



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Nanoparçacık Katkılı Epoksi Esaslı
Yapıştırıcıların Mekanik ve Termal
Özelliklerinin Araştırılması

Yasin ÖZDEMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Eylül-2018
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Yasin ÖZDEMİR tarafından hazırlanan “Nanoparçacık Katkılı Epoksi Esaslı Yapıştırıcıların Mekanik ve Termal Özelliklerinin Araştırılması” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Unvanı Adı SOYADI

.....

Danışman

Doç.Dr.Necati ATABERK

.....

Üye

Unvanı Adı SOYADI

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Ahmet AVCI
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

İmza

Yasin ÖZDEMİR

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nanoparçacık Katkılı Epoksi Esaslı Yapıştırıcıların Mekanik ve Termal Özelliklerinin Araştırılması

Yasin ÖZDEMİR

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç.Dr.Necati ATABERK

2018, 97 Sayfa

Jüri

Doç.Dr.Necati ATABERK

Prof.Dr.Ahmet AVCI

Prof.Dr.Ömer Sinan ŞAHİN

Bu çalışmada, nanoparçacık katkılı epoksi esaslı yapıştırıcıların termal ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla, yapıştırılan malzeme olarak Al 2024-T3 levha kullanılmıştır. Oluşturulan bağlantıların kayma ve çekme dayanımları incelenmiştir. Nanoparçacık katkılı epoksi esaslı yapıştırıcıların mekanik özellikleri belirlenirken, deneyler tek taraflı bindirmeli bağlantısı ASTM D1002-10 standartına uygun gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerin yapılması için sırasıyla alüminyum plakaların yüzey temizliği, yapıştırıcı malzemenin oluşturulması, yapıştırma işleminin yapılması ve çekme dayanımlarının ölçülmesi için çekme numunelerinin kalıplara dökülmesi işlem maddeleri uygulanmıştır. Öncelikle epoksi esaslı grafen katkılı ve epoksi esaslı karbon nanotüp katkılı yapıştırıcılar incelenmiştir. Burada bulunan optimum değerler kullanılarak üretilen epoksi esaslı grafen ve karbon nanotüp katkılı yapıştırıcılar incelenmiş ve en iyi değeri veren yapıştırıcı numunesi elde edilmeye çalışılmıştır. Bu işlemler uygulandıktan sonra bulunan en iyi numuneye değişik oranlarda gümüş nanoparçacıklar eklenmiştir ve en iyi orandaki yapıştırıcı belirlenmeye çalışılmıştır. Grafen, karbonnanotüp ve gümüş nanoparçacık katkılı epoksi bazlı üretilen en iyi yapıştırıcıya değişik oranlarda bakır nanoparçacıklar eklenmiştir ve en iyi yapıştırıcı belirlenmiştir. Deneylerin güvenilirliği açısından her numuneden beşer (5) adet üretilmiştir. Oluşturulan numunelerin taramalı elektro mikroskopi (SEM) görüntüleri ile morfolojik yapı ve çaplar analizi yapılmıştır. Üretilen yapıştırıcı numunelerden alınan örnekler ile yapıştırıcı numunelerin termal özelliklerini araştırmak için Thermogravimetric Analiz (TGA) ve Diferansiyel Termal Analiz (DTA) testleri uygulanmıştır. DTA testi ile üretilmiş yapıştırıcı numunelerinin camsı geçiş sıcaklığı (T_g), erime sıcaklığı (T_m) elde edilmiştir. TGA testleriyle de üretilen numunelerin kütle kaybına oranla bozunma sıcaklıkları elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Epoksi, Grafen, Karbon nanotüp, Gümüş Nanoparçacık, Bakır Nanoparçacık

ABSTRACT**MS THESIS****Investigation of Mechanical and Thermal Properties of Nanoparticles-Reinforced Epoxy Based Adhesives****Yasin ÖZDEMİR****THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING****Advisor: Assoc.Prof.Dr.Necati ATABERK****2018, 97 Pages****Jury****Assoc.Prof.Dr.Necati ATABERK****Prof.Dr.Ahmet AVCI****Prof.Dr.Ömer Sinan ŞAHİN**

In this study, thermal and mechanical properties of epoxy adhesive doped nanoparticles were investigated. For this purpose, Al 2024-T3 plate was used as adhesive material. The shear and tensile strengths of the created bondings are examined. While determining the mechanical properties of nanoparticle-doped epoxy based adhesives, the experiments were carried out in accordance with ASTM D1002-10, single lap sheared connection. In order to carry out these processes, surface treatment of aluminum plates, formation of adhesive materials, bonding process and drawing casting of tensile samples to measure tensile strength were applied respectively. First, epoxy based graphene additive and epoxy based carbon nanotube additive adhesives were investigated. The epoxy based graphene and carbon nanotube additive adhesives produced using the optimum values found here were examined and tried to obtain the best value adhesive sample. After these processes were applied, silver nanoparticles were added at different ratios to the best sample found, and the best adhesive was tried to be identified. Copper nanoparticles were added at various ratios to the best adhesive produced with graphene, carbon nanotube and silver nanoparticle doped epoxy base, and the best adhesive was identified. Five (5) samples were produced from each sample for the reliability of the experiments. Morphological structure and diameters of the formed samples were analyzed by scanning electron microscopy (SEM) images. Thermogravimetric analysis (TGA) and Differential Thermal Analysis (DTA) tests were applied to investigate the thermal properties of the adhesive samples with samples taken from the adhesive samples produced. The glass transition temperature (T_g) and melting temperature (T_m) of the adhesive samples produced by the DTA test were obtained. Decomposition temperatures of the samples produced in the TGA tests were obtained with respect to mass loss.

Keywords: Epoxy, Graphene, Carbon Nanotube, Silver Nanoparticles, Copper Nanoparticles



Tüm Sevdiklerime...

ÖNSÖZ

Lisans eğitimi ile başladığım üniversite hayatımda öğrenmiş olduğum bilgi ve tecrübeleri bir araya getirerek öncelikli olarak mensubu olduğum Türk Hava Kuvvetlerinin ihtiyacı olabilecek herhangi bir konuda üretileni tekrarlamak yerine yeniyi üretmek amacıyla yaptığım yüksek lisans eğitimi çalışmalarımın sonuna gelmiş bulunmaktayım. Bu süreçte üzerinde çalışmış olduğum her konunun hakkını vermek için bütün enerjimi çalıştığım konulara harcıyıp hiçbirini önemsiz bulmayıp, elimden gelenin en iyisini yapmaya çalıştım. Bu anlayış ile başladığım yüksek lisans eğitimim sürecinde, yollarımızın çok geç keşiştiğini düşündüğüm, kendisinden hem hayat görüşü olarak hem de çalışma anlayışı olarak bir çok değerler öğrenip bunları uygulayışıyla kendime rol model aldığım, benim için bir öğretim görevlisi, bir tez danışmanından öte olarak gördüğüm değerli hocam Doç.Dr.Necati ATABERK'e teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisans eğitimim sırasında her türlü bilgi alışverişinde bulunabildiğim Dr.Öğr.Üyesi Mürsel EKREM ve Arş.Grv. İlker GÖKTEPELİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca her zaman yanımda olarak benden hiçbir desteklerini esirgemeyen kıymetli babam Halis ÖZDEMİR, biricik annem Remziye ÖZDEMİR ve diğer canım aile üyelerime teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Son olarak, hayatıma anlam katan, her zaman yanımda olan, her derdimi dinleyip her zaman beni önemseyen kıymetli eşim, hayat arkadaşım ve en iyi dostum Esra ÖZDEMİR'e teşekkür ederim. Yüksek lisans eğitimim sürecinde biraz ihmal ettiğimi düşündüğüm gözümün nuru, minicik yavrum Halis Demir ÖZDEMİR'e de özürü bir borç bilir güzel bir gelecek ve bilimin ışığı altında geçecek bir hayat dilerim.

Yasin ÖZDEMİR
KONYA-2018

İÇİNDEKİLER

ÖZET	9
ABSTRACT.....	10
ÖNSÖZ	13
İÇİNDEKİLER	15
SİMGELER VE KISALTMALAR	17
1. GİRİŞ	18
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	21
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	29
3.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	30
3.1.1. Yapıştırıcı.....	30
3.1.2. Yapıştırılan malzeme (Al 2024-T3).....	32
3.1.3. Grafen	32
3.1.4. Karbon nanotüp.....	34
3.1.5. Gümüş nanoparçacık.....	35
3.1.6. Bakır nanoparçacık	36
3.2. Yapıştırma, Yapıştırıcı Bağlantıları ve Yapıştırıcıların Kuramsal Temelleri.....	37
3.2.1. Yapıştırma.....	37
3.2.2. Yapıştırma bağlantıları	38
3.2.3. Yapıştırma bağlantılarında oluşan gerilmeler.....	39
3.2.5. Yapıştırıcılara ilave edilen katkı maddeleri	43
3.2.6. Yapıştırmayı etkileyen faktörler	43
3.3. Analitik Yaklaşımlar	45
3.3.1. Tek taraflı bindirmeli bağlantılar	45
3.4. Yapıştırma Bağlantı Numunelerinin Yüzeylerinin Hazırlanması.....	48
3.5. Nano Yapıştırıcının Hazırlanması	53
3.6. Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantıların Yapıştırılması	54
3.7. Çekme Numunelerinin Üretilmesi	55
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	57
4.1. Yapıştırıcıların TGA ve DTA Sonuçları.....	57
4.1.1. Grafen katkılı epoksi yapıştırıcının TGA ve DTA sonuçları.....	60
4.1.2. KNT katkılı epoksi yapıştırıcıların TGA ve DTA sonuçları	62
4.1.3. Grafen ve KNT katkılı epoksi yapıştırıcıların TGA ve DTA sonuçları	63
4.1.4. Grafen, KNT ve gümüş nanoparçacık katkılı epoksi yapıştırıcıların TGA ve DTA sonuçları.....	69
4.1.5. Grafen, KNT, gümüş ve bakır nanoparçacık katkılı epoksi yapıştırıcıların TGA ve DTA sonuçları.....	71
4.2. Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantılarının Kayma Dayanım Testleri.....	73
4.2.1. Grafen katkılı yapıştırıcıların kayma testleri	74

4.2.2. KNT katkılı yapıştırıcıların kayma testleri	75
4.2.3. Grafen ve KNT katkılı yapıştırıcıların kayma testleri	77
4.2.4. Grafen, KNT ve gümüş nanoparçacık katkılı yapıştırıcıların kayma testleri	80
4.2.5. Grafen, KNT, gümüş nanoparçacık ve bakır nanoparçacık katkılı yapıştırıcıların kayma testleri.....	82
4.3. Çekme Numunelerinin Test Sonuçları.....	83
4.3.1. Grafen katkılı yapıştırıcıların çekme testleri	83
4.3.2. KNT katkılı yapıştırıcıların çekme testleri	85
4.3.3. Grafen ve KNT katkılı epoksi esaslı yapıştırıcıların çekme testleri	86
4.3.4. Grafen, KNT ve gümüş nanoparçacık katkılı yapıştırıcıların çekme testleri	89
4.3.5. Grafen, KNT, gümüş nanoparçacık ve bakır nanoparçacık katkılı yapıştırıcıların çekme testleri.....	91
4.4. Kırılma Yüzeyleri SEM Görüntüleri	92
4.4.1. Tek taraflı bindirmeli bağlantıların kırılma yüzeyi SEM görüntüleri.....	92
4.4.2. Çekme numuneleri kırılma yüzeyi SEM görüntüleri.....	97
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	101
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ	111

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

°	: Derece
°C	: Santrigrat Derece
K	: Kelvin
µm	: Mikrometre
mm	: Milimetre
nm	: Nanometre
g	: Gram
mg	: Miligram
Ra	: Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (µm)
w	: Yapıştırılan Malzemenin Kalınlığı(mm)
L	: Üst üste Bindirme Uzunluğu (mm)
π	: Pi Sayısı
ρ	: Yoğunluk
τ	: Kayma Dayanımı (MPa)
σ	: Çekme Dayanımı (MPa)
Pa	: Pascal (N/m ²)
γ	: Kayma Birim Şekil Değiştirmesi (mm/mm)
ε	: Birim Şekil Değiştirme
G	: Yapıştırıcının Kayma Modülü
A _{kayma}	: Yapıştırıcının Kayma Alanı (m ²)
P	: Uygulanan Kuvvet
mW	: Miliwatt
mJ	: Mili Joule

Kısaltmalar

DC	: Doğru Akım
Al	: Alüminyum
ASTM	: American Society for Testing and Materials
MWCNT	: Multiwalled Carbon Nanotube
TCKNT	: Tek Cidarlı Karbon Nanotüp
ÇCKNT	: Çok Cidarlı Karbon Nanotüp
TTBB	: Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantıları
NaOH	: Sodyum Hidroksit
E	: Saf Epoksi
Gr	: Grafen
Ag	: Gümüş
Cu	: Bakır
KNT	: Karbon Nanotüp
LSM	: Lap Shear Mukavemeti
PAA	: Fosforik Asit Anodizasyon
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TGA	: Termogravimetric Analiz
DTA	: Diferansiyel Termal Analiz
T _g	: Camı Geçiş Sıcaklığı
T _m	: Erime Sıcaklığı

1. GİRİŞ

Günümüzde endüstriyel sistemlerinin ihtiyacı olan enerji tüketimini azaltmak için çeşitli yollar denenmektedir. Yakıtta tasarruf sağlamanın en önemli yöntemlerinden bir tanesi de bu sistemlerin ağırlığını azaltmaktır. Sistem elemanlarını birleştirmek için kullanılan cıvata, perçin ve kaynak gibi geleneksel bağlantı yöntemlerinin yerine daha hafif bir bağlantı şekli olan yapıştırıcıların kullanımı, sistemleri daha hafif hale getirmiştir (Özenç, 2007; Düzcükoğlu ve ark., 2015).

1900'lü yıllardan bu yana bitkisel esaslı yapıştırıcılar, kâğıt gibi gözenekli yüzeye sahip malzemelerin yapıştırılmasında kullanılırken, yaklaşık 50 yıl öncesine kadar hayvansal esaslı yapıştırıcılar, daha çok kullanılmaktaydı. Örneğin kasein yapıştırıcılar, I. Dünya Savaşı'nda ahşap uçak kontrüksiyonları için kullanılmış, ancak bu tip yapıştırıcıların neme karşı düşük mukavemet ve dirence sahip oldukları görülmüştür. Doğal ürünlerdeki gibi sınırlamaları olmayan ve metal malzemeleri metal olmayan gözeneksiz malzemelere bağlayabilen sentetik reçinelerin gelişmesinden dolayı, son zamanlarda endüstriyel alanlarda yapıştırıcıların kullanımında ivmeli artış meydana gelmiştir. Tarihte üretilen ilk sentetik reçine, kereste parçalarının birbirlerine yapıştırılmasında kullanılan fenol formaldehittir. II. Dünya Savaşı sırasında savaş uçaklarının gövdelerindeki yapısal metalik malzemelerin birleştirilmesi fenolik reçineler ve epoksi reçinelerin kullanılmasıyla havacılık alanında yapıştırıcılar önemli bir yer edinmiştir. Bu sayede yapılan ar-ge çalışmaları hızlanmış, gün geçtikçe dayanım ve şekil değiştirme kabiliyeti artırılıp ve yorulma dayanımları da iyileştirilerek servis ömürleri uzatılmıştır. Bunun yanında gün geçtikçe titreşim sönümleme kabiliyeti fazla olan ve daha esnek özelliklere sahip olan daha iyi yapıştırıcılar ve yapışma bağlantıları elde edilmiştir (Şekercioğlu, 2001).

Yapıştırıcılar, yüzeylere sürülüp katılaştırıldığında parçaları birbirine bağlama özelliğine sahiptir. Yapıştırıcılar birkaç farklı şekilde sınıflandırılabilir. Form açısından; tek bileşenli sıvı yapıştırıcılar, çok bileşenli sıvı yapıştırıcılar, film yapıştırıcılar ve köpükler gibi, fiziksel hallerine göre; metal-metal yapıştırıcılar, kâğıt yapıştırıcılar ve ahşap yapıştırıcılar olarak sınıflandırabiliriz. Bu, malzemeye göre sınıflandırmaktır. Epoksi yapıştırıcılar, siyanoakrilit yapıştırıcılar ve polikloropen yapıştırıcılar da kimyasal formlarına göre sınıflandırmaya birkaç örnektir. Yapıştırma şartlarına göre sınıflandırmaya ise çözücü ile katılan yapıştırıcılar, soğuk katılan yapıştırıcılar ve

erimiş durumda uygulanan ve soğuyup sertleştiğinde yapışma sağlayan (hot-melt) yapıştırıcılar örnek gösterilebilir (Kinloch, 1987).

Özellikle son 20 yılda nano teknolojideki gelişmeler ile birlikte hafif ve yüksek dayanımlı malzemelerin ortaya çıkması hız kazanmıştır. Bu gelişmelerde özellikle bağlantı güvenilirliği uzun zaman periyotlarında gerekli olan havacılık, uzay, otomotiv, alt yapı sistemleri, deniz endüstrileri, tıp, spor, elektronik paketleme ve inşaat sektörlerinde polimer matrisli kompozit malzemelerin kullanımıyla, bu sektörlerde kullanılan araç ve gereçlerin birçoğunun daha dayanıklı ve hafif olarak üretilmesini sağlamıştır. Bu kompozit malzeme teknolojisindeki ilerlemeler ve kompozit malzeme üretim teknolojisinin gelişmesiyle beraber yapısal elemanların birleştirilmesi işlemlerinde de daha kullanışlı ve etkili yöntemlerin geliştirilmesi gerektiğini göstermiştir. Bu gereklilikle birlikte özellikle havacılık sektöründe mekanik birleştime yöntemlerinden uzaklaşarak yapıştırma ile birleştirme yöntemlerine ilgi önemli ölçüde artış göstermiştir. Bu ilginin artışı, yapıştırma alanında önemli çalışmalar yapılmasını sağlamıştır. Yapılan çalışmaların başlıca amaçları etkili ve başarılı bir yapıştırma yapmak için gerekli olan parametreleri belirlemek ve bu parametrelerin optimum değerlerini bulmak üzerine yapılmıştır. Dolayısıyla bu parametrelerin bulunması ve kullanılabilirliğinin denenmesi için birçok araştırma-geliştirme çalışmaları yapılmaktadır. Mühendislik alanında da bu konu ile ilgili birçok çalışma mevcuttur ve halen kullanılan yapıştırıcı türlerinin geliştirilmesine yönelik olarak çalışmalar yapılmaktadır.

Metaller mükemmel mekanik ve dayanım özelliklerinden dolayı en fazla tercih edilen malzemelerdir. Hâlbuki metallerin tasarımı büyük oranda korozyondan dolayı sınırlıdır. Korozyon, metallerin çevresel faktörler etkisinde bozulması olarak tanımlanabilir. Yapısal uygulamalarda kullanılan metallerin çoğu, oksijenli ortamlarda korozyona eğilimlidir ve bu eğilim yüksek sıcaklıklarda daha da artar. Korozyona uğrama oranı sulu ortamlarda daha hızlanır. Çünkü su, korozyonda birincil süreç olan elektrokimyasal reaksiyonlar için uygun bir ortam sağlar. Bisikletlerden köprülere, kovalardan büyük savaş gemilerine bütün yapıların çalışma ömürleri korozyon nedeniyle azalmaktadır (Ashby ve Jones, 1980). Mekanik borularla akışkanın taşındığı bir sistemde, borular korozyona uğradığı zaman, hasarlı bölgenin incelenmesi ve onarımı için sistem durur. Hasar fazla değilse, çoğunlukla onarım için kaynak tercih edilir ve kusurlu parça genellikle değiştirilir. Eğer hasar onarılamayacak kadar fazla ise, kusurlu parça kesinlikle değiştirilmelidir. Sistem onarım için dururken, zaman, işgücü ve onarım maliyeti gibi kayıplar oluşur. Ayrıca ekonomik kayıplar yanında kaynakla

onarımında patlama gibi tehlikeler söz konusudur. Mesela kusurlu bölge su altında akışkan taşınan bir taşıma ağında ise, kaynak yapmanın zorluğu daha da artar. Su altında kaynak, gemi teknolojisi gibi zor ve uğraştırıcı çevre şartlarında kaynak yapabilen teknik eleman gerektirir. Bunun gibi kaynak yapmadaki zorluklar ve ekonomik sebepler, yeni ve alternatif bir birleştirme ve onarım metodunu zorunlu kılmıştır (Lian, 1998).

Yapıştırıcıların geliştirilmesi ile beraber sadece hava ve karada kullanılan sistemlerde değil aynı zamanda deniz üstünde ve altında kullanılan sistemlere de yeni bir bakış açısı getirilmiştir. İngiltere’de, Denizcilik Araştırma Kurumu tarafından rapor edilen bazı araştırmalara göre Kuzey Denizinde kıyıda çok uzaklarda, denizin ortasında yapıştırıcı kullanılarak çelik yapılar onarılmıştır (Bowditch ve ark., 1987). Bu tip onarımlarda yapıştırıcı kullanılmadan önce, bulk numunesi(mekanik özellikleri öğrenmek için çekme numunesi şeklinde kalıba dökülen yapıştırıcı malzemesi) yöntemiyle çalışmalar yapılarak yapıştırıcının mekanik özelliklerine çevre ve ortamın etkilerinin iyi bir şekilde araştırılması hedeflenmiştir. Yapıştırma bağlantıları, kullanılmadan önce bağlantı yapılacak koşullar iyi bir şekilde analiz edilmelidir. Bağlantının mukavemeti, maruz kalacağı yüke, uygun yapıştırıcı seçilmesine, yapıştırıcıya ait özelliklere, yapışma yüzeylerinin ön işlemlerine ve yapışma işleminin sağlıklı yapılıp yapılmadığına bağlıdır. Aksi takdirde yapıştırma bağlantılarının su altında veya su üstünde nasıl davranacağı bilinemez.

Yukarıda açıklanan durumlar göz önüne alınarak bu tez çalışmasında, üretilen yapıştırıcıların çekme numunelerinin (bulk) çekme dayanımı testleri ve tek taraflı bindirmeli bağlantılarının (TTBB) kayma dayanımı testleri yapılarak üretilen bu yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve üretilen yapıştırıcı numunelerin TGA ve DTA testlerinin yapılarak ısıl özelliklerinin belirlenmesi üzerinde çalışılması uygun görülmüştür.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

1 ila 100 nanometre boyutundaki parçacıklara nanoparçacık adı verilmektedir(Hewakuruppu ve ark., 2013). Bu parçacıkların üretimi ve uygulama alanlarını inceleyen farklı disiplinlerin oluşturduğu bilim dalına da nanoteknoloji denilmektedir. Nanoparçacıklar, ham malzemeler ile atomik ya da moleküler boyuttaki yapılar arasında bir köprü oluşturmaktadır. Ham malzemelerde, malzeme boyutuna bakılmaksızın fiziksel özellikleri değişmezken nano boyuta inildiğinde boyuta bağlı olarak fiziksel özelliklerde değişiklikler gözlenmektedir. Bu yüzden malzemelerin fiziksel özellikleri, nano boyuta yaklaştıkça ve malzemenin yüzeyindeki atom yüzdesi önemli miktarda arttığı için değişmektedir. Bir mikrometreden daha geniş ham malzemeler için, yüzeydeki atom yüzdesi, malzemedeki atom sayısı ile ilişkisi önemsizdir. Nano boyutta olan malzemeler ise geniş bir yüzey alanına sahip olduğundan dolayı beklenmedik özellikler gösterebilmektedir. Nanoparçacıklar hem kuantum etkisi oluşturabilecek hem de kendi elektronlarını sınırlandırabilecek kadar küçük olduğundan dolayı beklenmedik optik özellikler göstermektedirler.

KNT'lerin ilavesi ile polimerin dayanımının artırılmasında bir diğer önemli faktör, matris ile KNT'ler arasındaki yük aktarımının etkinliğidir. Matris ve KNT'ler arasındaki ara yüzey bağlanması, yük aktarımının etkin bir şekilde çalışması için çok önemlidir. Birçok araştırmacı KNT'lerin ilavesi ile matrisin dayanımının beklenin altında kalmasını bu etkene bağlamıştır(Nan ve ark., 2003; Weisenberger ve ark., 2003).

Yu ve ark. (2007), çok cidarlı karbon nanotüpler (ÇCKNT) takviye edilmiş epoksi yapıştırıcı ile bağlanmış alüminyum bağlantıların nemli ortamlarda mekanik davranışını ve dayanıklılıklarını incelenmiştir. Bununla beraber MWCNT (Multi Walled Carbon Nano Tube) takviye edilmiş epoksi yapıştırıcılar ile karbon grafit elyaflı epoksi kompozitleri yapıştırmış ve mekanik dayanımını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada homojen bir yapıştırıcı hazırlanırken çok duvarlı karbon nanotüplerin ağırlıkça en fazla %1,4 değerinde olabileceğini tespit etmişlerdir.

Zhai ve ark. (2008), çelik yapıştırmak için epoksi yapıştırıcının içerisine nano Al_2O_3 ilave ederek epoksi yapıştırıcının mekanik özelliklerini geliştirmeyi hedeflemişlerdir. Çalışmalarında nano Al_2O_3 ile güçlendirilmiş epoksi yapıştırıcı ile saf epoksi yapıştırıcıyı karşılaştırmışlardır. Yüzeyler arası pürüzlülük ve yapıştırma oranının yapıştırma dayanımı üzerine etkilerini çekme deneyleri yapılarak ölçmüşlerdir. Saf epoksi ve nano Al_2O_3 ile güçlendirilmiş epoksi yapıştırıcı sonuçları

karşılaştırıldığında yapıştırma dayanımının saf epoksiye göre önemli ölçüde arttığını gözlemlemiştir. Yapılan çalışmada en iyi yapıştırma dayanımına sahip yapıştırıcının ağırlıkça %2 nano Al_2O_3 katkılı epoksi yapıştırıcı olduğu bulunmuştur. Ağırlıkça %2 nano Al_2O_3 katkılı epoksi yapıştırıcının çekme dayanımının saf epoksi ile karşılaştırıldığında dört kat daha fazla olduğu yapılan deneyler ile kanıtlanmıştır.

Grant ve ark. (2009), 0.1, 0.25 ve 0.4 mm kalınlıklarda, epoksi yapıştırıcılar ile birleştirilmiş alüminyum parçalarda elde ettikleri sonuçları paylaşmışlardır. Yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla elde edilen tokluk artışını, lineer elastik kırılma mekaniği analizi ve deney sonuçları ile uyumlu bulmuşlardır (Kawashita ve ark., 2008). Epoksi yapıştırıcılar ile birleştirilmiş alüminyum parçalarda 0.1, 0.25 ve 0.4 mm yapıştırıcı kalınlıklarında elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlar, çalışmalarında yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla elde edilen tokluk artışını, lineer elastik kırılma mekaniği analizi ve deney sonuçları ile uyumlu bulmuşlardır. Benzer bir çalışmada da yapıştırıcı kalınlığının 0.1 mm'den 0.3 mm'ye çıktığında kayma dayanımının lineer olarak azaldığını ve sebep olarak ise kalın yapıştırıcı tabakasında oluşan eğilme gerilmesinin olduğunu ifade etmişlerdir.

KNT'ler mükemmel mekanik özelliklere sahip olsalar da, bu özelliklerinden takviye elemanı olarak etkin bir şekilde yararlanabilmek için bazı zorlukların üstesinden gelmek gerekir. KNT'lerin polimer matris içerisinde homojen bir şekilde dağıtılması, nanotüplerin matris tarafından ıslatılarak matris ile ara yüz etkileşiminin artırılması, adhezyon gibi etkenler, karbon nanotüplerin takviye elemanı olarak göstereceği performansı etkileyen en önemli konulardır (Njuguna ve ark., 2007; Spitalsky ve ark., 2010).

Yoon ve ark. (2010), çalışmalarında epoksi reçine içerisinde E-cam elyaflarının oryantasyonu ve hacimsel oranlarıyla ilgili -150 °C kriyojenik sıcaklıkta alüminyum yapıştırıcı bağlantılarının kırılma tokluğu ve çatlak direncini incelemiştir. İki farklı hızda test oranları kullanılarak, çift konsol kiriş yapıştırıcı bağlantılarında çatlak ilerlemesi eğilimi belirlenmiştir. Deneyler sonucunda, E-cam elyafları ile takviye edilmiş epoksi yapıştırıcı çift konsol kiriş bağlantılarında, sadece düşük çatlak ilerleme hızında kararlı çatlak ilerlemesi değil, aynı zamanda -150 °C kriyojenik bir sıcaklıkta güçlendirilmemiş epoksi yapıştırıcıyla, çift konsol kiriş bağlantılarıyla bağlanmış numunelerden daha yüksek kırılma tokluğu ve çatlak direnci gösterdiği ifade edilmiştir.

Naito ve ark. (2012), bir poliimid yapıştırıcının kayma ve kopma gerilmelerinde yapıştırıcı kalınlığının etkisini incelemiştir. Kayma ve kopma gerilmesi testlerini, uç

uca ve bindirmeli bağlantı yaparak gerçekleştirmişlerdir. Yapıştırıcı olarak ticari poliimid ve yapışan olarak ise alüminyum 5052 alaşımı kullanmışlardır. Uç uca ekleme örneğinin çekme direnci, yapışma kalınlığının artmasıyla birlikte azaldığını gözlemişlerdir. Bindirmeli bağlantıda ise tam aksine yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla çekme direncinin arttığını görmüşlerdir. Deneyler ve sonlu eleman analizleri ile sonuçları elde etmişlerdir. Sonlu eleman metoduyla lineer gerilme analizi, normal gerilmenin yapıştırıcı ve yapışan yüzeyler arasına yoğunlaştığını göstermektedir. Yüzeyler hakkında sonlu eleman analizi, yapıştırıcı kalınlığının etkisini iyi bir şekilde açıkladığını göstermişlerdir.

Numunelerin yüzeyler arası farklılıkları ve yapışma özellikleri ile ilgili epoksi yapıştırıcı kullanarak yapıştırma bağlantı noktalarının bozulmasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Kumar ve ark., 2013). Yaptıkları çalışmalarda kullanışlı bir yöntem olan ultrasonik metodu uygulamışlardır. Bağlantı noktalarının ultrasonik metottaki sapmaları, geniş spektrumda yansımaları ile yapıştırmadaki bozunmanın kolaylıkla ölçülebileceğini göstermişlerdir. Ciddi yapıştırma bozunmaları yüzeyler arası hataların artmasına sebep olduğunu gözlemişlerdir. Bu araştırmalarla, minimum yansımaya sıklığındaki değişim ile yapışma kuvveti arasında bir bağlantı olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca deneysel verileri analitik modellemeyle de doğrulamışlardır.

Jojibabu ve ark. (2016), yapmış oldukları çalışmada, tek duvarlı karbon nanotüp katkı, grafen katkı ve çok duvarlı karbon nanotüp katkı epoksi yapıştırıcıların reolojik özellikleri, termal kararlılığı ve kayma dayanımını incelemişlerdir. Çalışmalarında epoksi yapıştırıcısı içerisinde nano katkılar homojen olarak dağıtılmıştır. Çalışmalarında katkı ve katkısız epoksi yapıştırıcının kayma dayanım davranışları gösterilmiştir. Nano parçacık katkı epoksi yapıştırıcılar viskoplastik davranışlar sergilemişlerdir. Viskoplastik davranışları belirlemek için Casson's analiz methodu kullanılmıştır. Nano parçacık katkı epoksi yapıştırıcının TGA analizleri bu yapıştırıcının termal kararlılığının arttığını göstermiştir. Nano parçacık katkı epoksi yapıştırıcının saf epoksi ile karşılaştırıldığında kayma dayanımının, ağırlıkça % 1 çok duvarlı karbon nanotüpte %53, ağırlıkça %0.5 grafende %49 ve ağırlıkça %0.5 tek duvarlı karbon nanotüp kullanımında %46 oranında arttığı bulunmuştur. Ağırlıkça %1'den büyük nano parçacık eklenmiş yapıştırıcılarda homojen karışım elde edilemediği için en fazla ağırlıkça %1 oranı baz alınmıştır.

Gültekin ve ark. (2016), tek tesirli bindirmeli bağlantılarda dört farklı yöntem kullanarak yapışkana nanopartikül ekleyerek elde edilen nanokompozit yapıştırıcının

çekme mukavemetini deneysel olarak belirlemeyi hedeflemişlerdir. Çalışma için, yapıştırılan malzeme olarak Al2024-T3 alüminyum alaşımı, nanoparçacık olarak grafen ve yapışkan olarak DP460 sıvı yapısal epoksi kullanılarak birleştirilmiş tek tesirli yapıştırma bağlantılarını üretmişlerdir. Deneylelerden elde edilen hasar yükünü incelediklerinde, nano takviye yöntemlerinin yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve standart sapmanın üzerinde büyük etkisi olduğu literatürde gösterilmesine rağmen, bu çalışmada yapıştırma bağlantılarının hasar yükünü artıran ve standart sapmayı minimize eden yeni bir metod geliştirmişlerdir. Bu geliştirmelerin yapıştırma bağlantılarının güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini artırdığını belirtmektedirler.

Leena ve ark. (2016), alüminyum alaşımların yüzeylerini hazırlamada üç farklı yöntem kullanarak, tek taraflı bindirmeli yapıştırma bağlantısında uygulamışlardır. Çalışmada amaç, yüzey hazırlama metotlarının yüzey morfolojisi, yüzey pürüzlülüğü ve yüzey enerjisi üzerindeki etkilerini incelemektir. Deneysel çalışma sonucunda, FPL (Forest Products Laboratory) dağlama yönteminin yapışma bağlantısının dayanımını en fazla artıran yöntem olduğunu ve FPL dağlamanın ıslatma davranışında olumlu katkı sağladığını tesbit etmişlerdir. Alüminyum/epoksi bağlantılarında, alüminyum alaşımlarının yüzeylerine uygulanan ön işlem, yapıştırıcı dayanımını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Genellikle, çok sayıda alüminyum ön işlem prosedürleri vardır. Kimyasal işlemler arasında en yaygın olarak uygulanan yöntem kromik-sülfirik asitle dağlamadır.

Subramanian ve ark. (2016), Polidopamin (PDA), oksidatif polimerizasyon yoluyla asitle muamele edilmiş MWCNT veya saf MWCNT yüzeyi üzerinde kendiliğinden kaplanmışlardır. PDA modifiyeli MWCNT hibridlerinin epoksi / alüminyum bağlantılarının lap-shear kesme mukavemeti üzerindeki etkisi ve hata mekanizmaları sistematik olarak incelenmiştir. PDA / asitle modifiye edilmiş MWCNT hibriti sadece ağırlıkça % 0.5 iken, saf epoksi yapışkan ile karşılaştırıldığında % 100'den fazla bir oranda lap shear kesme mukavemetinde önemli bir artışa neden olurken, tek başına PDA ilavesi veya sadece asitle muamele edilmiş MWCNT'nin eklenmesi yalnızca marjinal değişime veya lap shear kayma mukavemetinde çok az bir artışa neden olduğunu gözlemlemişlerdir. PDA kaplanmış saf MWCNT hibriti de bağ mukavemetinde önemli ölçüde bir artışa neden olmakta, ancak daha az bir ölçüde elastikliğinin (uzama miktarının) arttığını bulmuşlardır. Bu bulguların daha ileri analizi, önemli bağ mukavemeti artışının, ara yüze yapışmanın substratın ve yapışkanın yapışma mukavemetinin aynı anda geliştirilmesine bağlanabilir olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu tür hibrit nano yapışkanlı sistemlerde yapıştırıcı özelliklerinin mekanik olarak anlaşılması, çeşitli uygulamalar için yeni nesil yapıştırıcılara yol açabileceğinden önemli olduğu düşünülmüştür.

Katkılı alüminyum bağlantıların mekanik performansı, tek taraflı bindirmeli (TTB) ve çift konsol giriş (DCB) kullanılarak incelenmiştir (Ekrem ve Avcı, 2018). Nanofiber takviyelerin nano ve mikro ölçekli sertleştirici mekanizmalarını ortaya çıkarmak için, kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak analiz edilmiştir. Mod I kırılma tokluğu ve yapıştırıcı bağlanmış bağlantıların kayma dayanımının PVA nanofiberlerin epoksi yapıştırıcıya eklenmesiyle arttığı bulunmuştur.

Vertuccio ve ark. (2017), çok cidarlı karbon nanotüp (ÇCKNT) ve fonksiyonelleştirilmiş sıvı kauçuk bazlı yapıştırıcı tasarlanmış ve elektriksel iletkenliğini karakterize etmişlerdir. Elastomerik alanların, yapışkan formülasyonun esnekliğini ve mekanik performansını arttırmak için çok önemli bir rol oynadığını görmüşlerdir. Lap-shear testlerinden, matriste 25 phr elastomerik faz içeren numunelerde kayma dayanımlarının %69'lara varan artışlar gösterdiğini bulmuşlardır. Ayrıca sertleştirilmiş yapıştırıcıya ÇCKNT dahil edilmesi ile yapıştırıcının elektriksel iletkenliğinin ÇCKNT eklenmemiş olan yapıştırıcıya göre 11 kat daha iletkenlik sağladığı yapılan testlerde bulunmuştur. Bu sonuç ile araştırmayı yapanlar 11 kat gibi avantaj sağlayan yapıştırıcının ÇCKNT eklenmemiş yapıştırıcı ile karşılaştırıldığında, elektriksel iletkenliğin gerekli olduğu uygulamalarda kullanılmasının çok avantajlı olacağını ortaya koymuşlardır.

Trinidad ve ark. (2017), elektriksel olarak iletken yapıştırıcıların (ECAs) mekanik bağlanma dayanımı ve kalıntı çözücünün bağlanma mukavemeti üzerindeki etkisi, bakır kaplanmış bir FR-4 yüzeyi ve Lap-shear testi kullanılarak iletken yapıştırıcılar arasında incelenmiştir. Epoksi matrislerde çeşitli dolgu maddesi konsantrasyonları olan gümüş (Ag) ve sodyum dodesil sülfat (SDS) -düzenlenmiş grafen (Gr (s)) içeren solventsiz ve solvent destekli formülasyonlar hazırlanmış ve karşılaştırılmıştır. Çözücü madde içermeyen formülasyonlar içinde ağırlıkça % 0.75 Gr (s) 'nin katılması, Lap-shear mukavemetini (LSM) arttırırken, çözücü-destekli formülasyonlarda etanol solventi ve SDS kombinasyonu LSM'ni önemli ölçüde azalttığı bulunmuştur. Ek olarak, Ag içeriğinin arttırılmasının genellikle hem çözücüsüz hem de çözücüyle desteklenmiş formülasyonlar için LSM'ni düşürdüğü bulunmuştur. Her iki formülasyonunu ve yüzey profilometrisinin optik mikroskopi (SEM) kullanarak, yapısını ve arayüzünü inceleyerek, çözücüyle desteklenmiş formülasyonların, yapışma

yüzeyinde daha fazla boşluklar ve çözücü içermeyen formülasyonlara kıyasla materyal boyunca daha fazla kabarcık oluşumu sergilediğini bulmuşlardır. Bu nedenle, yapılan çözücü madde ile düzenlenmiş Grafenlerle doldurulmuş formülasyonlardaki değişik deneylerde LSM'nin önemli oranda düşüşleri, kütleme işlemi sırasında mikron aralığında kabarcık oluşumuna bağlanmıştır.

Severijns ve ark. (2017), yapıştırıcı destekli indüksiyon ile sertleştirilen yapıştırılmış bağlantıların kürlenme davranışı ve mekanik davranışları araştırılmıştır. Endüksiyon Isıtma (IH), demir partiküllerinin iki bileşenli bir epoksi macun yapıştırıcısı ile karıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Partikül içeriği, kaplin mesafesi ve bobin akımı gibi farklı proses parametrelerinin IH kütleme prosesine etkisi, deneysel testler ve COMSOL çoklu analizinde indüksiyon ısıtma işleminin simülasyonu ile değerlendirilmiştir. Süreç simülasyonu, histerezis kayıplarının Demir partikülleri kullanılarak IH ısı üretimi için önemli bir katkısı olduğunu göstermiştir. Mekanik performans, cam elyaf katkılı plastik (GFRP) ile birlikte Demir partiküllerinin farklı hacim değerlerinde Lap-Shear kayma mukavemet (SLT) testi ile değerlendirilmiştir Yapıştırıcıya demir parçacıklarının eklenmesi, hacimce % 0.5'lik bir küçük parçacık içeriğinde bile % 15'lik kesme mukavemetinde bir azalmaya neden olduğu görülmüştür. Partikül içeriğindeki hacimce bir artış,% 7.5'e varan oranlarda, kesme kuvvetinde herhangi bir ilave azalmaya neden olmadığı bulunmuştur.

