



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Nano Parçacık Katkılı Poliüretan Yapıştırıcıların
Mekanik ve Termal Özelliklerinin Deneysel
Olarak İncelenmesi

Mehmet TONGUR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

HAZİRAN-2020
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet TONGUR tarafından hazırlanan “Nano Parçacık Katkılı Poliüretan Yapıştırıcıların Mekanik ve Termal Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi” adlı tez çalışması 22/06/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Ahmet AVCI

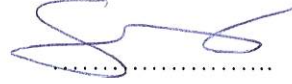
Danışman

Doç. Dr. Necati ATABERK

Üye

Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

İmza



Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. S. Savaş DURDURAN
FBE Müdürü

Bu tez çalışması BAP tarafından 191319006 numaralı proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Mehmet TONGUR

22.05.2020

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nano Parçacık Katkılı Poliüretan Yapıştırıcıların Mekanik ve Termal Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi

MEHMET TONGUR

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Necati ATABERK
2020, 109 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Necati ATABERK

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

Bu tez çalışmasında, poliüretan yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mekanik ve termal özelliklerini geliştirmek amacıyla ağırlıkça farklı oranlarda (%0, % 0.05, % 0.10 ve % 0.15) grafen (GR) ve çok cidarlı karbon nanotüp (ÇCKNT) ilave edilerek nanokompozit poliüretan yapıştırıcılar üretilmiştir. Nanoparçacık türü ve katkı oranının etkisini incelemek amacıyla Al 2024-T3 ve 8 katmanlı karbon takviyeli kompozit levhalar kullanılarak tek taraflı bindirmeli bağlantılar (TTBB) üretilmiştir. Üretilen numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla sabit çekme yükü altında ASTM D1002-10 standardına uygun olarak mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Poliüretan yapıştırıcının güçlendirilmesinde kullanılan nanoparçacıkların dağılımı ve kırılma yüzeylerin morfolojisi SEM analizleri ile görüntülenmiştir. Yapıştırıcı numunelerin termal özelliklerini araştırmak için Termogravimetrik Analiz (TGA) ve Diferansiyel Termal Analiz (DTA) testleri uygulanmıştır. DTA testi ile yapıştırıcı numunelerinin camsı geçiş sıcaklığı (T_g), erime sıcaklığı (T_m) ve erime entalpisi (H_m) elde edilmiş olup TGA testleriyle de üretilen numunelerin kütle kaybına bağlı olarak sıcaklık değişimleri elde edilmiştir. Poliüretan yapıştırıcıyla birleştirilmiş TTBB numunelerinin mekanik özellikler açısından en uygun bağlantı ağırlıkça %0.10 grafen ve %0.15 ÇCKNT içeren alüminyum-alüminyum TTBB'lerde görülmektedir. Çekme numunelerinde ise mekanik özellikler açısından en uygun yapıştırıcı ağırlıkça %0.05 grafen ve %0.10 ÇCKNT içeren numunelerde görülmektedir. Termal özellikler açısından değerlendirildiğinde ise üretilen numunelerden en yüksek kütle kaybı başlangıç sıcaklığı 333.88 °C ile ağırlıkça %0.05 grafen içeren numunede, en yüksek tamamen bozulma sıcaklığı 527.7 °C ile %0.10 ÇCKNT içeren numunede, en yüksek erime sıcaklığı (T_m) 300.36 °C ile %0.05 grafen içeren numunede ve en yüksek camsı geçiş sıcaklığı (T_g) sıcaklığı 56.54°C ile %0.05 grafen içeren numunede elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Diferansiyel Termal Analiz, Mekanik ve Termal Özellikler, Nanokompozitler, Poliüretan yapıştırıcılar, Taramalı Elektron Mikroskopi, Termogravimetrik Analiz

ABSTRACT

MS THESIS

Experimental Investigation of Mechanical and Thermal Properties of Nano Particle Doped Polyurethane Adhesives

Mehmet TONGUR

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTIN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Necati ATABERK

