20-27.
- Kayacan, R., 1988. Yapıştırma ve Metal Bağlantılar İçin Yapıştırıcı Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Khashaba, U.A., Aljinaidi, A.A., Hamed, M.A. 2015. Development of CFRE composite scarf adhesive joints with SiC and Al2O3 nanoparticle. Composite Structures 128;415-427.
- Kim, J.S., Reneker, D.H., 1999. Mechanical properties of composites using ultrafine electrospun fibers. Polymer Composites, 20,124–131.
- Kinloch, A.J., Bishop, H.E., Smart, N.R. 2006. Surface Analysis and Bonding of Aluminium-Magnesium Alloys. The Journal of Adhesion, 14,105-118.
- Kinloch, A. J., 1987. Adhesion and Adhesive Science and Technology. First Edition, Chapman and Hall.
- Kingston, C.T. ve Simard, B., 2003. Fabrication of Carbon Nanotubes, Analytical Letters, 36, 3119-3145.
- Kosynkin, D. V., Higginbotham, A. L., Sinitskii, A., Lomeda, J. R., Dimiev, A., Price, B. K., & Tour, J. M. 2009. Longitudinal unzipping of carbon nanotubes to form graphene nanoribbons. Nature, 458(7240), 872-875.
- Kratschmer, W., Lamb, L.D., Fostiropoulos, K., Huffman, D.R., 1990. Solid C₆₀: a new form of carbon. Nature, 347, 354-358.
- Kroto,H., Heath, J.R. O'Brien, S.C., Curl, R.F. Smalley, R.E., 1985. C₆₀:buckminsterfullerene. Nature, 318, 162-163.
- Kumskov, A. S., Zhigalina, V. G., Chuvilin, A. L., Verbitskiy, N. I., Ryabenko, A. G., Zaytsev, D. D., Eliseev, A. A. and Kiselev, N. A. 2012. The structure of 1D and 3D CuI nanocrystals grown within 1.5-2.5 nm single wall carbon nanotubes obtained by catalyzed chemical vapor deposition. Carbon, 50, 4696-4704.
- Kut, D., Güneşoğlu, C. 2005. Nanoteknoloji ve tekstil sektöründeki uygulamaları. Tekstil ve Teknik, Şubat,224-230.
- Kwon, H., Mondal, J., AlOgab, K.A., Sammelselg, V., Takamichi, M., Kawaski, A., Leparroux, M. 2017. Graphene oxide-reinforced aluminum alloy matrix composite materials fabricated by powder metallurgy. Journal of Alloys and Compounds, 698,807-813.
- Lam, C.K., Lau, K.T., Cheung, H., Ling, H.Y. 2005. Effect of ultrasound sonication in nanoclay clusters of nanoclay/epoxy composites. Materials Letters, 59,1369-1372.
- Lau, K.T., Gu, C. 2004. Stretching process of singleand multi-walled carbon nanotubes for nanocomposite applications. Carbon, 42,426-428.

- Lee, J. K., Song, S. and Kim, B. 2012. Functionalized graphene sheets-epoxy based nanocomposite for cryotank composite application. Polymer Composites, 33, 1263-1273.
- Li, W., Dichiara, A., and Bai, J., 2013. Carbon Nanotube–Graphene Nanoplatelet Hybrids as High- Performance Multifunctional Reinforcements in Epoxy Composites. Composites Science and Technology, 74, 221–227.
- Liu, Q., Zhou, X., Fan, X., Zhu, C., Yao, X. and Liu, Z. 2012. Mechanical and Thermal Properties of Epoxy Resin Nanocomposites Reinforced with Graphene Oxide. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 51, 251–256.
- Loctite Worldwide Design Handbook, 1998.
- Lu, K.L., Lago, R.M., Chen, Y.K., Green, M.L.H., Harris, P.J.F., Tsang, S.C. 1996. Mechanical damage of carbon nanotubes by ultrasound. Carbon, 34,814-816.
- Malikov, E.Y., Muradov, M.B., Akperov, O.H., Eyvazavo, G.M., Puskas, R., Madarasz, D., Nagy, L., Kukovecx, A., Konya, Z. 2014. Synthesis and characterizatiob 1f polyvinil alcohol based multiwalled carbon nanotube nanocomposites. Physsica E, 61,129-134.