Scarselli ve ark. (2017), havacılık uygulamalarında kullanılan yapıştırıcıların mekanik özelliklerini geliştirmek için çalışmışlardır. Alüminyum alaşımları ile birlikte havacılık sektöründe kompozit malzemeler kullanılmaya başlandığından beri, hava araçlarının birincil yapıları için ana yapıları oluşturan malzemelerde yapıştırıcılara olan ilgi artmıştır. Kompozit matrisler olarak bir kaç polimerin mekanik özelliklerinin artırılması için nano grafit kullanılmasının uygun olduğu belirlenmiştir Bu çalışmada tek taraflı bindirmeli tek yönlü kompozit laminatlar üretilmiştir. İki farklı yaklaşım tarzı ile üretilen numuneler saf epoksi yapıştırıcılı ve nano grafit katkılı epoksi yapıştırıcılı olarak üretilmiş, test edilmiş ve bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Epoksi reçine içinde homojen dağılmış nano grafitin etkileri deneysel olarak tek taraflı bindirmeli bağlantılarında çalışmışlardır. Yapıştırıcının mekanik özelliklerinin sürdürülebilir olarak geliştiği deneysel olarak çıkan sonuçlar ile ispatlanmıştır. Deney sonuçlarına göre nano grafit eklenmiş epoksinin kayma dayanımının % 18, kopma uzaması %29 ve kırılma kopma gerilmesinin %53 arttığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlarla, yapıştırıcı ile

bağlanmış yapıların etkilerinin büyük bir potansiyel ile geliştirebileceği nano grafit katkılı yapıştırıcı deneyleri ile gösterilmiş ve önerilmiştir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tezin bu bölümünde, çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri, alüminyum levhaların yüzeylerinin hazırlanması, nanoparçacık katkılı epoksi esaslı yapıştırıcı üretilmesi, tek taraflı bindirmeli bağlantılarının hazırlanması ve çekme deneyi yapılacak numunelerin üretilmesi incelenmiştir.

Bu çalışmada, Alüminyum 2024-T3 alaşımından oluşan levhalar kullanılarak yapılan tek taraflı bindirme bağlantılarının ve çekme numunelerinin mekanik ve termal özellikleri incelenmiştir. İlk önce saf epoksi reçinenin mekanik özelliklerini belirlemek için testler yapılmıştır. Yapıştırma dayanımını arttırmak için yapıştırıcı reçine içerisine değişik oranlarda nano parçacıklar ilave edilmiştir. Öncelikli olarak Çizelge 1.'de görülen değişik oranlardaki nanoparçacık eklenmiş epoksi esaslı yapıştırıcılar üretilmiş ve Al 2024-T3 levhalarının yapıştırma işlemi yapılmıştır. Sonra yapıştırılma işlemi yapılan Al 2024-T3 numunelerinin çekme deneyi yapılmış ve ayrıca çekme deneyleri sonucunda kopan numunelerden parçalar alınarak SEM, TGA ve DTA testleri yapılmıştır. Nano parçacık ile güçlendirilmiş epoksi reçinelerin mekanik özellikleri saf epoksinin mekanik özellikleriyle karşılaştırılmıştır. Bu analizler sonucunda epoksi esaslı Grafen ve KNT katkılı yapıştırıcıların mekanik özelliklerine göre en yüksek dayanım değerlerinin elde edildiği katkı oranları belirlenmiştir. Bu oranlar, Grafen ve KNT oranlarının artırılarak ve azaltılarak değişik varyasyonlarında denenerak yapıştırıcının dayanımına olan etkisi gözlemlenmeye çalışılmıştır. Ardından, bulunan en iyi oranlar birlikte epoksi yapıştırıcıya eklenerek yeni epoksi esaslı yapıştırıcı numuneleri üretilmiş ve bu numunelerde aynı yöntemlerle incelenmiştir. Buradan bulunan en iyi değerli epoksi, Grafen ve karbon nanotüp yapıştırıcı numunesine değişik oranlarda bakır nanoparçacıklar eklenmiştir. Üretilen hibrid numunelerin çekme deneyleri yapılarak kopan parçalardan alınan örnek parçaların aynı şekilde SEM, TGA ve DTA testleri yapılmış ve saf epoksi yapıştırıcı ile kıyaslanmıştır. Buradan bulunan en iyi karışım oranlarındaki hibrid yapıştırıcıya değişik oranlarda gümüş nanoparçacık eklenmiştir. Üretilen numunelerde aynı şekilde incelenmiştir ve tezin ilerleyen bölümlerinde yapılan bütün analizler ve bulunan sonuçlar detaylı şekilde sunulmuştur.

Bu tez çalışmasında alüminyum alaşımlı malzemeden üretilen numunelerin nanoparçacık katkılı epoksi esaslı reçine ile tek taraflı bindirmeli yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı, üretilen çekme numunelerinin çekme dayanımı ve termal özellikleri incelenmiştir.

Çizelge 1’de yapıştırıcı numunelerine verilen isimler sunulmuştur. Numunelere isimler verilirken, üretilen yapıştırıcı içerisindeki nanoparçacıklar ve bunların yüzde ağırlık oranı esas alınmıştır. Burada grafen için Gr, çok cidarlı karbon nanotüp için KNT, bakır için Cu ve alüminyum için Al kullanılmıştır. Örneğin 050Gr numunesi ağırlıkça % 0.50 oranında grafen içeren epoksi bazlı yapıştırıcıyı temsil etmektedir. Tezin bundan sonraki kısımlarında bu çizelgede belirtilen numune isimleri kullanılacaktır.

Çizelge 1. Nanoparçacık ile güçlendirilmiş yapıştırıcı numuneleri

Numune İsmi	Ağırlıkça Karışım Oranı (%)				
	Gr	KNT	Ag	Cu	Epoksi + Sertleştirici
E	-	-	-	-	100
025Gr	0.25	-	-	-	Diğer
050Gr	0.50	-	-	-	Diğer
075Gr	0.75	-	-	-	Diğer
1Gr	1	-	-	-	Diğer
025KNT	-	0.25	-	-	Diğer
050KNT	-	0.50	-	-	Diğer
075KNT	-	0.75	-	-	Diğer
1KNT	-	1	-	-	Diğer
015Gr015KNT	0.15	0.15	-	-	Diğer
015Gr025KNT	0.15	0.25	-	-	Diğer
015Gr050KNT	0.15	0.50	-	-	Diğer
025Gr015KNT	0.25	0.15	-	-	Diğer
025Gr025KNT	0.25	0.25	-	-	Diğer
025Gr050KNT	0.25	0.50	-	-	Diğer
050Gr015KNT	0.50	0.15	-	-	Diğer
050Gr025KNT	0.50	0.25	-	-	Diğer
050Gr050KNT	0.50	0.50	-	-	Diğer
015Gr015KNT1Ag	0.15	0.15	1	-	Diğer
015Gr015KNT3Ag	0.15	0.15	3	-	Diğer
015Gr015KNT5Ag	0.15	0.15	5	-	Diğer
015Gr015KNT10Ag	0.15	0.15	10	-	Diğer
015Gr-015KNT1Ag5Cu	0.15	0.15	1	5	Diğer
015Gr015KNT1Ag10Cu	0.15	0.15	1	10	Diğer
015Gr015KNT1Ag20Cu	0.15	0.15	1	20	Diğer

3.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

3.1.1. Yapıştırıcı

Epoksi reçine, bir İsviçreli kimyager Dr. Pierre Castan tarafından icat edilmiştir ve 1939 yılında patent almıştır. İsviçreli şirket Ciba Geigy 1940'lardan itibaren epoksi üretimini ticari olarak yürütmektedir. Epoksi reçinelerinin, glisidil epoksi ve non-glisidil epoksi reçineleri olmak üzere iki ana kategorisi vardır. Glisidil epoksiler ayrıca glisidil eter, glisidil ester ve glisidil-amin olarak sınıflandırılır (Dunn, 2004).

Epoksi reçineler polimer matrisli kompozitlerde en yaygın kullanılan termoset plastiklerden biridir. Kısa sürede kürleşebilme ve kürleştiğinde ise başka ürünlerle reaksiyona girmeme gibi özelliklere sahiptir. Bu reçineler aynı zamanda kimyasal ve çevresel koşullara karşı iyi bir dirence, yalıtkanlık özelliğine ve iyi derecede yapışma özelliğine sahiptir. Genellikle bisfenol ve epiklorohidrin'in reaksiyonu ile üretilmektedir. Epiklorohidrin'in moleküler ağırlığının arttırılıp azaltılmasıyla farklı reçineler elde edilmektedir. Epoksi reçinelerin kürleştirilmesinde genellikle sertleştirici, aktivatör ve katalizör olarak bahsedilen ajanlar kullanılır. Bunlar genelde aminlerden oluşur. Amin nitrojenindeki her bir hidrojen reaktiftir ve kovalent bağlı bir epoksi halkasını açabilecek özelliktedir (Singla ve Chawla, 2010).

Bu çalışmada MGS™ LR285 laminasyon reçinesi ile MGS™ LH285 kürleştiricisi kullanılmıştır. Kullanılan reçine iki fazlı olup %80-90'ı diglisidil eter bisfenol A ve %10-20'si alifatik diglisidil eter karışımından oluşmaktadır. Kürleştiricinin ise %70-90'i sikloalifatik amin ve %10-30'u Polioksil alkil amin karışımından oluşmaktadır. Üretici firma (HEXION) tarafından oluşturulan kullanım talimatına göre ağırlıkça 100/40 oranında epoksi/kürleştirici karışımı oda koşullarında 2 ila 3 saatlik süre içerisinde kürleşmektedir. Epoksinin çizelge 2'de belirtilen çeşitli özellikleri Hexion firmasından temin edilmiştir.

Çizelge 2: MGS™ LR285 Epoksinin Mekanik Özellikleri

Yoğunluk (g/cm ³)	1.18-1.20
Eğilme mukavemeti (MPa)	110-120
Çekme mukavemeti (MPa)	70-80
Basma mukavemeti (MPa)	120-140
Darbe mukavemeti (J)	45-55
Elastiklik modülü(GPa)	3.0-3.3
Kopma uzaması [%]	5.0-6.5

Bu çalışmadaki tek taraflı bindirmeli bağlantıların yapıştırılması işleminde kullanılan epoksi reçinenin bazı özellikleri yukarıda verildiği gibidir. Yapıştırma işlemi için yapıştırıcı hazırlama süreci ana hatlarıyla şu şekildedir: Öncelikle yapıştırıcı olarak kullanılacak olan epoksi reçine miktarı belirlenerek tartılmıştır. Sonrasında epoksi yapıştırıcıya eklenecek nanoparçacıklar tartılmıştır ve epoksi reçineye eklenmiştir. Üretilen reçine ultrasonik karıştırıcı yardımıyla karıştırılmıştır. Son olarak tartılan reçinenin içerisine 100/40'ı oranında epoksi/kürleştirici tartılarak karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi 5 dakika boyunca mekanik (elle) olarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlemden sonra karışım içerisinde oluşan hava kabarcıklarını gidermek amacıyla oda

sıcaklığında vakum fırınında bekletilmiştir. Bu işlemden sonra yapıştırma işlemine geçilmiştir.

3.1.2. Yapıştırılan malzeme (Al 2024-T3)

Alüminyum 2024 T3, birincil alaşım elementi bakır olan bir alaşım türüdür. Ağırlık taşıma ve yorulma direnci yüksek olan uygulamalarda kullanılmaktadır. Ortalama bir işlenebilirliğe ve yalnızca sürtünme kaynağı ile kaynak yapılabilme özelliğine sahiptir. Düşük korozyon dayanımından dolayı, yorulma direncini azaltmasına rağmen Alüminyum ya da Al-Zn ile kaplanmaktadır (Parker ve ark., 2002). Genelde haddelenerek alüminyum kaplı plaka ve tabakalar haline getirilir (Avallone ve ark., 2006).

Bu çalışmada 1.62 mm kalınlığında alüminyum 2024-T3 levha kullanılmıştır. Bu malzeme yüksek dayanıma, işlenebilme özelliğine ve yüksek yüzey kalitesine sahiptir. Ayrıca bu alaşım yapısal uygulamalarda; uçak sanayii, otomotiv, askeri ve makine sektörlerinde, yaygın olarak kullanılır. Bu alaşım ve alaşımın özellikleriyle ilgili bilgiler Seykoç Alüminyum firmasından temin edilmiştir.

Çizelge 3: Al2024-T3 Malzemesinin kimyasal kompozisyonu

Bileşenler	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
% Ağırlık	90.9-93.2	0.1	3.8-4.9	0.50	1.2-1.8	0.3-0.9	0.5	0.15	0.25

Çizelge 4: Al2024-T3 Malzemesinin mekanik özellikleri

	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Elastiklik Modülü (GPa)	Posison Oranı	Kayma Modülü (GPa)
Mekanik Özellikler	348	450	18	73.1	0.33	28

3.1.3. Grafen

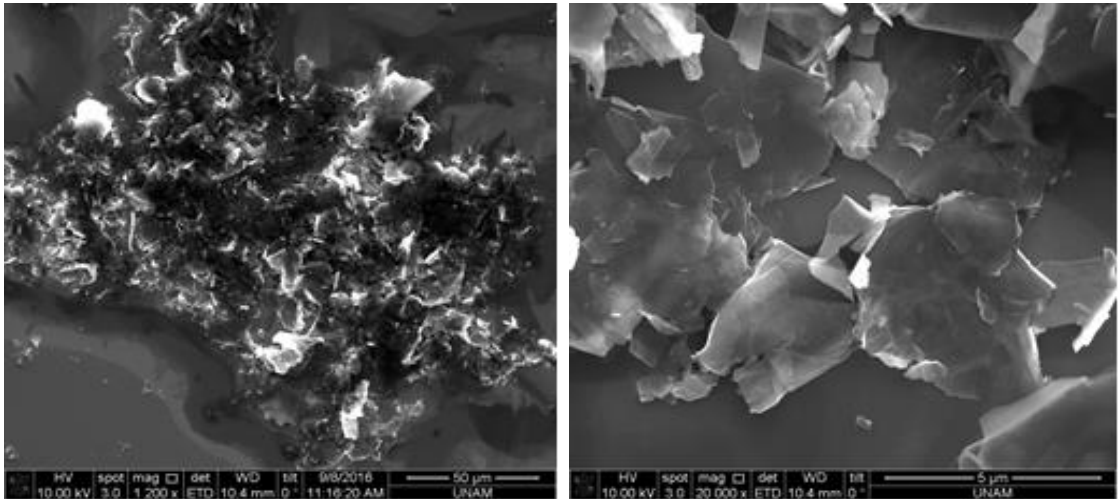
21. yüzyılın mucize malzemesi olarak bilinen grafen, tek bir atom kalınlığında iki boyutlu ve her biri karbon atomu olan altıgen yapıların bal peteği şeklinde birbirine bağlanmasıyla oluşmaktadır. Bu altıgen yapılar doğada Van Der Waals çekim kuvvetlerinden dolayı üst üste katmanlar şeklinde bulunur ve bu yapıya da grafit denir.

Elektronik cihazlarda kullanılmak üzere geniş çapta grafen üretimi önemli bir sorundur. Bu tür uygulamalarda makro ölçüde grafen üretimi grafit kristallerinden ve grafen oksitten elde edilmektedir fakat bu yöntemlerle üretilen grafenin elektrik

direncinin çok yüksek olduğu yapılan çalışmalarla görülmüştür. Buna bir alternatif olarak kimyasal buhar biriktirme yöntemi kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemle üretilen grafen tabakası ise düşük elektrik direncine sahiptir. Aynı zamanda elastik ve geçirgendir. Grafenin bu özelliklerinden faydalanarak elektronik cihazlarda kullanılmaya başlanmıştır (Kim ve ark., 2009).

Üst düzeyde elektrik iletim özelliğine sahip olan grafen, sensör, pil teknolojisi, hidrojen depolama, transistor, optik gibi pek çok elektrik elektronik uygulamalarında kullanılmasının yanında üstün mekanik özelliklere de sahiptir. Tez çalışmasında kullanılacak olan grafen Nanografi firmasından temin edilmiştir.

2010 yılı nobel fizik ödülünün grafen hakkındaki ‘çılgır açan deneyleri’ dolayısıyla Hollandalı Andre Geim ve Rus kökenli İngiliz vatandaşı Konstantin Novoselov’a verilmesi dikkatleri ‘mucize materyal’ olarak bilinen bu malzeme üzerine çekmiştir. Grafenin dikkat çeken önemli özelliklerinden birisi de yüksek dayanıma sahip olmasıdır. Grafen içindeki elektronlar oda sıcaklığında kütsüz rölativistik parçacıklar gibi davranır, bu sayede grafen kuantum boşluğu etkisi gibi kendine has özellikler sergiler. 0.142 nm uzunluğunda olan karbon-karbon bağlarının dayanımından dolayı grafen, 130 GPa kopma direnciyle şimdiye kadar keşfedilmiş en dayanıklı malzeme olarak adlandırılmıştır. Bunun yanı sıra her bir metre karesi ortalama 0.77 mg ağırlık özelliği ile en hafif malzemedir. 1 gram ağırlıktaki tek tabakalı grafen (bir atom kalınlığında olan grafen levhalar) yaklaşık olarak bir futbol sahasını kaplayacak şekilde alana sahiptir. Bu çalışmada kullanılan grafen malzemesinin temel özellikleri saflığı % 99.5, çapı 24 µm, özgül yüzey alanı 150 m²/g ve Elastisite modülü ise 0.5 TPa olarak tedarikçi firma olan Nanografi firması tarafından verilmiştir.



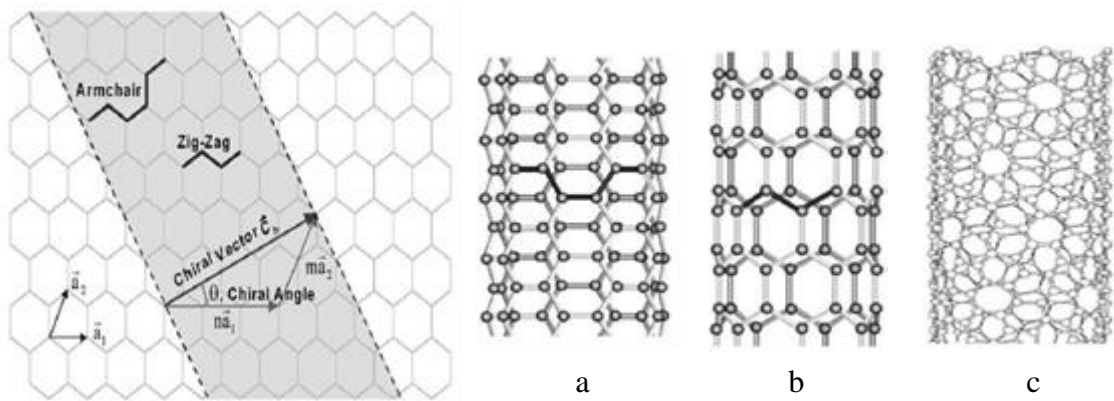
Şekil 3.1.3: Kullanılan grafenin 1200 ve 20000 büyütmeli SEM görüntüleri

3.1.4. Karbon nanotüp

Karbon nanotüp'lerin (KNT) yapısı, tüp haline gelecek şekilde yuvarlatılmış bir grafit levha olarak düşünülebilir (Şekil 3.1.5.). Grafit C-C sp^2 bağlarına sahiptir. Bu bağlar elmasın sahip olduğu C-C sp^3 bağlarından daha güçlüdür. Çünkü C-C sp^2 bağlarının boyları daha kısadır. Ancak, grafit tabakaları arasındaki nispeten çok zayıf olan van der Waals bağları, grafit tabakalarının birbirleri üzerlerinden kolaylıkla kaymasına izin verir. Nanotüpler tek cidarlı veya çok cidarlı yapılarda bulunabilmektedir ve çok cidarlı karbon nanotüpler (ÇCKNT'ler) basitçe eş merkezli tek cidarlı karbon nanotüplerden (TCKNT'ler) oluşmaktadır (Thostenson ve ark., 2001). TCKNT'ler, ÇCKNT'lere göre daha dayanıklıdır. Çünkü sadece bir grafit tabakasının yuvarlatılması ile oluşur (Fan, 2007). ÇCKNT'ler ise iç içe geçmiş eş merkezli tüpler olup bu tüplerin birbirleri içinden kayabilme ihtimalleri dayanımlarını düşürür (Lordi ve ark., 1999). KNT'lerin bir başka yapısı da fulleren, beşgen ve altıgenden oluşan, dışbükey kapalı kafes şeklindedir.

Çizelge 5: KNT'lerin Mekanik Özellikleri

	Çekme Dayanımı (GPa)	Elastiklik Modülü (TPa)	Yoğunluk g/cm^3	% Uzama	Elektrik İletkenliği (S/m)
Mekanik Özellikler	10 - 60	1	1.3 - 2	10	$10^6 - 10^7$



Şekil 3.1.5. Bir grafit levhasından değişik yapılara sahip nanotüp oluşumunun şematik gösterimi a) Koltuk Tipi b) Zig-Zag Tipi c) Helisel Tip (chiral) (Thostenson ve ark., 2001; Ma ve ark., 2010)

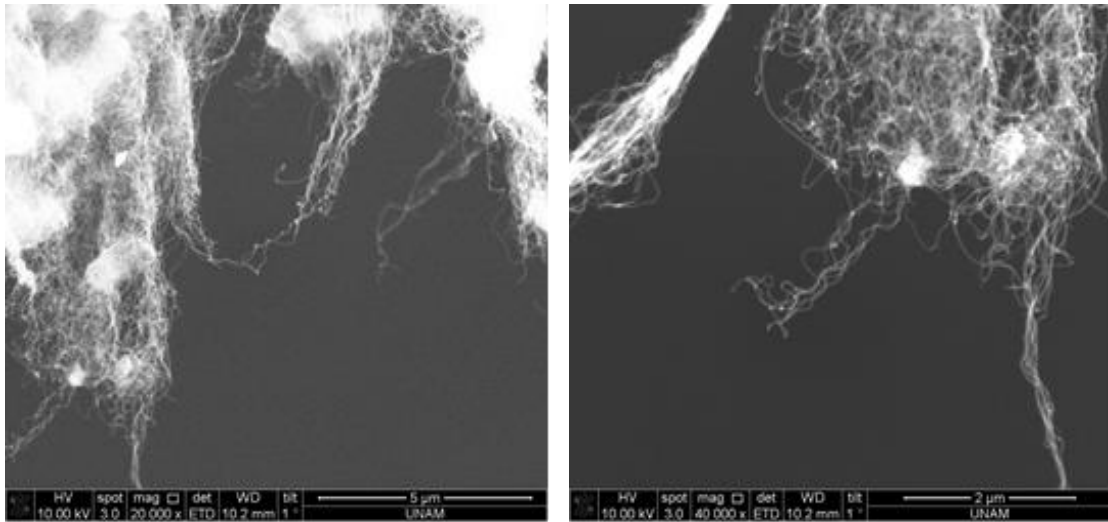
KNT'ler hafif, dayanıklı, yüksek termal ve elektriksel iletkenliğe sahip nanomalzemelerdir ve Çizelge 5'de bu özellikleri özetlenmiştir. KNT'lerin özellikleri çaplarına, boylarına, yönlendirmelerine, yüzeysel özelliklerine bağlıdır. Çizelge 3.1.5'de

gösterilen mekanik özellikler tedarikçi firma olan Nanografi şirketinden temin edilmiştir.

Çizelge 6:Bazı nanomalzemelerin mekanik ve elektriksel özellikleri (Ma ve ark., 2010)

Özellikler	Grafit	Elmas	Fulleren	TCKNT	ÇCKNT
Özgül ağırlık (g/cm ³)	1.9–2.3	3.5	1.7	0.8	1.8
Elektrik iletkenliği (S/cm)	4000 ^p ,3.3 ^c	10 ⁻² -10 ⁻¹⁵	10 ⁻⁵	10 ² -10 ⁶	10 ³ -10 ⁵
Elektron hareketliliği (cm ² / (V s))	2.0×10 ⁴	1800	0.5-6	~10 ⁵	10 ⁴ -10 ⁵
Isı iletkenliği (W / (m K))	298 ^p , 2.2 ^c	900-2320	0.4	6000	2000
Isıl genişleme katsayısı (K ⁻¹)	-1×10 ^{-6p} 2.9×10 ^{-5c}	(1~3) ×10 ⁻⁶	6.2×10 ⁻⁵	önemsiz	önemsiz
Havada termal kararlılığı (°C)	450–650	<600	~600	>600	>600

p: düzlem halde , c: tek ekseninde



Şekil 3.1.4: Kullanılan KNT'ün 20000 ve 40000 büyütmeli SEM görüntüleri

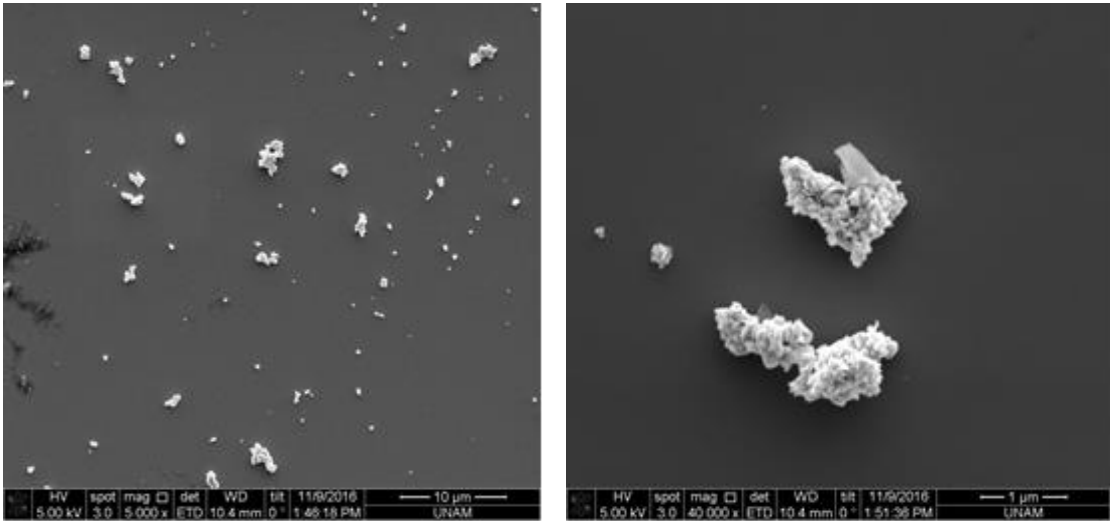
3.1.5.Gümüş nanoparçacık

Gümüş, parlak, beyaz ve değerli bir metalik element olmasıyla birlikte periyodik tabloda simgesi Ag olan elementtir. Kaynama noktası 1950 °C, ergime noktası 961.9°C,

atom ağırlığı 107.87 gram, atom numarası 47 ve özgül ağırlığı da 10.5 g/cm³'tür. Birleşiklerinin birçoğunda +1 değerlidir. Gümüş; dövülebilen, esnek ve ışığı çok iyi yansıtan bir metaldir. Bir gram gümüşten 2 km uzunluğunda ince tel çekilebilir. Elektrik sistemde küp ve altıgen olarak kristallenir. Atmosferde oksitlenmeye karşı büyük bir dayanım gösterir.

Bakırdan daha zor, altından ise daha kolay oksitlenir. Asitlere ve birkaç organik maddeye karşı dayanıklıdır. Fakat nitrik asit ve derişik sıcak sülfürik asitte kolayca eritilir. Ayrıca kükürt ve birçok kükürt bileşikleri ile hemen birleşir. Gümüş eşya üzerindeki kararmanın sebebi, havadaki hidrojen sülfür ve yumurta gibi bazı yiyeceklerde bulunan kükürttür. Periyodik tabloda ağır metaller grubu içinde yer alan gümüşün, çoğu özellikleri bakırın özelliklerine benzemekle beraber bakır, çoğu bileşiklerinde iki değerlikli olması ile gümüşten farklıdır.

Gümüş nanoparçacık ise çeşitli yöntemlerle nano metre boyutunda üretilmiş parçacıklardır ve özellikleri kitle halindeki gümüşten oldukça farklıdır. Üretim sırasında birbirinden ayrılan atomik düzeydeki gümüşlerin bir araya gelip istiflenmeleri önlenmeye çalışılır. Bu çalışmada kullanılan gümüş nanoparçacıkların farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri Şekil 3.1.5'te sunulmuştur.



Şekil 3.1.5: Gümüş nanoparçacıkların 5000 ve 40000 büyütmele SEM görüntüleri

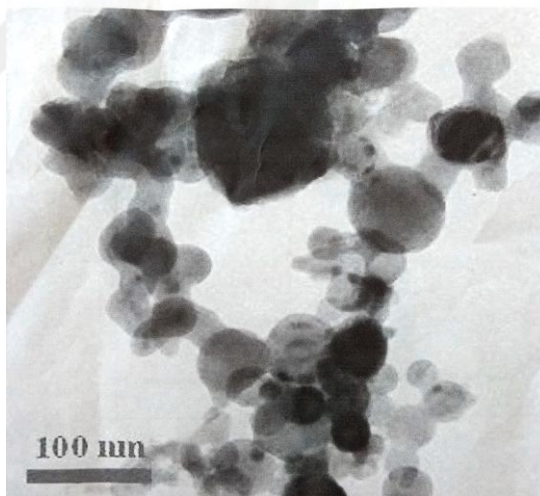
3.1.6. Bakır nanoparçacık

Bakır bilinen en eski metallere biridir. Periyodik cetvelde 1b grubunda bulunan bakırın atom numarası 29, atomik kütlesi 63.546 g/mol, ergime sıcaklığı 1083 °C, kaynama sıcaklığı 2595 °C ve yoğunluğu ise 8.96 g/cm³ 'tür. Kırmızımsı renge

sahip olan bakır metalinin elektrik iletkenliği çok yüksektir ve bütün metaller arasında gümüşten sonra ikinci sırada yer almaktadır. Geçiş metali olan bakır yüzey merkez kübik kristal yapısına sahiptir (Hostynek ve Maibach, 2006).

Metal nanoparçacıkları üzerine olan ilgi son zamanlarda oldukça fazladır. Bu ilginin sebebi bu nanoparçacıkların katalizör, manyetik kayıt ediciler ve elektronik gibi farklı alanlarda potansiyel kullanım alanlarına sahip olmalarıdır (Khanna ve ark., 2007). Birçok metal nanoparçacık arasında, bakır nanoparçacıklar sahip oldukları üstün katalitik, optik ve elektronik özelliklerden dolayı oldukça yoğun ilgi görmektedir (Park ve ark., 2007). Bakırın modern teknolojilerde kullanılan en önemli metallerden birisi olması da onun üzerine çekilen dikkatleri daha da arttırmaktadır. Ayrıca diğer metallerle de karşılaştırıldığında ucuz olması, kolay bulunabilir olması ve kullanım alanlarının geniş olması gibi avantajlarından ötürü nanoboyutlu bakır parçacıkları cazip hale gelmektedir (Dadgostar, 2008).

Bu çalışmada kullanılan bakır nanoparçacıklara ait SEM görüntüsü Şekil 3.1.6.'da sunulmuştur.



Şekil 3.1.6. Bakır nanoparçacığa ait SEM görüntüsü

3.2. Yapıştırma, Yapıştırıcı Bağlantıları ve Yapıştırıcıların Kuramsal Temelleri

3.2.1. Yapıştırma

Yapışma, iki yüzey arasında oluşan bağlar vasıtasıyla malzemelerin birbirini çekmesi ve birbirlerini tutması olarak tarif edilebilir. Burada yapıştırıcı ile malzemelerin

temas eden yüzeyleri arasında bir bağ kuvveti oluşmaktadır. Bu bağları kimyasal veya fiziksel bağlar şeklinde açıklamak mümkündür (Özenç, 2007).

Yapıştırma bağlantıları, homojen bir yük iletimi ve gerilim dağılımı sağladığından yük taşıma performansları civata, perçin, kaynak ve lehime göre çok daha iyi olmaktadır.

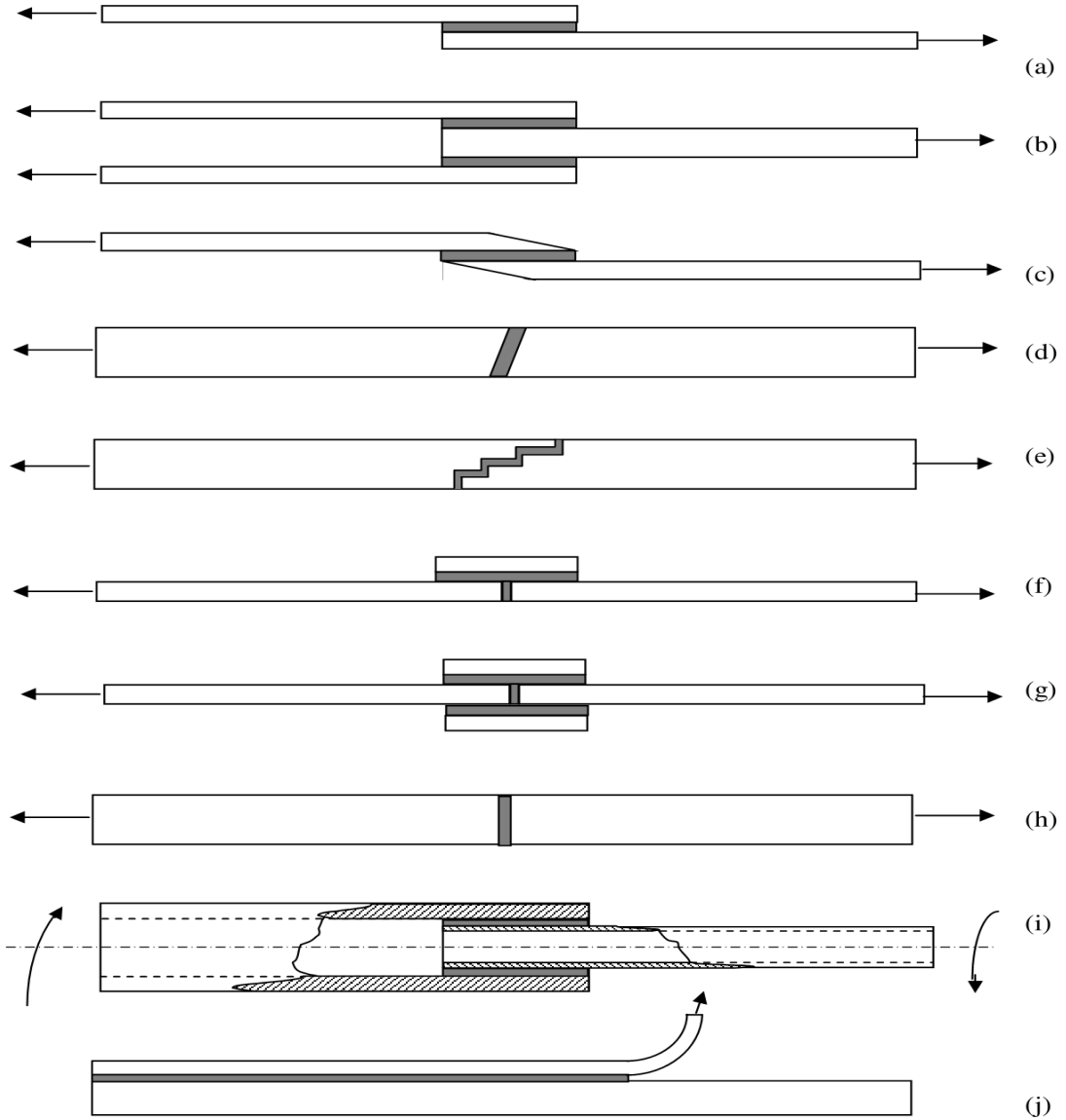
İyi bir yapışma sağlanabilmesi; yapıştırıcının uygun seçilmesine, iyi bir bağlantı şeklinin belirlenmesine, yapıştırılacak yüzeyin fiziksel ve kimyasal özelliğine, yapıştırılan yüzeylerin ıslanabilirliğine ve yapıştırıcının kürleşme sürecine bağlıdır (Wang ve ark., 2012).

3.2.2. Yapıştırma bağlantıları

Yapıştırma yoluyla birleştirilecek parçaların bağlantı şekilleri özel olarak tasarlanmalıdır. Gerilme ve yükleri düşünmeksizin yapıştırma bağlantısını tasarlamak hatalıdır. Bağlantı tasarımı genelde iki ana faktöre bağlıdır:

- Çalışma sırasında bağlantının maruz kalacağı kuvvetlerin ve yüklerin yönüne,
- Bağlantının oluşturulabilme kolaylığı ise parçaların imalat yöntemine (döküm, taşlama vb.) ve kullanılan malzemeye bağlıdır (Adin, 2007).

Uygun çalışma koşullarına bağlı olarak tasarlanmış yapıştırmalı bağlantının bir çok durumda civata, perçin vb. gibi bağlantılardan daha güvenli olduğu görülmektedir. Şekil 3.2.2 'de yapıştırma bağlantı tipleri gösterilmektedir.



Şekil 3.2.2: Yapıştırma bağlantı tipleri, (a) Tek taraflı bindirme bağlantısı, (b) Çift taraflı bindirme bağlantısı, (c) Pahlı bindirme bağlantısı, (d) açılı bindirme bağlantısı, (e) kademeli bağlantı, (f) Tek taraflı katkı alın bağlantısı, (g) Çift taraflı katkı alın bağlantısı, (h) Alın bağlantısı, (i) Silindirik bindirmeli bağlantı, (j) Soyulma (Adams ve ark., 1997)

3.2.3. Yapıştırma bağlantılarında oluşan gerilmeler

Yükleme şartları, yapıştırıcı bağlantısının mukavemetinde son derece etkilidir. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda, yapıştırıcı üzerinden taşınan gerilme için çekme dayanımı yerine, kayma dayanımı şeklinde olması gerektiği belirtilmektedir. Yapıştırıcıların soyulma ve ayrılma şartlarında zayıf kaldığı ifade edilmektedir (Pfeiffer ve Abd El Salam Shakal, 1998). Yapışma bağlantıları genellikle; çekme, kayma, basma, yarıma ve ayrılma yüklerine maruz kalır. Yapışma bağlantıları çekme, kayma ve basma

yüklerine karşı mukavemetli olmalarına rağmen, yarıma ve ayrılma kuvvetlerine karşı zayıftır (Morrisey ve Johnson, 1985).

Yapıştırma bağlantıları genel olarak çekme, çekme makaslama, kayma ve soyulma yüklerine maruz kalır. Yapıştırma bağlantı tasarımında, yapının hangi tip yüklemeye maruz kalacağı önceden tespit edilmelidir. Yükleme tipi belirlendikten sonra gerilme analizi yapılmalı, bunun için de yapışma düzlemindeki gerilme dağılımını temsil eden en uygun, basit bir model kurulması gerekir. Analitik, nümerik ve deneysel olmak üzere üç değişik yol ile gerilme analizi yapılabilir (Durmuş ve Ekrem, 2017).

Tek taraflı bindirmeli bağlantılarda sorunlardan biri üst üste binme uçlarındaki kayma ve soyulma gerilmelerinin yoğunlaşmasıdır. Yükleme esnasında yapıştırıcı arayüzeyi ile yapıştırılan malzemenin üst üste bindirme uzunluğunda kayma dayanımı (τ) yapıştırma boyunca oluşmaktadır. Aynı zamanda üst üste bindirme uzunluğunda dönmeden dolayı oluşan soyulma gerilmesi bağlantının uç kısmında en büyük çekme dayanımı, yapıştırmanın diğer ucunda ise basma gerilmesi şeklinde oluşur. Yapıştırma bağlantısının merkezinde ise soyulma (çekme-basma) gerilmesi sıfırlanmaktadır. Bağlantı dayanımından en yüksek verim elde edilmesi için bahsedilen bu gerilmeler göz önünde bulundurulmalıdır.