2020,109 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Necati ATABERK

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

In this thesis, nanocomposite polyurethane adhesives were produced by adding different ratios (%0, % 0.05, % 0.1 and % 0.15) of graphene (GR) and Multi-Walled Carbon Nanotube (MWCNT) to improve the mechanical and thermal properties of the polyurethane adhesive bonded connections. In order to examine the effect of nanoparticle type and additive ratio, single lap joints (SLJ) were produced using Al 2024-T3 and 8-layer carbon-reinforced composite plates. While determining the mechanical properties of SLJ, mechanical tests were carried out in accordance with ASTM D1002-10 standard under stable tensile load. The distribution of the nanoparticles and the morphology of the failure surfaces 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. The glass transition temperature (T_g), melting temperature (T_m) and melting enthalpy (H_m) of the adhesive samples produced by the DTA test were obtained and decomposition temperatures of the samples produced in the TGA tests were obtained with respect to mass loss. In terms of mechanical properties, the most appropriate connection of polyurethane adhesive bonded SLJ connections samples was seen in aluminium-aluminium SLJs containing percentage by weight %0.10 graphene and %0.15 MWCNT. As for adhesive samples, the most appropriate adhesive was seen in samples containing percentage by weight %0.05 graphene and %0.10 MWCNT. When evaluated in terms of thermal properties, the highest mass loss from the produced samples was observed in the sample containing the starting temperature of 333.88 ° C and 0.05% by weight of graphene, the sample with the highest total decomposition temperature of 527.7 ° C and %0.10 by weight of MWCNT, the sample with the highest melting temperature (T_m) of 300.36 ° C and %0.05 by weight of graphene and the highest glass transition temperature (T_g) temperature was obtained 56.54 ° C in the sample containing % 0.05 graphene.

Keywords: Differential Thermal Analysis, Mechanical and Thermal Properties, Nanocomposites, Polyurethane Adhesives, Scanning Electron Microscopy, Thermogravimetric analysis

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans Tez çalışmamın yapılmasında ve tamamlanmasında her türlü desteği ve yardımı esirgemeyen tez danışmanım Doç. Dr. Necati ATABERK hocama minnet ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen; test ve analizlerin yapılması ve yorumlanmasında, desteklerinden ve bu tezin hazırlamasında yaptığı katkılardan dolayı Dr. Öğretim Üyesi Mürsel EKREM hocama en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Ayrıca, bu çalışmanın yapılabilmesi için deney numunelerin temin edilmesi ve incelenmesi gibi konularda 191319006 numaralı proje ile maddi destek veren Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, her zaman yanımda olan ve benden desteklerini hiç esirgemeyen sevgili anneme, babama ve canım eşime en içten duygularıyla teşekkür ederim.

MEHMET TONGUR
KONYA-2020

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ÖNSÖZ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	11
3.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	12
3.1.1. Yapıştırıcı.....	12
3.1.2. Alüminyum Alaşımı (Al 2024-T3)	14
3.1.3. Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Malzeme	15
3.1.4. Nanoparçacıklar ve Özellikleri	15
3.2. Yapıştırıcı Bağlantıları ve Yapıştırıcıların Kuramsal Temelleri	19
3.2.1. Yapıştırma.....	19
3.2.2. Yapıştırma Bağlantıları	23
3.2.3. Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Gerilmeler	25
3.2.4. Yapıştırma İşleminde Olası Hasar Mekanizmaları	26
3.3. Analitik Yaklaşımlar	27
3.4. Yapıştırma Bağlantı Numunelerinin Yüzeylerinin Hazırlanması	31
3.5. Nanoparçacık Katkılı Poliüretan Yapıştırıcının Hazırlanması.....	36
3.6. Çekme Numunelerinin Üretilmesi	37
3.7. Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantıların Yapıştırılması.....	37
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	40
4.1. Çekme Numunelerinin Test Sonuçları.....	40
4.1.1. Grafen Katkılı Poliüretan Yapıştırıcıların Çekme Testleri	41
4.1.2. ÇCKNT Katkılı Poliüretan Yapıştırıcıların Çekme Testleri.....	42
4.1.3. Grafen ve ÇCKNT Katkılı Poliüretan Yapıştırıcıların Çekme Testleri.....	44
4.2. Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantılarının Kayma Testleri	48
4.2.1. Grafen Katkılı Poliüretan Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantılarının Kayma Testleri	50
4.2.2. ÇCKNT Katkılı Poliüretan Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantılarının Kayma Testleri	53
4.2.3. Grafen ve ÇCKNT Katkılı Poliüretan Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantılarının Kayma Testleri	57
4.3. Yapıştırıcıların TGA ve DTA Sonuçları.....	68
4.3.1. Grafen Katkılı Poliüretan Yapıştırıcının TGA ve DTA sonuçları	69
4.3.2. ÇCKNT Katkılı Poliüretan Yapıştırıcıların TGA ve DTA Sonuçları.....	72
4.3.3. Grafen ve ÇCKNT Katkılı Poliüretan Yapıştırıcıların TGA ve DTA Sonuçları	74