- Marami, G., Nazari, S.A.; Faghidian, S.A., Tahami, F.V., 2016. Improving the mechanical behavior of the adhesively bonded joints using RGO additive. International Journal of Adhesion and Adhesives, 70, 277-286.
- Marques, E.A.S., da Silva, L.F.M., Flaviani., 2015. Testing and simulation of mixed adhesive joints for aerospace applications. Composite Part B:Engineering, 74,123-130.
- Marques, E.A.S., da Silva, L.F.M., 2008. Joint Strength Optimization of Adhesively Bonded Patches. The Journal of Adhesion, 84,915–934.
- May, M., Wang, H.M., and Akid, R., 2010. Effects of the addition of inorganic nanoparticles on the adhesive strength of a hybrid sol-gel epoxy system, International Journal of Adhesion and Adhesives, 30 (6), 505-512.
- McBain, J.W. and Hopkins, D.G., 1925. On Adhesives and Adhesive Action. Journal of Physical Chemistry, 29(2),188-204.
- Mittal, K.L., 1976. Adhesion aspects of metallization of organic polymer surfaces. Journal of Vaccum Science and Technology, 13,19 doi: http://dx.doi.org/10.1116/1.568850
- Moghanian, A., Sharifianjazi, F., Abachie, P., Sadeghi, E., Jafarikhorami, H., Sedghi, A. 2017. Production and properties of Cu/TiO2 nano-composites, Journal of Alloys and Compounds, 698,518-524.
- Mohammed, R.D. 2007. Material properties and fracture mechanisms of epoxy nanocomposites. PhD thesis. Mechanical Engineering. Imperial College of Science, Technology and Medicine, London.
- Moriche, R., Prolongo, S. G., Sanchez, M., Jimenez-Suárez, A., Campo, M., Urena, A. 2016. Strain Sensing Based on Multiscale Composite Materials Reinforced with Graphene Nanoplatelets. Journal of Visualized Experimens 117, doi: 10.3791/54512.
- Neto, A.S., Diego, Cruz, T.L., Avilab, A.F., 2013. Nano-modified adhesive by graphene: The single lap joint case. Materials Research, 16:592-596.
- Nikolic, G., Zlatkovic, S., Cakic, M., Cakic, S., Lacnjevac, C., Rajic, Z. 2010. Fast Fourier Transform IR Characterization of Epoxy GY Systems Crosslinked with Aliphatic and Cycloaliphatic EH Polyamine Adducts. Sensors, 10, 684-696.

- Ogasawaraa, T., Ishidaa, Y., and Kasaib, T., 2009. Mechanical properties of carbon fiber/fullerene-dispersed epoxy composites, Composites Science and Technology, 69, 2002-2007.
- Örs, A. 2009. Karbon Nanotüplerin Polimer ile Fonksiyonlaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Enerji Enstitüsü İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Packham, D.E., 2003. Mechanical theory of adhesion. In: Pizzi A, Mittal KL (eds) Handbook of adhesive technology, 2nd edition. Marcel Dekker, New York
- Park, S., An, J., Potts, J.R., Velamakanni, A., Murali, S., & Ruoff, R.S. 2011. Hydrazine-reduction of graphite- and graphene oxide. Carbon, 49(9), 3019-3023.
- Park, S.W., Kim, B.C., and Lee, D.G., 2009. Tensile strength of joints bonded with a nanoparticle reinforced adhesive. Journal of Adhesion Science and Technology, 23 (1), 95-113.
- Philips, J.P., Deng, X., Stephen, R.R., Fortenberry, E.L., Todd, M.L., Mcclusky, D.M., Stevenson, S., Misra, R., Morgan, S., Long, T.E., 2007. Nano- and bulk-tack adhesive properties of stimuli-responsive, fullerene–polymer blends, containing polystyrene-block-polybutadiene-block-polystyrene and polystyrene-blockpolyisoprene-block-polystyrene rubber-based adhesives. Polymer, 48, 6773-6781.