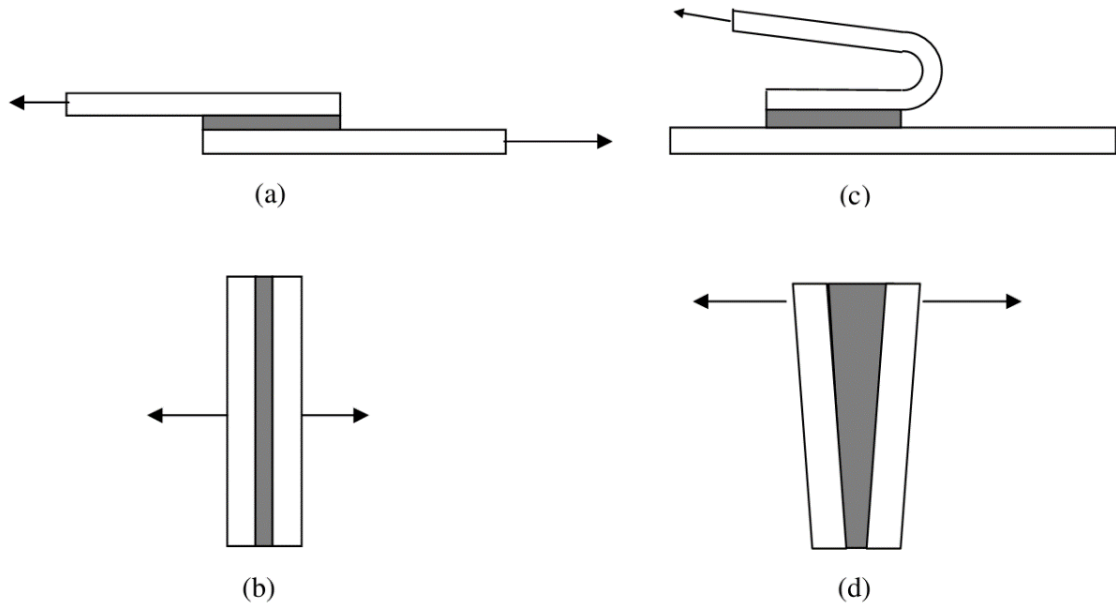
3.2.3.1. Kayma dayanımı

Kayma dayanımı, yapıştırılan malzemeyi ayırmak için zorlandığında yapıştırıcının düzleminde etkili olan kuvvetler ile oluşur. Kayma yükleri yapıştırılan alanın tümüne düzgün etki eder (Şekil 3.2.2.a). Bu tür yüklemelerde yapışma alanının tamamının etki altında olması bağlantı ömrünü arttırarak ekonomiklik sağlar ve pratikte yaygın olarak kullanılır. Mümkün olduğu yerlerde bağlantılar yükün büyük bir kısmı kayma yükü olarak iletilebilecek şekilde oluşturulmalıdır (Petrie, 1975).

3.2.3.2. Çekme ve basma gerilmeleri

Şekil 3.2.3.2 b'de görüldüğü gibi çekme gerilmesi, bağlantı düzlemine dik olarak etki eden tüm kuvvetler düzgün olarak dağıtıldığında oluşur. Ama bağlantıya sadece bu tür gerilmenin etkidiğinden emin olmak her zaman mümkün değildir. Yapıştırıcı dış kenarlarında yüksek gerilme bölgesi oluşur. Eğer bu kuvvetler eksenden kaçık olarak etkimekte ise o zaman yapışma alanına gerilmenin eşit yayılma avantajı

kaybolacak ve bağlantının bozulma ihtimali artacaktır. Önemli olan diğer bir nokta da yapıştırılan malzemenin kalın olması gerektiğidir. Maruz kaldığı yük etkisi ile fark edilir oranda bir makaslama oluşmamalıdır. Eğer durum böyle değilse o zaman gerilme dağılımı eşit olmayacaktır (Petrie, 1975; Temiz, 2003).



Şekil 3.2.3.2.: Gerilme tipleri (a) kesme (b) çekme (c) soyulma (d) çekme-makaslama

Basma yüklemesi altındaki bir yapıştırıcının başarısızlığı çok zordur, ancak düzensiz gerilim dağılımları nedeniyle zayıf noktalar çatlayabilir. Eğer basma kuvveti yeterince yüksek ve parçaların herhangi birinde hareket yoksa yapıştırıcı kohezyon olarak kopmadıkça, parçalar birbirlerine göre aynı konumda kalabilir.

3.2.3.3. Soyulma

Bu tür gerilmenin oluşması için yapıştırılan malzemelerden biri veya her ikisi de esnek olmalıdır (Şekil 3.2.3.2'deki c görüntüsü). Bu tür yüklemelerde bağlantı sınırında oluşan gerilme çok yüksektir. Bağlantı çok geniş veya yük düşük olmadıkça yapıştırma bağlantısı çabuk bozulacaktır. Mümkün oldukça bu tür yüklemelerden kaçınılmalıdır.

3.2.3.4. Çekme-Makaslama gerilmesi

Şekil 3.2.3.2. d'deki tip yükleme, ekseriyetle eksenden kaçık çekme kuvvetinin veya momentinin sonucudur. Önceki gerilmelerin aksine bu gerilme, yapışma alanına

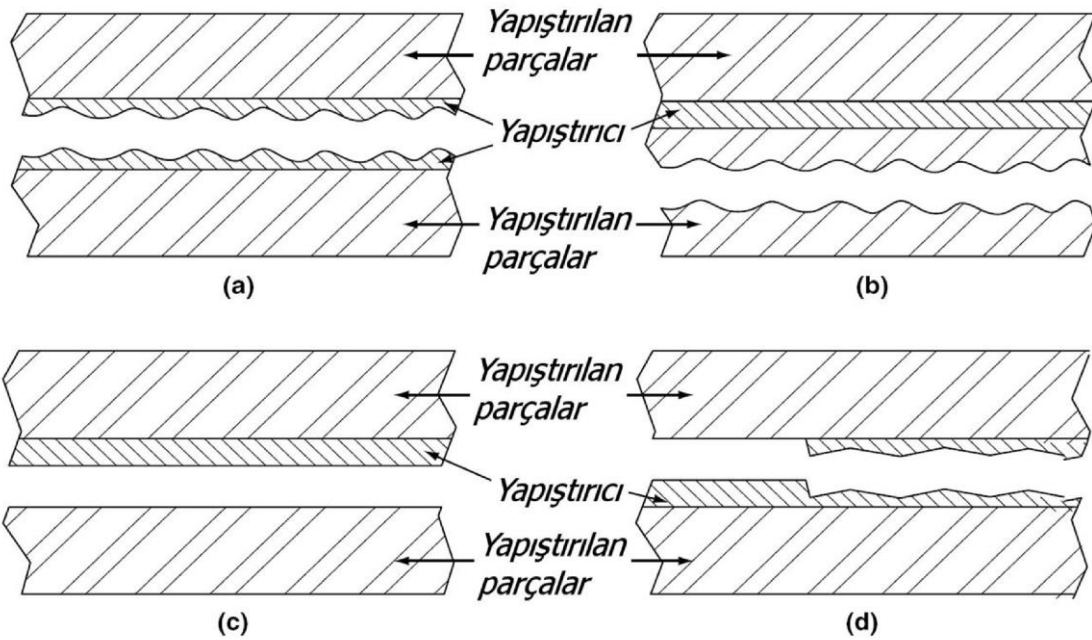
eşit olmayan şekilde etkimekte ve bağlantının bir tarafında yoğunlaşmaktadır. Bu gerilmeyi karşılamak için yeterli derecede yapışma alanına ihtiyaç vardır. Çekme veya kesme gerilmelerine göre bu alan daha fazla olduğu için bu tarz bağlantı tavsiye edilmez; çünkü maliyet artar (Adin, 2007).

3.2.3.5. Yapıştırma işleminde olası hasar mekanizmaları

Yapıştırma bağlantılarının veya yapıştırıcının mekanik özelliklerinin değişik yükleme şartlarında, tam anlamıyla belirlenebilmesi için hasar tiplerinin karakterize edilmesinin önemi büyüktür. Aynı zamanda temel hasar modelinin belirlenmesi, yapıştırma bağlantısına uygulanan mekanik testin sonuçlarının daha iyi anlaşılmasına ve hasar çeşitlerinin sınıflandırılmasına olanak verir. Bu bağlamda yapışma bağlantılarında adhezyon, kohezyon ve yapısal olmak üzere genel olarak üç tip hasar oluşumu görülmektedir.

Yapıştırma işleminde oluşabilecek olası hasar halleri Şekil 3.2.3.5'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde (a)'da gösterilen hasarda yapıştırıcının kohezyon özelliklerinden yapıştırılan malzemeyle güçlü bir arayüze neden olan iyi bir yüzey hazırlamayla karakterize edilen kohezyon kırılmadır. Ayrıca kohezyon kırılma yapıştırıcı içerisinde zig-zag giderek daha fazla yol alacağından kırılma enerjisi fazla olacaktır. Buradan yola çıkarak kayma gerilmesi ve kırılma tokluğunun maksimum olacağını söylemek mümkündür. Şekil 3.2.3.5 (b)'de direk yapıştırılan malzeme kırılıp hasar görmüştür. Şekil 3.2.3.5 (c) yapıştırma hasarında, yapıştırıcı yüzeylere tam olarak yapışmamış ve tek bir yüzeyde kamıştır. Bu tür hasar mekanizmalarına adhezyon (arayüze) kırılma mekanizmaları denilmektedir. Adhezyon kırılmalar genellikle yapışma yüzeylerinin zayıf hazırlanması sonucu olarak veya düşük yüzey enerjili yapıştırılan malzemeler yapıştırıldığında sıklıkla görülmektedir. Şekil 3.2.3.5 (d)' hasarından yapıştırıcı arayüzeyleri tam olarak ıslatamamış ve düzgün bir yapıştırma elde edilemediğinden yapıştırılan parçanın bir yüzeyinde hiç yapıştırıcı malzeme yokken diğer yüzeyin bir kısmında yapıştırıcı tamamen yüzeyde kalmıştır ve ardından yapıştırıcıda kopma gözlenmiştir. Bunun başlıca sebebi yapıştırıcının yapıştırma yüzeyini iyi ıslatamadığından kaynaklandığı olarak düşünülmektedir. Şekilde gösterilen bu dört resim yapıştırma bağlantıları için oluşan başlıca hasar mekanizmaları olarak adlandırılmaktadır. Genellikle yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcının yapıştırılan yüzeyleri tam olarak ıslatması ve testler sonucunda birbirinden ayrılan yüzeylerin

üzerinde orantılı bir şekilde dağılmış olarak kopması istenmektedir. Bu çalışmada üretilen yapıştırıcı numunelerinde yukarıdaki olası hasar mekanizmalarının oluşması göz önüne alınarak TTBB olacak şekilde üretilmiştir.



Şekil 3.2.3.5. Yapıştırma işleminde oluşan olası hasarlar

3.2.5. Yapıştırıcılara ilave edilen katkı maddeleri

Yapıştırıcılar organik ve inorganik esaslı maddelerin karışımından meydana gelebilirler. Çok az sayıdaki polimer, yalnız başına yapıştırıcı olarak kullanılmaktadır. Katkı maddelerinden amaçlanan, yapıştırıcıların atmosferik şartlara, yüke, düşük ve yüksek sıcaklıklara dayanımı ve tatbik edildiği malzemenin kullanım süreci boyunca kullanılmasıdır. Yapıştırıcı malzemelerinde ilave edilen katkı maddeleri:

Katalizörler ve sertleştiriciler

Hızlandırıcı ve yavaşlatıcılar

Modifiye ediciler (dolgular, yumuşatıcılar, incelticiler, vb.) (Kaya, 2004).

3.2.6. Yapıştırmaı etkileyen faktörler

Yapışmayı etkileyen faktörlerin en önemlileri aşağıda açıklanmıştır

Sıcaklık

Birçok yapıştırıcı oda sıcaklığında etkili olmaktadır. Sıcaklık arttıkça yapıştırıcı daha etkin olmakla birlikte yapışma süresi de kısalmaktadır. Kimyasal reaksiyonların çoğunda olduğu gibi, sıcaklık ile birlikte reaksiyon hızında da bir artış olur. Burada dikkat edilmesi gereken bir nokta sıcaklığın kontrolünün yapılmaması durumunda, yapıştırıcıyı oluşturan polimerik maddenin bozunması ihtimalinin olmasıdır. Yapışmada en etkili faktörlerden birisi de sıcaklıktır.

Sıcaklığın yapıştırıcı malzemeye aşağıdaki gibi etkisi olmaktadır;

Sıvı halde olan yapıştırıcının viskozitesini düşürür.

Yapıştırıcının bünyesinde bulunan çözücü maddenin buharlaşarak sistemden ayrılmasını sağlar.

Termosetlerde olduğu gibi reçinenin pişmesini ve yapıştırmasını sağlar.

Çözücü içermeyen katı halde olan yapıştırıcıyı eriterek yüzeye yayılmasını sağlar.

Basınç

Basınç uygulaması yapışmanın kısa zamanda olmasını ve yapıştırıcının uygulanan yüzeye homojen bir şekilde dağılmasını, dolayısıyla yapıştırıcı kalınlığının yüzeyin her tarafında eşit olmasını sağlamaktadır. Uygulama kolaylığı açısından, film ve bant halinde olan yapıştırıcılar kullanıldıklarında, yapışmalarını sağlamak için hafif bir baskı uygulanması ve buldukları yerin şeklini aldıklarından tercih edilmektedirler.

Zaman

Yapıştırıcının, kuruyup etkin hale gelmesi için, birkaç saniyeden birkaç güne kadar bir sürenin geçmesi gerekmektedir. Geçen bu süre yapıştırıcının etkin olma süresi olmakla birlikte basınç ve sıcaklık artışlarıyla bu süre kısaltılabilir.

Katalizör

Reaksiyonunun başlatılması ve hızlandırılması için bazı maddelerin yapıştırıcıların formülünde olması gerekir. Bu amaçla kullanılan kimyasal maddelerin her biri değişik sıcaklıkta etkinliklerini göstererek yapışmayı sağlarlar. Tek ve iki bileşenli yapıştırıcılarda katalizörler, termoset ve elastomerik yapıştırıcı türlerinde olduğu gibi önemli bir yere sahiptirler.

Vulkanizasyon

Kükürt veya daha başka kimyasal maddelerin yardımıyla bir kısım elastomerik yapıştırıcılar yapışmayı sağlayabilmeleri için vulkanize olarak sertleşirler. Sıcaklıkla

aktifleşen iki bileşenli yapıştırıcılar ve kullanılan vulkanizasyon öğeleri etkinliklerini meydana getirirler.

Çözücü

Su ve organik esaslı çözücüler kullanılarak hazırlanan yapıştırıcılar, yapışma işlemini ortamdan çözücü maddenin yüksek sıcaklıkta veya oda sıcaklığında buharlaşarak ayrılmasıyla gerçekleştirirler.

Oksijen

Ortamda oksijenin olmadığı zaman etkinlik gösteren ve oksijensiz ortamlarda yapışan bazı yapıştırıcılar bulunmaktadır. Oksijenin bulunduğu ortamda bozulmadan uzun süre muhafaza edilebilirler.

Rutubet ve Su

Havada bulunan rutubet veya tatbik edildikleri yerdeki su ve rutubet vasıtasıyla reaksiyona girerek yapışmayı sağlayan poliüretan, siyanoakrilat ve silikon türü yapıştırıcılar bulunmaktadır.

Metal Yüzeyleri

Demir ve bazı metallerin yüzeyine uygulanan yapıştırıcılar, metal iyonlarıyla reaksiyona girerek yapışma olayını gerçekleştirmektedir (Kaya, 2004).

3.3. Analitik Yaklaşımlar

Yapıştırıcı kullanılarak bağlanmış bağlantılar birçok farklı sektörlerde kullanılmaktadır. Yapıştırıcı ile bağlama kaynak, perçinleme ve civatalama gibi çok yaygın kullanılan bağlama methodlarına göre düşük maliyet ve düşük ağırlığa sahip bağlantılar elde etmeyi sağlar. Yapıştırıcıyla bağlama, aynı zamanda geleneksel bağlantı malzemeleri ile karşılaştırıldığında, yapıştırıcının küçük hacminden dolayı ağırlık/dayanım oranında ve kalitesinde bir iyileşme ile iş verimliliğinde bir artış sunabilir. Bu yöntem özellikle ince malzemelerin birleştirilmesi için uygundur. Yapılarda yapıştırıcıyla bağlanmış bağlantıların güvenliğini sağlamak için, bağlantı üzerindeki gerilme dağılımlarını analiz etmek gereklidir (Duzcukoglu ve ark., 2015).

3.3.1. Tek taraflı bindirmeli bağlantılar

Bu çalışmanın amacı, literatürde mevcut tek taraflı bindirmeli bağlantılarında analitik modelleri incelemek ve bunların uygulanmasını kolaylaştırmak amacıyla elde

edilen deney sonuçları ile her biri için uygulanabilirlik koşullarının doğruluğunu tespit etmek amacıyla karşılaştırmaktır. Tek taraflı bindirmeli bağlantılar verimliliği ve basit olmasından dolayı yapıştırıcıların testi için en çok tercih edilen yöntemdir. Tek taraflı bindirmeli bağlantıların mekanik özellikleri bindirme genişliği, bindirme uzunluğu ve yapıştırıcı kalınlığı ile değişir. Fakat tek taraflı bindirmeli bağlantılarda analitik modellemelerin uygulanması genellikle çok zahmetli olduğu için aşağıdaki modellemelerden basit lineer elastik analiz yapıştırıcıların testinin yapılması için seçilmiştir.

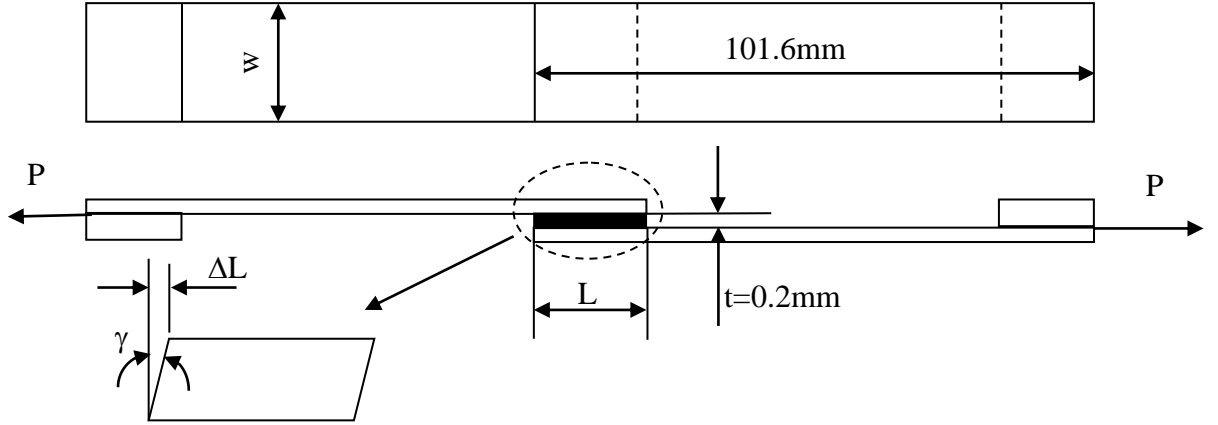
1. Basit lineer elastik analizler,
2. Volkersen analizi,
3. Goland and Reissner analizi,
4. Adams and Peppiat analizi,
5. Hart-Smith analizi,
6. Crocombe ve Bigwood analizi.

3.3.1.1. Basit lineer elastik analizler

Pratikte en yaygın olarak kullanılan bağlantılardan biri olan tek taraflı bindirmeli bağlantıların en basit analizi olduğu düşünülmektedir. Bu analizde yapıştırıcı, sadece kayma yönünde deforme olur ve yapıştırılan malzemeler ise rijit olarak kabul edilir. Soyulma ve eğilme gerilmeleri ihmal edilir. Şekil 3.3.1.1'de gösterildiği gibi, yapıştırıcının kayma dayanımı (τ), üst üste binme uzunluğu boyunca sabittir ve aşağıdaki formül ile hesaplanır (Owens ve Lee-Sullivan, 2000).

$$\tau = \frac{P}{wL} \quad (3.1)$$

burada P uygulanan kuvvet, w bağlantının genişliği, L ise üst üste bindirme uzunluğudur.



Şekil 3.3.1.1.: Tek taraflı bindirmeli bağlantıları ve maruz kaldığı yük

Kayma dayanım değeri, yapıştırıcı tabaka üzerinde etkili olan ortalama kayma gerilmesi olarak yorumlanabilir. Bu analiz birçok sadeleştirme sayesinde çok gerçekçi değildir ama hala ASTM ve ISO standartları gibi birçok test durumlarda yapıştırıcı kesme mukavemetini hesaplamada alıntı için temeldir.

Şekil 3.3.1.1’de görüldüğü üzere yapıştırıcının kayma yer değiştirmesi ΔL olarak elde edilebilir.

$$\gamma \cong \tan \gamma = \frac{\Delta L}{t} \quad (3.2)$$

burada γ (kayma birim şekil değiştirmesi) çok küçük değer olduğundan radyan cinsinden değeri tanjantı yerine kullanılabilir. ΔL , kayma düzlemine göre yapıştırıcının aksenal yer değiştirmesi ve t ise yapıştırıcının kalınlığıdır. Elastik şekil değişimi için Hooke yasasından:

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad (3.3)$$

$$\tau = \frac{P}{A_{kayma}} \quad (3.4)$$

Burada; τ : yapıştırıcının kayma dayanımı, A_{kayma} : yapıştırıcının kayma alanı ($w \times L$ Şekil 3.3.1.1.) ve P : yapıştırılan malzemeye uygulanan çekme kuvvetidir. G , yapıştırıcının kayma modülü, bulunurken gerilme-açısal şekil değiştirme grafiğindeki değişimin lineer olduğu aralık dikkate alınmıştır.

Bir malzemenin hasara uğrayıncaya kadar yutabileceği enerji, malzemenin tokluğu olarak adlandırılır. Yapılan mekanik testler sonucu elde edilen gerilme-birim şekil değiştirme grafiklerindeki eğrinin altında kalan alan ölçülerek tokluk değerleri bulunmuştur.

Kayma dayanımının bulunması için Shimadzu AGS-X cihazı, şekil değiştirmelerin ölçülmesi için Epsilon 3560 modelli extansometre ile Trapeziumx yazılımı kullanılmıştır. Kayma dayanımına ait deney yapılışı sırasında çekilen görüntü Şekil 3.3.1.2.'de sunulmuştur.



Şekil 3.3.1.2.: Yapıştırılmalı bağlantının Shimadzu AGS-X cihazında çekme testi

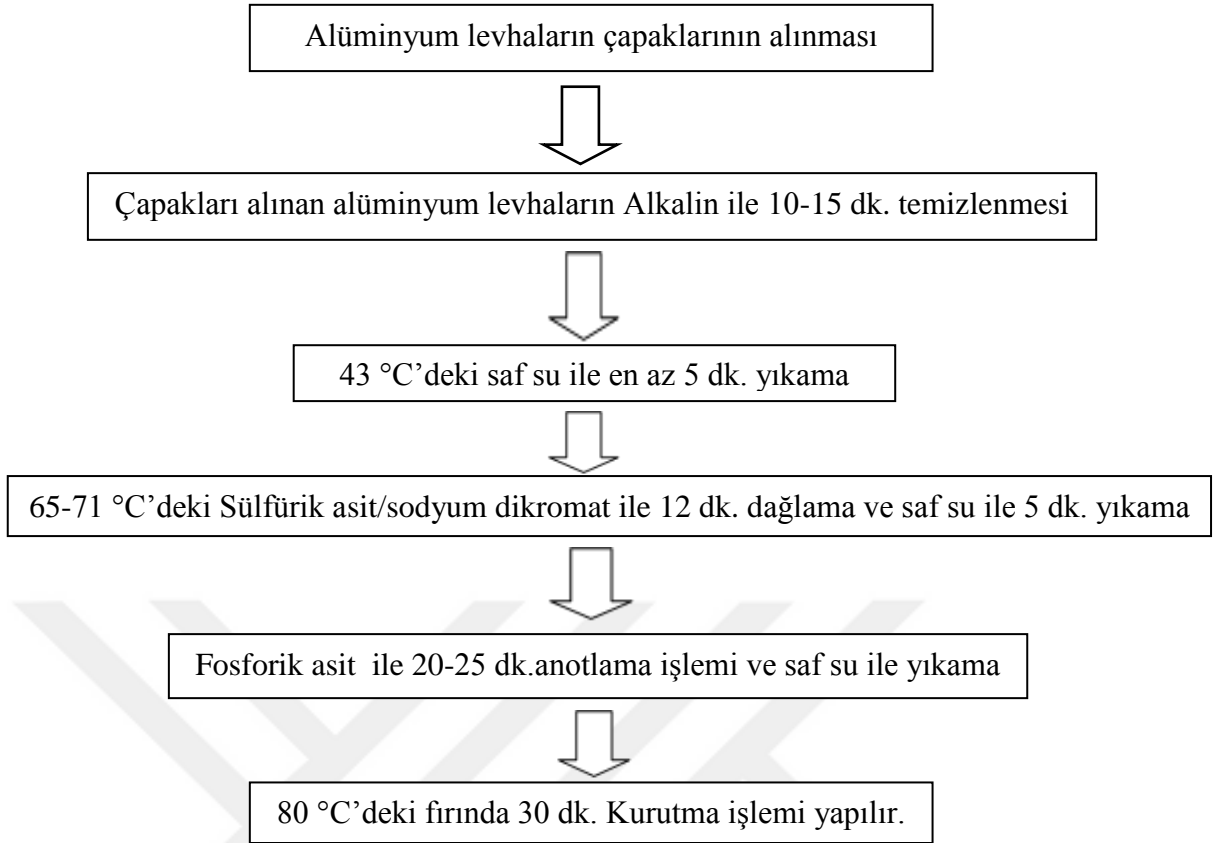
3.4. Yapıştırma Bağlantı Numunelerinin Yüzeylerinin Hazırlanması

Yüzey hazırlama işleminin amacı yüzeyde pürüzlülük oluşturmak ve yapıştırılacak olan numunenin yüzeyinde üretim sırasında veya herhangi bir nedenle bulunabilen gliserin ve yağ tarzı kir tabakalarının uzaklaştırmasıdır. Aksi takdirde yapışma sırasında yapıştırıcının, yüzeydeki kir tabakasına tutunması halinde kuvvet iletimi azalacak dolayısıyla yapışma dayanımı düşecektir. Aynı zamanda pürüzlü bir yüzey oluşturarak yapıştırıcının yüzeye daha iyi tutunması da sağlanmış olur. Bu işlemler için özellikle havacılık sektöründe kullanılan alüminyum gibi numuneler için ASTM 1002-10 standartlarının aşamaları uygulanmaktadır.

Tek taraflı bindirmeli test numunesi boyutları ASTM D1002-10 standartlarına göre belirlenmiştir. Bu standartlara göre Seykoç Alüminyum firmasından alınan alüminyum levhalar ilk olarak 101.6×25 mm boyutlarında Bilgisayarlı Sayısal Kontrollü (CNC) Lazer Kesim Tezgâhında kesilmiştir. Kesim aşamasından sonra elde edilen parçaların kenarlarında oluşan kalıntılar, yapışmayı etkileyebileceği ve çalışana zarar verebileceğinden dolayı giderilmiştir. Numunenin kenar kısımlarındaki pürüzler giderildikten sonra havacılık sektöründe en çok kullanılan yüzey hazırlama metodu olan ASTM D2651-01 standardına uygun (sülfürik asit/ sodyum dikromat) solüsyon ile ASTM D3933-98 standardına uygun yüzey temizleme işlemi yapılmıştır (ASTM, 2008; ASTM, 2010). Bu işlemler boyunca ve bittikten sonra yapıştırılacak yüzeylere çözeltileri ve yıkama işlemleri dışında dışarıdan herhangi bir temasta bulunulmamıştır. Yine aynı şekilde fosforik asitle anotlama işlemi sırasında ve sonrasında da yapıştırılacak yüzeylere temas edilmeden hızlı bir şekilde Şekil 3.4.'daki işlem basamakları takip edilmiştir.

Yüzey hazırlama işlemi sırasında hem çözeltiler için hem de elektriksel anotlama yaparken kullanılacak olan sülfürik asit ve sodyum dikromat Sigma Aldrich, sodyum hidroksit ve fosforik asit Tekkim firmalarından temin edilmiştir.

ASTM D3933-98 standartında belirtilenlere göre bir alüminyum levhanın yapıştırma numunesinin hazırlanması aşamaları şu şekildedir: Öncelikle alüminyum levha, ASTM D1002-10 standartında belirtilen boyutlarda kesildikten sonra kenarlarında oluşan çapaklar giderilmiştir. Daha sonra sodyum hidroksit (NaOH) ile yaklaşık olarak 90°C'de 10-15 dakika temizleme işlemine maruz bırakılmıştır. Bu işlemin amacı yüzeydeki gliserin benzeri bileşikleri uzaklaştırmaktır. Bu işlemden sonra numuneler 43°C'deki saf su ile minimum 5 dakika yıkanarak temizlenmiştir.



Şekil 3.4.: Yapıştırılacak alüminyum numunesinin hazırlanma işlem basamakları

Alkalinle temizlemeden sonra asitle dağlama işlemi yapılmıştır. Bu uygulamanın amacı alkali banyosuyla giderilemeyen yağ gibi lekeleri ortadan kaldırmaktır. Alüminyum yüzeylere asitle dağlama işlemi uygulanmadan önce kir ve yağın giderilmesi gerekir. Çünkü uygulanacak asit kir ve yağ tabakasıyla karşılaştığı için yüzeye homojen bir şekilde etki edemez. Alkali temizleme ile yüzeydeki yağ ve kir giderildikten sonra dağlama için uygulanan asit, yüzeye etki ederek oksit tabakasını kolayca çözer. Şekil 3.4.1.'de alüminyum plakaların alkalinle temizleme ve hemen ardından 43°C'deki saf suyla yıkama işlemleri görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 3.4.1.: 90°C'de Alkalin ile temizleme ve 43°C'deki saf su ile yıkama

Dağlamanın diğeri bir amacı ise alkali ile temizlenmiş yüzeye asitle oyma işlemi yapılarak yapıştırıcının yüzeye daha iyi tutunmasını sağlamaktır. Bu işlem ASTM D2674-72 standartında belirtilen usullere göre yapılmıştır (ASTM, 2012). Dağlama için numuneler, standartta belirtildiği gibi ağırlıkça %26.7 sülfirik asit, %5 sodyum dikromat ve %68.3 saf sudan oluşan 65-71 °C'deki karışıma daldırılarak 12 dakika boyunca bekletildi. Dağlama işlemi bu şekilde tamamlandıktan sonra numuneler oda sıcaklığındaki saf su ile yıkandı. Şekil 3.4.2'de de dağlama işlemi görsel olarak sunulmuştur. Görselden de fark edileceği üzere termometre yardımı ile ağırlıkça %26.7 sülfirik asit, %5 sodyum dikromat ve %68.3 saf sudan oluşan dağlama için kullanılan asidin sıcaklığı sürekli kontrol altında tutulmuştur.



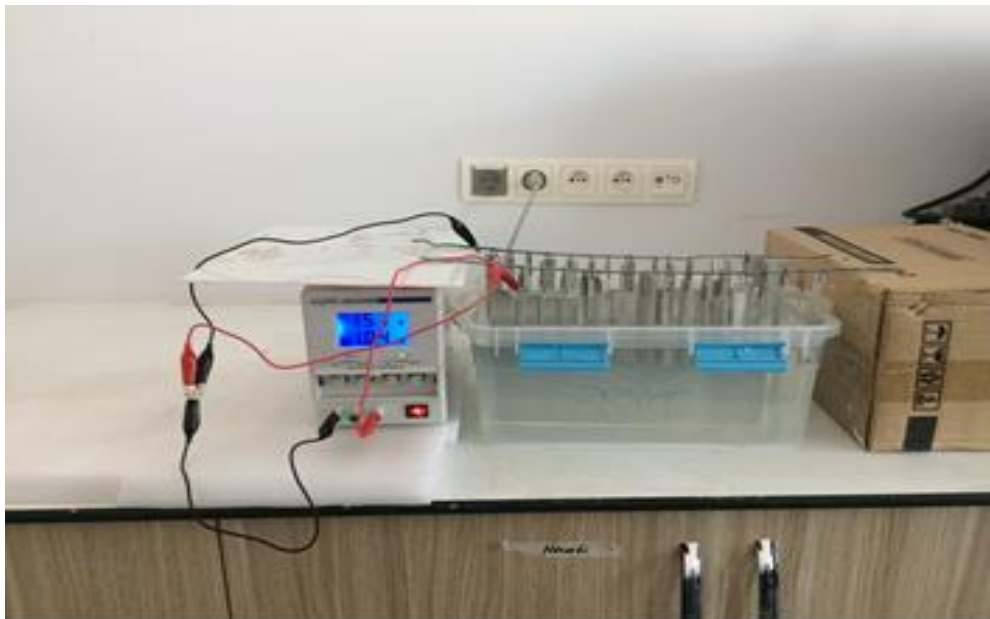
Şekil 3.4.2.: 65-71 °C'deki Sülfirik asit ve sodyum dikromat ile dağlama işlemi

Dağlama işleminden sonra anodizasyon işlemi uygulanmıştır. Bu işlemle metaller üzerindeki oksit tabakasının kalınlığının artırılması amaçlanır. Anodizasyon yüzeyde bir kaplama işlemi değil tamamen değişikliktir. Bu işlem için elektrolitik devre düzeneği kurulmuştur. Metale uygulanacak bu işleme anodizasyon denilmesinin sebebi ise alüminyum metalinin devrede anot olarak kullanılmasından dolayıdır. Anodik oksit oluşumu ara yüzeylerde anyon, katyon taşınması ile gerçekleşir. Alüminyumun kullanım alanına göre farklı çözeltilerle anotlama işlemi gerçekleştirilir. Dekoratif ve koruma amaçlı bir çalışma için okzalik asit, sülfuro-organikasit, fosforik asit, kromik asit kullanılmaktadır. Elektrolit kapasitörler için ise sitrik asit ve borik asit kullanılmaktadır (ÖZLÜ ve ark.). Yapılan bu çalışmada ise havacılık sektöründe kullanılan numuneler olduğu için koruma amaçlı fosforik asit anodizasyonu yapılmıştır. Fosforik asit

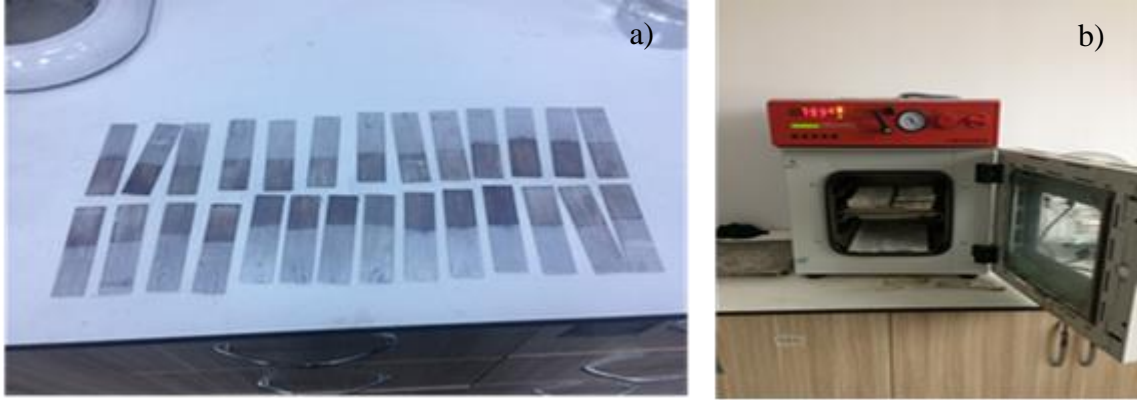
anodizasyonu için standartlarda belirtildiği şekilde ağırlıkça %9-10 fosforik asit ve %88-91 saf su çözeltisi hazırlanmıştır. Hazırlanan çözelti elektrolit devre düzeneğinde bir kap içine alınmıştır. Numunelerin yapıştırılacak yüzeyleri çözelti içerisine daldırılarak 14-16 volt DC gerilimde 20-25 dakika süreyle oda sıcaklığında bekletilmiştir. Fosforik asitle anotlama işlemi Şekil 3.4.3'de gösterildiği şekilde yapılmıştır. Bu işlem sonrasında numuneler çıkartılarak saf su ile yıkanmıştır. Numuneler hava ile fazla temas ettirilmeden Şekil 3.4.4.b'de gösterildiği gibi 80 °C sıcaklıkta 30 dakika boyunca kurutulmuştur. Bu işlem tamamlandıktan sonra numuneler temiz bir ortamda muhafaza edilerek 72 saat içinde yapıştırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Fosforik asit ile anotlama yapmanın temel amaçlarını şu şekilde sıralayabiliriz:

Temel olarak anodizasyonun üç amacı vardır:

1. Islanabilirliğin artırılması. Islanabilirliğin artırılması ile yapıştırma yüzeyinde yapıştırıcının tutunma kabiliyeti artırılarak daha iyi bir yapıştırmaya olanak sağlamaktadır.
2. Kontrollü bir oksit tabakası oluşturmak. Yüzey üzerinde bulunan oksit tabakasının yüzeydeki her yere eşit olarak dağılması sağlanmıştır.
3. Servis ömrünü uzatmak. Anodizasyon yapılmış yapıştırma yüzeylerinin servis ömürleri 72 saattir. Yapılan çalışmalarda anodizasyon işlemine tabii tutulmuş numunelerinin yüzeyindeki oksit tabakasının kontrollü bir şekilde yüzeye eşit dağılma durumunun 72 saat sonunda bozulduğu bulunmuştur.



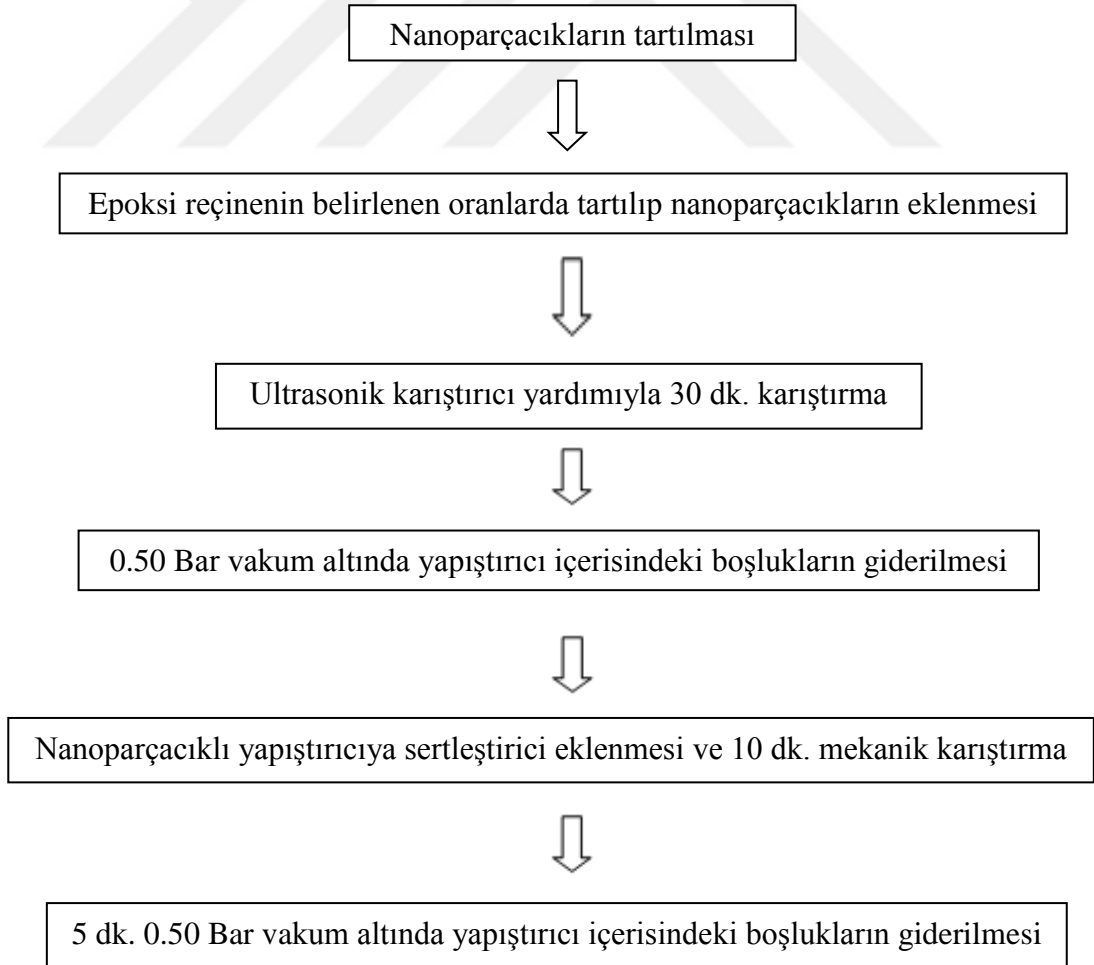
Şekil 3.4.3.: Fosforik asitle anotlama işlemi



Şekil 3.4.4.: a) Anotlama işlemi sonrası numuneler b) 80 °C’de kurutma işlemi

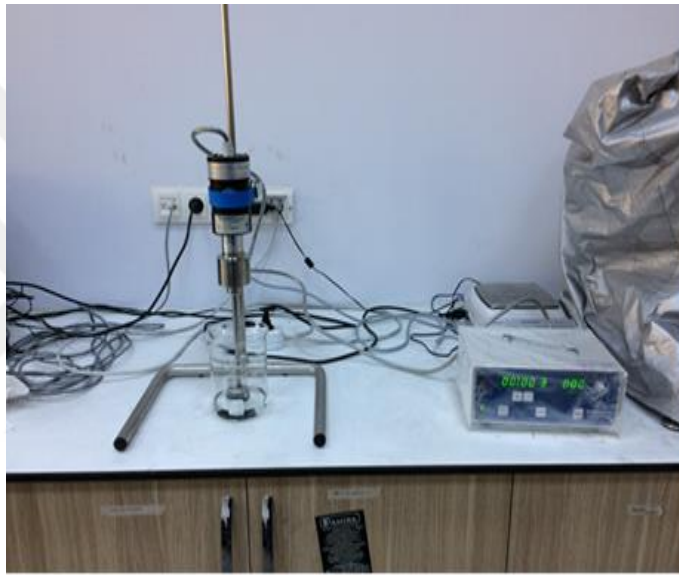
3.5. Nano Yapıştırıcının Hazırlanması

Şekil 3.5.’de bu çalışmada kullanılan nanoparçacık katkıli yapıştırıcıların hazırlanma süreci şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.5.: Nanoparçacık katkıli yapıştırıcıların hazırlanma işlem basamakları

Çözelti karıştırma yönteminde, epoksi reçine içine eklenen değişik oranlardaki nanoparçacıklar ultrasonik karıştırıcı kullanılarak homojen bir dağılım sağlayacak şekilde karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ultrasonik karıştırıcı olarak Bandelin HD 2200, 20 kHz ve 70 Watt gücünde olan cihaz kullanıldı. Karıştırma işlemi bu cihazın %25'lik gücünde gerçekleştirildi. Şekil 3.5.1.'de çözelti karıştırma işlemi sırasında alınan bir görsel sunulmuştur. Şekilde kullanılan ultrasonik karıştırıcı, kontrol ünitesi ve karışımı yapılan epoksi esaslı nanoparçacık katkılı yapıştırıcı görülmektedir. Epoksi reçine içine belirlenen değişik yüzde ağırlık oranlarında Grafen, KNT, bakır nanoparçacık ve gümüş nanoparçacık katılarak toplam olarak 30 dakika karıştırıldı.