4.4. Kırılma Yüzeylerinin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntü Analizi.	81
4.4.1. Çekme Numunelerinin Kırılma Yüzeyi SEM Görüntü Analizleri	82
4.4.2. Tek Taraflı Bindirmeli Alüminyum-Alüminyum Bağlantıların Kırılma Yüzeyi SEM Görüntüleri	86
4.4.3. Tek Taraflı Bindirmeli Kompozit-Kompozit Bağlantıların Kırılma Yüzeyi SEM Görüntüleri.....	89
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	93
6. GELECEK ÇALIŞMALAR.....	101
KAYNAKLAR	102
ÖZGEÇMİŞ	110



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Grafenin (a) 1200 ve (b) 20000 büyültmedeki SEM görüntüsü.....	17
Şekil 3.2. Tek cidarlı karbon nano tüpler	17
Şekil 3.3. Çok cidarlı karbon nano tüpler(ÇCKNT).....	18
Şekil 3.4. ÇCKNT'lerin (A) 1200 ve (b) 20000 büyültmedeki SEM görüntüsü.....	19
Şekil 3.5. Adezyon ve kohezyon olayının şematik olarak gösterilmesi	20
Şekil 3.6. Mekanik kilitlenme mekanizması, yapıştırılan yüzeydeki iyi ıslatma ve kötü ıslatma görüntüsü	21
Şekil 3.7. Difüzyonun aşamaları.....	22
Şekil 3.8. Polimer ve metal arasında gerçekleşen elektrostatik bağlanma(Aslan,2018)	22
Şekil 3.9. 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 takviyeli alın bağlantısı. (g) Çift taraflı takviyeli alın bağlantısı. (h) Alın bağlantısı, (i) Silindirik bindirmeli bağlantı, (j) Soyulma	24
Şekil 3.10. En yaygın yük tipleri ve bindirme bölgesindeki gerilme dağılımları: (a) Çekme veya basma yükü, (b) Kesme yükü, (c) Soyulma yükü, (d) Ayrılma yükü	25
Şekil 3.11. Tek taraflı bindirmeli bağlantıları ve maruz kaldığı yük	28
Şekil 3.12. ASTM D638-10 standardına göre çekme numunesi ölçüleri	30
Şekil 3.13. Kompozit bağlantı numunelerinin yüzeylerinin hazırlanması	32
Şekil 3.14. Alüminyum levhaların sodyum hidroksit çözeltisi ile temizlenmesi	33
Şekil 3.15. a) Sülfürik asit/sodyum dikromat tartılması, b) Sülfürik asit/sodyum dikromat çözeltisi ile dağlama, c) Dağlama sonrası plakalar d) Plakaların saf su ile yıkanması...	34
Şekil 3.16. a) Fosforik asit ile anotlama işlemi b) Kurutma işlemi	35
Şekil 3.17. Yüzeyleri hazırlanmış alüminyum ve kompozit levhalar.....	35
Şekil 3.18. Nanoparçacık katkılı yapıştırıcının ultrasonik karıştırma ünitesi ile karıştırma işlemi.....	36
Şekil 3.19. Çekme numunesinin kalıba dökülmesi ve kalıptan çıkan çekme numuneleri	37
Şekil 3.20. Üretilen tek taraflı bindirmeli numunelerin yapıştırma ve kurutma süreci ...	38