- Pires, I., Quintino, L., Durodola, J.F., 2003. Performance of bi-adhesive bonded aluminium lap joints. International Journal of Adhesion and Adhesives, 23, 215-223.
- Popov V.N. 2004. Carbon nanotubes: properties and application, Materials Science and Engineering, 43, 61-102.
- Rafiee, M.A., Rafiee, J., Wang, Z., Song, H., Yu, Z.Z., and Koratkar, N. 2009. Enhanced Mechanical Properties of Nanocomposites at Low Graphene Content. ACS Nano, 3(12), 3884-3890.
- Reina, A., Jia, X. T., Ho, J., Nezich, D., Son, H. B., Bulovic, V., Kong, J. 2009. Large Area, FewLayer Graphene Films on Arbitrary Substrates by Chemical Vapor Deposition. Nano Letters, 9(1), 30-35.
- Sadigh, M.A., Marami, G. 2016. Investigating the effects of reduced graphene oxide additive on the tensile strength of adhesively bonded joints at different extension rates. Materials and Design, 92, 36–43
- Sancaktar, E., Kumar, S., 2000. Selective use of rubber toughening to optimize lap-joint strength. Journal of Adhesion Science and Technology, 14, 1265–1296.
- Sayman, O., 2012. Elasto-Plastic Stress Analysis in an Adhesively Bonded Single-Lap Joint, Composites Part B, 43(2), 204-209.
- Sayman, O., Ozel, A., Pasinli, A., Ozen, M.,2013. Nonlinear Stress Analysis in Adhesively Bonded Single-Lap Joint, Journal of Adhesion Science and Technology, 27 (21), 2304-2314.
- Schmid, C.F., Klingenberg, D.J. 2000. Mechanical flocculation in flowing fiber suspensions. Physical Reviver Letters, 84,290-293.
- Shaffer, M.S.P., Kinloch, I.A. 2004. Prospects for nanotube and nanofibre composites. Composites Science and Technology, 64,2281-2282.
- Shishevan F.A., 2015. Termal Çevrimin Bazalt Karbon Intra Ply Hibrit Elyaf Takviyeli Karbon Nanotüp ve ya Grafen Dolgulu Polimer Kompozitlerin Mekanik ve

Terma Özellikleri Üzerindeki Etkileri. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.

Shields, J., 1985. Adhesive handbook, 3rd edition. Butterworth & Co Ltd., London.

- Siddiqui, N.A., Khan, S.U., Ma, P.C., Li, C.Y., and Kim, J.K. 2011. Manufacturing and characterization of carbon fibre/epoxy composite prepress containing carbon nanotubes. Composites Part A, 42 (10): 1412-1420.
- Silva, M., Marwqes, E., da Silva, L.F.M., 2016. Behaviour under impact of mixed adhesive joints for automotive industry. Latin American Journal of Solid and Strustures, 13,835-853.
- Singh, V., Joung, D., Zhai, L., Das, S., Khondaker, S.I. ve Seal, S. 2011. Graphene based materials: Past, present and future, Progress in Materials Science, 56, 1178-1271.
- Soliman, M., Al-Haik, M., Taha, M.R., 2012. On and Off-Axis Tension Behavior of Fiber Reinforced Polymer Composites Incorporating Multi-walled Carbon Nanotubes, Journal of Composite Materials, 46(14), 1661-75.
- Sprenger, S., Eger, C., 2004. Nano-modified ambient temperature curing epoxy adhesives. Adhaesion, Kleben and Dichten. 2004:1
- Srivastava, V.K. 2011. Effect of carbon nanotubes on the strength of adhesive lap joints of C/C and C/C–SiC ceramic fibre composites. International Journal of Adhesion and Adhesives, 31, 486–89.
- Subagia, I.D.G.A. and Kim, Y. 2013. A study on flexural properties of carbonbasalt/epoxy hybrid composites. Journal of Mechanical Science and Technology, 27, 987-992.
- Sun X. Kiang, C., Endo, K., Takeuchi, K., Furuta, T., Dresselhaus, M.S. 1996. Stacking characteristics of graphene shells in carbon nanotubes, Physical Review B, 54, 426-428.