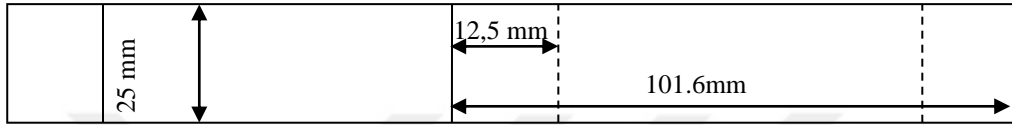
Şekil 3.5.1.: Bandelin Marka Ultrasonik karıştırma ünitesi ile karıştırma işlemi

Sonra epoksi reçine içine farklı ağırlık oranlarında ilave edilmiş nano parçacıklı homojen solüsyon vakum fırını içerisinde 30 dakika 0.50 Bar vakumda bekletilerek solüsyon içindeki hava kabarcıkların giderilmesi sağlandı. Epoksi/kürleştirici oranı ağırlıkça 100/40 oranında ilave edilerek mekanik olarak 10 dk karıştırıldı. Daha sonra hava kabarcıklarını gidermek için tekrar oda sıcaklığında 5 dk. vakum fırınında 0.50 Bar vakum altında bekletildikten sonra nanoparçacık katkılı yapıştırıcı kullanıma hazır duruma getirildi.

3.6. Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantıların Yapıştırılması

Üretilen nano yapıştırıcılar önceden çapakları alınan ve yüzey hazırlığı yapılan Al 2024-T3 numunesine Şekil 3.6.'daki resimde gösterilen ölçülerde olacak şekilde tek

tarafli bindirmeli olarak yapıştırılmıştır. Yapılacak olan deneylerin güvenilirliği açısından her numuneden 5 adet üretilmiştir. Üretilen kayma dayanımı test numuneleri Şekil 3.6.1’de gösterilen aparat yardımıyla üst üste dizilip yapıştırma boyları (12.5 mm olarak) sabitlenmiştir. Üretilen test numuneleri üst üste dizilirken 0.2 mm yapıştırıcı kalınlığı oluşacak şekilde iki deney parçası arasına şim bırakılmıştır. Bu işlem bitirilip en üstteki numune de yerleştirildikten sonra kurutma işlemi yapılmıştır. Kurutma işlemi 24 saat oda sıcaklığında bekletilerek ve ardından 80 °C’de 12 saat bekletilerek yapılmıştır.



Şekil 3.6.: Tek Tarafli Bindirmeli Yapıştırma Numunesi

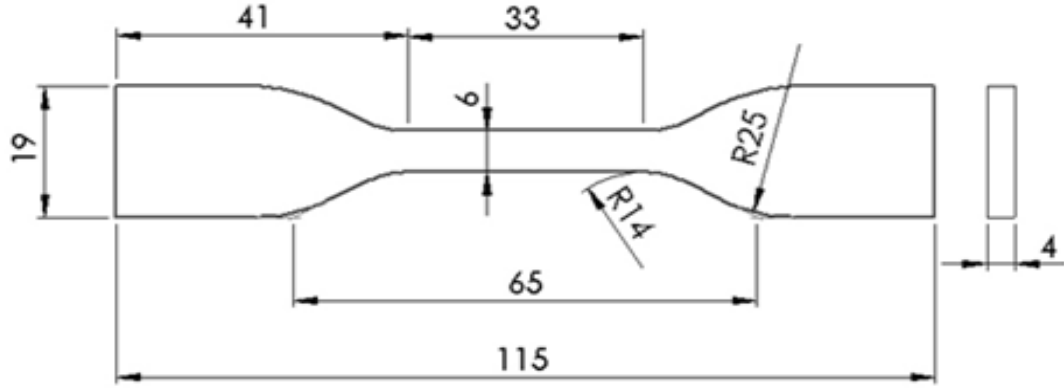


Şekil 3.6.1.: Üretilen Lap-Shear numunelerinin yapıştırma ve kurutma süreci

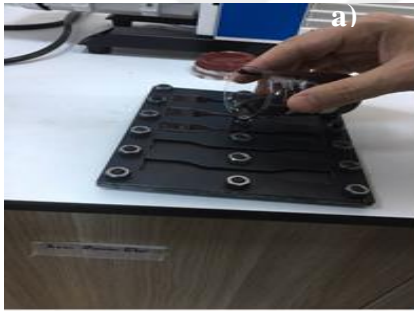
3.7. Çekme Numunelerinin Üretilmesi

Üretilen nanoparçacıklı yapıştırıcılar çekme numunesi kalıbına dökülmüştür. Çekme numuneleri ASTM D638-10 standartına uygun olarak üretilmiştir. ASTM D638-10 standartına göre üretilen çekme numunesinin boyutları Şekil 3.7’de gösterilmiştir. Yapılan döküm işleminden sonra çekme numunesi kalıbı kuruma işlemi için 24 saat oda

sıcaklığında bekletilmiş ve ardından 80 °C'de 12 saat bekletilerek numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.7.1.'de sırasıyla çekme numunesinin kalıba dökülmesi, üretilecek çekme numunelerinin kalıpta sertleşmeye bırakılma işlemi ve en son üretilen çekme numunelerinden bir tanesinin resmi sunulmuştur. Test sonuçlarının güvenilirliğini sağlamak için aynı özellikteki numuneden 5 adet üretilmiştir.



Şekil 3.7.: ASTM D638-10 standartına göre çekme numunesi ölçülendirmesi.



Şekil 3.7. 1.: a) Çekme numunesinin kalıba dökülmesi, b) Kalıba dökülen çekme numuneleri, c) Üretilen çekme numunesi örneği

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Yapılan bu çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada nano yapıştırıcı üretimi ve bu üretilen yapıştırıcılar ile tek taraflı bindirmeli bağlantılarının ve çekme numunelerinin üretimi yapılmıştır. İkinci aşamada ise üretilen numunelerin çekme ve kayma deneyleri yani mekanik performans testleri, TGA ve DTA testleri yapılmıştır.

Birinci aşamada, epoksi içerisine değişik oranlarda Grafen, Karbon nanotüp, bakır nanoparçacık ve gümüş nanoparçacık eklenmiştir. Bu nanoparçacık ekleme işlemleri kademeli olarak gerçekleştirilmiştir. Her defasında bulunan en iyi değer üzerinden çalışmalar devam ettirilmiştir. İlk olarak Çizelge 1’de verilen Grafen ve Karbon nanotüpün optimum seviyeleri tek başlarına belirlenmiştir. Bu işlemin ardından Grafen ve Karbon nanotüpün optimum değerleri birlikte çalışılmıştır. Bulunan en uygun değere Çizelge 1’de belirtilen oranlarda nano gümüş eklenmiştir ve en son aşama olarak hibrit yapıştırıcı üretmek için sağlanan en uygun oranlarda karıştırılmış Grafen, karbon nanotüp ve gümüş nanoparçacık karışımına Çizelge 1’de belirtilen değişik oranlarda bakır nanoparçacık eklenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda bulunan en iyi değerler ve veriler değişik yöntemler ile değerlendirilmiş ve tartışılmıştır.

İkinci aşamada, üretilen nanoparçacık katkılı epoksi esaslı numunelerin yapıştırılmış Al 2024-T3 malzemelerinin tek taraflı bindirmeli bağlantılarının aksenal çekme deneylerinden elde edilen sonuçları grafikler halinde verilmiş ve tartışılmıştır. Bununla beraber çekme deneyleri için üretilen deney parçalarının çekme deneyleri yapılmış ve sonuçları grafikler halinde sunulmuş ve tartışılmıştır. Çekme deneyleri sonucunda kırılan numunelerin kırılma yüzeyleri SEM’de incelenerek mekanik deneylerde elde edilen sonuçlar ile ilişkilendirilmiştir.

Çekme deneyi sonrasında mekanik özellikler, kopma yüzeylerinin SEM analizi sonrasında hasar mekanizmaları, TGA ve DTA sonuçlarına göre üretilen malzemelerin termal özellikleri değerlendirilmiştir.

4.1. Yapıştırıcıların TGA ve DTA Sonuçları

TGA (Termogravimetrik analiz) yöntemi ile polimer bazlı numunenin ısı özellikleri analiz edilebilir. TGA testi sırasında bir numunenin kütlelerinin, numunenin sıcaklığına ve zamana göre değişimi, kontrollü atmosfer altında ölçülür. TGA testinin en sık kullanım amacı bir numunenin ısı ve oksidatif dengesinin ölçülmesi ve bileşen

özelliklerinin karakterize edilmesidir. TGA tekniği ile malzemenin bozunmasına, oksidasyonuna ya da bileşenlerinden uçucu moleküllerin kaybına bağlı olan kütledeki artış ya da azalış değerleri elde edilir. Özellikle polimer bazlı malzemeler için kullanılan önemli bir ısıl analiz yöntemidir. Termoplastik, termoset, elastomerik, kompozit, film, elyaf, boya ve kaplama gibi malzemelerin analizi için kullanılır.

Sıradan bir TGA testinde numune sabit sıcaklık değerinden belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılır ya da numune sabit bir sıcaklıkta belirli bir süre tutulur. Uygulanacak sıcaklık test programı numune hakkında istenen bilgiye göre ayarlanır. TGA testi sırasında numune yüksek sıcaklıklara kadar ısıtıldığı için deneyin yapıldığı ortam, yani atmosfer çok önemlidir. TGA deneylerinde atmosfer seçimi, reaktif ya da inert olabilir, böylece numunenin oksitlenmesi veya sadece bozunması teste tabi tutulabilir.

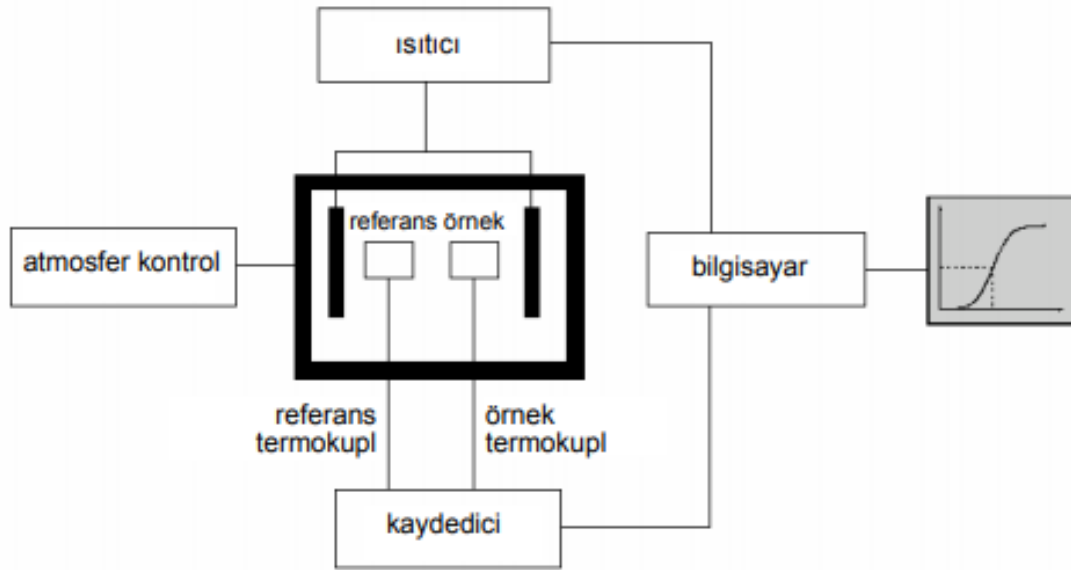
TGA ölçümleri malzeme hakkında önemli bilgiler sağlayarak, malzemenin veya ürünün kullanılacağı son yere göre ürünün performansını öngörmeye ve ürün kalitesini arttırmada yardımcı olur.

Diferansiyel termal analizde (DTA) bir kimyasal sistem (örnek) ile inert bir referans bileşik (bu alüminyum, silisyum karbür veya cam parçacıklar olabilir) arasındaki sıcaklık farkı ölçülerek sistemin yuttuğu ısı gözlenir. Çalışmada sistem ve referansın sıcaklıkları sabit bir hızda artırılır. Örnek ve referans arasındaki sıcaklık farkı sıcaklığın fonksiyonu olarak izlenir. Şekil 4.1'de DTA sistemi şematik olarak görülmektedir. Tartılmış miktarlardaki örnek ve referans maddeler küçük tavalara içine konur. Sisteme bağlı olan bir programlayıcıdaki kontrol termokuplu, fırının sıcaklığının doğrusal bir hızla yükselmesini kontrol eder. Örnek ve referans termokuplları seri olarak bağlanmışlardır. Örnek veya referansın sıcaklıkları arasındaki farklılık bir akım doğmasına neden olur ve yükseltelen akım programlayıcıdaki kalemin konumunu değiştirir.

Bir DTA cihazı örnek ve referans odacıkları inert veya reaktif gazların dolaşabileceği şekilde dizayn edilir. Bazı sistemlerde düşük veya yüksek basınçta çalışma olanağı da vardır. Diferansiyel termogramın ordinatı watt/saniye veya milikalori/saniye cinsinden verilir.

DTA analizi, sıcaklık artışı ile malzemenin yuttuğu ve verdiği enerjiyi gösterir. DTA grafiğinin sol tarafındaki ilk pikten sonraki düşüşün başladığı noktadaki sıcaklık camsı geçiş (T_g) sıcaklığını göstermektedir. Bu T_g değerinden sonra malzeme katılığını kaybeder. Sıcaklık arttıkça grafikte bir pik oluşur. Bu pik yukarı doğru ise Endotermik reaksiyon olarak nitelenir ve malzeme hızla erimeye başlayarak enerji yutar. Eğer pik

aşağı doğru ise bu reaksiyonada Ekzotermik reaksiyon denir ve malzeme dışarıya enerji vermektedir. Bahsedilen pikin tepe noktası erime noktası sıcaklığını (T_m) göstermektedir. Ayrıca DTA grafiğindeki erimeyi gösteren bu pik bölgesindeki eğri altında kalan alan ölçülerek erime entalpisi hesaplanabilir. Bu çalışmada bu bilgiler göz önüne alınarak DTA grafiklerinin yorumlamaları yapılmıştır.



Şekil 4.1.: Diferansiyel termal analiz sisteminin şematik diyagramı

Genel olarak termoset polimerler nispeten yüksek çapraz bağlanma yoğunluğuna sahiptirler. Bu da yüksek bozunma sıcaklığına neden olur, nano parçacıkların varlığı polimerlerin termal kararlılıklarını esas olarak 3 yola etkileyebilir (Chisholm ve ark., 2005)

- 1) Çapraz bağlanma yoğunluğunu azaltarak,
- 2) Isıl iletkenliğini azaltarak,
- 3) Polimer zincirleri arasındaki Van der Waals etkileşimini zayıflatarak.

Nano parçacık sayısı belli bir seviyeye ulaştıktan sonra nano parçacıklar topaklanmaya başlayarak matris-nano parçacık arasındaki bu etkileşim azalmaktadır. Topaklanmanın sistemde kirlilik olarak işlev gördüğü nano parçacık oranında termal kararlılık sıcaklığını azaltmaktadır (Ghosh ve ark., 2012). Topaklanan nano parçacıklar termal analiz sırasında verilen ısıyı yutarak erime ve bozunma esnasında ek ısı kaynağı olarak davranmaktadır. Bu etki sebebi ile nano parçacık oranı artırıldıkça erime ve tamamen bozunma sıcaklarında düşüşler beklenmektedir.

Bu çalışmada, TGA ve DTA analizleri Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde (BİTAM) Setaram-Labsys Evo marka cihaz kullanılarak yapılmıştır.

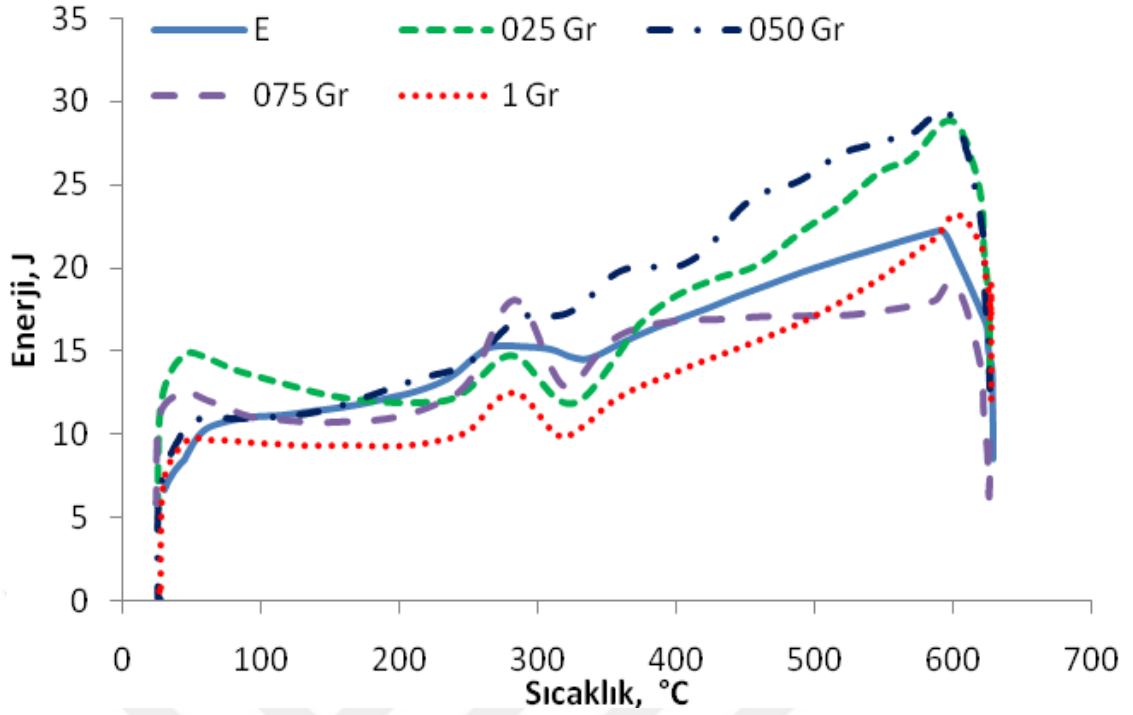
4.1.1. Grafen katkılı epoksi yapıştırıcının TGA ve DTA sonuçları

Bu çalışma kapsamında üretilen ağırlıkça değişik oranlarda grafen katkılı epoksi yapıştırıcılar ile saf epoksi yapıştırıcının TGA ve DTA sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar grafik olarak Şekil 4.1.1’de sunulmuştur. Şekil 4.1.1’de üretilen değişik yüzde oranlarında grafen katkılı epoksi esaslı yapıştırıcı ile saf epoksi yapıştırıcının DTA analiz sonuçları karşılaştırıldığında, saf epoksinin T_g değeri 67.1 °C 050Gr numunesinin T_g değeri 44.5 °C ve en düşük camı geçiş sıcaklığı ise T_g değeri 38.2 °C ile 075Gr numunesindedir. Bu değerlerden anlaşıldığı üzere ilk önce katılığını kaybeden yapıştırıcı 075Gr numunesidir. Ayrıca 075Gr için T_g değerinin düşük olması nano parçacıkların çapraz bağ yoğunluğundaki azalma etkisini göstermektedir. T_m değerinin saf epoksidede 276.8 °C, 025Gr için 295 °C olması nano parçacıkların homojene yakın dağılım göstermesi ve bu sebeple polimer zincirlerdeki düzensizliklere girerek termal kararlılığı arttırması olarak değerlendirilmektedir. Artan nano parçacık oranı ile parçacık dağılımı homojenlikten uzaklaşmış, topaklanmalar oluşarak termal kararlılık olumsuz etkilenmiş saf epoksinin T_m değerine yakın erime sıcaklıkları elde edilmiştir. Şekil 4.1.1’den saf epoksinin T_m sıcaklığı 276.8 °C iken, üretilen grafen katkılı epoksi bazlı yapıştırıcı numunelerinden en yüksek T_m sıcaklık değeri 295 °C ile 025Gr numunesinde gözlenirken, en düşük T_m sıcaklık değeri 275 °C ile 075Gr numunesinde gözlenmiştir.

Çizelge 7 de grafen katkılı tüm numunelerin kütle kaybı, T_g ve T_m değerleri toplu halde sunulmuştur.

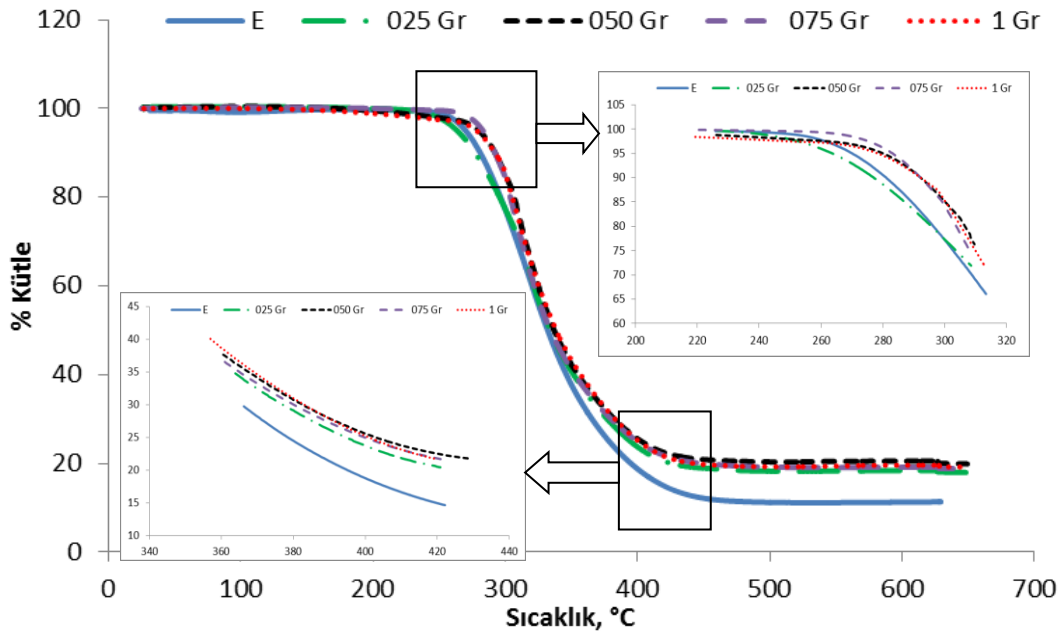
Çizelge 7: Saf epoksi ve grafen katkılı epoksi yapıştırıcıların termal analiz değerleri

Numune İsmi	% Kütle Kaybındaki Bozunma sıcaklıkları(°C)			T_g (°C)	T_m (°C)
	%5	%50	Kütle Kaybının Durduğu		
E	270	332	443.1	67.1	276.8
025Gr	263	333	428.7	44.05	295
050Gr	280	336	428.5	44.5	295.7
075Gr	283	334	430.3	38.2	275
1Gr	278	338	431.4	41.1	280.3



Şekil 4.1.1.: Grafen katkılı epoksi yapıştırıcının DTA eğrileri

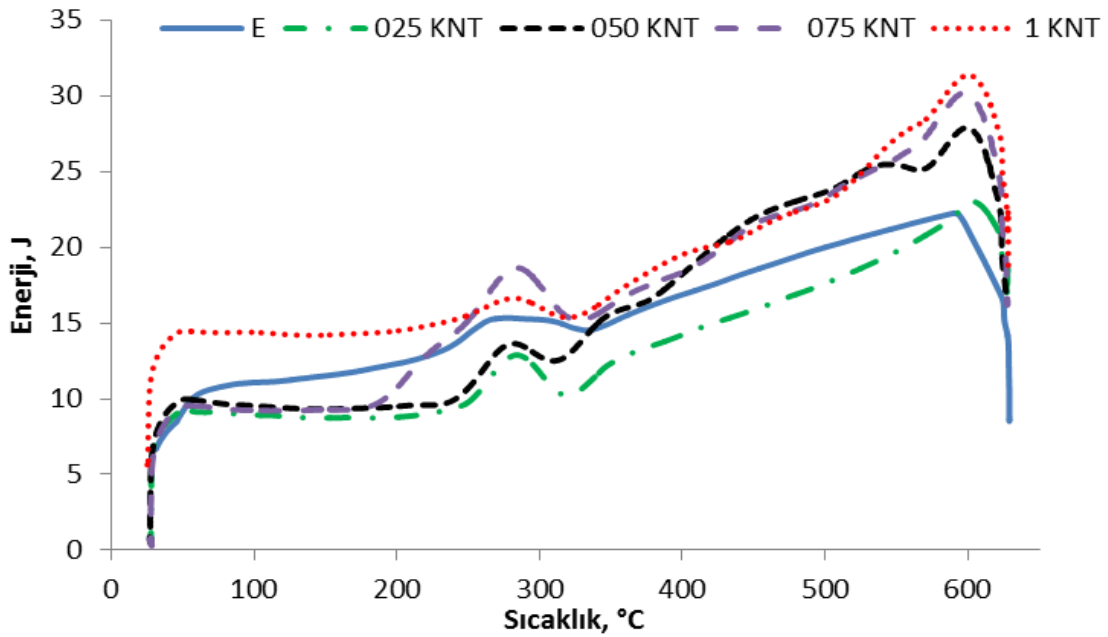
Şekil 4.1.1.a'da değişik yüzde oranlarında grafen katkılı epoksi esaslı yapıştırıcı ile saf epoksi yapıştırıcının TGA analiz sonuçları verilmektedir. Sırasıyla %5, %50 kütle kaybı ve tamamen bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar saf epoksi için 270, 332 ve 443.1°C iken, 075Gr numunesinde 283, 334, 430.3 °C ve 025Gr numunesinde 263, 333, 428.7°C olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.1.1.a.: Grafen katkılı epoksi yapıştırıcının TGA eğrileri

4.1.2. KNT katkıli epoksi yapıştırıcıların TGA ve DTA sonuçları

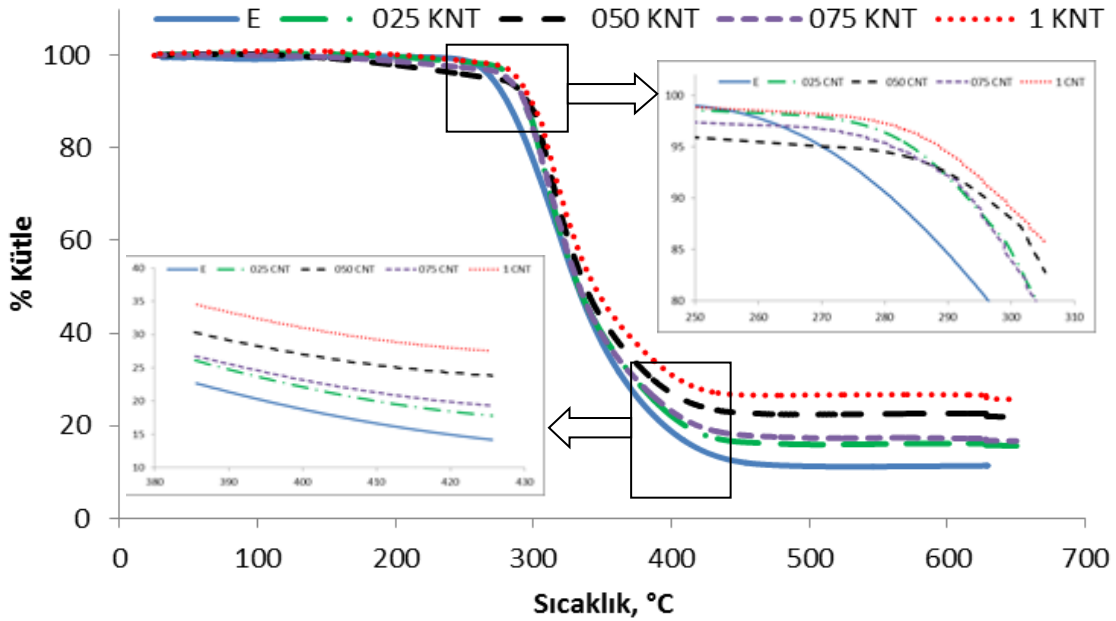
Şekil 4.1.2 ve Şekil 4.1.2.a'da ağırlıkça değişik oranlarda KNT katkıli epoksi esaslı yapıştırıcılar ile saf epoksi yapıştırıcının TGA ve DTA analizleri grafik şeklinde verilmiştir. Şekil 4.1.2'deki DTA grafiğinden saf epoksinin T_g değeri $67.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 075KNT numunesini T_g değeri $54\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve en düşük T_g değeri $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile 025KNT numunesinde gözlemlenmiştir. Ayrıca Şekil 4.1.2'den saf epoksinin T_m sıcaklığı $276.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken, KNT katkıli epoksi bazlı numunlerden en yüksek T_m sıcaklığı $296\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile 025KNT numunesinde ve en düşük T_m sıcaklığı $278\text{ }^{\circ}\text{C}$ değeriyle 050KNT numunesinde görülmüştür. KNT katkısının da epoksi matrisin çapraz bağları üzerinde grafene benzer etki yaptığı görülmektedir. Düşük katkı oranlarında çapraz bağların bozulmasına sebep olan nano parçacıklar yüksek oranlarda topaklanarak bu etkinin azalmasına sebep olmaktadır.



Şekil 4.1.2.: KNT katkıli epoksi yapıştırıcıların DTA eğrileri

Şekil 4.1.2.a' da KNT katkıli epoksi esaslı yapıştırıcılar ile saf epoksi yapıştırıcının TGA sonuçları verilmektedir. Sırasıyla %5, %50 kütle kaybı ve tamamen bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar saf epoksi için 270 , 332 ve $443.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken, 1 KNT numunesinde 288 , 344 ve $425.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 050KNT numunesinde 270 , 337 ve $428.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak tespit edilmiştir. Açıkça görüldüğü gibi KNT katkıli epoksi bazlı yapıştırıcıların bozunma sıcaklıkları saf epoksi yapıştırıcıya göre artış göstermiştir. Termal bozulma

sıcaklıkları ağırlıkça KNT takviyesinin artması ile artmıştır. Bu bozunma sıcaklıklarının artmasının başlıca nedeni KNT ile saf epoksi arasındaki etkin kombinasyonudur (Ebadi-Dehaghani ve Nazempour, 2012). Ayrıca KNT'ler daha yüksek ısı kapasitesi ve ısı iletkenliğe sahiptir bu nedenle KNT'ler termal enerjiyi soğurma eğiliminde olup saf epoksi'den daha yüksek sıcaklıkta bozunmasına sebep olmuştur(Gojny ve ark., 2006).



Şekil.4.1.2.a.: KNT katkıli epoksi yapıştırıcıların TGA eğrileri

Çizelge 8 de KNT katkıli tüm numunelerin kütle kaybı, T_g ve T_m değerleri toplu halde sunulmuştur.

Çizelge 8: Saf epoksi ve KNT katkıli epoksi yapıştırıcıların termal analiz değerleri

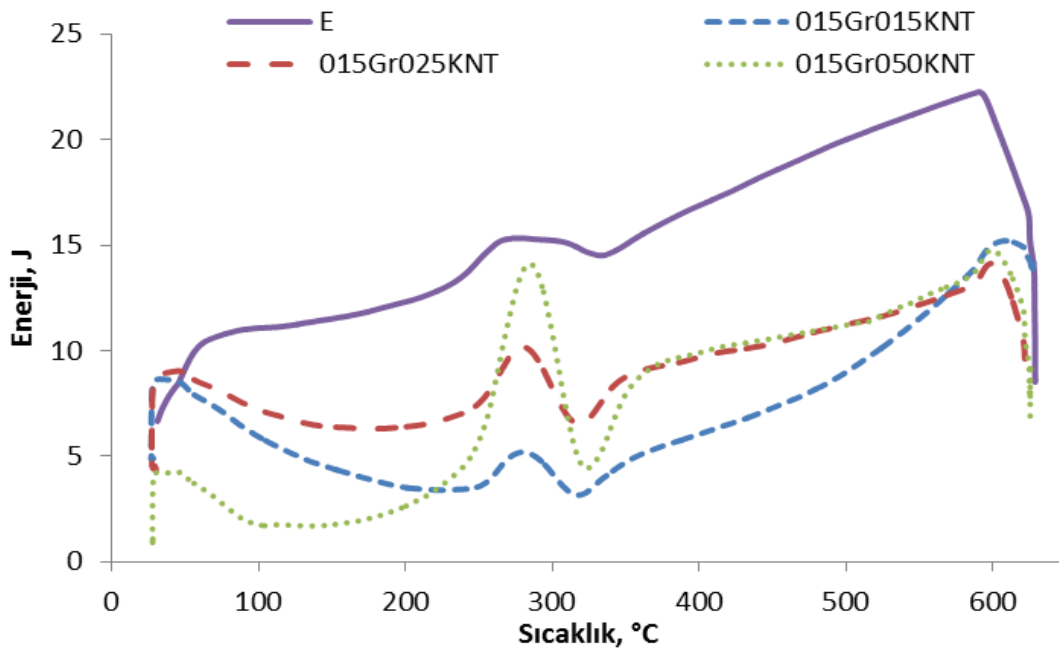
Numune İsmi	% Kütle Kaybındaki Bozunma sıcaklıkları(°C)			T_g (°C)	T_m (°C)
	%5	%50	Kütle Kaybının Durduğu		
E	270	332	443.1	67.1	276.8
025KNT	284	332	431.8	38	296
050KNT	270	337	428.2	39.3	278
075KNT	280	333	431.5	54	282.1
1KNT	288	344	425.3	44.8	281.6

4.1.3. Grafen ve KNT katkıli epoksi yapıştırıcıların TGA ve DTA sonuçları

Ağırlıkça değişik oranlarda ilave edilen Grafen ve karbon nanotüp katkıli epoksi bazlı yapıştırıcılar ile saf epoksi yapıştırıcıya ait TGA ve DTA sonuçları grafik olarak sunulmuştur. Bu bölümde, ağırlıkça en iyi oran olarak belirlenen Grafen ve karbon nanotüpün değişik varyasyonları bir arada kullanılarak değişik oranlardaki Grafen ve

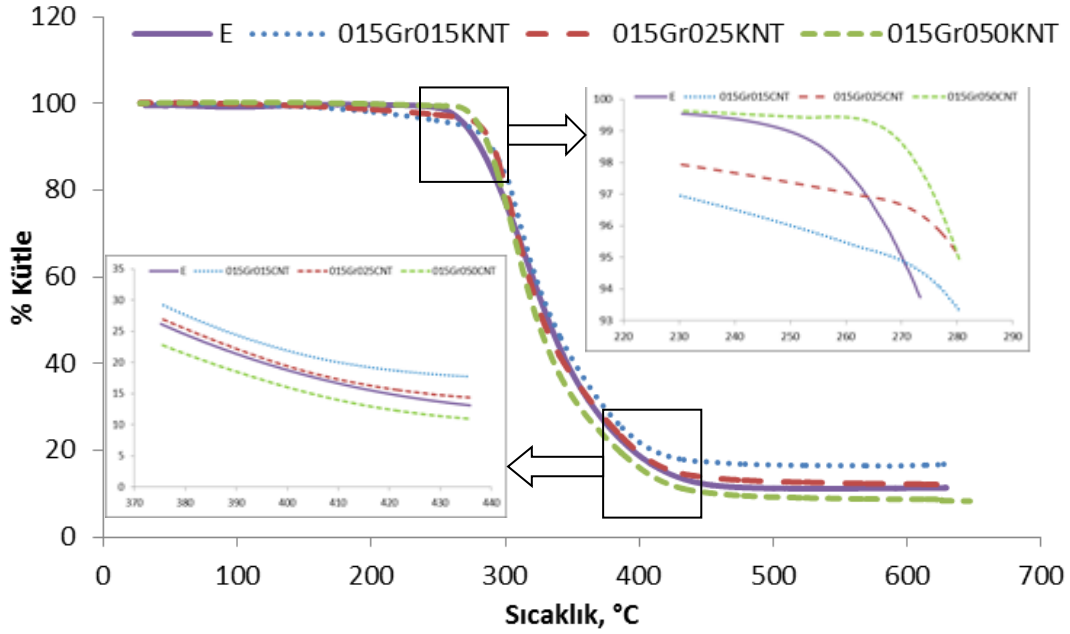
karbon nanotüp katkılı epoksi esaslı yapıştırıcılar üretilmiş ve saf epoksi ile karşılaştırılmıştır. Bulunan sonuçlar kendi arasında değerlendirilmiş ve en iyi sonuca sahip numune tespit edilmiştir.

Şekil 4.1.3'de ağırlıkça yüzde 0.15 oranındaki Grafen ve ağırlıkça değişik oranlardaki KNT katkılı epoksi esaslı yapıştırıcılar ve saf epoksinin DTA analizi sonucunda bulunan değerlerin grafiksel olarak karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 4.1.3'de saf epoksinin T_g değeri $67.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve T_m sıcaklığı $276.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak bulunmuştur. Saf epoksinin sahip olduğu bu camsı geçiş sıcaklığı ve erime sıcaklığı değerleri ile grafen ve KNT katkılı epoksi bazlı yapıştırıcılar karşılaştırıldığında, 015Gr025KNT T_g değeri $36.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ değeri ile ağırlıkça yüzde 0.15 oranında sabit grafen değerli yapıştırıcılar arasında en yüksek değere ve T_g değeri $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ değerleriyle 015Gr050KNT numunesi ise en düşük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte 015Gr025KNT numunesinin T_m değeri $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 015Gr050KNT numunesinin T_m değeri $278\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir.