Şekil 4.1. Poliüretan yapıştırıcı ve Grafen nanoparçacık katkılı yapıştırıcılara ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	42
Şekil 4.2. Poliüretan yapıştırıcı ve ÇCKNT nanoparçacık katkılı yapıştırıcılara ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	43
Şekil 4.3. Poliüretan yapıştırıcı ve Ağırlıkça %0.05 Grafen ve %0.05,0.10 ve 0.15 ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcılara ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	45
Şekil 4.4. Poliüretan yapıştırıcı ve Ağırlıkça %0.10 Grafen ve %0.05,0.10 ve 0.15 ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcılara ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri.....	46
Şekil 4.5. Ağırlıkça %0.15 Grafen ve %0.05,0.10 ve 0.15 ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcılara ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri	47
Şekil 4.6. Yapıştırılmalı bağlantının Shimadzu AGS-X cihazında çekme testi.	48
Şekil 4.7. Kayma dayanım testleri sonucunda oluşan hasar mekanizmaları a) PU Al-Al b) PU Komp-Komp c) PU Al-Komp numuneleri	49
Şekil 4.8. Grafen katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş AL-AL TTBB numunelerin kayma test sonuçları	51
Şekil 4.9. Grafen katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş AL-KOMP TTBB numunelerinin kayma test sonuçları	52
Şekil 4.10. Grafen katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş KOMP-KOMP TTBB numunelerinin kayma test sonuçları	53
Şekil 4.11. ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş AL-AL TTBB numunelerinin kayma test sonuçları	54
Şekil 4.12. ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş AL-KOMP TTBB numunelerinin kayma test sonuçları	55
Şekil 4.13. ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş KOMP-KOMP TTBB numunelerinin kayma test sonuçları	56
Şekil 4.14. %0.05 Grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkılı Poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş AL-AL TTBB numunelerinin kayma test sonuçları.....	58
Şekil 4.15. %0.05 Grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT Katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş AL-KOMP TTBB numunelerinin kayma test sonuçları	59
Şekil 4.16. %0.05 Grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş KOMP-KOMP TTBB numunelerinin kayma test sonuçları	60
Şekil 4.17. %0.10 Grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş AL-AL TTBB numunelerinin kayma test sonuçları.....	61

Şekil 4.18. %0.10 Grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş AL-KOMP TTBB numunelerinin kayma test sonuçları	62
Şekil 4.19. %0.10 grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş KOMP-KOMP TTBB numunelerinin kayma test sonuçları	63
Şekil 4.20. %0.15 Grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş AL-AL TTBB numunelerinin kayma test sonuçları.....	65
Şekil 4.21. %0.15 grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş AL-KOMP TTBB numunelerinin kayma test sonuçları	66
Şekil 4.22. %0.15 Grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş KOMP-KOMP TTBB numunelerinin kayma test sonuçları	67
Şekil 4.23. TG/DTA sisteminin şematik diyagramı (Raju,2013)	69
Şekil 4.24. Saf poliüretan ve ağırlıkça %0.05,0.10 ve 0.15 grafen katkılı poliüretan numunelerinin TGA grafiği	70
Şekil 4.25. Saf Poliüretan ve ağırlıkça %0.5,0.10 ve 0.15 grafen katkılı poliüretan numunelerinin DTA grafiği	71
Şekil 4.26. Saf poliüretan ve ağırlıkça %0.05,0.10 ve 0.15 ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı numunelerinin TGA grafiği	72
Şekil 4.27. Saf poliüretan yapıştırıcı ve ağırlıkça %0.05,0.10 ve 0.15 ÇCKNT nanoparçacık katkılı poliüretan yapıştırıcı numunelerinin DTA grafiği	73
Şekil 4.28. Saf poliüretan ve ağırlıkça % 0.05 grafen oranı sabit %0.05,0.10 ve 0.15 ÇCKNT katkılı poliüretan numunelerinin TGA grafiği	75
Şekil 4.29. Saf poliüretan ve ağırlıkça % 0.05 grafen oranı sabit %0.05,0.10 ve 0.15 ÇCKNT katkılı poliüretan numunelerinin DTA grafiği	76
Şekil 4.30. Saf poliüretan ve ağırlıkça % 0.10 grafen oranı sabit %0.05,0.10 ve 0.15 ÇCKNT katkılı poliüretan numunelerinin TGA grafiği	77
Şekil 4.31. Saf poliüretan ve ağırlıkça % 0.10 grafen oranı sabit %0.5,0.10 ve 0.15 ÇCKNT katkılı poliüretan numunelerinin DTA grafiği	78
Şekil 4.32. Saf poliüretan ve ağırlıkça % 0.15 grafen oranı sabit %0.05,0.10 ve 0.15 ÇCKNT katkılı poliüretan numunelerinin TGA grafiği	79
Şekil 4.33. Saf poliüretan ve ağırlıkça % 0.15 grafen oranı sabit %0.05,0.10 ve 0.15 ÇCKNT katkılı poliüretan numunelerinin DTA grafiği	80
Şekil 4.34. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analiz şeması (Şükür,2019) ve ZEISS Evo LS 10 marka cihaz	82