- Sutradhar, S., Patnaik, A., 2017. A new fulerene C60 nanogold composite for nonenzymatic glucose sensing. Sensors and Actuators B: Chemical, 241, 681-689.
- Şenel, C. M., Gürbüz, M., Koç, E. 2015. Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Yeni Nesil Kompozitler, Mühendis ve Makina, 56, 36-47.
- Taibi, A.A., Boukhili, R., Achion, S. and Boukheli, A., 2006. Bonded Joints With Composites Adherends Part II Finite Element Analysis of Joggle Lap Joints. International Journal of Adhesion and Adhesive, 26, 237-248.
- Tapas, K., Sambhu, B., Dahu, Y., Nam, H.K., Saswata, B., Joong, H.L. 2010. Recent advances in graphene based polymer composites, Progress in Polymer Science, 35, 1350-1375.
- Tek, G., 2011. Tek ve Çift Tesirli Yapıştırma Bağlantılarında Gerilme Analizi. Y.Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Temiz, Ş., 2003. Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özellikleri Üzerine Çevresel Faktörlerin Etkisinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi.
- Temiz, S., 2006. Application of Bi-Adhesive in Double-Strap Joints Subjected to Bending Moment. Journal of Adhesion Science and Technology, 20(14),1547–1560.
- Temiz, S., Akpinar, S., Aydın, M.D. and Ozel, A., 2013. Increasing Single Lap Joint Strength by Adherend Curvature-Induced Residual Stresses. Journal of Adhesion Science and Technology, 27, 244-251.

- Theerthagiri, J., Senthil, R.A., Jagannathan, M., Maiyalagan, T. 2015. Recent progress in non-platinum counter electrode materials for dye sensitized solar cells, Chem Electro Chem, 2,928-945.
- Tın, S., 2006. Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Tasarım ve Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi, Afyon.
- Tripathi, G., Srivastava, D. 2007. Effect of carboxyl-terminated poly(butadiene-coacrylonitrile) (CTBN) concentration on thermal and mechanical properties of binary blends of diglycidyl ether of bisphenol-A (DGEBA) epoxy resin. Materials Science and Engineering A, 443, 262–269.
- Tsai, J.L., Hsiao, H., Cheng, Y.L. 2010. Investigating Mechanical Behaviours of Silica Nanoparticle Reinforced Composite. Journal of Composite Materials, 44, 505-524.
- Tsai, M.Y., Morton, J., 1995. The effect of a spew fillet on adhesive stress distrubution in laminated composite single-lap joints. Composite Structures, 32,123-131.
- TSEN 13887, 2007. Yapısal Yapıştırıcılar-Metallerin ve Plastiklerin Yapışma Öncesi Yüzey Hazırlama Kılavuzu
- Tüzün, F.N., Tunalıoğlu, M.Ş., 2015. The effect of finely divided fillers on the adhesion strengths of epoxy based adhesives. Composites Structures, 121, 296-303.
- Venables, J.D., McNamara, D.K., Chen, J.M., Sun, T.S., Hopping, R.L.,1979. Oxide morphologies on aluminum prepared for adhesive bonding. Appl Surf Sci 3,88-98.
- Volkersen, O., 1938. Die Niektraftverteilung in Zugbeanspruchten Mit Konstanten Laschenquerschritten, Luftfahrtforschung, 15, 41-47.
- Voyutskii, S.S.,1963. Autohesion and Adhesion of High Polymers, Wiley-Interscience, New York.
- Yang, G.J., Li, C.L., Xin, C., 2013a. Improvement of adhesion and cohesion in plasma sprayed ceramşc coatings by heterogeneous modification of nonbonded lamellar interface using strength adhesive infiltration, Journal of Thermal Spray Technology, 22, 36-47.
- Yang, X., Wang, Z., Xu, M., Zhao, R. and Liu, X. 2013b. Dramatic mechanical and thermal increments of thermoplastic composites by multi-scale synergetic reinforcement: Carbon fiber and graphene nanoplatelet. Materials and Design, 44, 74–80.
- Yang, Y., Wu, L., Guo, Y., Zhou, Z., 2011. Effect of spew fillets on strength of single lap adhesive composites joints. Advanced Materials Research, 239, 810-814.