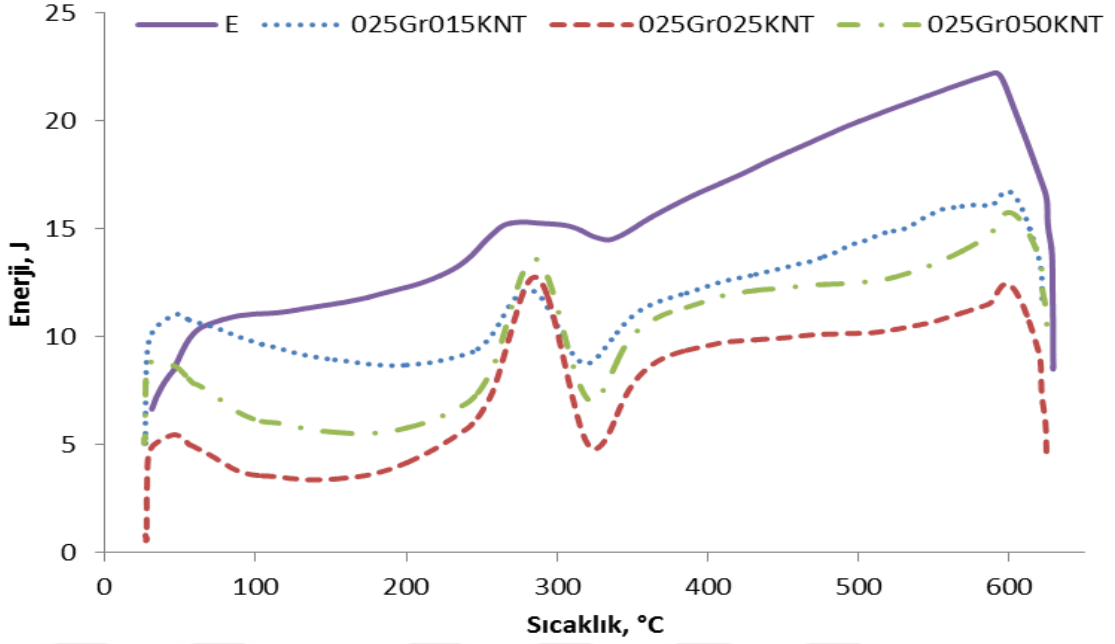
Şekil 4.1.3.:Ağırlıkça %0,15 Grafen ve değişik oranlarda KNT katkılı yapıştırıcıların DTA eğrileri

Ağırlıkça yüzde 0.15 grafen ve ağırlıkça değişik oranlarda KNT katkılı epoksi esaslı yapıştırıcı ile saf epoksi yapıştırıcının TGA analizine ait grafik Şekil 4.1.3.a'da sunulmuştur. Grafikten, % 5, %50 ve kütle kaybı tamamen bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar saf epoksi için sırasıyla 270 , 332 ve $443.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken, 015Gr015KNT numunesi için 268.63 , 335.05 ve $427\text{ }^{\circ}\text{C}$, 015Gr025KNT numunesi için 280.4 , 327.94 ve $431\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak bulunmuştur.



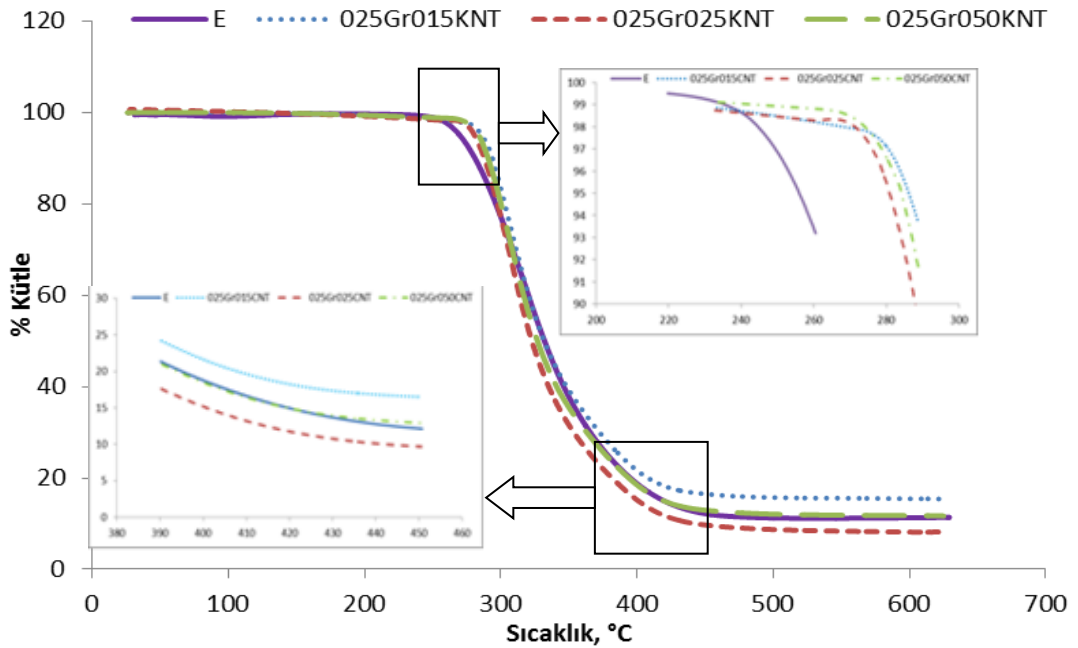
Şekil.4.1.3.a.: Ağırlıkça %0,15 Grafen ve değişik oranlarda KNT katkılı yapıştırıcıların TGA eğrileri

İkinci grupta ağırlıkça yüzde 0.25 oranında grafen sabit tutulmuş ve ağırlıkça değişik oranlarda KNT katkılı epoksi bazlı yapıştırıcılar üretilmiş ve saf epoksinin termal özellikleriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar aşağıdaki Şekil 4.1.3.b ve Şekil 4.1.3.c'de grafik şeklinde verilmiştir. Şekil 4.1.3.b incelendiğinde, saf epoksinin T_g değeri $67.1\text{ }^\circ\text{C}$ ve T_m sıcaklığı $276.8\text{ }^\circ\text{C}$ olarak bulunmuştur. Saf epoksiye ait bu değerler katkılı yapıştırıcı numuneleri ile karşılaştırıldığında, T_g değeri $47.2\text{ }^\circ\text{C}$ ile en yüksek değer 025Gr015KNT numunesinde ve T_g değeri $27.5\text{ }^\circ\text{C}$ ile en düşük değer 025Gr050KNT numunesinde gözlemlenmiştir. İlave olarak 025Gr015KNT numunesinde T_m değeri $272.4\text{ }^\circ\text{C}$ ve 025Gr050KNT numunesinde T_m değeri $279.7\text{ }^\circ\text{C}$ olduğu bulunmuştur.



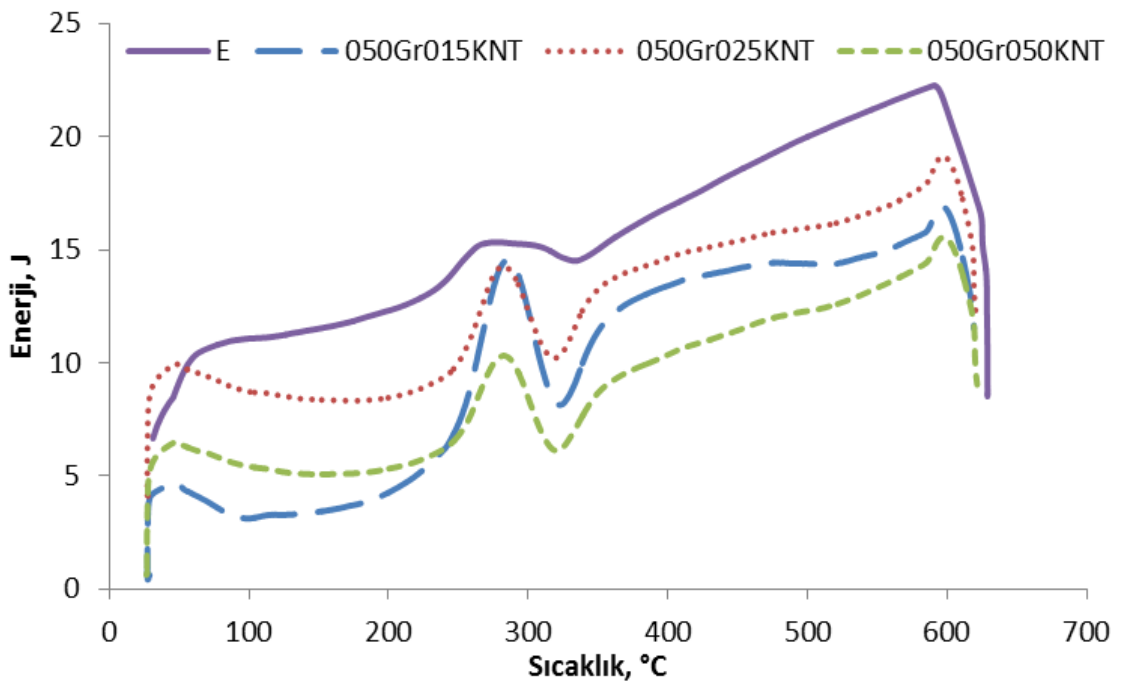
Şekil 4.1.3.b.: Ağırlıkça %0,25 Grafen ve değişik oranlarda KNT katkıli yapıştırıcıların DTA eğrileri

Yukarıda bahsedilen grubun TGA grafik sonuçları Şekil 4.1.3.c’de sunulmuştur. Buradaki TGA grafiği değerlendirildiğinde, saf epoksiye ait sırasıyla % 5, %50 kütle kaybı ve tamamen bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar 270, 332 ve 443.1 °C iken, en düşük bozunma sıcaklık değerleri 025Gr025KNT numunesinde 280.82 , 322.75 ve 433.8 °C’lerde, en yüksek bozunma sıcaklık değerleri ise 025Gr015KNT numunesinde 286.13 , 331.93 ve 429.4 °C’lerinde tespit edilmiştir.



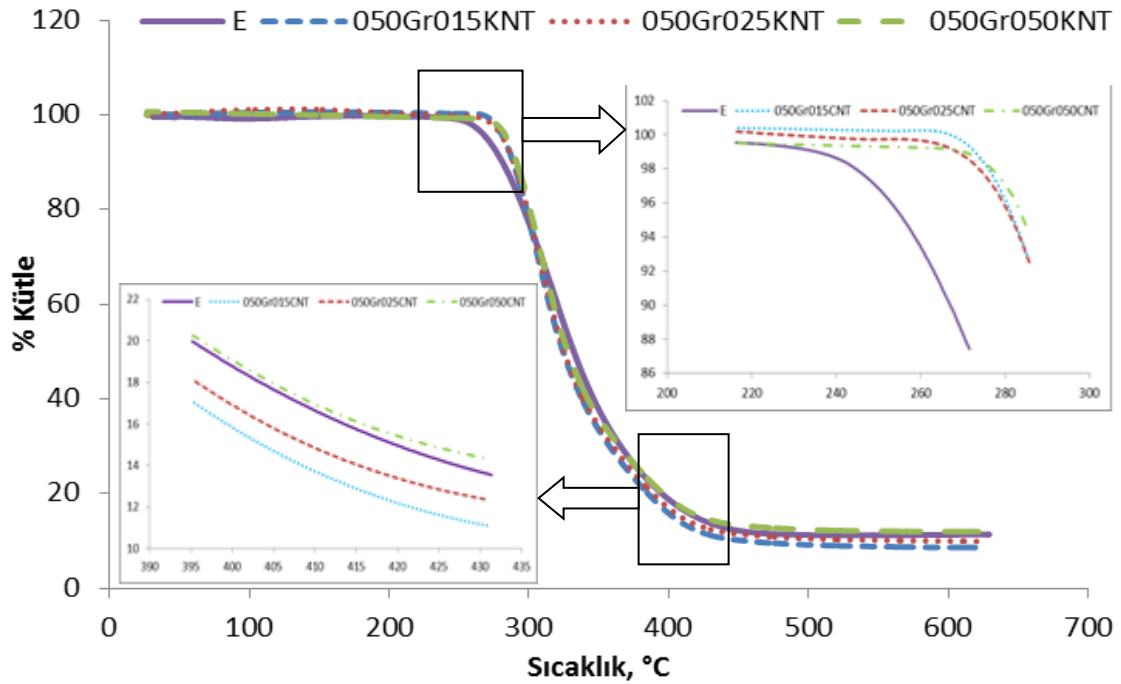
Şekil 4.1.3.c.: Ağırlıkça %0,25 Grafen ve değişik oranlarda KNT katkıli yapıştırıcıların TGA eğrileri

Üçüncü grup, ağırlıkça yüzde 0.50 oranında grafenin sabit tutulup ağırlıkça değişik oranlarda KNT katkılı epoksi bazlı yapıştırıcılar ile saf epoksinin DTA sonuçlarının karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.1.3.d'de sunulmuştur. Saf epoksinin T_g değeri $67.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve T_m sıcaklığı $276.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken, en düşük T_g değeri $38.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile 050Gr015KNT numunesinde gözlenenmiş ve en yüksek T_g değeri $53.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile 050Gr025KNT numunesinde tespit edilmiştir. İlaveten T_m sıcaklık değerleri 050Gr015KNT ve 050Gr025KNT numuneleri için sırasıyla $280.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $274.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.1.3.d.: Ağırlıkça %0,50 Grafen ve değişik oranlarda KNT katkılı yapıştırıcıların DTA eğrileri

Şekil 4.1.3.e'de saf epoksinin ve ağırlıkça %0.50 oranının sabit tutulduğu Grafen ve ağırlıkça değişik oranlarda KNT katkılı epoksi bazlı yapıştırıcıların TGA sonuçlarına ait değerler grafik olarak verilmiştir. Buradaki TGA grafiği değerlendirildiğinde, saf epoksiye ait sırasıyla % 5, %50 kütle kaybı ve tamamen bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar 270 , 332 ve $443.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak bulunurken, 050Gr015KNT numunesinin ve 050Gr050KNT numunesinin sırasıyla % 5, %50 kütle kaybı ve tamamen bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıkları 281.9 , 323.3 , $433.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve 284.3 , 327.7 , $434.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.1.3.e.: Ağırlıkça %0,50 Grafen ve değişik oranlarda KNT katkılı yapıştırıcıların TGA eğrileri

Çizelge 9 da Grafen ve KNT katkılı tüm numunelerin kütle kaybı, T_g ve T_m değerleri toplu halde sunulmuştur.

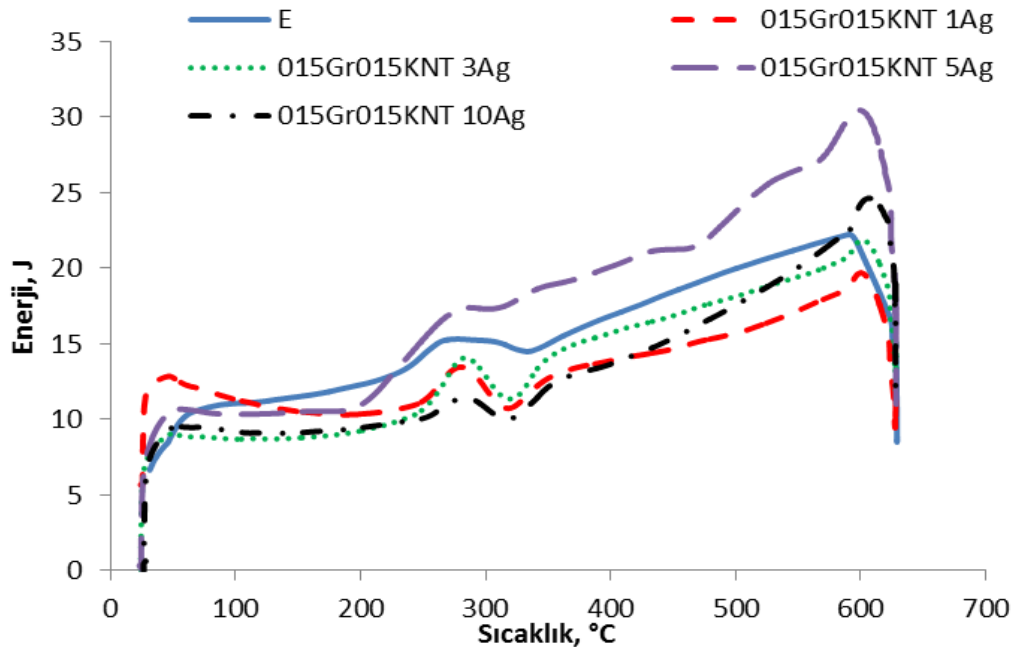
Çizelge 9: Saf epoksi ve grafen ve KNT katkılı epoksi yapıştırıcıların termal analiz değerleri

Numune İsmi	% Kütle Kaybındaki Bozunma sıcaklıkları(°C)			T_g (°C)	T_m (°C)
	%5	%50	Kütle Kaybının Durduğu		
E	270	332	443.1	67.1	276.8
015Gr015KNT	268.63	335.05	427	32.9	275.4
015Gr025KNT	280.4	327.94	431	36.4	270
015Gr050KNT	280.2	323.8	434.5	28	278
025Gr015KNT	286.13	331.93	429.4	47.2	272.4
025Gr025KNT	280.82	322.75	433.8	32.1	278.5
025Gr050KNT	284.14	326.95	432.6	27.5	279.7
050Gr015KNT	281.9	324.3	433.2	38.9	280.2
050Gr025KNT	281.5	325.1	432	53.3	274.2
050Gr050KNT	284.3	327.3	434.1	41.7	274.5

Elde edilen bu sonuçlara göre hem grafen hem de KNT eklenmesi epoksinin T_g sıcaklığını azaltmaktadır. Bu etki düşük katkı oranları için daha fazla yüksek katkı oranları için daha az olmuştur. Bu durumun çapraz bağ yoğunluğunun düşük katkı oranlarında daha fazla azaldığından kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

4.1.4. Grafen, KNT ve gümüş nanoparçacık katkılı epoksi yapıştırıcıların TGA ve DTA sonuçları

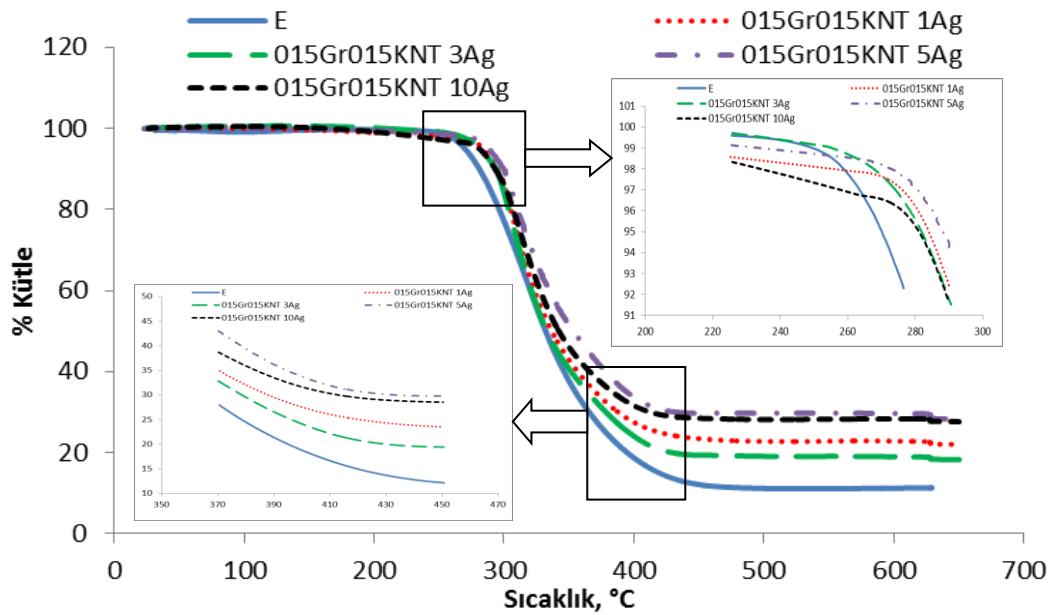
Grafen, KNT ve gümüş nanoparçacık katkılı epoksi yapıştırıcılar ve saf epoksinin DTA sonuçlarına dair grafik Şekil 4.1.4'de sunulmuştur. Şekil incelendiği zaman saf epoksinin T_g değerinin $67.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve T_m sıcaklığının $276.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra grafen, KNT ve gümüş nanoparçacık katkılı epoksi bazlı yapıştırıcılardan en düşük değerlere sahip 015Gr015KNT3Ag numunesinin T_g değeri $38.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve T_m sıcaklığı $274.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ iken, en yüksek değerler 015Gr015KNT5Ag numunesinde T_g değeri $50.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve T_m sıcaklığı $275.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak bulunmuştur.



Şekil 4.1.4: Grafen, KNT ve Gümüş Nanoparçacık katkılı epoksi yapıştırıcıların DTA eğrileri

Aşağıdaki Şekil 4.1.4.a'da saf epoksi ve grafen, KNT ve gümüş nanoparçacık katkılı epoksi bazlı yapıştırıcılara ait TGA değerlerinin karşılaştırıldığı grafik verilmiştir. Grafikte saf epoksiye ait sırasıyla % 5, %50 kütle kaybı ve tamamen bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar 270 , 332 ve $443.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak bulunmuştur. Üretilen yapıştırıcı numuneleri ile karşılaştırıldığında, en yüksek değerlere sahip yapıştırıcı numunesi sırasıyla % 5, %50 kütle kaybı ve tamamen bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar 281.8 , 332.8 ve $426.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ değerleri ile 015Gr015KNT3Ag numunesinde, en düşük sırasıyla % 5, %50 ve tamamen kütle kaybı için bozunmanın gerçekleştiği

sıcaklıklar 288.2, 353.4 ve 422.4°C değerleri ile 015Gr015KNT5Ag numunesinden elde edilmiştir.



Şekil 4.1.4.a.: Grafen, KNT ve Gümüş Nanoparçacık ilaveli epoksi yapıştırıcıların TGA eğrileri

Çizelge 10'da grafen, KNT ve gümüş nano parçacık katkılı epoksi yapıştırıcıların kütle kaybı, T_g ve T_m değerleri toplu halde sunulmuştur.

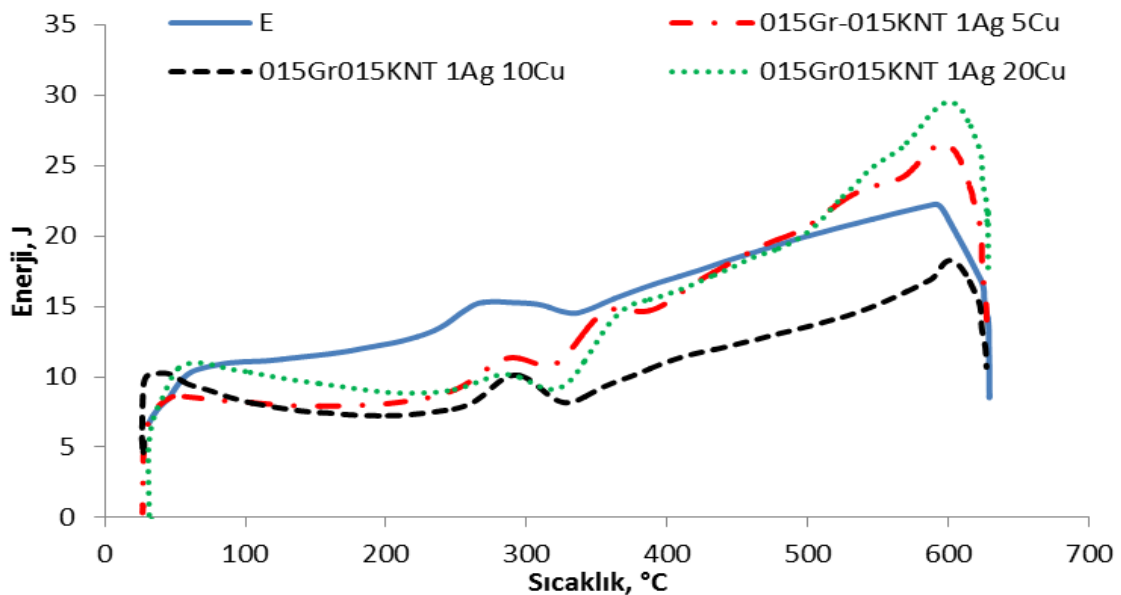
Çizelge 10: Saf epoksi, grafen, KNT ve gümüş nano parçacık katkılı epoksi yapıştırıcıların termal analiz değerleri

Numune İsmi	% Kütle Kaybındaki Bozunma sıcaklıkları(°C)			T_g (°C)	T_m (°C)
	%5	%50	Kütle Kaybının Durduğu		
E	270	332	443.1	67.1	276.8
015Gr015KNT1Ag	284	336.7	427.5	40.3	269.9
015Gr015KNT3Ag	281.8	332.8	426.7	38.2	274.8
015Gr015KNT5Ag	288.2	353.4	422.4	50.46	275.12
015Gr015KNT10Ag	281.08	342.27	418.6	39.8	271.8

Bu sonuçlara göre grafen ve KNT katkısının sebep olduğu çapraz bağ yoğunluğundaki azalma etkisi ve bunun sonucunda ısıl özelliklerde azalma devam ederken Ag nano parçacıkların özellikle yüksek katkı oranlarında karışım içinde ek ısı kaynağı etkisi yapması daha belirgin hale gelmiştir.

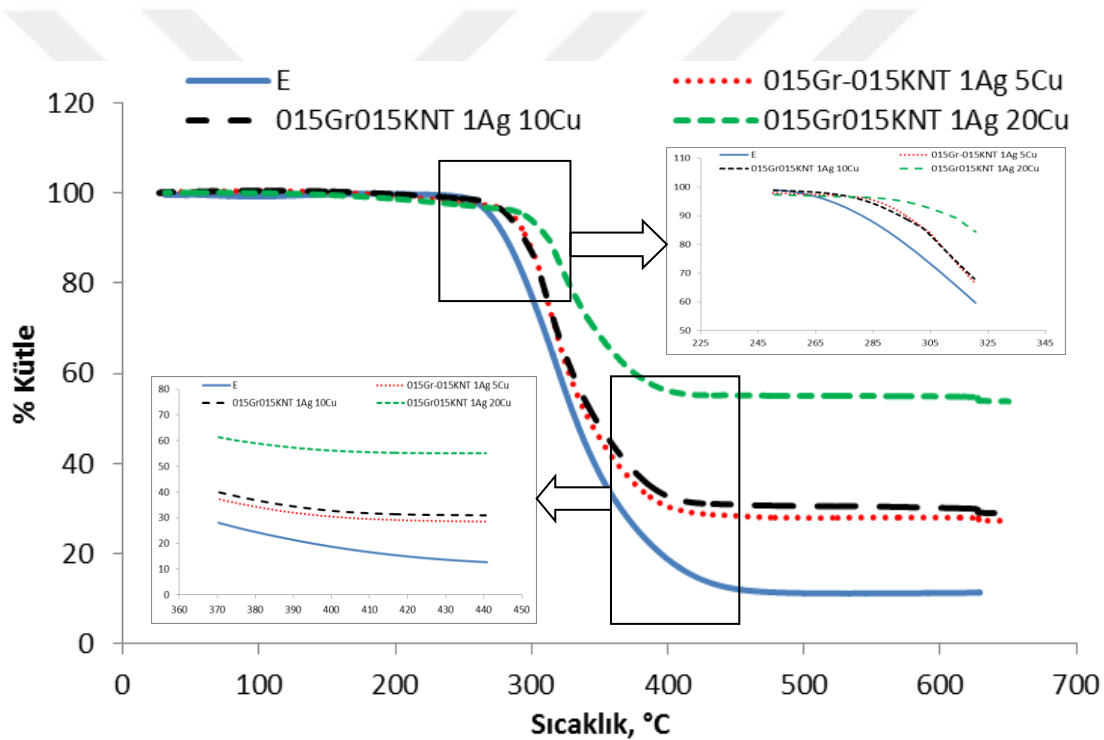
4.1.5. Grafen, KNT, gümüş ve bakır nanoparçacık katkılı epoksi yapıştırıcıların TGA ve DTA sonuçları

Son olarak saf epoksi ve grafen, KNT, gümüş ve bakır nanoparçacık katkılı yapıştırıcıların TGA ve DTA sonuçları incelenmiştir. TGA ve DTA sonuçlarına dair yapılan ayrıntılı bilgiler, sonuçlar bölümünde kapsamlı olarak verilmiştir. Şekil 4.1.5’de saf epoksi ve grafen, KNT, gümüş ve bakır nanoparçacık katkılı yapıştırıcıların DTA sonuçlarının grafiksel olarak karşılaştırılması sunulmuştur. Grafikteki saf epoksiye ait sıcaklık değerleri okunduğunda T_g değerinin $67.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve T_m sıcaklığının $276.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu görülmektedir. Saf epoksinin okunan bu değerleri ile grafen, KNT, gümüş ve bakır nanoparçacık katkılı yapıştırıcılardan en yüksek T_g değerinin $56.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık değeri ile 015Gr015KNT1Ag20Cu numunesinde, en düşük T_g değerinin $42.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık değeri ile 015Gr015KNT1Ag5Cu numunesinde olduğu tespit edilmiştir. Bu değerler yukarıda açıklandığı gibi nano parçacıkların çapraz bağ yoğunluğundaki azalmaya etkisini göstermektedir. T_m sıcaklık değerleri incelendiğinde, en yüksek T_m sıcaklık değerleri $283.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile 015Gr015KNT1Ag10Cu numunesinde, en düşük T_m sıcaklık değerleri $276.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile 015Gr015KNT1Ag20Cu numunesinde görülmüştür. Artan T_m değerleri nano parçacıkların polimer zincirine girerek termal kararlılığın artmasına neden olmuştur. Artan nano parçacık oranı ile parçacık dağılımı homojenlikten uzaklaşmış topaklanmalar oluşarak termal kararlılık olumsuz etkilenmiş saf epoksinin T_m değerine yakın erime sıcaklıkları elde edilmiştir.



Şekil 4.1.5.: Grafen, KNT, Gümüş ve Bakır Nanoparçacık ilaveli epoksi yapıştırıcıların DTA eğrileri

Şekil 4.1.5.a'da saf epoksi ve grafen, KNT, gümüş ve bakır nanoparçacık katkıli yapıştırıcıların TGA sonuçlarının grafiksel olarak karşılaştırılması sunulmuştur. Grafikten saf epoksiye ait sırasıyla % 5, %50 kütle kaybı ve tamamen bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar 270, 332 ve 443.1 °C olarak elde edilmiştir. Saf epoksinin bu bozunma değerleri ile üretilen grafen, KNT, gümüş ve bakır nanoparçacık katkıli yapıştırıcılardan en düşük bozunma sıcaklıklarına sahip yapıştırıcı sırasıyla % 5, %50 kütle kaybı ve tamamen bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar 282.72 °C, 346.61 °C ve 408.6 °C değerleriyle 015Gr015KNT1Ag10Cu numunesinde gözlemlenmiştir. İlâveten en yüksek bozunma sıcaklıklarına sahip yapıştırıcı numune sırasıyla % 5, %50 kütle kaybı ve tamamen bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar 286.2 °C, 341.78 °C ve 409.5 °C değerleriyle 015Gr015KNT1Ag5Cu numunesinde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil.4.1.5.a.: Grafen, KNT, Gümüş ve Bakır Nanoparçacık ilâvali epoksi yapıştırıcıların TGA eğrileri

Çizelge 11 de grafen, KNT, gümüş ve Cu nano parçacık katkıli epoksi yapıştırıcıların kütle kaybı, T_g ve T_m değerleri toplu halde sunulmuştur.

Çizelge 11: Saf epoksi ve grafen, KNT, gümüş ve bakır nano parçacık katkıli epoksi yapıştırıcıların termal analiz değerleri

Numune İsmi	% Kütle Kaybındaki Bozunma sıcaklıkları(°C)			T_g (°C)	T_m (°C)
	%5	%50	Kütle Kaybının Durduğu		
E	270	332	443.1	67.1	276.8
015Gr-015KNT1Ag5Cu	286.2	341.78	409.5	42.9	296.2
015Gr015KNT1Ag10Cu	282.72	346.61	408.6	45.7	283.3
015Gr015KNT1Ag20Cu	295.22	-	402.5	56.35	276.6

Grafen ve KNT lerin çapraz bağ yoğunluğunu azaltma etkisi yanında Ag nano parçacıklar gibi Cu nano parçacıklarında özellikle yüksek katkı oranlarında karışım içinde ek ısı kaynağı oluşturma etkisi bu sonuçlarda da görülmektedir.

4.2. Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantılarının Kayma Dayanım Testleri

Alüminyum iki parçanın birleştirilmesi için kullanılan yapıştırıcının mukavemetini arttırmak için yapıştırıcı reçine içerisine ağırlıkça belirlenen oranlarda nano parçacıklar ilave edilmiştir. TTBB kayma dayanımı deneyleri ASTM D1002-10 standartına uygun olarak yapılmıştır ve bu deneylerin yapılması için Shimadzu AGS-X çekme test cihazı ile Trapeziumx yazılımı kullanılmıştır. Tek taraflı bindirmeli bağlantıların ve çekme numunelerinin testleri 1 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2’de TTBB’larına ait kayma dayanım testleri sonucunda oluşan kopma yüzeylerine ait resimler sunulmuştur. Hasar yüzeyleri arasında farklı nano parçacık katkıli yapıştırıcılar için kopma yüzeylerinde belirgin bir farklılık görülmemiştir. Hemen hemen tüm yapıştırıcılarda oluşan hasarlı yüzeylerin makro görünümü yaklaşık olarak aynıdır. Şekil incelendiğinde yukarıda Şekil 3.2.3.5’deki hasar mekanizmalarından ‘c ve d’ resimleri ile gösterilen hasar mekanizmasının oluştuğu görülmektedir.

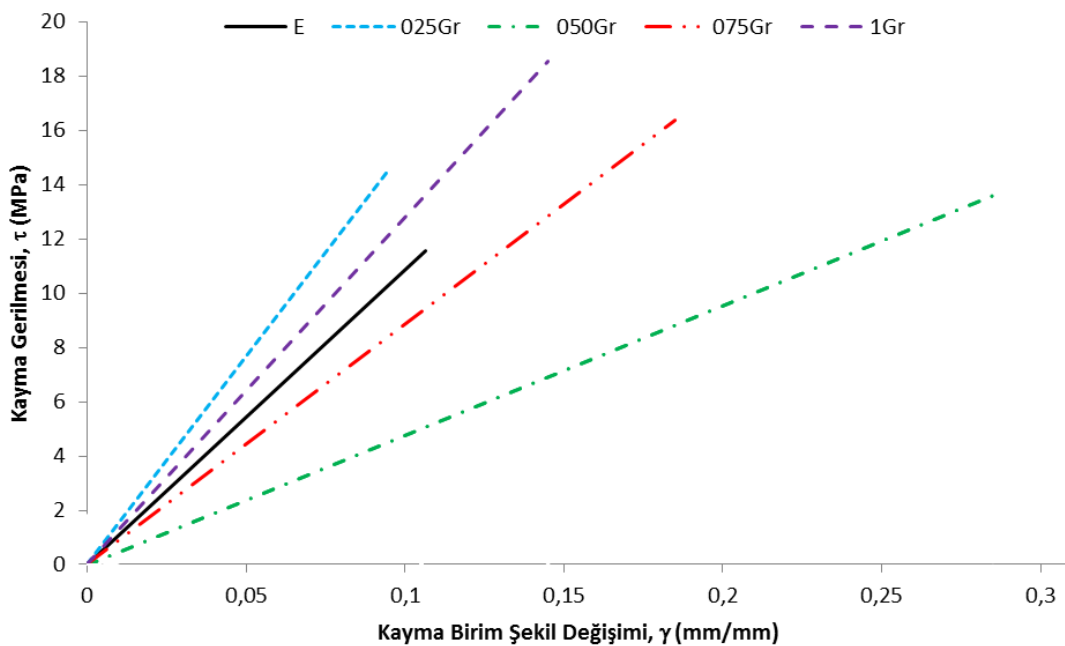


Şekil 4.2.: Kayma dayanım testleri sonucunda oluşan hasar mekanizmaları a) 015Gr015KNT b) 015Gr050KNT c) 050Gr050KNT numuneleri

Bu deneyler oda sıcaklığında yapılmıştır. Yapıştırıcıların kayma dayanımı (τ) ve kayma şekil değiştirme (γ) grafikleri verilmiştir. Grafikleri oluşturmak için kayma dayanımı değerleri; yük değerini yapıştırılan alana bölerek (Denklem 3.1), kayma şekil değiştirme değerleri ise, yapışma bölgesinin uzama miktarının yapıştırma kalınlığına bölünmesi ile hesaplanmıştır (Denklem 3.2). Epoksi reçine içerisine ilave edilen malzemeler ile elde edilen yapıştırıcıların kayma deney sonuçları alt başlıklarda aşağıda incelenmiştir.

4.2.1. Grafen katkıli yapıştırıcıların kayma testleri

Bu çalışmada ilk önce epoksi reçine içerisine ağırlıkça %0.25, 0.50, 0.75 ve 1 oranlarında grafen ilave edilerek üretilen tek taraflı bindirmeli yapıştırıcı bağlantıların kayma testleri yapılmıştır ve saf epoksi reçinenin kayma testi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Buradan elde edilen veriler aşağıdaki grafikte sunulmuştur.



Şekil 4.2.1.: Grafen katkıli epoksi yapıştırıcının kayma test sonuçları

Grafik incelendiği zaman grafen ilave edilen tüm epoksi yapıştırıcıların kayma dayanımının arttığı görülmektedir. Saf epoksinin kayma dayanımı 10.77 MPa iken, 0.25Gr numunesinin kayma dayanımı 14.36 MPa olarak bulunmuştur. Grafikte kayma dayanımının en büyük değerinin (18.51 MPa) 1Gr numunesinde olduğu görülmektedir. Ayrıca grafikten kayma birim şekil değişimi incelendiğinde en yüksek artışın 0.50Gr numunesinde olduğu saptanmıştır. Saf epoksi yapıştırıcının kayma birim şekil değişimi

0.106 mm/mm iken, en yüksek kayma birim şekil değişiminin 050Gr numunesinde 0.285 mm/mm olduğu görülmektedir. Bununla birlikte en düşük kayma birim şekil değişiminin 0.096 mm/mm değeri ile 025Gr numunesinde olduğu grafikten okunmaktadır. 025Gr numunesine ait en büyük kayma birim şekil değişiminin saf epoksiye göre daha küçük olması, grafenin karışım içerisinde homojen olarak dağılması ile epoksinin şekil değiştirebilirliğini azalttığı düşünülmektedir. Üretilen diğer grafen katkılı epoksi yapıştırıcılarının en yüksek kayma birim şekil değişimi oranının saf epoksinin kayma birim şekil değişimi oranından fazla olması ise grafenin karışım içerisinde toplanarak daha fazla şekil değişimine izin vermesi olarak değerlendirilmektedir.

Çizelge 12’de saf epoksi ve grafen katkılı epoksi yapıştırıcıların kayma testleri sonucunda elde edilen mekanik özellikleri sunulmuştur.

Çizelge 12: Saf epoksi yapıştırıcı ve Grafen katkılı epoksi yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin ortalama değerleri

Numuneler	Kayma Dayanımı(MPa)	En Büyük Kayma Birim Şekil Değişimi(mm/mm)	Kayma Modülü(GPa)	Tokluk (kJ/m ³)
E	11.75 ±2.92	0.2 ±0.18	101.6	0.57
025Gr	13.48 ±1.59	0.081 ±0.020	118.6	0.59
050Gr	12.32 ±1.97	0.15 ±0.11	51.12	2.07
075Gr	12.38 ±4.61	0.137 ±0.063	87.18	1.49
1Gr	17.7 ±2.6	0.148 ±0.048	120.75	1.26

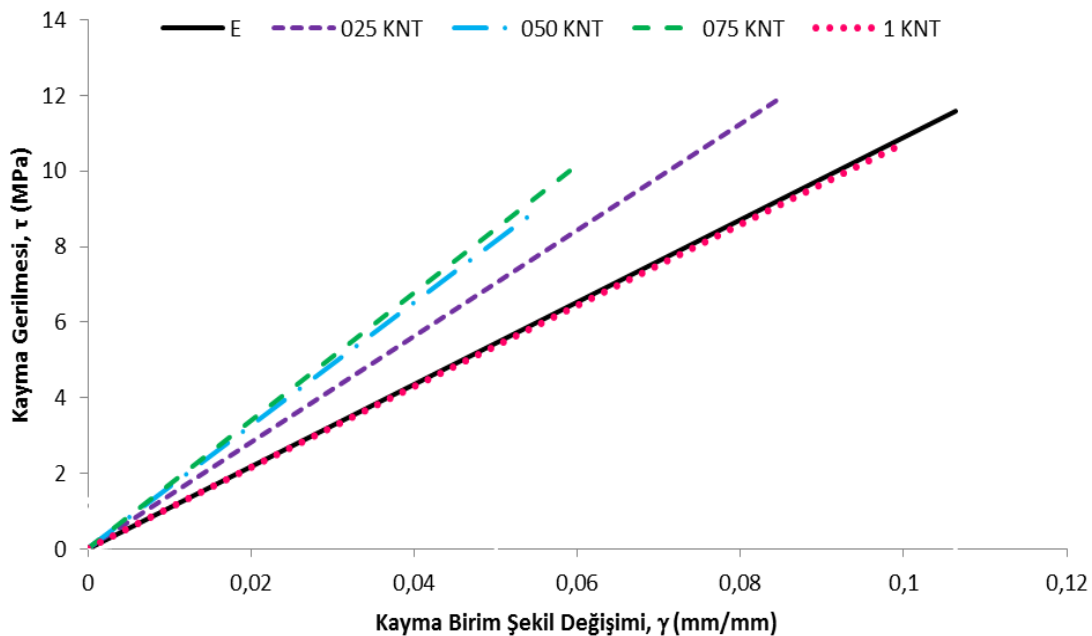
4.2.2. KNT katkılı yapıştırıcıların kayma testleri

Epoksi reçineye ağırlıkça en uygun eklenecek grafen değeri bulunduktan sonra, ağırlıkça %0.25, 0.50, 0.75 ve 1 oranında KNT katkılı epoksi esaslı yapıştırıcıların kayma test sonucu aşağıdaki Şekil 4.2.2’de sunulmuştur.