Şekil 4.35. Çekme Testleri Kırılma Yüzeyleri SEM Görüntüleri a) PU numunesi 1000 büyütme görüntüleri b) PU numunesi 10000 büyütme.....	83
Şekil 4.36. Çekme Testleri Kırılma Yüzeyleri SEM Görüntüleri a) 15GR numunesi 1000 büyütme, b) 15GR numunesi 10000 büyütme.....	84
Şekil 4.37. Çekme Testleri Kırılma Yüzeyleri SEM Görüntüleri a) 15KNT numunesi 1000 büyütme, b) 15KNT numunesi 10000 büyütme	85
Şekil 4.38. Çekme Testleri Kırılma Yüzeyleri SEM Görüntüleri a) 10GR10KNT numunesi 1000 büyütme, b) 10GR10KNT numunesi 10000 büyütme	86
Şekil 4.39. Tek taraflı bindirmeli Alüminyum-Alüminyum bağlantıların çekme testi sonrasında oluşan kırık yüzeylerin SEM Görüntüleri a) PU AL-AL numunesi 1000 büyütme, b) PU AL-AL numunesi 10000 büyütme	87
Şekil 4.40. Tek taraflı bindirmeli Alüminyum-Alüminyum bağlantıların çekme testi sonrasında oluşan kırık yüzeylerin SEM Görüntüleri a) 15GR AL-AL numunesi 1000 büyütme, b) 15GR AL-AL numunesi 10000 büyütme.....	88
Şekil 4.41. Tek taraflı bindirmeli Alüminyum-Alüminyum bağlantıların çekme testi sonrasında oluşan kırık yüzeylerin SEM Görüntüleri a) 15GR AL-AL numunesi 1000 büyütme, b) 15GR AL-AL numunesi 10000 büyütme.....	88
Şekil 4.42. Tek taraflı bindirmeli Alüminyum-Alüminyum bağlantıların çekme testi sonrasında oluşan kırık yüzeylerin SEM Görüntüleri a) 05GR05KNT AL-AL numunesi 1000 büyütme, b)05GR05KNT AL-AL numunesi 10000 büyütme.....	89
Şekil 4.43. Tek taraflı bindirmeli Kompozit-Kompozit bağlantıların çekme testi sonrasında oluşan kırık yüzeyleri SEM Görüntüleri a) PU KOMP-KOMP numunesi 1000 büyütme, b) PU KOMP-KOMP numunesi 10000 büyütme.....	90
Şekil 4.44. Tek taraflı bindirmeli Kompozit-Kompozit bağlantıların çekme testi sonrasında oluşan kırık yüzeyleri SEM Görüntüleri a) 05GR KOMP-KOMP numunesi 1000 büyütme, b)05GR KOMP-KOMP numunesi 10000 büyütme.	91
Şekil 4.45. Tek taraflı bindirmeli Kompozit-Kompozit bağlantıların çekme testi sonrasında oluşan kırık yüzeyleri SEM Görüntüleri a) 05KNT KOMP-KOMP numunesi 1000 büyütme, b)05KNT KOMP-KOMP numunesi 10000 büyütme.....	91
Şekil 4.46. Tek taraflı bindirmeli Kompozit-Kompozit bağlantıların çekme testi sonrasında oluşan kırık yüzeyleri SEM Görüntüleri a) 05GR05KNT KOMP-KOMP numunesi 1000 büyütme, b)05GR05KNT KOMP-KOMP numunesi 10000 büyütme....	92