- Yasmin, A., Luo, J.J. Daniel, I.M. 2006. Mechanical and thermal behavior of clay/epoxy nanocomposites. Composites Sci Tech, 66,2415-2422.
- Yasmin, A., Abot, J.L., Daniel I.M. et al 2003. Processing of clay/epoxy nanocomposites by shear mixing. Scripta Materialia, 49,81-86.
- Yetim, A. 2011. Karbon Nano Tüpler. Yükseklisans Tezi, Fenbilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- Yue, L., Pircheraghi, G., Monemian, S.Y., Zloczower, I.M., 2014. Epoxy composites with carbon nanotubes and graphene nanoplatelets-dispersion and synergy effects. Carbon, 78, 268-278.

- Zaman, I., Phan, T.T., Kuan, H.C., Meng, Q., Bao, L.L.T, and Luong, L. 2011. Epoxy/graphene platelets nanocomposites with two levels of interface strength, Polymer, 52 (7),1603-1611.
- Zhang, X., Fan, X., Yan, C., Li, H., Zhu, Y., Li, X., and Yu, L., 2012. Interfacial Microstructure and Properties of Carbon Fiber Composites Modified with Graphene Oxide, Acs Applied Materials & Interfaces, 4 (3), 1543–1552.
- Zhai, L.L., Ling, G.P., Wang, Y.W., 2007. Effect of nano-Al2O3 on adhesion strength of epoxy adhesive and steel. International Journal of Adhesion ad Adhesives, 28, 23-28.
- Zhai, LL., Ling, G., Li, J., Wang, Y., 2006. The effect of nanoparticles on the adhesion of epoxy adhesive. Materials Letters, 60, 3031-3033.
- Zhan, Y.Q., Meng, F.B., Yang, X.L. and Liu, X.B. 2011. Magnetite-graphene nanosheets (GNs)/poly(arylene ether nitrile) (PEN): Fabrication and characterization of a multifunctional nanocomposite film. Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects, 390, 112-119.
- Zhang, J., Lou, R., Yang, C., 2012. A multi Wall carbon nanotube-reinforced hightemperature resistant adhesive for bonding carbon/carbon composites. Carbon, 50, 4922-4925.
- Zhao, X., Adams, R.D., da Silva, L.F.M., 2011. Single Lap Joints with Rounded Adherend Corners: Experimental Results and Strength Prediction. Journal of Adhesion Science and Technology, 25 (8),837–856.
- Zhou, Y., Pervin, F., Jeelani, S., 2007. Effect vapor grown carbon nanofiber on thermal and mechanical properties of epoxy. Journal of Materials Science, 42,7544-7553.
- Xie, X.L., Mai, Y., Zhou, X.P. 2005. Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: A review. Materials Science Engineering R 49,89-112.
- Xu, L.R., Li, L., Lukehart, C.M., Kuai, H., 2007. Mechanical characterization of nanofiber-reinforced composite adhesives. Journal of Nanoscience and Nanotechnolgy. 7(7), 2546-2548.
- Wieland, W.B., Slater, A.G., Mabgham, B., Champness, N.R., Beton, P.H., 2014. Fullerenes as adhesive layers for mechanical peeling of metallic, molecular and polymer thin films. Beilstein Journal of Nanotechnology, 2,394-401 doi: 10.3762/bjnano.5.46.
- Wan, Y.J., Gong, L.X., tang, L.C., Wu, L.B., Jiang J.X., 2014. Mechanical properties of epoxy composites filled with silane-functionalized graphene oxide. Composite Part A, 64, 79-89.
- Wang, Z.L. 2001. Characterization of nanophase materials. Wiley-VCH, Weinheim
- Qian, D., Dickey, E.C., Andrews, R., Rantell, T., 2000. Load transfer and deformation mechanisms in carbon nanotube-polystyrene composites. Applied Physics Letters, 76, 2868–2870

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Erzurum'un Aşkale ilçesinde doğdu. İlk, Orta ve Lise öğrenimini Aşkale'de tamamladı. 2011 yılında Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Mekanik Bilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı ve 2014 yılında mezun oldu. Aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Mekanik Bilim Dalı'nda doktora öğrenimine başladı. Kafkas Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.