Şekil 4.2.2’de üretilen en yüksek kayma dayanımına sahip KNT katkılı epoksi esaslı yapıştırıcının saf epoksi yapıştırıcının kayma dayanımı değerine hemen hemen eşit olduğu görülmektedir. En yüksek kayma dayanımı 025KNT numunesinde görülmüştür. Saf epoksinin kayma dayanımı 10.77 MPa ve en yüksek kayma dayanımına sahip 025KNT numunesinin kayma dayanımı değeri 11.86 MPa’dır. Ayrıca en düşük kayma dayanımı 8.45 MPa değeri ile 050KNT numunesinde görülmüştür. Bununla beraber, en düşük kayma birim şekil değiştirmesi 0.05 mm/mm değeriyle 050KNT numunesinde gözlemlenmiştir. Grafenin kayma birim şekil değişimi eksenine dikkatli incelendiğinde KNT katkılı epoksi esaslı üretilen hiçbir numunenin en yüksek kayma birim şekil

değişimi değerinin saf epoksi numunenin kayma şekil değişimi değerini geçmediği görülmektedir. Saf epoksi ile kıyaslayacak olursak en yüksek kayma birim şekil değişimi değeri 0.1 mm/mm değeriyle 1KNT numunesinde görülmektedir.

KNT katkı edilmiş polimerlerde mekanik özellikler (dayanım, süneklilik, kırılma tokluğu, ara yüzey dayanımı) genellikle KNT oranının artması ile yükselir ve KNT miktarı ağırlıkça %1'e ulaştığında en büyük değerine ulaşır. Bu oranların aşılması ile birlikte mekanik özelliklerde düşüşler gözlemlenmiştir. Mekanik özelliklerdeki düşüşler nanoparçacıkların homojen dağılmayarak epoksi reçine içerisinde KNT'lerin topaklanmasından ve çözeltilerin yüksek takviye maddesi içeriğinden kaynaklanmaktadır (Sul ve ark., 2011).



Şekil.4.2.2.: KNT katkılı epoksi yapıştırıcının kayma test sonuçları

Çizelge 13'de saf epoksi ve KNT katkılı epoksi yapıştırıcıların kayma testleri sonucunda elde edilen mekanik özellikleri sunulmuştur.

Çizelge 13: Saf epoksi yapıştırıcı ve KNT katkılı epoksi yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin ortalama değerleri

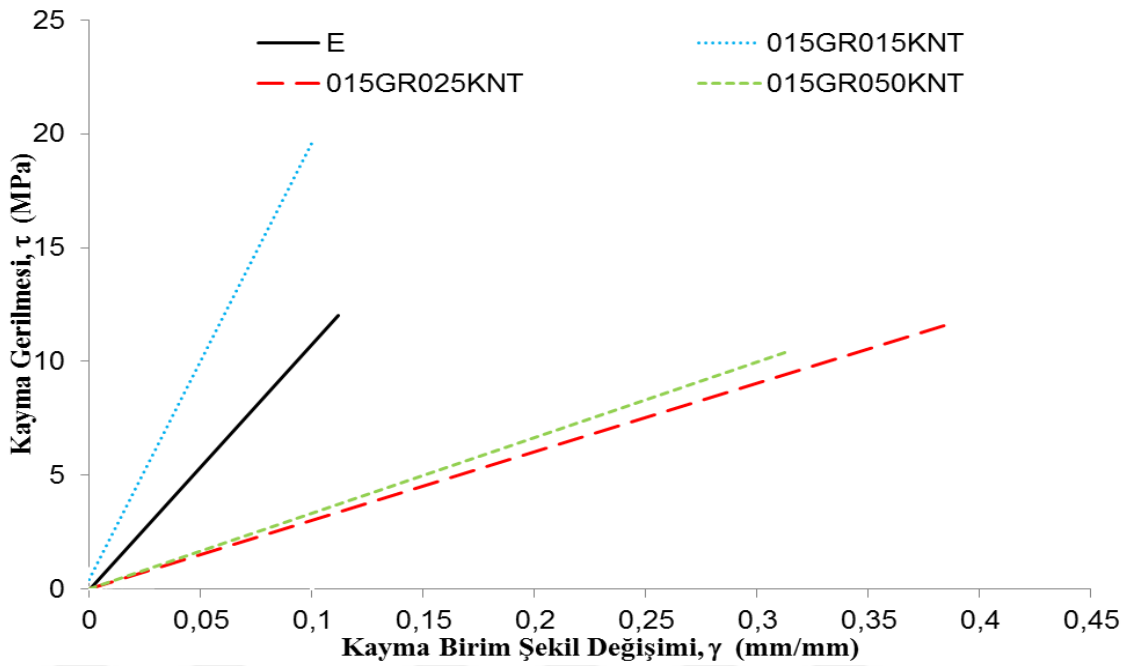
Numuneler	Kayma Dayanımı(MPa)	En Büyük Kayma Birim Şekil Değişimi(mm/mm)	Kayma Modülü(GPa)	Tokluk (kJ/m ³)
E	11.75 ±2.92	0.2 ±0.18	101.6	0.57
0.025KNT	9.55 ±2.97	0.07 ±0.018	131.29	0.47
0.050KNT	7.2 ±3.04	0.0392 ±0.068	194.4	0.24
0.075KNT	8.29 ±2.09	0.072 ±0.033	144	0.25
1KNT	7.55 ±2.88	0.121 ±0.047	61.5	0.3

4.2.3. Grafen ve KNT katkı yapıştırıcıların kayma testleri

Düşük katkı oranlarında dayanım değerinin fazla, şekil değiştirebilirliğin az olması sebebiyle hibrit yapıştırıcılar için en düşük grafen ve KNT katkı oranlarının ağırlıkça %0.15 olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Testler üç gruba ayrılmıştır. Grupların oluşturulmasında grafen oranı sabit tutulmuş ve KNT oranı arttırılarak karşılaştırma yapılmıştır. Birinci grupta grafen oranı ağırlıkça %0.15 olarak sabit tutulmuş, buna karşılık KNT oranı ağırlıkça %0.15, 0.25 ve 0.50 olarak seçilmiştir. İkinci grupta grafen oranı ağırlıkça % 0.25 olarak sabit tutulurken KNT oranı ağırlıkça %0.15, 0.25 ve 0.50 olarak seçilmiştir. Son grupta ise grafen oranı ağırlıkça %0.50 olarak sabit tutulmuş ve KNT oranı ağırlıkça %0.15, 0.25 ve 0.50 olarak seçilmiştir.

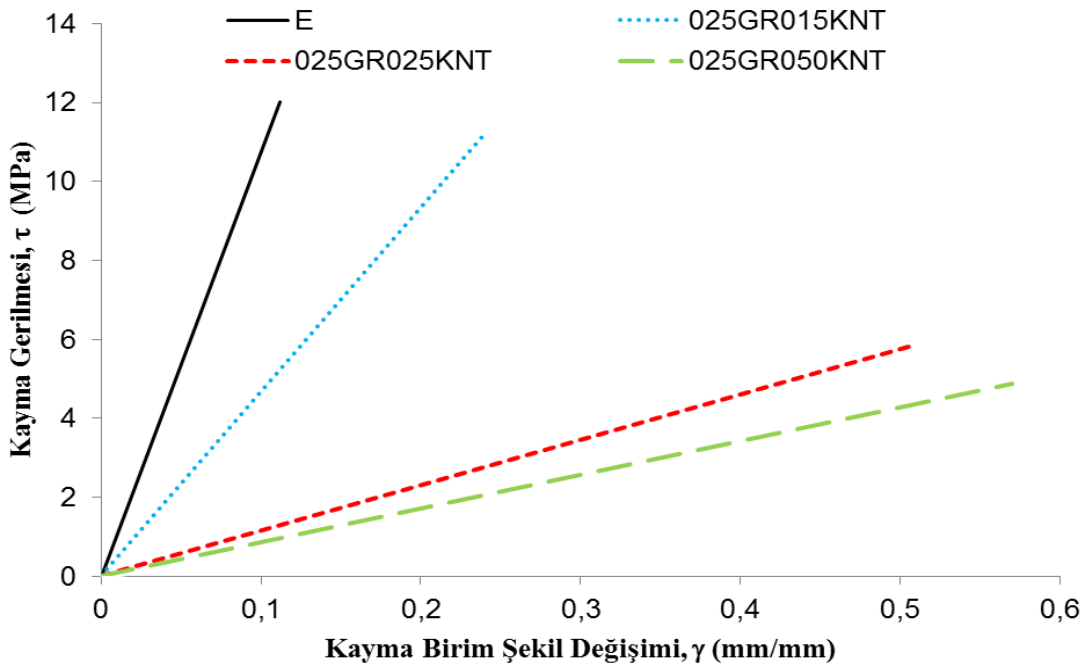
İlk olarak Şekil 4.2.3.1’de görüldüğü üzere grafen oranı ağırlıkça % 0.15’de sabit tutulmuş ve KNT oranı kademeli olarak arttırılmıştır. Saf epoksi ile karşılaştırıldığında en yüksek kayma dayanımı 19.39 MPa ile 015Gr015KNT numunesinde gözlemlenmiştir. KNT eklenmesinin dayanım değerinde azalmaya sebep olduğu görülmektedir. En yüksek kayma dayanımı 015Gr015KNT numunesine olmasına karşın, en yüksek kayma birim şekil değiştirmesi 0.385 mm/mm değeriyle 015Gr025KNT numunesinde olduğu bulunmuştur. Bu sonucun bulunmasındaki sebebin, yapıştırıcıya eklenen KNT oranının artmasıyla KNT’lerin uzama kabiliyeti yüksek olduğu için daha fazla uzama elde edildiği düşünülmektedir.

Çizelge 5’de KNT’lerin en büyük uzama oranında %10 olarak verilmesi bu sonucu desteklemektedir. Kayma birim şekil değişimi $\Delta L/t$ denkleminden bulunmuştur. Buradaki ΔL uzaması dinamik extansometre ile sadece yapışma bölgesindeki uzamalar ölçülerek belirlenmiştir.



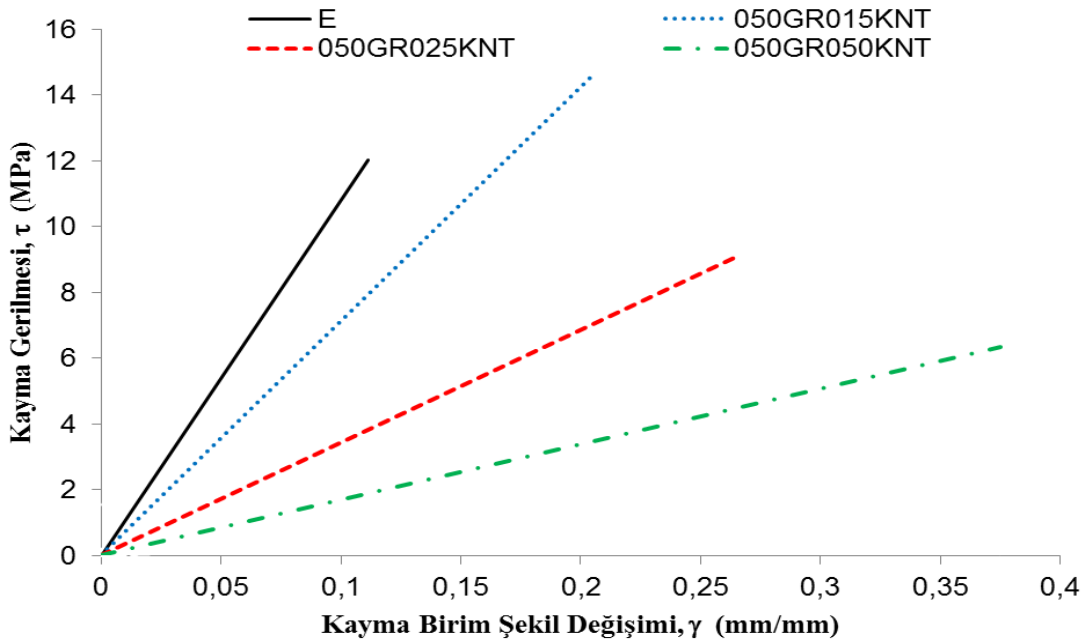
Şekil 4.2.3.1.: %0.15 Grafen ve %0.15, 0.25 ve 0,50 oranında KNT'ün kayma dayanımları

Şekil 4.2.3.2'deki grafikte ağırlıkça %0.25 grafen oranı sabit tutulmuş ve KNT oranı artırılarak değişik oranlardaki karışımlarla oluşan yapıştırıcılar üretilmiştir. Üretilen yapıştırıcı numuneleri ve saf epoksinin kayma dayanımı ve kayma birim şekil değiştirme grafiği çizilmiş ve en yüksek kayma dayanımının 025Gr015KNT numunesinde olduğu bulunmuştur. Saf epoksi ile karşılaştırıldığında, saf epoksinin kayma dayanımı 10.77 MPa olmasına karşın 025Gr015KNT numunesinin kayma dayanımının 12.04 MPa'a arttığı bulunmuştur. Ayrıca Şekil 4.2.3.2'deki grafikten en yüksek kayma birim şekil değiştirmesi 0.58 mm/mm değeriyle 025Gr050KNT numunesinde gözlemlenmiştir. Kayma birim şekil değiştirmelerinin KNT oranı arttıkça daha fazla olması KNT'ün epoksi ve grafene göre daha fazla şekil değiştirebilmesinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Kayma dayanım değeri ağırlıkça %0.15 grafen katkılı hibrit yapıştırıcıda olduğu gibi KNT oranı arttıkça azalmaktadır.



Şekil.4.2.3.2.:%0.25 Grafen ve %0.15, 0.25 ve 0,50 oranında KNT'ün kayma dayanımları

Son olarak %0.50 oranında grafen sabit tutulurken KNT oranı artırılarak üretilen yapıştırıcıların mekanik özellikleri saf epoksinin mekanik özellikleri ile karşılaştırılmıştır ve bu karşılaştırma Şekil 4.2.3.3'de verilmiştir. Grafik incelendiği zaman kayma dayanımının en yüksek olduğu numunenin 050Gr015KNT olduğu görülmektedir. Saf epoksinin kayma dayanımı 10.77 MPa olmasına rağmen, 050Gr015KNT numunesinin kayma dayanımının 14.14 MPa olduğu grafikten okunmaktadır. Bununla beraber en yüksek kayma birim şekil değiştirme değerinin 050Gr050KNT değerinde olduğuda grafikten gözlemlenmektedir. Saf epoksinin en büyük kayma birim şekil değiştirme değeri 0.106 mm/mm olmasına karşın, 050Gr050KNT numunesinin en büyük kayma birim şekil değiştirme değerinin 0.375 mm/mm olduğu grafikten okunmuştur. Yukarıda açıklandığı gibi KNT katkısı arttıkça kayma birim şekil değiştirmesi artmasına rağmen kayma dayanımında düşüşler gözlemlenmiştir.



Şekil.4.2.3.3.: %0.50 Grafen ve %0.15, 0.25 ve 0.50 oranında KNT'ün kayma dayanımları

Çizelge 14'de saf epoksiyle beraber grafen ve KNT katkılı epoksi yapıştırıcıların kayma testleri sonucunda elde edilen mekanik özellikleri sunulmuştur.

Çizelge 14: Saf epoksi yapıştırıcı ve Grafen ve KNT katkılı epoksi yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin ortalama değerleri

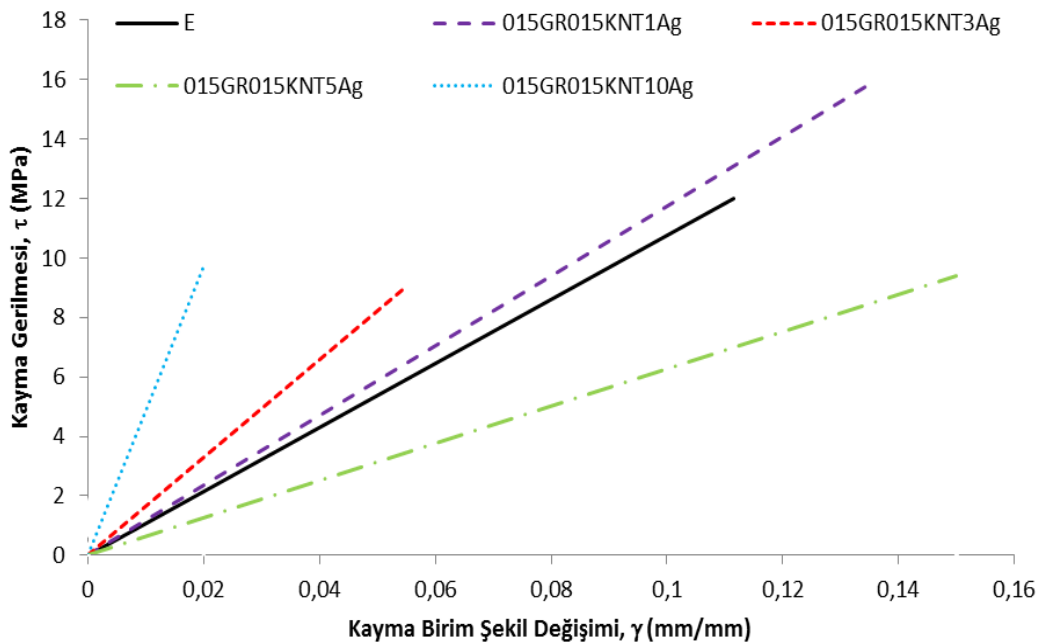
Numuneler	Kayma Dayanımı(MPa)	En Büyük Kayma Birim Şekil Değişimi(mm/mm)	Kayma Modülü(GPa)	Tokluk (kJ/m ³)
E	11.75 ±2.92	0.2 ±0.18	101.6	0.57
015Gr015KNT	17.4 ±2.54	0.745 ±0.71	193.9	0.96
025Gr015KNT	11.52 ±2.95	0.948 ±0.73	51.41	1.48
050Gr015KNT	12.82 ±2.68	0.587 ±0.473	65.56	1.37

4.2.4. Grafen, KNT ve gümüş nanoparçacık katkılı yapıştırıcıların kayma testleri

Grafen ve KNT katkılı epoksi esaslı yapıştırıcıların deney sonuçları incelendiğinde en iyi sonucu 015GR015KNT numunesinin verdiği tespit edilmiş ve bu aşamada bu numunenin üzerinde ağırlıkça değişik oranlarda gümüş nanoparçacık eklenerek üretilen epoksi bazlı yapıştırıcıların mekanik deneylerinin yapılması ile devam edilmesi uygun görülmüştür.

Aşağıda Şekil 4.2.4'de sunulan grafikte saf epoksi yapıştırıcı ile nanoparçacık katkılı epoksi bazlı yapıştırıcıların kayma dayanımı-kayma birim şekil değişimi sunulmuştur. Grafik incelendiği zaman saf epoksiye göre kayma dayanımının en fazla 015Gr015KNT1Ag numunesinde arttığı bulunmuştur. Saf epoksinin kayma dayanımı

10.77 MPa olduğu görülürken, 015Gr015KNT1Ag numunesinin kayma dayanımı 15.64 MPa olarak tespit edilmiştir. Ayrıca saf epoksinin en büyük kayma birim şekil değişimi 0.106 mm/mm iken 015Gr015KNT5Ag numunesinin en büyük kayma birim şekil değişimi 0.15 mm/mm olarak bulunmuştur. Yapıştırıcı içerisine ilave edilen gümüş nano parçacık oranında artışla beraber kayma dayanımında düşüş gözlemlenmesine karşın, kayma birim şekil değiştirme oranında artış gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin saf epoksiye ilave edilen katkı maddelerinin yapıştırıcı içerisinde homojen olarak dağıtılamadığından dolayı oluşan topaklanmalar olduğu ve yapıştırıcı içerisinde oluşan bu topaklanmaların kayma dayanımının azalmasına sebep olurken, kayma birim şekil değişiminin artmasına sebep olduğu düşünülmektedir.



Şekil.4.2.4.: Grafen, KNT ve Gümüş nanoparçacık katkılı yapıştırıcıların kayma dayanım testleri

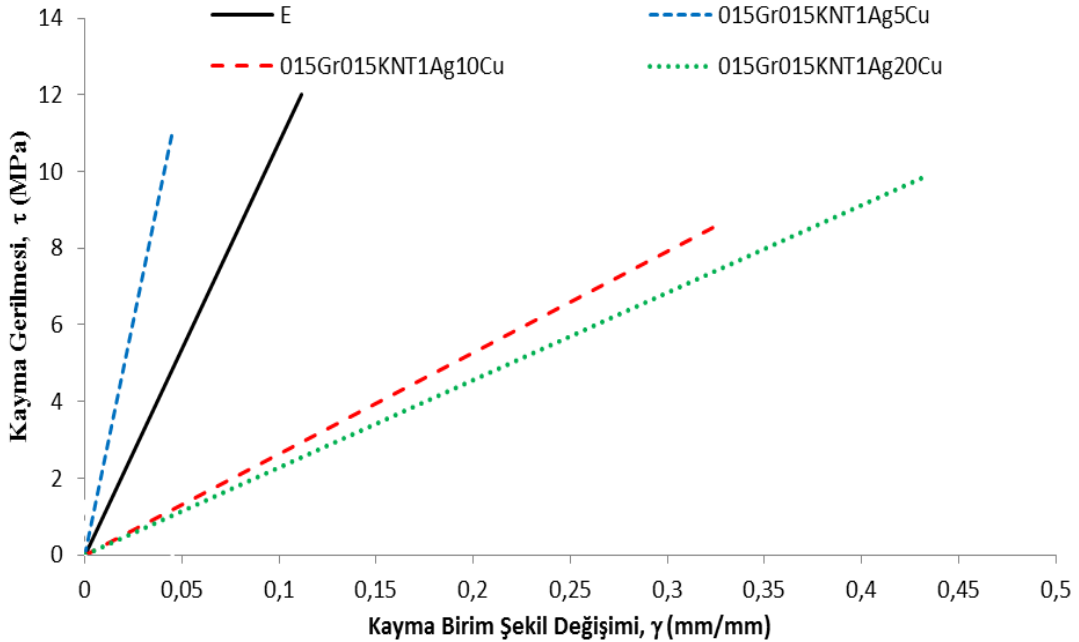
Çizelge 15’de saf epoksiyle beraber grafen, KNT ve gümüş nano parçacık katkılı epoksi yapıştırıcıların kayma testleri sonucunda elde edilen mekanik özellikleri sunulmuştur.

Çizelge 15: Saf epoksi yapıştırıcı, Grafen, KNT ve gümüş nanoparçacık katkılı epoksi yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin ortalama değerleri

Numuneler	Kayma Dayanımı(MPa)	En Büyük Kayma Birim Şekil Değişimi(mm/mm)	Kayma Modülü(GPa)	Tokluk (kJ/m ³)
E	11.75 ±2.92	0.2 ±0.18	101.6	0.57
015Gr015KNT1Ag	13.27 ±2.81	0.101 ±0.042	91.4	0.83
025Gr015KNT3Ag	7.51 ±1.53	0.089 ±0.064	163.45	0.24
050Gr015KNT5Ag	10.07 ±2.99	0.154 ±0.07	68	0.76
050Gr015KNT10Ag	11.31 ±3.36	0.148 ±0.127	403	0.08

4.2.5. Grafen, KNT, gümüş nanoparçacık ve bakır nanoparçacık katkılı yapıştırıcıların kayma testleri

Bir önceki aşama incelendiğinde en iyi mekanik dayanıma sahip olan 015Gr015KNT1Ag numunesinin içerisine değişik oranlarda bakır nanoparçacık ilave edilerek deneylere devam edilmiştir. Şekil 4.2.5’de sunulan grafikte, nanoparçacık katkılı yapıştırıcılar ve saf epoksi yapıştırıcı incelenmiştir. Burada saf epoksi ile kıyaslandığı zaman en yüksek kayma dayanımı 015Gr015KNT1Ag20Cu numunesinde gözlemlenmiştir. Saf epoksinin kayma dayanımı 10.77 MPa iken, 015Gr015KNT1Ag5Cu numunesinin kayma dayanımı 11.20 MPa olarak bulunmuştur. Ayrıca en yüksek kayma birim şekil değişiminin 0.435 mm/mm değeriyle aynı şekilde 015Gr015KNT1Ag20Cu numunesinde olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yapıştırıcı içerisine ilave edilen bakır nanoparçacık oranı arttıkça kayma dayanımında düşüş gözlemlenmesiyle beraber kayma birim şekil değiştirme oranında artış tespit edilmiştir. Bunun sebebi olarak yukarıda açıklandığı gibi yapıştırıcı içerisinde oluşan topklanmalar olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.2.5.: Grafen, KNT, Gümüş ve Bakır nanoparçacık katkılı yapıştırıcıların kayma dayanım testleri

Çizelge 16’da saf epoksiyle beraber grafen, KNT, gümüş ve bakır nano parçacık katkılı epoksi yapıştırıcıların kayma testleri sonucunda elde edilen mekanik özellikleri sunulmuştur.

Çizelge 16: Saf epoksi yapıştırıcı, Grafen, KNT, gümüş ve bakır nanoparçacık katkılı epoksi yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin ortalama değerleri

Numuneler	Kayma Dayanımı(MPa)	En Büyük Kayma Birim Şekil Değişimi(mm/mm)	Kayma Modülü(GPa)	Tokluk (kJ/m ³)
E	11.75 ±2.92	0.2 ±0.18	101.6	0.57
015Gr015KNT1Ag5Cu	7.92 ±1.38	0.315 ±0.29	169.11	0.17
025Gr015KNT1Ag10Cu	10.88 ±1.9	0.279 ±0.087	34.98	1.84
050Gr015KNT1Ag20Cu	10.85 ±2.75	0.711 ±0.35	12.67	6.46

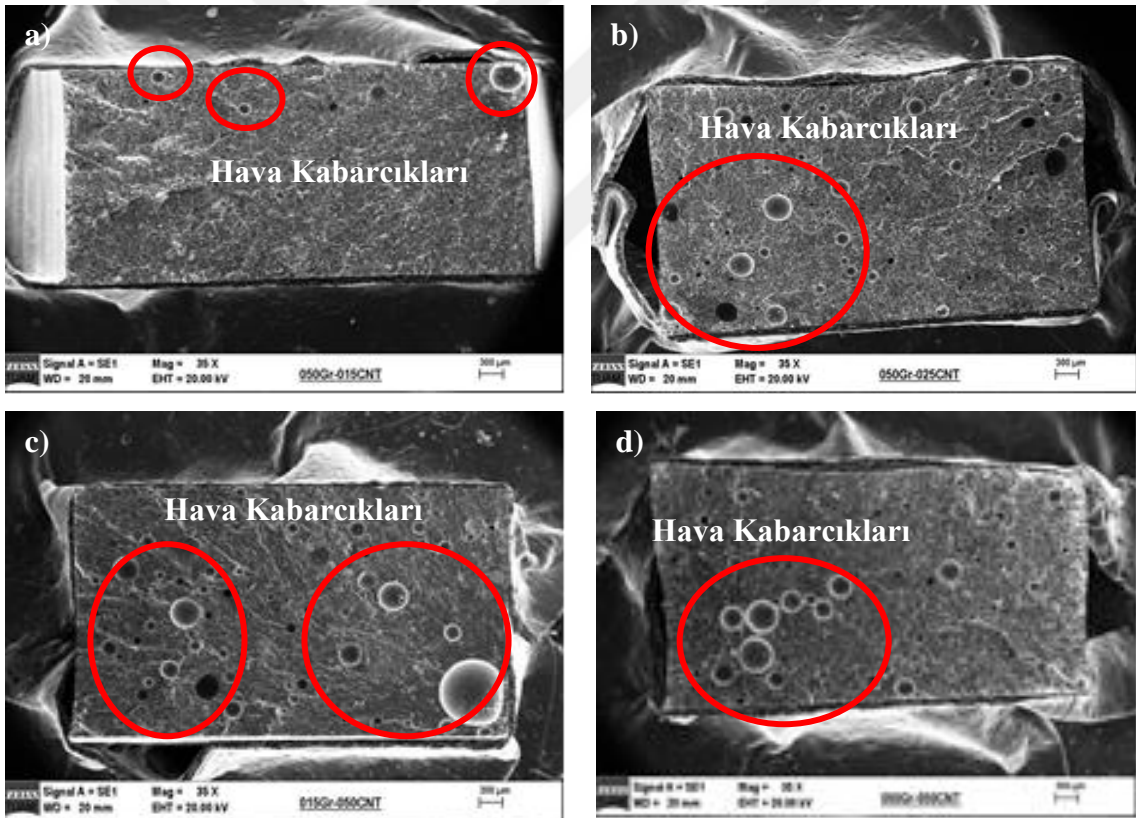
4.3. Çekme Numunelerinin Test Sonuçları

Çekme numunelerinin üretiminde ASTM D638-10 standardı baz alınarak numunelerin üretimin gerçekleştirildiğini yukarıda belirtilmişti. Deneylerin kronolojik olarak ilerleyişi genel olarak ilk başta ağırlıkça %0.25, 0.50, 0.75 ve 1 oranlarında grafen katkılı epoksi esaslı yapıştırıcıların üretimi ve %0.25, 0.50, 0.75 ve 1 oranlarında KNT katkılı epoksi yapıştırıcıların üretimiyle başlamıştır. Ardından üretilen bu numunelerin en uygun karıştırma oranları belirlenmiş ve bu orana ağırlıkça %1, 3, 5 ve 10 oranlarında gümüş nanoparçacık eklenmiştir. Yapılan çekme testleri sonucunda en iyi sonucu veren numuneye de ağırlıkça %5, 10 ve 20 oranlarında bakır nanoparçacıklar eklenerek hibrit yapıştırıcılar üretilmiştir. Bu üretilen yapıştırıcıların çekme testleri sonucunda bulunan bulgular son olarak bir bütün halinde değerlendirilmiş ve son kısımda verilmiş olan sonuçlar elde edilmiştir.

4.3.1. Grafen katkılı yapıştırıcıların çekme testleri

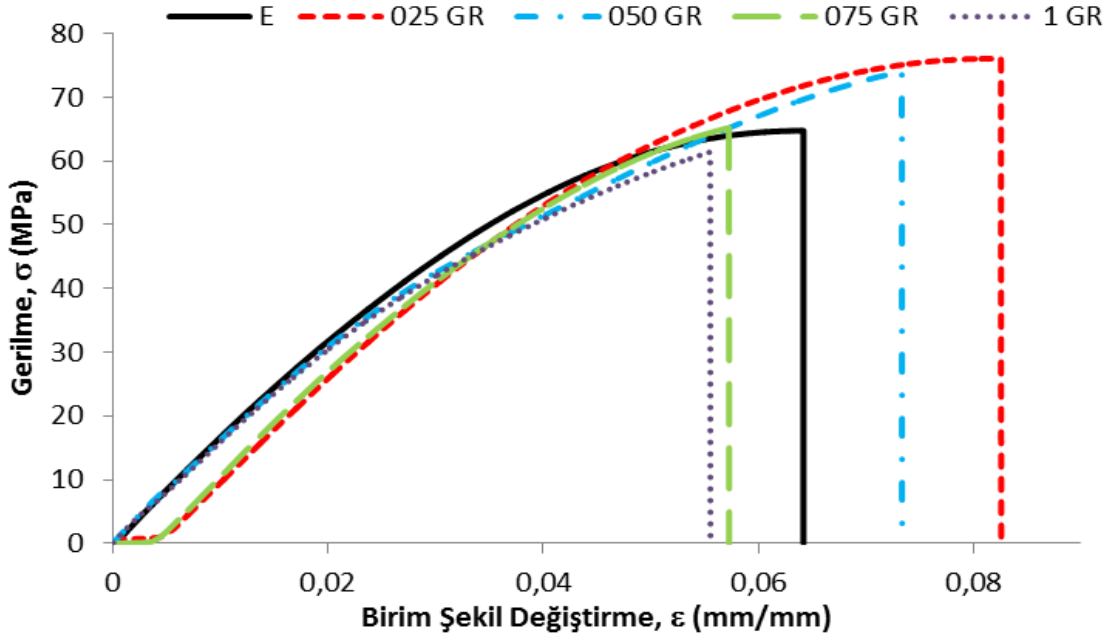
Şekil 4.3.1'de grafen katkılı epoksi bazlı yapıştırıcı numuneleri ile saf epoksi yapıştırıcının gerilme-birim şekil değiştirme grafiği sunulmuştur. Saf epoksi yapıştırıcının çekme dayanımı 64.75 MPa iken, en yüksek değere sahip 025Gr numunesinin çekme dayanımının 76.03 MPa olduğu bulunmuştur. Bununla beraber grafikten en yüksek birim şekil değiştirmenin 0.082 mm/mm değeriyle yine 025Gr numunesinde olduğu görülmektedir. Ayrıca grafikte en düşük çekme dayanımı değeri 1Gr numunesinden okunmaktadır. 1Gr numunesinin çekme dayanımı 61.4 MPa olduğu görülmektedir. Bu numunenin en büyük birim şekil değiştirme oranı da en düşük değer olan 0.055 mm/mm'dir. Epoksi içerisine ilave edilen grafenin miktarı arttırıldıkça çekme dayanımı ve birim şekil değiştirme oranında azalmaya sebep olduğu görülmüştür. TTBB testlerinin sonuçları ile karşılaştırıldığında, görülen bu farklılığın

çekme test numunesinin kesitinin daha büyük olması ve bu kesit içerisinde Şekil 4.3’de verilen bir çekme numunesinin SEM görüntüsünde görüldüğü gibi kalmış hava kabarcıklarının buna sebep olduğu düşünülmektedir. Yapıştırıcı numuneleri içerisindeki nanoparçacık katkı oranları arttıkça kesitte tespit edilen hava kabarcıklarının miktarı artmaktadır. Bunun sonucunda yük taşıyabilen net kesit alanı azalmış olmaktadır. Buda hesaplanan gerilmenin daha küçük çıkmasına neden olmuştur. Bu durum üretilen tüm nanoparçacık katkılı (grafen, KNT, gümüş ve bakır) yapıştırıcı numunelerinde görülmüştür. Hava kabarcıklarının azaltılması için nanoparçacık katkılı yapıştırıcının daha uzun süre vakumda bekletilmesi gerekir. Ancak kürleştirici katıldıktan sonra üreticinin tavsiyesi doğrultusunda en fazla 20 dakika içerisinde yapıştırma işleminin tamamlanması gerekmektedir. Bundan dolayı, çok uzun sürelerde üretilen yapıştırıcı numuneler vakumda bekletilememiştir.



Şekil 4.3.: Bazı çekme numunelerine ait kırık yüzeyinde tespit edilen hava kabarcıklarının SEM görüntüleri a) 050Gr015CNT, b) 050Gr025CNT, c) 015Gr050CNT, d) 050Gr050CNT

Şekil 4.4.2 , Şekil 4.4.2.1 ve Şekil 4.4.2.2’de verilen çekme numunelerine ait kırılma yüzeylerinin SEM görüntülerinde bu kabarcıklar büyütme oranının çok yüksek olmasından dolayı görülmemektedir.



Şekil 4.3.1.: Grafen katkılı epoksi yapıştırıcıların çekme dayanım testi

Çizelge 17’de saf epoksi yapıştırıcı ve grafen katkılı epoksi yapıştırıcıların çekme test sonuçlarında elde edilen çekme dayanımı ve en büyük birim şekil değıştirme değeri sunulmuştur.

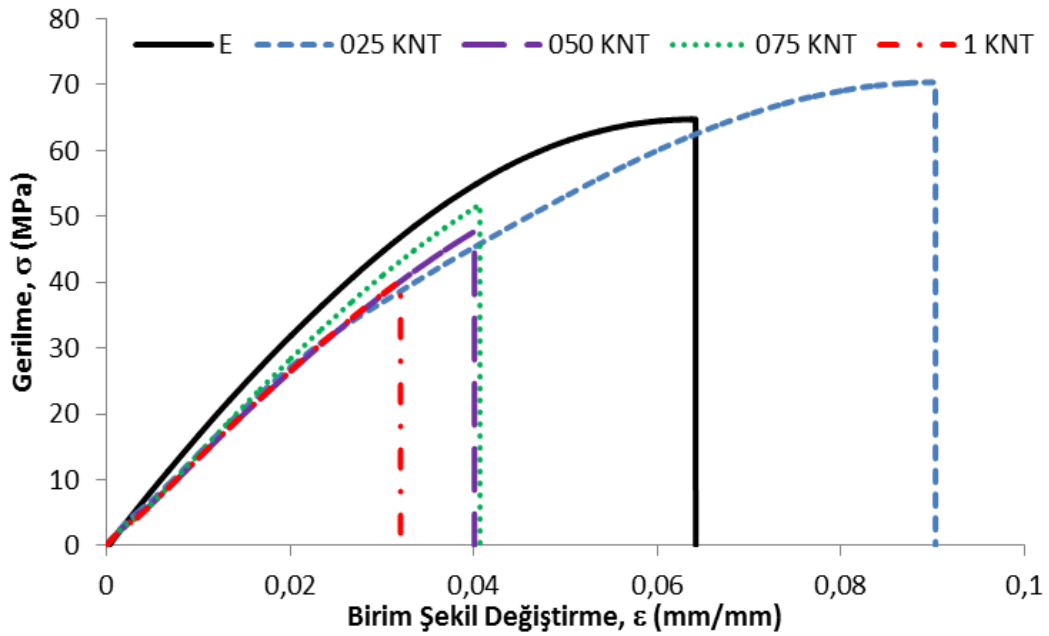
Çizelge 17: Saf epoksi yapıştırıcı ve Grafen katkılı epoksi yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin ortalama değeri

Numuneler	Çekme Dayanımı(MPa)	En büyük Birim Şekil Değişimi(mm/mm)
E	58.7 ±8.63	0.061 ±0.007
025Gr	63.75±18.65	0.0949 ±0.081
050Gr	68.45±4.94	0.069 ±0.008
075Gr	61.37 ±4.61	0.058 ±0.002
1Gr	55.96 ±10.46	0.057 ±0.017

4.3.2. KNT katkılı yapıştırıcıların çekme testleri

KNT katkılı epoksi esaslı üretilen yapıştırıcı numuneleri ve saf epoksinin karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.3.2’de verilmiştir. Şekildeki grafik incelendiği zaman saf epoksiye göre çekme dayanımı artan tek numunenin 025KNT numunesi olduğu görülmektedir. Saf epoksinin çekme dayanımı 64.75 MPa iken, 025KNT numunesinin çekme dayanımı 70,37 MPa olduğu bulunmuştur. En küçük çekme dayanımı 1KNT numunesinde elde edilmiştir. 1KNT numunesinin çekme dayanımı 40.26 MPa olarak tespit edilmiştir. Bu değerlerle birlikte en yüksek birim şekil değıştirme oranı

025KNT’de ,en küçük birim şekil değıştirme oranı ise 1KNT’de sırasıyla 0.0903 ve 0.032 mm/mm olarak bulunmuştur.



Şekil .4.3.2.: KNT katkılı epoksi yapıştırıcıların çekme testi

Çizelge 18’de saf epoksi yapıştırıcı ve KNT katkılı epoksi yapıştırıcıların çekme test sonuçlarında elde edilen çekme dayanımı ve en büyük birim şekil değıştirme değeri sunulmuştur.