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. Nano parçacık ile güçlendirilmiş poliüretan yapıştırıcı numuneleri	12
Çizelge 3.2. KLB 75 Poliüretan yapıştırıcının mekanik özellikleri	13
Çizelge 3.3. Al2024-T3 malzemesinin mekanik özellikleri (Gültekin,2018)	14
Çizelge 3.4. Al2024-T3 malzemesinin kimyasal bileşimi (Ekrem,2015)	14
Çizelge 3.5. CFRP kompozit malzemesinin mekanik özellikleri	15
Çizelge 3.6. Farklı karbon nano malzemelerin fiziksel özellikleri (Ma,2010).....	16
Çizelge 3.7. ÇCKNT'lerin mekanik özellikleri.....	18
Çizelge 3.8. Temel hasar tipleri (ISO 10365,1992).....	27
Çizelge 3.9. Alüminyum-Alüminyum TTBB numunelerinin katkı oranları	39
Çizelge 3.10. Alüminyum-Kompozit TTBB numunelerinin katkı oranları	39
Çizelge 3.11. Kompozit-Kompozit TTBB numunelerinin katkı oranları.....	40
Çizelge 4.1. Saf poliüretan yapıştırıcı ve Grafen katkılı poliüretan yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin ortalama değerleri.....	42
Çizelge 4.2. Poliüretan yapıştırıcı ve Grafen katkılı poliüretan yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin ortalama değerleri.....	44
Çizelge 4.3. Grafen ve ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin ortalama değerleri	48
Çizelge 4.4. Poliüretan yapıştırıcı ve grafen katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş TTBB numunelerinin mekanik özelliklerinin ortalama değerleri	53
Çizelge 4.5. Poliüretan yapıştırıcı ve ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş TTBB numunelerinin mekanik özelliklerinin ortalama değerleri	57
Çizelge 4.6. Poliüretan yapıştırıcı ve %0.05 Grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT Katkılı TTBB numunelerinin mekanik özelliklerinin ortalama değerleri.....	60
Çizelge 4.7. Poliüretan yapıştırıcı ve %0.10 grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkılı TTBB numunelerinin mekanik özelliklerinin ortalama değerleri.....	64
Çizelge 4.8. Poliüretan yapıştırıcı ve %0.15 grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT Katkılı poliüretan yapıştırıcıların TTBB numunelerinin mekanik özelliklerinin ortalama değerleri	67
Çizelge 4.9. Poliüretan ve ağırlıkça %0.05,0.10 ve 0.15 grafen katkılı poliüretan numunelerinin termal özellikleri.....	71
Çizelge 4.10. Saf poliüretan yapıştırıcı ve ağırlıkça %0.05,0.10 ve 0.15 grafen nanoparçacık katkılı poliüretan yapıştırıcıların termal özellikleri.....	74

Çizelge 4.11. Grafen ve ÇCKNT nanoparçacık katkılı poliüretan yapıştırıcıların termal özellikleri	74
Çizelge 4.12. Saf poliüretan yapıştırıcı, hibrit grafen ve ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcıların termal özellikleri.....	81