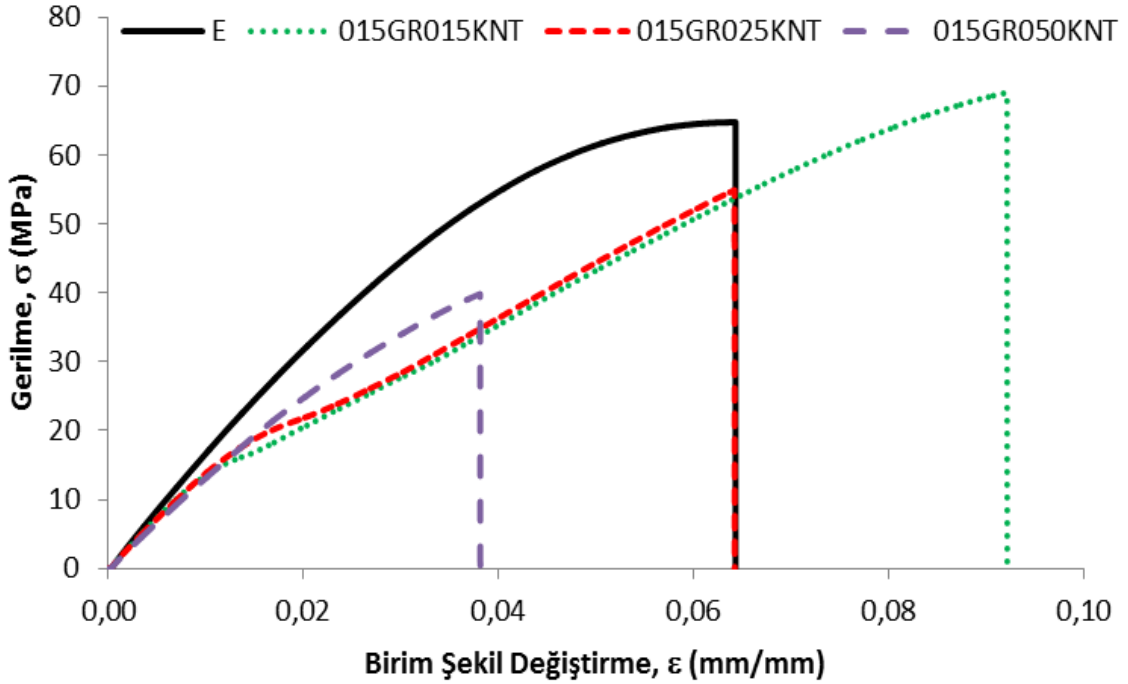
Çizelge 18: Saf epoksi yapıştırıcı ve KNT katkılı epoksi yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin ortalama değeri

Numuneler	Çekme Dayanımı(MPa)	En büyük Birim Şekil Değışimi(mm/mm)
E	58.7 ±8.63	0.061 ±0.007
025KNT	66.48 ±7.59	0.081 ±0.020
050KNT	42.32 ±5.97	0.051 ±0.08
075KNT	45.38 ±8.61	0.045 ±0.063
1KNT	37.7 ±6.26	0.024 ±0.048

4.3.3. Grafen ve KNT katkılı epoksi esaslı yapıştırıcıların çekme testleri

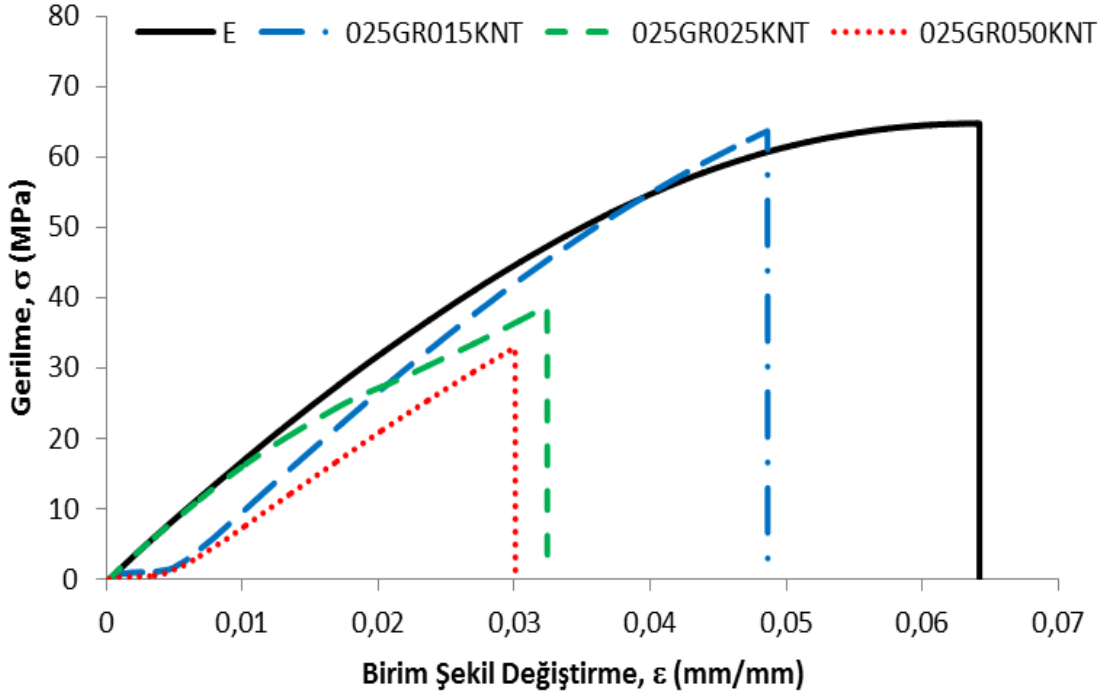
Üretilen yapıştırıcıların çekme testlerine ait grafikler Şekil 4.3.3.1’de verilmiştir. Çekme dayanımları grafikte görüldüğü üzere saf epoksinin çekme dayanımı ve uzama miktarı ile kıyaslanmıştır. Saf epoksinin çekme dayanımı 64.75 MPa iken, 015Gr015KNT numunesinin çekme dayanımı 69 MPa olarak bulunmuştur. Saf epoksiye göre en düşük çekme dayanımı ise 015Gr050KNT numunesinde 39.82 MPa olarak tespit edilmiştir. Birim şekilde değıştirme oranı kıyaslandığı zaman saf epoksinin

en büyük birim şekil değiştirme oranı 0.063 mm/mm iken, en yüksek değer olan 015Gr015KNT numunesinin ve en düşük birim şekil değiştirme değeri 015Gr050KNT numunesinde gözlemlenmiştir ve sırasıyla 0.092 mm/mm ve 0.038 mm/mm olarak bulunmuştur. Grafen oranı %0.15 olarak sabit tutulurken, KNT oranı %0.15, 0.25 ve 0.50 olarak seçilmiştir.



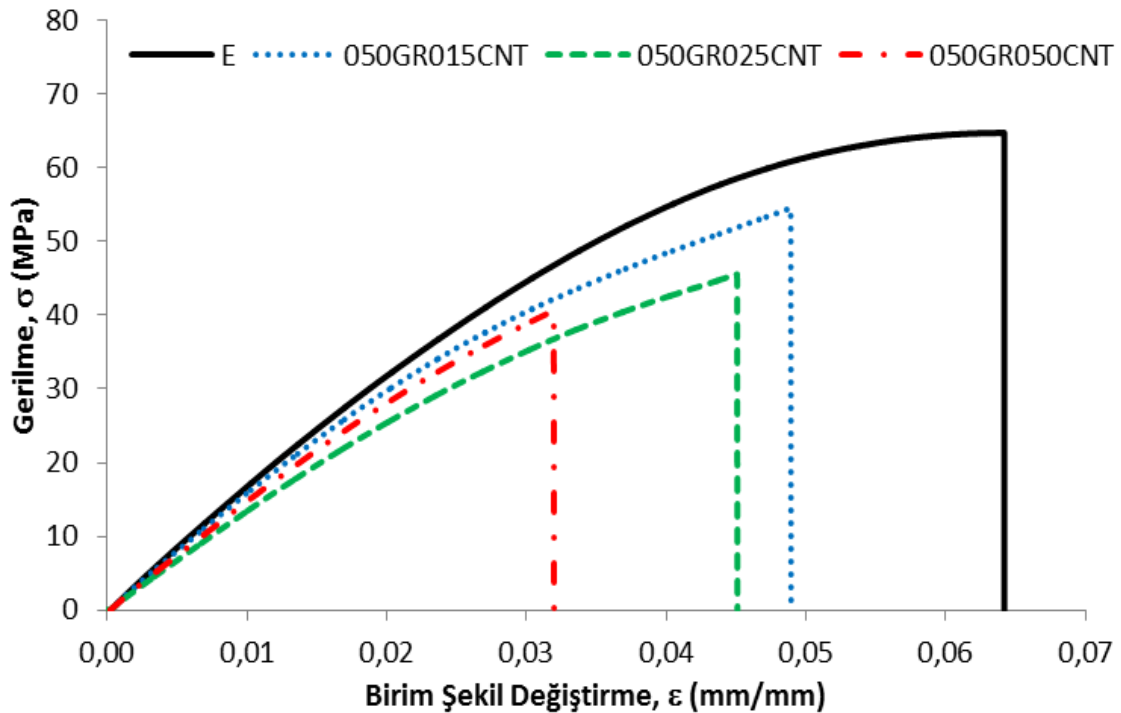
Şekil 4.3.3.1.: Ağırlıkça %0.15 Grafen ve artan oranlarda KNT'lerin çekme dayanımı testleri

Şekil 4.3.3.2.'de ise ağırlıkça %0.25 oranında grafen sabit tutulmuş ve ağırlıkça yukarıda belirtilen oranlarda KNT katkılı epoksi bazlı yapıştırıcılara ait değerlerdir. Şekil 4.3.3.2'deki grafik tanımlandığında çekme dayanımının en yüksek değeri saf epoksi yapıştırıcıda olduğu görülmektedir. Saf epoksi yapıştırıcının çekme dayanımı 64.75 MPa olmasına karşın, üretilen yapıştırıcılardan en yüksek çekme dayanımı 63.66 MPa değeriyle 025Gr015KNT numunesinde görülmüştür. En düşük çekme dayanımı ise 32.91 MPa değeriyle 025Gr050KNT numunesinde tespit edilmiştir. En büyük birim şekil değiştirme oranı olarak saf epoksi ile üretilen nanoparçacıklı yapıştırıcılar karşılaştırıldığında yine en yüksek değer 0.048 mm/mm oranıyla 025Gr015KNT numunesinde bulunmuştur. Saf epoksinin en yüksek birim şekil değiştirme oranı 0.063 mm/mm olmasına rağmen en küçük birim şekil değiştirme oranı 025Gr050KNT numunesinde 0.030 olarak gözlemlenmektedir.



Şekil 4.3.3.2.: Ağırlıkça %0.25 Grafen ve artan oranlarda KNT'lerin çekme dayanımı testleri

Üçüncü aşamada ise grafenin ağırlıkça karışımdaki oranı %0.50 olarak sabit tutulmuş ve KNT oranı kademeli olarak arttırılmıştır. Şekil 4.3.3.3'de saf epoksi yapıştırıcı ile ağırlıkça %0.50 sabit tutulan grafen ve kademeli olarak arttırılan KNT katkılı epoksi bazlı yapıştırıcıların gerilme-birim şekil değiştirme grafiği verilmiştir. Grafikten yola çıkarak saf epoksi yapıştırıcı ile en yüksek çekme dayanımını kıyaslayacak olur isek, saf epoksi yapıştırıcının çekme dayanımı 64.75 MPa olmasına rağmen, en yüksek çekme dayanımı 050Gr015KNT numunesinde ve en düşük çekme dayanımı 050Gr050KNT numunesinde sırasıyla, 54.52 MPa ve 40.58 MPa olarak bulunmuştur. Aynı şekilde en yüksek birim şekil değiştirme oranları kıyaslanacak olunursa, saf epoksinin en yüksek birim şekil değiştirme oranı 2.12 mm/mm olarak gözlenmekte, üretilen yapıştırıcılardan en büyük değer 050Gr015KNT numunesinde ve en düşük birim şekil değiştirme oranının 050Gr050KNT numunesinde sırasıyla, 0.048 mm/mm ve 0.031 mm/mm olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin, katkı oranlarındaki değerler arttıkça yapıştırıcı içerisindeki topaklanmaların fazlaştığı ve bundan dolayı birim şekil değiştirme oranının düştüğü değerlendirilmektedir. Sonuçta katkı maddeleri olan KNT'lerinin çap ve boyu ile grafenlerin yüzey alanlarının yapıştırıcının mekanik özelliklerine çok fazla etki ettiği düşünülmektedir.



Şekil 4.3.3.3.: Ağırlıkça %0.50 Grafen ve artan oranlarda KNT'lerin çekme dayanımı testleri

Çizelge 19'da saf epoksi yapıştırıcıyla beraber grafen ve KNT katkılı epoksi yapıştırıcıların çekme test sonuçlarında elde edilen çekme dayanımı ve en büyük birim şekil değiştirme değerleri sunulmuştur.

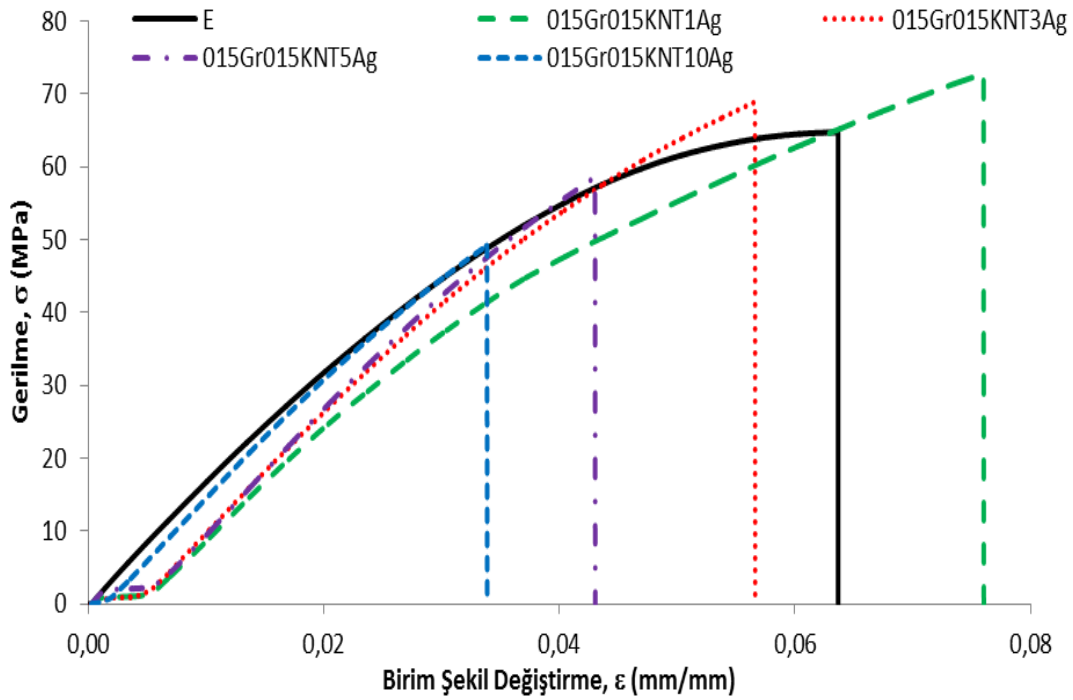
Çizelge 19: Saf epoksi yapıştırıcı ve Grafen katkılı epoksi yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin ortalama değerleri

Numuneler	Çekme Dayanımı(MPa)	En büyük Birim Şekil Değişimi(mm/mm)
E	58.7 ±8.63	0.061 ±0.007
015Gr015KNT	70.8 ±3.89	0.081 ±0.02
025Gr015KNT	63.75 ±6.78	0.051 ±0.038
050Gr015KNT	49.78 ±4.61	0.046 ±0.043

4.3.4.Grafen, KNT ve gümüş nanoparçacık katkılı yapıştırıcıların çekme testleri

Şekil 4.3.4'de ağırlıkça değişik oranlarda grafen, KNT ve gümüş nanoparçacık katkılı epoksi esaslı yapıştırıcıların Gerilme-Birim şekil değiştirme grafiği sunulmuştur. Grafik incelendiğinde saf epoksinin çekme dayanımı 64.75 MPa'dır. En yüksek çekme dayanımı ise 015Gr015KNT1Ag numunesinde ve 72.75 MPa olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca birim şekil değiştirme değerinin yine 015Gr015KNT1Ag numunesinde olduğu bulunmuştur. Saf epoksi ile karşılaştırıldığında, saf epoksinin en yüksek birim şekil değiştirme değeri 0.063 mm/mm iken 015Gr015KNT1Ag numunesinin en yüksek birim

şekil değiştirme değeri 0.076 mm/mm olduğu görülmektedir. Saf epoksi yapıştırıcı ile kıyaslandığı zaman en düşük çekme dayanımı 49.20 MPa değeriyle 015Gr015KNT10Ag değerinde görülmüştür. Aynı şekilde saf epoksi yapıştırıcı ile birim şekil değiştirme oranları kıyaslandığı zaman en küçük değer tekrar 015Gr015KNT10Ag numunesinde 0.033 mm/mm değeriyle görülmektedir.



Şekil 4.3.4.: Grafen, KNT ve Gümüş Nanoparçacık katkılı yapıştırıcıların çekme dayanımı testleri

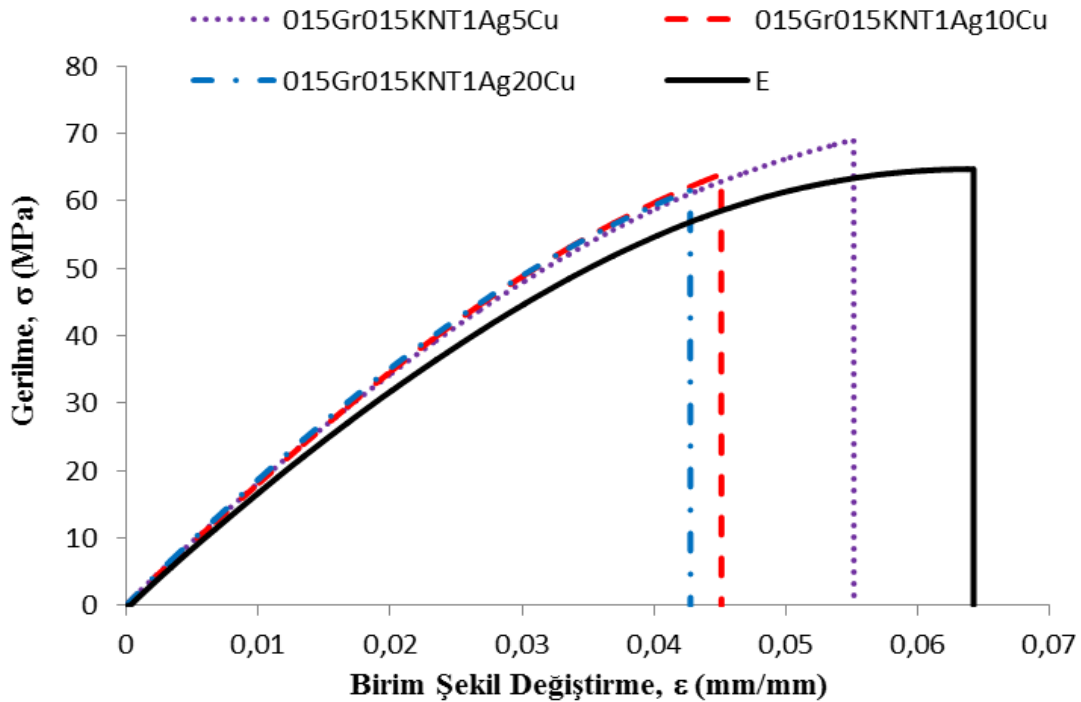
Çizelge 20’de saf epoksi yapıştırıcıyla beraber grafen, KNT ve gümüş nanoparçacık katkılı epoksi yapıştırıcıların çekme test sonuçlarında elde edilen çekme dayanımı ve en büyük birim şekil değiştirme değerleri sunulmuştur.

Çizelge 20: Saf epoksi yapıştırıcı, Grafen, KNT ve gümüş nanoparçacık katkılı epoksi yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin ortalama değerleri

Numuneler	Çekme Dayanımı(MPa)	En büyük Birim Şekil Değişimi(mm/mm)
E	58.7 ± 8.63	0.061 ± 0.007
015Gr015KNT1Ag	61.33 ± 15.2	0.063 ± 0.019
025Gr015KNT3Ag	65.29 ± 5.5	0.054 ± 0.006
050Gr015KNT5Ag	48.07 ± 14.87	0.040 ± 0.011
050Gr015KNT10Ag	52.46 ± 6.08	0.041 ± 0.005

4.3.5. Grafen, KNT, gümüş nanoparçacık ve bakır nanoparçacık katkı yapıştırıcıların çekme testleri

Yukarıda yapılan testlerin değerlendirilmesi sonucunda en iyi yapıştırıcı numunesi olarak 015GR015KNT1Ag numunesi belirlenmiştir. Bu numune belirlendikten sonra üzerine değişik oranlarda bakır nanoparçacık eklenerek Şekil 4.3.5’de isimleri verilen test numuneleri üretilmiştir. Şekil 4.3.5’de üretilen bu numuneler ile saf epoksi yapıştırıcının karşılaştırıldığı grafik sunulmuştur. Grafik yorumlandığı zaman saf epoksinin çekme dayanımı 64.75 MPa iken, 015GR015KNT1Ag5Cu numunesinin dayanımı 69.07 MPa ile en yüksek çekme dayanımıdır. En düşük çekme dayanımı ise 015GR015KNT1Ag20Cu numunesinden 61.60 MPa olarak elde edilmiştir. Birim şekil değiştirmeler karşılaştırılacak olunursa, saf epoksinin en yüksek birim şekil değiştirme oranı 0.063 mm/mm iken, üretilen nanoparçacık katkı yapıştırıcıların arasında en yüksek birim şekil değiştirme oranı 015GR015KNT1Ag5Cu numunesinde ve en düşük birim şekil değiştirme oranı 015GR015KNT1Ag20Cu numunesinde sırasıyla, 0.055 mm/mm ve 0.042 mm/mm olarak bulunmuştur.



Şekil 4.3.5.: Grafen, KNT, Gümüş ve Bakır Nanoparçacık katkı yapıştırıcıların çekme dayanımı testleri

Çizelge 21’de saf epoksi yapıştırıcıyla beraber grafen, KNT, gümüş ve bakır nanoparçacık katkılı epoksi yapıştırıcıların çekme test sonuçlarında elde edilen çekme dayanımı ve en büyük birim şekil değiştirme değerleri sunulmuştur.

Çizelge 21: Saf epoksi yapıştırıcı, Grafen, KNT, gümüş ve bakır nanoparçacık katkılı epoksi yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin ortalama değerleri

Numuneler	Çekme Dayanımı(MPa)	En büyük Birim Şekil Değişimi(mm/mm)
E	58.7 ±8.63	0.061 ±0.007
015Gr015KNT1Ag5Cu	60.06 ±9.5	0.049 ±0.012
025Gr015KNT1Ag10Cu	59.54 ±7.32	0.043 ±0.006
050Gr015KNT1Ag20Cu	55.27 ±5.59	0.042 ±0.01

4.4. Kırılma Yüzeyleri SEM Görüntüleri

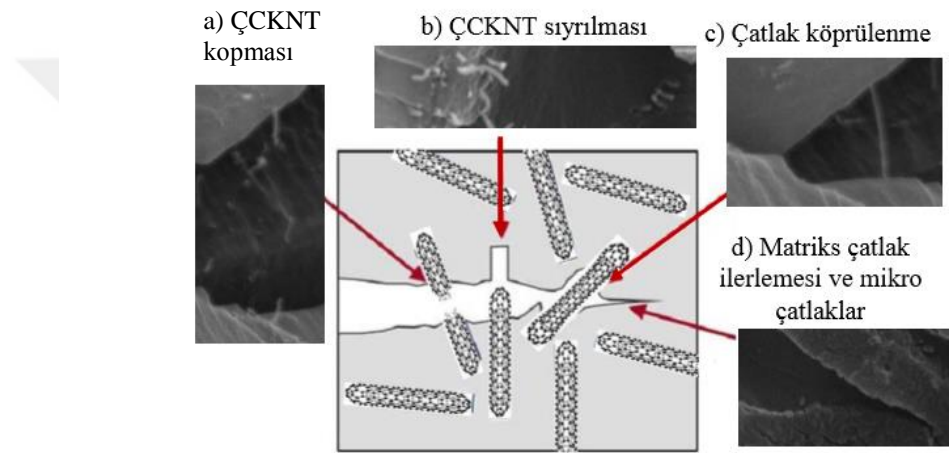
4.4.1. Tek taraflı bindirmeli bağlantıların kırılma yüzeyi SEM görüntüleri

SEM görüntüleri farklı yakınlaştırma ölçeklerinde alınıp değerlendirilmiştir. Burada kırılmanın sünek yada gevrek karakterli olması ve yapıştırıcı içindeki malzemelerin homojen dağılımı, topaklanma oluşup, oluşmadığı gibi durumlar değerlendirilmiştir.

Saf epoksiye ait Şekil 4.4.1’deki a ve b SEM görüntüleri ile Şekil 4.4.1’deki c, d, e ve f görüntüleri karşılaştırıldığında, saf epoksi yapıştırıcının kırıl yüzeyinin düz ve pürüzsüz olduğu, nanoparçacık eklenen yapıştırıcılarda ise kırılmaya sebep olan çatlakların sayısında ve dolayısıyla pürüzlülükte artış olduğu görülmektedir. Bu çatlakların sönmülediği enerjiden dolayı 050Gr numunesinin tokluk değerinin grafen katkılı yapıştırıcılarda en yüksek (2.07 kJ/m^3) olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.2.1’deki kayma dayanımı-kayma birim şekil değiştirme grafiğini onaylar durumdadır. Ayrıca Şekil 4.4.1.1’deki c ve e görüntüleri ile Şekil 4.4.1.2’deki a görüntüsü grafen ve KNT katkılı epoksi esaslı yapıştırıcı ile bağlanmış bağlantıların kırılma yüzeyleriyle saf epoksinin kırılma yüzeyi beraber değerlendirildiğinde, nanoparçacık katkılı yapıştırıcıların kırılma yüzeylerinde nehir yatağı görüntülü dalgalı yüzeyler oluştuğu tespit edilmiştir. Bu farklılığın sebebi epoksi içerisine katılan nanoparçacıklar olduğu değerlendirilmektedir.

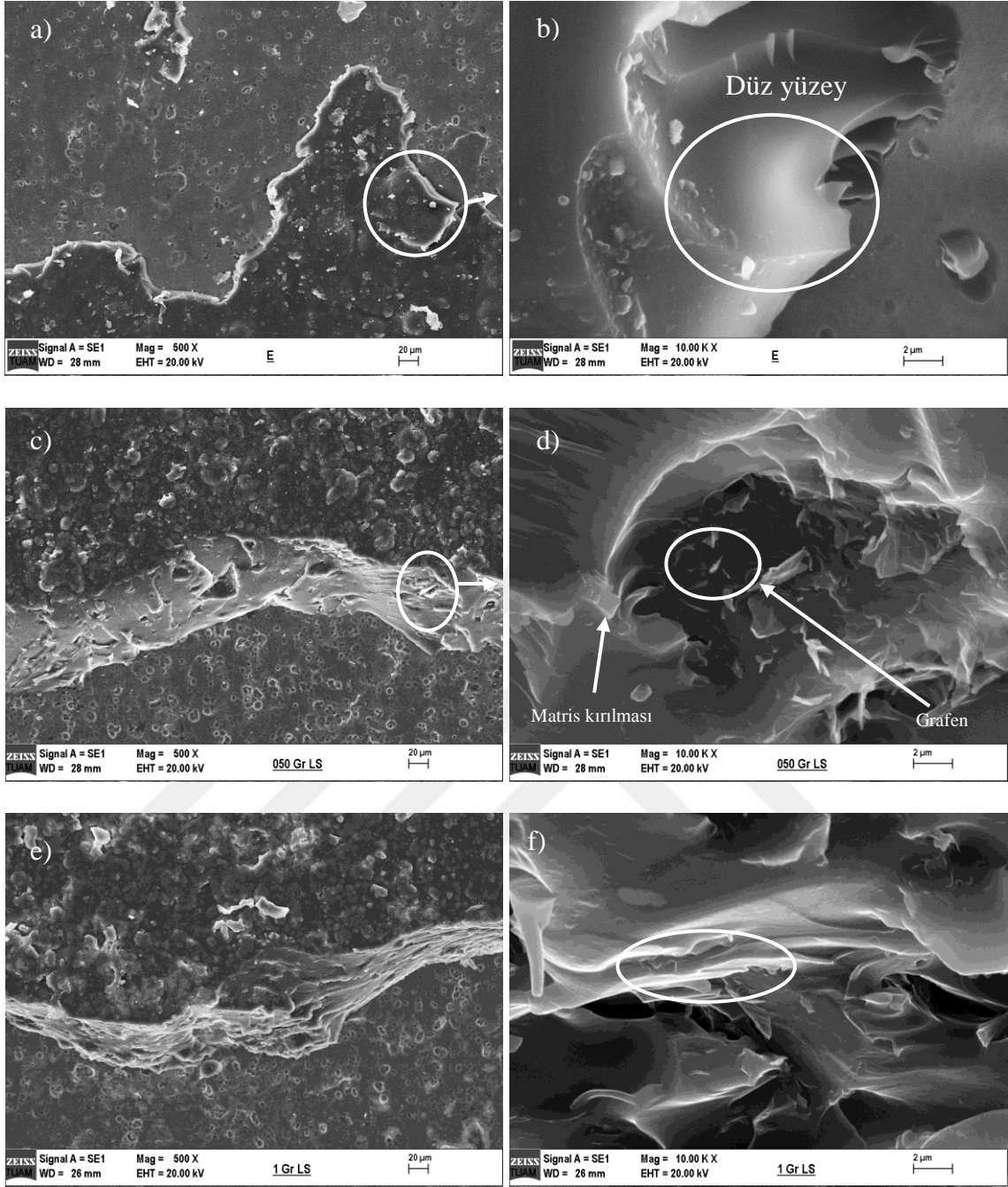
Enerji yayılımının bazı önemli mekanizmaları KNT’ler ile takviyelendirilmiş epoksi yapıştırıcılarda tanımlanmıştır. Bunlar KNT’lerin kopması, sıyrılması, çatlak köprülenme ve matris kırılmasıdır (Thostenson ve ark., 2005). Şekil 4.4.’de KNT’lerin

hasar mekanizmaları gösterilmiştir. Bu mekanizmaların hepsi enerji yutan mekanizmalar olup, kırılma tokluğunun artmasına yardımcı olur. KNT'ler epoksi matriks içerisine homojen bir şekilde dağıtıldığında çatlak ucunda ikincil çatlaklar oluşturarak veya çatlak köprülenmesi ile çatlak ucundaki gerilme yoğunluğunun azalmasını sağlayarak tabakalar arası kırılma tokluğunun artmasına neden olurlar. Ayrıca KNTlerin çatlak köprülenmesinde KNT çeperlerinin bir kısmının matristen ayrılması ancak kalan yüzeylerin mükemmel ara yüzey yapışması ile yük transferini etkin bir şekilde gerçekleştirir.



Şekil 4.4: ÇCKNT'lerin muhtemel kırılma mekanizmaları

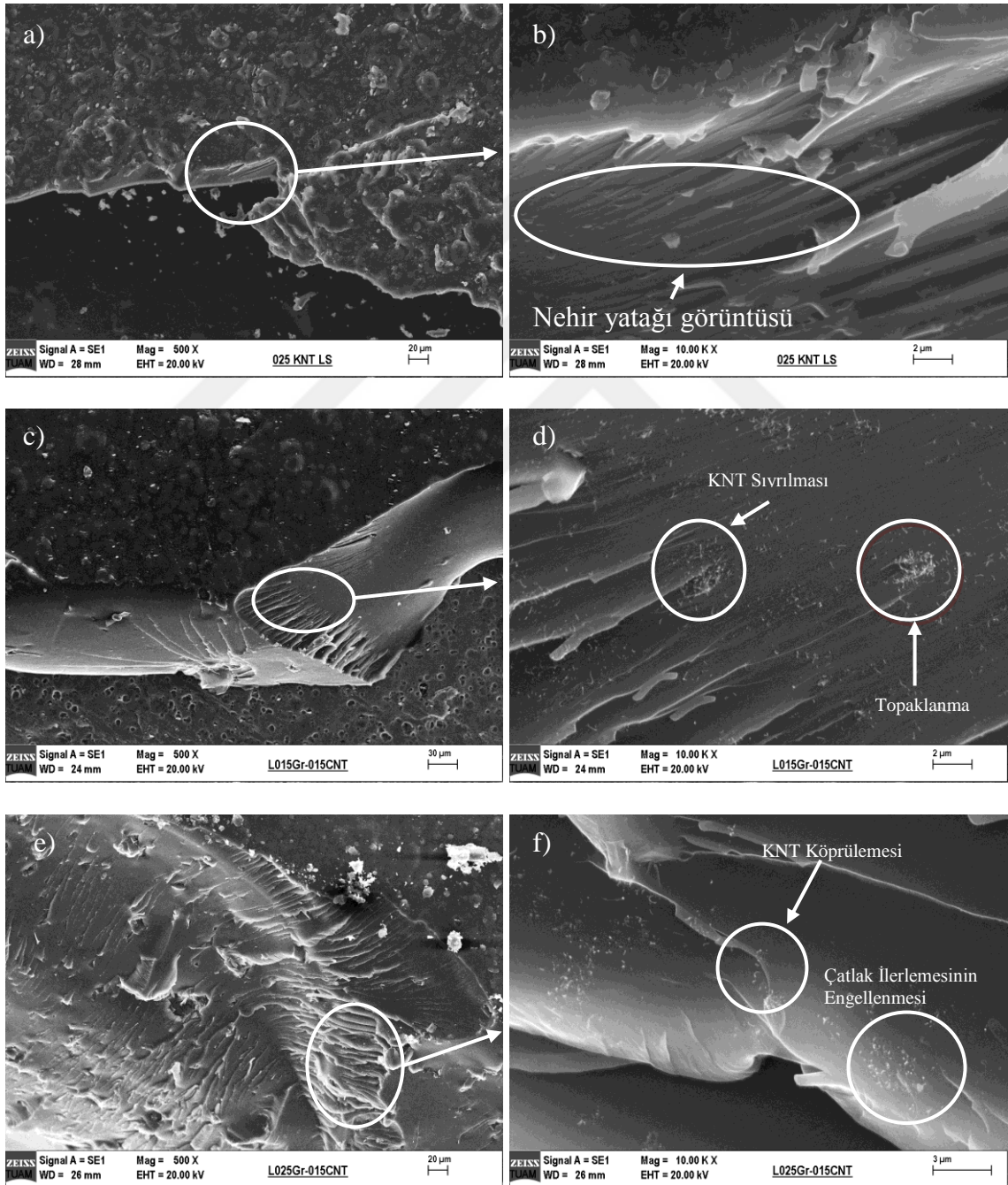
Şekil 4.4.1'de sırasıyla saf epoksi, 050Gr numunesi ve 1Gr numunesine ait 500 ve 10000 büyütme SEM görüntüleri sunulmuştur. Saf epoksi yapıştırıcının kırılma yüzeyi, epoksinin gevrek özelliğinden dolayı düz ve pürüzlülüğü az bir görünümde (Şekil 4.4.1 (b)). Nanoparçacık eklenmiş yapıştırıcılarda ise daha pürüzlü kırık yüzeyler görülmektedir. Nano parçacıklar kırılma sırasında çatlak ilerlemesini engelleyerek malzemenin daha fazla enerji yutmasına sebep olmaktadır. Grafen katkılı yapıştırıcıların kırık yüzeylerinde saf epoksiye göre daha pürüzlü ve katmanlı görünümde bölgeler görülmektedir (Şekil 4.4.1(d ve f)). Bu yapının grafenin katmanlı yapısından kaynaklandığı değerlendirilebilir. Ayrıca şekil 4.4.1'deki d görüntüsünde matris kırılması ve grafen nanoparçacıkları gösterilmiştir.



Şekil 4.4.1.: TTBB kırılma yüzeyleri SEM görüntüleri a) Saf epoksi 500 büyütme b) Saf epoksi 10000 büyütme c) 050Gr 500 büyütme d) 050Gr 10000 büyütme e) 1Gr 500 büyütme f) 1Gr 10000 büyütme

Şekil 4.4.1.1’de 025KNT, 015Gr015KNT ve 025Gr015KNT numunelerine ait TTBB kırılma yüzeylerinin 500 ve 10000 büyütmeli SEM görüntüleri verilmiştir. KNT katkılı yapıştırıcıların kırık yüzeylerinde nehir yatağına benzer pürüzlü yapılar görülmektedir (Şekil 4.4.1.1 (b)). Bu yapı KNT ve grafen eklenmiş yapıştırıcıda daha belirgin hale gelmiştir(Şekil 4.4.1.1 (c ve e)). Bu görüntülerden grafenin nehir yatağı görünümünü oluşumunu daha çok artırdığı değerlendirilmektedir. Bu nehir yatağı şeklindeki görüntülerden, bu numunelerin tokluğunun arttığı sonucuna varılabilir ve bu

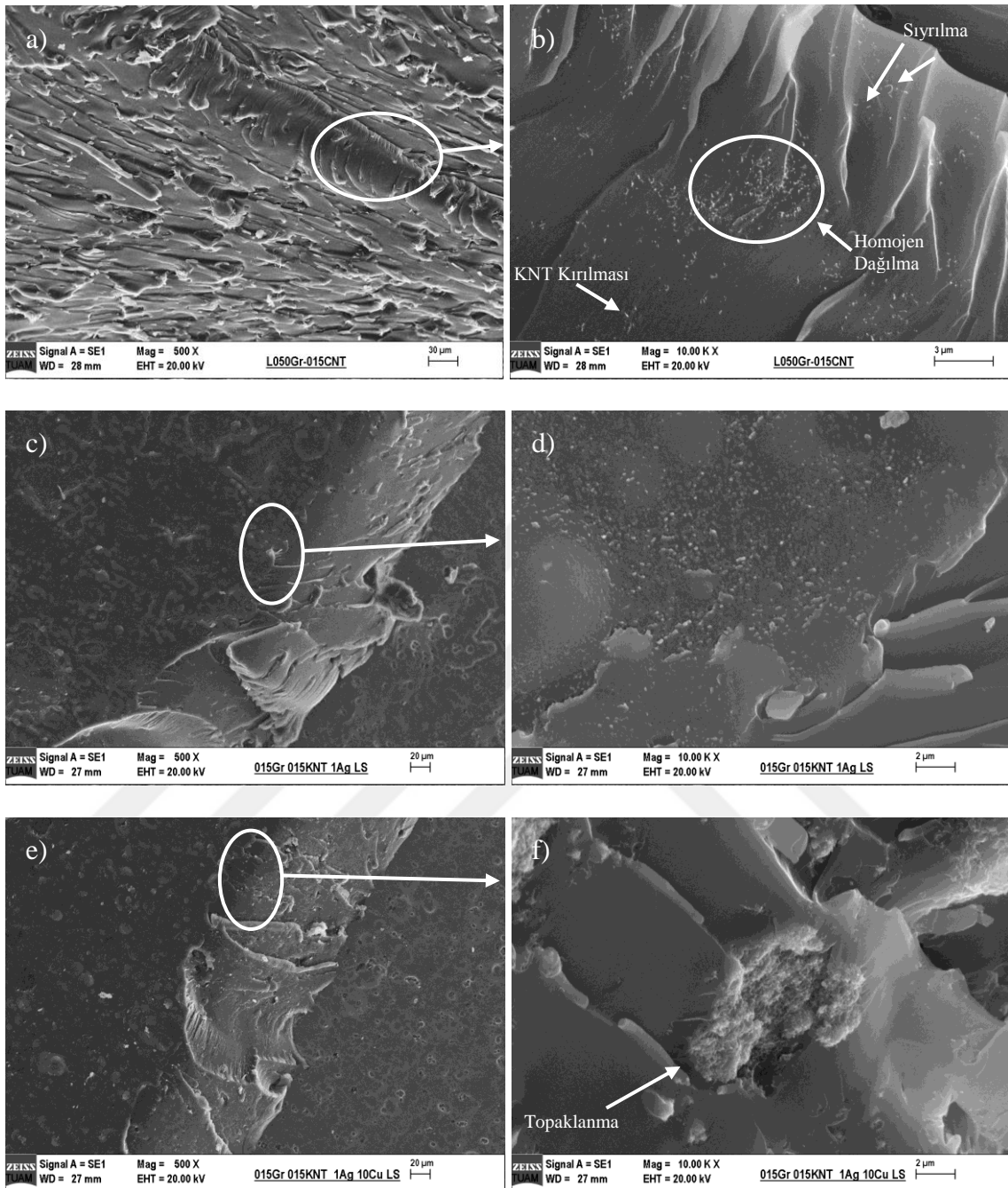
sonuç TTBB kayma test sonuçlarıyla uyumludur. Ayrıca Şekil 4.4.1.1'deki d görüntüsünde oluşan topaklanma ve KNT sıyrılması gösterilmiştir. Oluşan bu toplanmalar yapıştırıcı içerisinde homojen bir karışım oluşmadığını göstermektedir. Bu toplanmaların polimer zincirleri arasındaki Van der Waals etkileşimini zayıflatarak kayma dayanımında düşüslere sebep olduğu düşünülmektedir. Bu dayanım düşüslerinden dolayı yapıştırıcı içerisine ilave edilen katkı maddelerinde topaklanma, istenmeyen bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4.4.1.1: TTBB kırılma yüzeyleri SEM görüntüleri a) 0.25Gr 500 büyütme b) 0.25Gr 10000 büyütme c) 1Gr 500 büyütme d) 1Gr 10000 büyütme e) 0.15Gr0.15CNT 500 büyütme f) 0.15Gr0.15CNT 10000 büyütme

Şekil 4.4.1.1.'deki f görüntüsünde işaretlenen bölgede KNT köprülemesi ve KNT'lerin homojen dağılım ile çatlak ilerlemesini durdurması gösterilmiştir. KNT köprülemesi ile çatlak ilerleme yönü değişmiş ve buna bağlı olarak yapıştırıcı numuneyi kırmak için gerekli olan enerji miktarı artmıştır. Bu da yapıştırıcının tokluğunu arttırmıştır.