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

cm	: Santimetre
°	: Derece
°C	: Derece santigrat
g	: Gram
s	: Saniye
GPa	: Giga Paskal
MPa	: Mega Paskal
N	: Newton
K	: Kelvin
m	: Metre
m ²	: Metrekare
µm	: Mikrometre
mm	: Milimetre
nm	: Nanometre
%	: Yüzde
G	: Yapıştırıcının Kayma Modülü
τ	: Kayma gerilmesi
γ	: Kayma şekil değiştirme
σ	: Çekme gerilmesi
ε	: Birim Şekil Değiştirme
A_{kayma}	:Yapıştırıcının Kayma Alanı
mW	: Miliwatt
mJ	: MiliJoule

Kısaltmalar

AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğrusal Akım
UV	: Ultraviyole
Al	: Alüminyum
TCKNT	: Tek Cidarlı Karbon Nanotüp
ÇCKNT	: Çok Cidarlı Karbon Nanotüp
GR	: Grafen
TTBB	: Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantıları
DCB	: Double-Cantilever Beam (Çift Konsollu Kiriş)
DSC	: Differential scanning calorimetry (Diferansiyel taramalı kalorimetri)
DTA	: Diferansiyel Termal Analiz
TGA	: Termogravimetrik analiz
FT-IR	: Fourier dönüşümü infrared spektroskopi
PAA	: Fosforik asit anodizasyon
NaOH	: Sodyum Hidroksit
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı elektron mikroskobu)
T_g	: Camı geçiş sıcaklığı
T_m	: Erime sıcaklığı
H_m	: Erime Entalpisi

1. GİRİŞ

Eski çağlardan günümüze kadar, malzemelerin kullanım amaçlarına göre mühendislik yönünden gerekliliğin sağlanması ve malzemeleri birbirine eklemek ve kullanım ömürleri süresince bir arada tutmak amacıyla birçok malzeme ve teknik kullanılmıştır. Kaynak, lehim, perçin, cıvata gibi uzun yıllar kullanılan geleneksel birleştirme yöntemlerinin dışında bu yöntemlerin kullanımlarında oluşabilecek dezavantajları giderebilen basit, düşük üretim maliyeti, daha düşük tasarım ağırlığı ve kullanımı daha basit olan malzemeler bulunmaktadır. Yapıştırıcı olarak adlandırılan bu malzemeler, plastik, kauçuk vb. malzemelerden yapılmaktadır (Ekrem,2015).

Yapıştırıcı, yapıştırılacak olan malzemeleri bir arada bağlamak ve tutturmak için malzemelerin yüzeylerine uygulanan kimyasal bağlayıcı bir malzeme olarak tarif edilir (ASTM,2011). Son yıllardaki teknolojik gelişmeler vasıtasıyla, yapıştırıcıların fiziksel ve mekanik özelliklerindeki iyileşmelerden dolayı geleneksel birleştirme yöntemlerine alternatif olan yapıştırma ile birleştirme tekniği birçok mühendislik alanında başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Özellikle bağlantı güvenilirliğinin gereksinim duyulduğu havacılık, uzay, otomotiv, altyapı sistemi, inşaat ve deniz endüstrilerinde yapıştırıcılar, gün geçtikçe geleneksel bağlantı yöntemlerin yerini almaktadır (Kayacan,2004).

Yapıştırma bağlantıları, yapılan işlemlerde büyük katkı sağlamasına ve çok geniş bir kullanıma sahip olmasına rağmen, yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin (elastisite modülleri, poisson oranı, akma ve çekme mukavemeti vb.) tespit edilmesi ve oluşturulan bağlantıların güvenilirliği gibi bazı durumlarla karşı karşıya kalınmaktadır. Bunun yanında bağlantıların mekanikle ilgili niteliklerinin doğru olarak belirlenmesinden ayrı olarak, belirli bir yüklemde bağlantıların gerilme dağılımlarını tespit edebilmek, termal özelliklerinin, bağlantı dayanımı ve diğer etkenlerin belirlenmesini de zorunlu hale getirir (Gültekin,2018).