Şekil 4.4.1.2'de 050Gr015KNT, 015Gr015KNT1Ag ve 015Gr015KNT1Ag10Cu numunelerine ait 500 ve 10000 büyütme SEM görüntüleri sunulmuştur. Özellikle 050Gr015KNT numunesine ait 10000 büyütme SEM görüntüsünde yapıştırıcının homojene yakın olarak karıştığı ve toplaklanmış yapıların oluşmadığı görülmüştür. Şekil 4.4.1.2'deki a görüntüsünde nehir yatağı görüntüsüne benzer şekiller tespit edilmiştir. Bu görüntüler çatlak ilerlemesinin yapıştırıcı malzeme içersine eklenen nanoparçacıklar ile yönünün değişmesinin sağladığı gözlemlenmiştir. Bundan dolayı enerji emilim miktarı artmış ve buna bağlı olarak numunenin tokluğu artmıştır. Ayrıca Şekil 4.4.1.2'deki b görüntüsünde işaretlenen yerlerde KNT kırılması ve KNT sıyrılması mekanizmaları gösterilmiştir. Ayrıca 4.4.1.2'deki e görüntüsünde a görüntüsündeki gibi nehir yatağı görüntüsüne benzer şekiller tespit edilmiştir. Yukarıda a görüntüsü için yapılan tespitler e görüntüsündeki yapıştırıcı numune içinde aynı şekilde değerlendirilebilir. Şekil 4.4.1.2'deki f görüntüsünde nano parçacıkların epoksi reçine içinde topaklanması gösterilmiştir. Bu topaklanmanın epoksi reçine içerisindeki nano parçacıklarının toplam miktarının fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

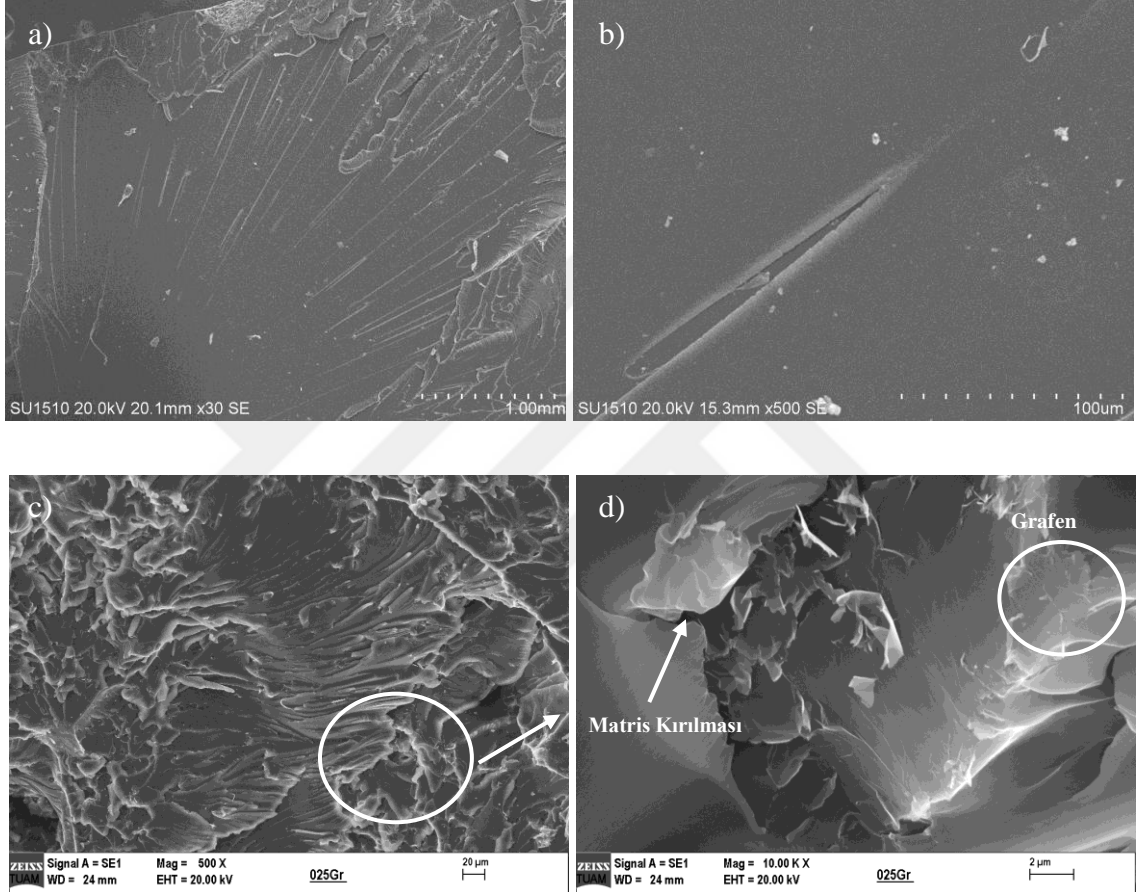


Şekil 4.4.1.2: TTBB kırılma yüzeyleri SEM görüntüleri a) 050Gr015KNT500 büyütme b) 050Gr015KNT 10000 büyütme c) 015Gr015KNT10Ag 500 büyütme d) 015Gr015KNT10Ag 10000 büyütme e) 015Gr015KNT1Ag10 Cu büyütme f) 015Gr015KNT1Ag10Cu 10000 büyütme

4.4.2.Çekme numuneleri kırılma yüzeyi SEM görüntüleri

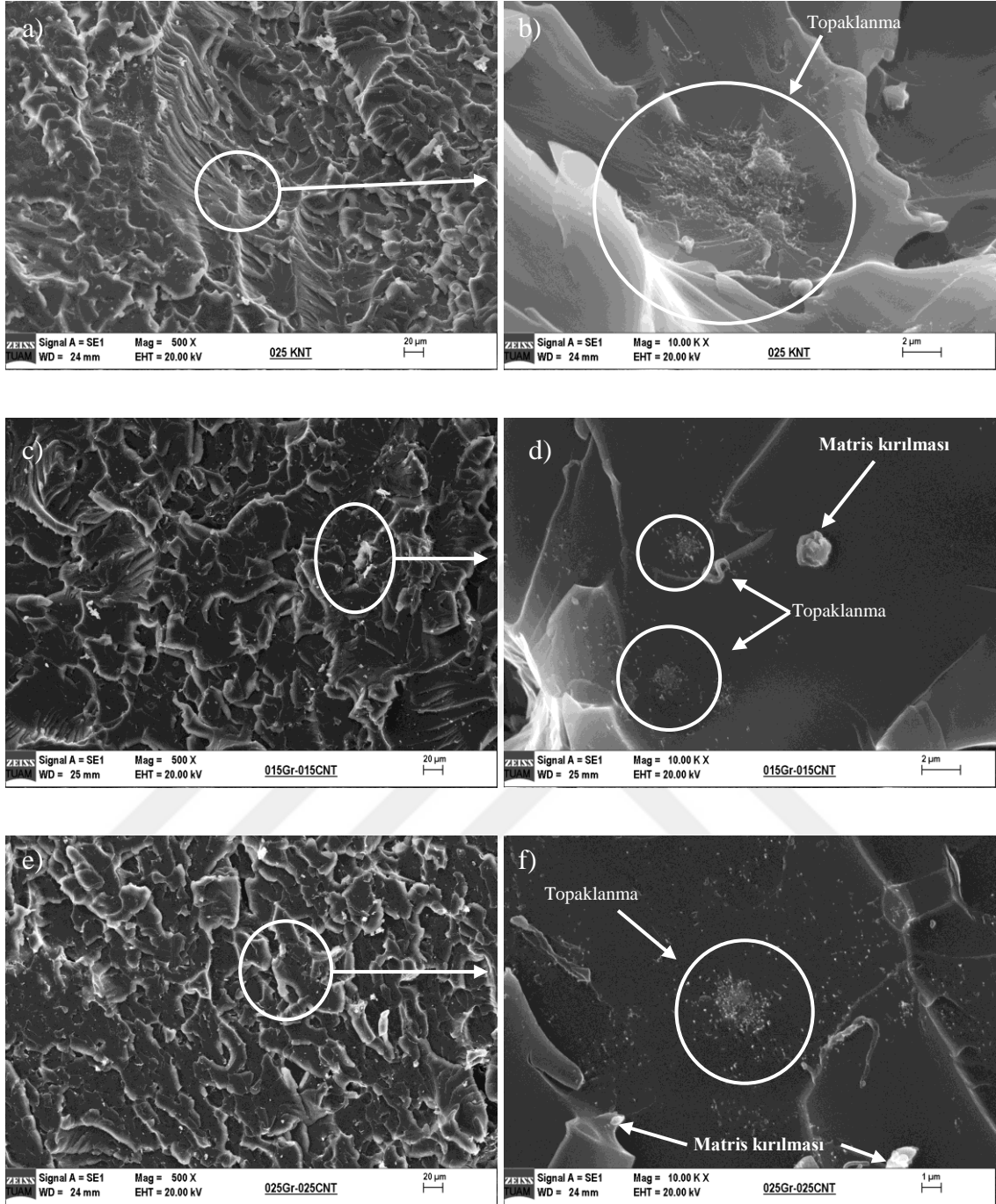
Çekme deneyi sonucunda kopan parçaların kırılan yüzeylerine ait 500 ve 10000 büyütmeli SEM görüntüleri Şekil 4.4.2, Şekil 4.4.2.1 ve Şekil 4.4.2.2’de sunulmuştur.

Şekil 4.4.2’de saf epoksi ve 025Gr numunesine ait SEM görüntüleri sunulmuştur. Şekil 4.4.2’de a ve b görüntüleri saf epoksi numuneye aittir. Kırık yüzey epoksinin gevrek özelliğinden dolayı düz görünümündedir. Şekil 4.4.2’deki d’de kırık yüzeye gömülü grafenler ve matris kırılmasının olduğu bölge işaretlenmiştir. Bu görüntüler a ve b ile kıyaslandığında yüzeyin daha pürüzlü yapıda olduğu ve grafenin çatlak ilerlemesini engellediği görülmektedir.



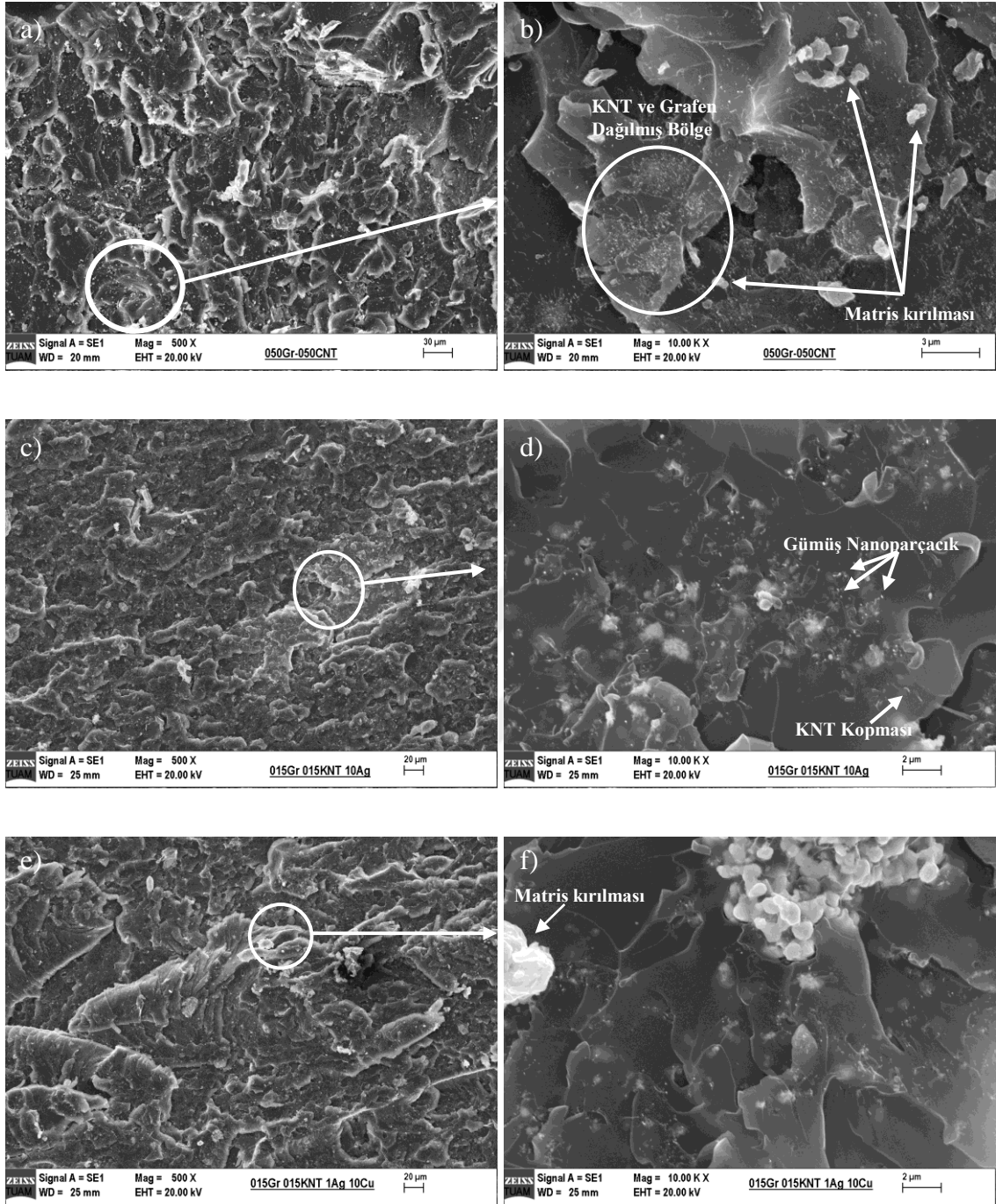
Şekil 4.4.2.:Çekme Testleri Kırılma Yüzeyleri SEM Görüntüleri a) Saf Epoksi 500 büyütme görüntüleri b) Saf Epoksi 10000 büyütme, c) 025Gr numunesi 500 büyütme, d) 025Gr numunesi 10000 büyütme

Şekil 4.4.2.1’de 025KNT, 015Gr015KNT ve 025Gr025KNT numunelerine ait SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde 015Gr015KNT ve 025Gr025KNT numunelerinin 10000 büyütme görüntülerinde toplanmış yapıların olduğu görülmektedir. Şekil 4.4.2.1’deki b, d ve f görüntülerinde tespit edilen toplanmalar işaretlenerek gösterilmiştir. Bu toplanmalar yapıştırıcı içerisinde epoksi ile nano parçacıkların homojen karışmadığını göstermektedir. Bundan dolayı çekme dayanımında düşüşler gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4.2.1.: Çekme Testleri Kırılma Yüzeyleri SEM Görüntüleri a) 075KNT numunesi 500 büyütme, b) 075KNT numunesi 10000 büyütme, c) 015Gr015KNT numunesi 500 büyütme, d) 015Gr015KNT numunesi 10000 büyütme, e) 025Gr025KNT numunesi 500 büyütme, f) 025Gr025KNT numunesi 10000 büyütme

Şekil 4.4.2.2’de 050Gr050KNT, 015Gr015KNT10Ag ve 015Gr015KNT1Ag10Cu numunelerine ait SEM görüntüleri sunulmuştur. Şekil 4.4.2.2’deki b ve f görüntülerinde matris kırılmaları tespit edilmiş ve bu bölgeler görüntü üzerinde işaretlenmiştir. Ayrıca b görüntüsünde KNT ve grafenlerin dağıldığı bölge işaretlenerek gösterilmiştir. Şekil 4.4.2.2’deki d görüntüsünde gümüş nanoparçacıkların olduğu ve KNT kopması bulunan yer işaretlenmiştir.



Şekil 4.4.2.2.: Çekme Testleri Kırılma Yüzeyleri SEM Görüntüleri a) 050Gr050CNT numunesi 500 büyütme, b) 050Gr050CNT numunesi 10000 büyütme, c) 015Gr015KNT10Ag numunesi 500 büyütme, d) 015Gr015KNT10Ag numunesi 10000 büyütme, e) 015Gr015KNT1Ag10Cu numunesi 500 büyütme, f) 015Gr015KNT1Ag10Cu numunesi 10000 büyütme

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, endüstriyel uygulama alanı geniş olan epoksi esaslı yapıştırıcıların mekanik ve termal özelliklerini iyileştirmek için grafen, KNT, gümüş ve bakır nanoparçacıklar reçineye eklenmiştir.

TGA ve DTA testleri sonucunda saf epoksinin %5, %50 ve tamamen kütle kaybı için bozunma sıcaklıkları 270, 332 ve 443.1 °C olarak tespit edilmiştir. Bu değerlere karşılık üretilen nano parçacık katkılı yapıştırıcı numunelerinden en iyi değerlere sahip numuneler;

- Üretilen grafen katkılı epoksi bazlı yapıştırıcı numunelerden %5, %50 ve tamamen kütle kaybı için en yüksek bozunma sıcaklıkları 075 Gr numunesinde 283, 334 ve 430.3 °C değerleriyle bulunmuştur.
- KNT katkılı epoksi bazlı yapıştırıcı numunelerinden %5, %50 ve tamamen kütle kaybı için en yüksek bozunma sıcaklıkları 1 KNT numunesinde 288, 344 ve 425.3 °C değerleriyle gözlemlenmiştir.
- Grafen ve KNT katkılı epoksi bazlı üretilen yapıştırıcı numunelerden %5, %50 ve tamamen kütle kaybı için en yüksek bozunma sıcaklıklarının 025Gr015KNT numunesinde 286.13 °C, 331.93 °C ve 429.4 °C'leriyle tespit edilmiştir.
- Grafen, KNT ve gümüş nanoparçacık katkılı epoksi bazlı yapıştırıcı numunelerinde %5, %50 ve tamamen kütle kaybı için en yüksek bozunma sıcaklıkları 015Gr015KNT5Ag numunesinde 288.2 °C, 353.4 °C ve 422.4 °C değerleriyle gözlemlenmiştir.
- Grafen, KNT, gümüş ve bakır nanoparçacık katkılı epoksi bazlı yapıştırıcılardan %5, %50 ve tamamen kütle kaybı için en yüksek bozunma sıcaklıkları 282.72 °C, 346.61 °C ve 408.6 °C değerleriyle 015Gr015KNT1Ag10Cu numunesinde tespit edilmiştir.

Mekanik testler sonucunda saf epoksi yapıştırıcının kayma dayanımı 10.77 MPa olarak bulunmuştur. Saf epoksinin kayma dayanımı ile yapılan testlerin en iyi kayma dayanımına sahip numuneler;

- Grafen katkılı epoksi bazlı yapıştırıcıların yapılan kayma dayanımı testlerinde en yüksek kayma dayanımı değerine 1 Gr numunesinin 18.51 MPa değeriyle sahip olduğu,
- KNT katkılı epoksi bazlı yapıştırıcıların kayma dayanımı testleri sonucunda en iyi kayma dayanımına 025KNT yapıştırıcı numunesinin 11.66 MPa değeriyle sahip olduğu,
- Grafen ve KNT katkılı epoksi bazlı yapıştırıcıların yapılan kayma dayanımı testleri sonucunda en iyi kayma dayanımına 19.39 MPa değeriyle 015Gr015KNT numunesinin sahip olduğu,
- Grafen, KNT ve gümüş nanoparçacık katkılı epoksi bazlı yapıştırıcıların yapılan kayma dayanımı testleri sonucunda, en iyi kayma dayanımını değerine 015Gr015KNT1Ag numunesinin 15.64 MPa değeriyle sahip olduğu,
- Grafen, KNT, gümüş ve bakır nanoparçacık katkılı epoksi bazlı yapıştırıcıların kayma dayanımı testleri sonucunda 11.2 MPa değeriyle 015Gr015KNT1Ag5Cu numunesinin sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Saf epoksi yapıştırıcı ile üretilen epoksi bazlı yapıştırıcıların kayma dayanımı değerlendirildiğinde, saf epoksinin kayma dayanımı 10.77 MPa iken, en iyi kayma dayanımının 19.39 MPa değeriyle 015Gr015KNT numunesinde gözlemlendiği bulunmuştur.

Çekme dayanımı ele alındığı zaman, saf epoksi yapıştırıcının çekme dayanımı 64.75 MPa iken;

- Grafen katkılı epoksi bazlı yapıştırıcıların yapılan çekme dayanımı testlerinde en yüksek çekme dayanımı değerine 025Gr yapıştırıcı numunesinin 76.03 MPa değeriyle sahip olduğu,
- KNT katkılı epoksi bazlı yapıştırıcıların çekme dayanımı testleri sonucunda en iyi çekme dayanımına 0.25KNT yapıştırıcı numunesinin 70.37 MPa değeriyle sahip olduğu,
- Grafen ve KNT katkılı epoksi bazlı yapıştırıcıların yapılan çekme dayanımı testleri sonucunda en iyi çekme dayanımına 69 MPa değeriyle 015Gr015KNT numunesinin sahip olduğu,
- Grafen, KNT ve gümüş nanoparçacık katkılı epoksi bazlı yapıştırıcıların yapılan çekme dayanımı testleri sonucunda, en iyi çekme dayanımını değerine 015Gr015KNT1Ag numunesinin 72.75 MPa değeriyle sahip olduğu,

- Grafen, KNT, gümüş ve bakır nanoparçacık katkılı epoksi bazlı yapıştırıcıların çekme dayanımı testleri sonucunda 69.07 MPa çekme dayanımı değeriyle 015Gr015KNT1Ag5Cu numunesinin sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Isıl özellikler açısından değerlendirildiğinde saf epoksi yapıştırıcı için kütle kaybının başladığı, tamamen kimyasal bozulmanın gerçekleştiği ve camsı geçiş (Tg) sıcaklıkları sırayla 270 °C , 443.1 °C , ve 67.1 °C dir. Üretilen yapıştırıcılardan 015Gr015KNT1Ag20Cu'da en yüksek kütle kaybı başlangıç sıcaklığı (295.22 °C), En yüksek tamamen bozulma sıcaklığı 015Gr050KNT'de (434.5 °C) ve en büyük Tg sıcaklığı 075KNT'de (54 °C) elde edilmiştir. Buna göre termal özellikler açısından en yüksek çalışma sıcaklığına sahip yapıştırıcı 015Gr015KNT1Ag20Cu'nun olduğu bulunmuştur.

Saf epoksi yapıştırıcının Tm erime sıcaklığı 276.8 °C'dir. Bu değerler nano parçacık katkılı olarak üretilen 015Gr015KNT numunesinde 273.06 °C olarak en büyük olmuştur. Buna göre 015Gr015KNT numunesi en yüksek erime sıcaklığına sahip olduğundan kullanım açısından avantaj sağlamaktadır.

KNT ve grafenin mekanik özelliklerde düşük katkı oranlarında dayanımı ve şekil değiştirebilirliği arttırdığı, yüksek katkı oranlarında ise reçine içerisinde toplanarak dayanımı azalttığı görülmüştür. Gümüş ve bakır nanoparçacıkların üstün mekanik özelliklerinden dolayı karışım içerisine eklenmiştir. Ancak yüksek katkı oranlarında gümüş ve bakır nanoparçacıkların reçine içerisinde toplanarak dayanımı azalttığı gözlemlenmiştir. Yapıştırıcının mekanik özelliklerini belirlemek için alüminyum levhalar ile tek taraflı bindirmeli bağlantılı ve kitle halindeki yapıştırıcıdan çekme numuneleri üretilmiştir. Tek taraflı bindirmeli bağlantıda mekanik özelliklere yapıştırılan malzemelerin yüzeyleride etkili olduğundan bu numunelerle yapılan testlerin sonuçları sadece yapıştırıcıya ait değil bağlantıya ait özellikleri göstermektedir. Bu sebeple çekme deney numuneleri üretilmiştir. KNT'lerin yapısal özelliğinden dolayı karışımın akıcılığını özellikle yüksek katkı oranlarında azalttığı, bunda yapıştırıcı malzemesinin mekanik özelliklerine olumsuz etki yaptığı belirlenmiştir. Bu açıdan epoksi reçine içerisine ağırlıkça %0.5'den daha fazla KNT eklenmesi uygun değildir.

Saf epoksi yapıştırıcının kayma dayanımı ve en büyük açıl birim şekil değiştirmesi sırasıyla 10.77 MPa ve 0.106 mm/mm'dir. Nanoparçacık katkılı numunelerden kayma dayanımı en büyük olan 015Gr015KNT numunesi için 19.39 MPa

ve 025Gr050KNT numunesi için en büyük açısal birim şekil değiştirme ise 0.58 mm/mm olarak bulunmuştur. Kayma zorlamaları etkisindeki bağlantıda şekil değiştirebilirlik açısından en uygun yapıştırıcı 025Gr050KNT, dayanım açısından ise 015Gr015KNT numunesi olmaktadır.

Saf epoksi yapıştırıcının çekme dayanımı ve en büyük birim şekil değiştirmesi sırasıyla, 64.75 MPa ve 0.063 mm/mm'dir. Nano parçacık katkılı numunelerden çekme dayanımı en büyük olan 025Gr için 76.03 MPa ve 015Gr015KNT numunesi için en büyük birim şekil değiştirme ise 0.092 mm/mm olarak bulunmuştur. Çekmeye zorlanan bağlantılarda şekil değiştirebilirlik özelliği açısından en uygun yapıştırıcı 015Gr015KNT, dayanım açısından ise 025Gr olmaktadır.



6- GELECEK ÇALIŞMALAR

Daha üstün mekanik ve termal özellikler elde edebilmek için yüksek ve düşük katkı oranlarının yapıştırıcı üzerindeki etkisini incelemek için çalışmalar yürütülebilir. Bu tez çalışmasında bulunan bulguların üzerine, epoksi içerisine farklı nanoparçacıklar farklı katkı oranlarında eklenerek yeni çalışmalar yapıp literatüre ve yapıştırıcı üzerine yapılan çalışmalara katkı sağlanabileceği düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- Adams, R. D., Comyn, J. ve Wake, W. C., 1997, Structural adhesive joints in engineering, Springer Science & Business Media, p.
- Adin, H., 2007, Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Ters Z Tipi Kompozit Malzemelerinin Mekanik Analizi, *Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Ashby, M. ve Jones, D., 1980, Fatigue failure, In: Engineering materials: an introduction to their properties and applications, Eds: Pergamon, Oxford, p. 135-142.
- ASTM, D., 2008, Standard Guide for Preparation of Metal Surfaces for Adhesive Bonding.
- ASTM, D., 2010, Standard Guide for Preparation of Aluminum Surfaces for Structural Adhesives Bonding (Phosphoric Acid Anodizing).
- ASTM, D., 2012, Standard Methods of Analysis of Sulfochromate Etch Solution Used in Surface Preparation of Aluminum.
- Avallone, E., Baumeister, I. ve Sadegh, A., 2006, Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. 10, New York: McGraw-Hill, p.
- Bowditch, M., Clarke, J. ve Stannard, K., 1987, The strength and durability of adhesive joints made underwater, In: Adhesion 11, Eds: Springer, p. 1-16.
- Chisholm, N., Mahfuz, H., Rangari, V. K., Ashfaq, A. ve Jeelani, S., 2005, Fabrication and mechanical characterization of carbon/SiC-epoxy nanocomposites, *Composite structures*, 67 (1), 115-124.
- Dadgostar, N., 2008, Investigations on colloidal synthesis of copper nanoparticles in a two-phase liquid-liquid system, *University of Waterloo*.
- Dunn, D. J., 2004, Engineering and structural adhesives, iSmithers Rapra Publishing, p.
- Durmuş, F. ve Ekrem, M., 2017, Morphology Analysis and Mechanical Properties of MWCNT Reinforced Nylon-6, 6 Nanofiber Mats by Electrospun Method, *Solid State Phenomena*, 23-27.
- Duzcukoglu, H., Ekinçi, S., Sahin, O. S., Avci, A., Ekrem, M. ve Unaldi, M., 2015, Enhancement of Wear and Friction Characteristics of Epoxy Resin by Multiwalled Carbon Nanotube and Boron Nitride Nanoparticles, *Tribology Transactions*, 58 (4), 635-642.
- Düzçükoğlu, H., Ekinçi, Ş., Şahin, Ö. S., Avci, A., Ekrem, M. ve Ünaldi, M., 2015, Enhancement of wear and friction characteristics of epoxy resin by multiwalled carbon nanotube and boron nitride nanoparticles, *Tribology Transactions*, 58 (4), 635-642.
- Ebadi-Dehaghani, H. ve Nazempour, M., 2012, Thermal conductivity of nanoparticles filled polymers, In: Smart nanoparticles technology, Eds: InTech, p.
- Ekrem, M. ve Avci, A., 2018, Effects of polyvinyl alcohol nanofiber mats on the adhesion strength and fracture toughness of epoxy adhesive joints, *Composites Part B: Engineering*, 138, 256-264.
- Fan, Z., 2007, Flow and rheology of multi-walled carbon nanotubes thermoset resin suspensions in processing of glass fiber composites, University of Delaware, p.
- Ghosh, P., Pathak, A., Goyat, M. ve Halder, S., 2012, Influence of nanoparticle weight fraction on morphology and thermal properties of epoxy/TiO₂ nanocomposite, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31 (17), 1180-1188.
- Gojny, F. H., Wichmann, M. H., Fiedler, B., Kinloch, I. A., Bauhofer, W., Windle, A. H. ve Schulte, K., 2006, Evaluation and identification of electrical and thermal conduction mechanisms in carbon nanotube/epoxy composites, *Polymer*, 47 (6), 2036-2045.

- Grant, L., Adams, R. ve da Silva, L. F., 2009, Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry, *International journal of adhesion and adhesives*, 29 (4), 405-413.
- Gültekin, K., Akpınar, S., Gürses, A., Eroglu, Z., Cam, S., Akbulut, H., Keskin, Z. ve Ozel, A., 2016, The effects of graphene nanostructure reinforcement on the adhesive method and the graphene reinforcement ratio on the failure load in adhesively bonded joints, *Composites Part B: Engineering*, 98, 362-369.
- Hewakuruppu, Y. L., Dombrovsky, L. A., Chen, C., Timchenko, V., Jiang, X., Baek, S. ve Taylor, R. A., 2013, Plasmonic “pump–probe” method to study semi-transparent nanofluids, *Applied optics*, 52 (24), 6041-6050.
- Hostynek, J. J. ve Maibach, H. I., 2006, *Copper and the Skin*, CRC Press, p.
- Jojibabu, P., Jagannatham, M., Haridoss, P., Ram, G. J., Deshpande, A. P. ve Bakshi, S. R., 2016, Effect of different carbon nano-fillers on rheological properties and lap shear strength of epoxy adhesive joints, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 82, 53-64.
- Kawashita, L., Kinloch, A., Moore, D. ve Williams, J., 2008, The influence of bond line thickness and peel arm thickness on adhesive fracture toughness of rubber toughened epoxy–aluminium alloy laminates, *International journal of adhesion and adhesives*, 28 (4-5), 199-210.
- Kaya, F., 2004, Ana hatları ile yapıştırıcılar, Birsen yayınevi, p.
- Khanna, P., Gaikwad, S., Adhyapak, P., Singh, N. ve Marimuthu, R., 2007, Synthesis and characterization of copper nanoparticles, *Materials Letters*, 61 (25), 4711-4714.
- Kim, K. S., Zhao, Y., Jang, H., Lee, S. Y., Kim, J. M., Kim, K. S., Ahn, J.-H., Kim, P., Choi, J.-Y. ve Hong, B. H., 2009, Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes, *Nature*, 457 (7230), 706.
- Kinloch, A., 1987, *Adhesion and adhesives: science and technology. 1987*, City: London, Chapman and Hall.
- Kumar, R. V., Bhat, M. ve Murthy, C., 2013, Some studies on evaluation of degradation in composite adhesive joints using ultrasonic techniques, *Ultrasonics*, 53 (6), 1150-1162.
- Leena, K., Athira, K., Bhuvaneshwari, S., Suraj, S. ve Rao, V. L., 2016, Effect of surface pre-treatment on surface characteristics and adhesive bond strength of aluminium alloy, *International journal of adhesion and adhesives*, 70, 265-270.
- Lian, M. K., 1998, Study of durability of epoxy bonded joints in aqueous environments, *Virginia Tech*.
- Lordi, V., Ma, S. ve Yao, N., 1999, Towards probing pentagons on carbon nanotube tips, *Surface science*, 421 (1-2), L150-L155.
- Ma, P.-C., Siddiqui, N. A., Marom, G. ve Kim, J.-K., 2010, Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: a review, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41 (10), 1345-1367.
- Morrissey, M. ve Johnson, W., 1985, *Douglas Aircraft Company Design Handbook, Adhesive and Cements, California*.
- Naito, K., Onta, M. ve Kogo, Y., 2012, The effect of adhesive thickness on tensile and shear strength of polyimide adhesive, *International journal of adhesion and adhesives*, 36, 77-85.
- Nan, C.-W., Shi, Z. ve Lin, Y., 2003, A simple model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites, *Chemical Physics Letters*, 375 (5-6), 666-669.

- Njuguna, J., Pielichowski, K. ve Alcock, J. R., 2007, Epoxy-based fibre reinforced nanocomposites, *Advanced Engineering Materials*, 9 (10), 835-847.
- Owens, J. F. ve Lee-Sullivan, P., 2000, Stiffness behaviour due to fracture in adhesively bonded composite-to-aluminum joints II. Experimental, *International journal of adhesion and adhesives*, 20 (1), 47-58.
- Özenç, M., 2007, Yapıştırma bağlantılarının darbe yükleri altındaki davranışlarının incelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- ÖZLÜ, H., ÇAKAR, S. ve ÇEPER, İ., AA6063 Alaşımli Alüminyum Profilin H₂SO₄ Elektroliti Kullanılarak Eloksal Kaplanması.
- Park, B. K., Jeong, S., Kim, D., Moon, J., Lim, S. ve Kim, J. S., 2007, Synthesis and size control of monodisperse copper nanoparticles by polyol method, *Journal of colloid and interface science*, 311 (2), 417-424.
- Parker, D., Bussink, J., van de Grampel, H. T., Wheatley, G. W., Dorf, E. U., Ostlinning, E., Reinking, K., Schubert, F., Jünger, O. ve Wagener, R., 2002, Polymers, High- Temperature, *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*.
- Petrie, E., 1975, Plastics and adhesives as adhesives, *Handbook of plastics and elastomers*.
- Pfeiffer, P. ve Abd El Salam Shakal, M., 1998, Effect of bonded metal substrate area and its thickness on the strength and durability of adhesively bonded joints, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 12 (3), 339-348.
- Scarselli, G., Corcione, C., Nicassio, F. ve Maffezzoli, A., 2017, Adhesive joints with improved mechanical properties for aerospace applications, *International journal of adhesion and adhesives*, 75, 174-180.
- Severijns, C., de Freitas, S. T. ve Poulis, J., 2017, Susceptor-assisted induction curing behaviour of a two component epoxy paste adhesive for aerospace applications, *International journal of adhesion and adhesives*, 75, 155-164.
- Singla, M. ve Chawla, V., 2010, Mechanical properties of epoxy resin-fly ash composite, *Journal of minerals and materials characterization and engineering*, 9 (03), 199.
- Spitalsky, Z., Tasis, D., Papagelis, K. ve Galiotis, C., 2010, Carbon nanotube-polymer composites: Chemistry, processing, mechanical and electrical properties, *Progress in Polymer Science*, 35 (3), 357-401.
- Subramanian, A. S., Tey, J. N., Zhang, L., Ng, B. H., Roy, S. ve Wei, J., 2016, Synergistic bond strengthening in epoxy adhesives using polydopamine/MWCNT hybrids, *Polymer*, 82, 285-294.
- Sul, I. H., Youn, J. R. ve Song, Y. S., 2011, Quantitative dispersion evaluation of carbon nanotubes using a new analysis protocol, *Carbon*, 49 (4), 1473-1478.
- Şekercioğlu, T., 2001, Yapıştırma bağlantılarının dinamik yükler altındaki davranışlarının incelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi*.
- Temiz, M., 2003, Review of electromagnetic fields and powers in terms of the normalized propagation constant on the optical mode inside waveguide on double heterojunction constructions, *Laser Physics*, 13 (9), 1123-1137.
- Thostenson, E. T., Ren, Z. ve Chou, T.-W., 2001, Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review, *Composites Science and Technology*, 61 (13), 1899-1912.
- Thostenson, E. T., Karandikar, P. G. ve Chou, T.-W., 2005, Fabrication and characterization of reaction bonded silicon carbide/carbon nanotube composites, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38 (21), 3962.

- Trinidad, J., Chen, L., Lian, A. ve Zhao, B., 2017, Solvent presence and its impact on the lap-shear strength of SDS-decorated graphene hybrid electrically conductive adhesives, *International journal of adhesion and adhesives*, 78, 102-110.
- Vertuccio, L., Guadagno, L., Spinelli, G., Russo, S. ve Iannuzzo, G., 2017, Effect of carbon nanotube and functionalized liquid rubber on mechanical and electrical properties of epoxy adhesives for aircraft structures, *Composites Part B: Engineering*, 129, 1-10.
- Wang, Y., Wang, C., Yin, H., Wang, L., Xie, H. ve Cheng, R., 2012, Carboxyl-terminated butadiene-acrylonitrile-toughened epoxy/carboxyl-modified carbon nanotube nanocomposites: Thermal and mechanical properties, *Express Polymer Letters*, 6 (9).
- Weisenberger, M., Grulke, E., Jacques, D., Rantell, A. T. ve Andrews, R., 2003, Enhanced mechanical properties of polyacrylonitrile/multiwall carbon nanotube composite fibers, *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 3 (6), 535-539.
- Yoon, S. H., Kim, B. C., Lee, K. H. ve Lee, D. G., 2010, Improvement of the adhesive fracture toughness of bonded aluminum joints using e-glass fibers at cryogenic temperature, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24 (2), 429-444.
- Yu, J., Grossiord, N., Koning, C. E. ve Loos, J., 2007, Controlling the dispersion of multi-wall carbon nanotubes in aqueous surfactant solution, *Carbon*, 45 (3), 618-623.
- Zhai, L., Ling, G. ve Wang, Y., 2008, Effect of nano-Al₂O₃ on adhesion strength of epoxy adhesive and steel, *International journal of adhesion and adhesives*, 28 (1-2), 23-28.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Yasin ÖZDEMİR
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya – 14.09.1987
Telefon : 0 532 650 62 44
Faks :
e-mail : yasin0433@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Mersin Atatürk Anadolu Lisesi-Mersin	2004
Üniversite	: İnönü Üniversitesi-Malatya	2015
Yüksek Lisans	: Necmettin Erbakan Üniversitesi-Konya	
Doktora	:	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2006-.....	Türk Hava Kuvvetleri	Uçak Bakım

UZMANLIK ALANI Uçak Yer Destek Teçhizatları (Uçak Harici Takat Sistemleri), Kriyojenik Gazlar, Elektro Eğirme yöntemiyle nano elyaf üretimi, Uçak iklimlendirme ve basınçlandırma sistemleri

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

Y. Ozdemir, M. Ozgoren, I. Goktepelı, "Energy Analysis for an Air-Conditioning System of a Commercial Aircraft: Case study for Airbus A330", International Journal of Energy Applications and Technologies, vol. 3(2), pp. 60-67, December 2016.

Y. Ozdemir, K. Dincer, G.Karanfil, 'Investigation of electrical conductivity of nanofibers(PAN) containing nanoparticle (nano Al₂O₃) produced by Electrospinning Method' International Research and Practice Conference: Nanotechnology and Nanomaterials(NANO-2017) Chernivtsi/UKRANİE, 23-26 August 2017

Y. Ozdemir, N.AtaberK, M.Ekrem, 'Mechanical and Thermal Properties of Graphen and Carbon Nanotube Reinforced Epoxy Adhesives' The Internatınonal Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology in ÇEŞME/İZMİR (IMSMATEC'18), April 10-12 2018.