Yapıştırma bağlantılarının dayanımları ile alakalı yapılan araştırmalar genel olarak incelendiğinde; bağlantıların bindirme uzunluğu, bağlantı kalınlığı, yapıştırılan malzemelerin kalınlığı, yükleme biçimi, çevresel şartlar (sıcaklık, su, nem), bağlantı geometrisi, yapılan yüzey işlemleri ve yapıştırıcı madde miktarı konuları ile ilgili çalışmalar dikkat çekmektedir. Son zamanlarda ise özellikle poliüretan yapıştırıcılar içerisine katılan çeşitli özelliklerdeki nanoparçacıkların, bağlantıların mekanik özelliklerine etkisi ile ilgili araştırmalara literatür de rastlanmamaktadır. Yapıştırıcı içerisine nanoparçacık takviyesi ile ilgili yapılan bu araştırmalar ağırlıklı olarak statik

yükler altında epoksi yapıştırıcılara nanoparçacık katılarak yapılan çalışmalar olarak dikkat çekmektedir. Buna karşın poliüretan yapıştırıcı ile yapılan çalışmalar, incelenen literatür içerisinde oldukça sınırlı sayıda kalmaktadır. Yapıştırıcılar ile yapılan çalışmalar incelendiğinde; genellikle yapıştırıcı madde içerisinde kullanılan nanoparçacık yapıştırıcı maddelerin özelliklerini önemli ölçülerde değiştirmesine neden olduğu tespit edilmiştir. Nanoparçacıklar yapıştırıcıların termal, elektriksel, termomekanik özelliklerine olumlu yönde katkı sağlarken aynı zamanda yapıştırıcıların çevresel etkenlere dayanıklılığını, yüksek oranda su absorbe etme özellikleri ve geliştirilmiş yaşlanma özellikleri sayesinde arttırmaktadırlar.

Bu çalışmada aderent malzeme olarak yüksek dayanıma, işlenebilme özelliğine ve yüzey kalitesine sahip olan ayrıca yapısal uygulamalarda; uçak sanayii, otomotiv, askeri ve makine sektörlerinde, yaygın olarak kullanılan AA2024-T3 alüminyum alaşımı levha ve ağırlık bakımından avantajlı, korozyon etkiler açısından metallere göre üstünlüğü olan, titreşim absorbe yeteneğine sahip karbon fiber kumaş takviyeli kompozit levhalar kullanılmıştır. Yapıştırıcı olarak ise diğer muadil yapıştırıcılara oranla ucuz olmasından dolayı poliüretan yapıştırıcı kullanılmıştır. Katkı maddesi olarak kullanılan ÇCKNT bilim dünyasında olağanüstü elektronik, termal, mekanik, optik ve kimyasal özellikleri nedeniyle tercih edilirken ve grafen nanoparçacıklar ise bilinen en ince, esnek ve hafif malzeme olmasından dolayı tercih edilmiştir. Oluşturduğumuz hibrit yapıştırıcının mekanik ve termal özellikler açısından daha iyi sonuçlar alınacağı düşüncesi ile seçilmiştir.

Bu tez çalışmasında yapıştırma bağlantılarının güvenilir bir şekilde kullanımını sağlamak amacıyla yapıştırıcıların mekanik özelliklerini tespit etmede çalışmalar yapılmış poliüretan yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerini geliştirmek için grafen ve karbon nano tüpten oluşan değişik oranlarda nanoparçacıklar ilave edilerek elde edilen yapıştırıcıların mekanik ve termal özellikleri deneysel olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Ek olarak yapıştırıcı içerisine eklenen nano yapının türü ve katkı oranının etkisini incelemek için saf poliüretan yapıştırıcı çekme dayanımı testleri, nano parçacık katkılı yapıştırıcıya ait çekme dayanımı testleri yapılmıştır. Üretilen nano parçacık katkılı yapıştırıcılar kullanılarak Al 2024 T3 ve karbon fiber takviyeli epoksi katkılı 8 katmanlı kompozit bağlantı numuneleri üretilerek yapılan numunelerin çekme yükü altında mekanik özellikleri belirlenmiştir. Oluşturulan numunelerin taramalı elektro mikroskopi (SEM) görüntüleri ile morfolojik yapı analizi, yapıştırıcı numunelerin termal özelliklerini araştırmak için Termogravimetrik Analiz

(TGA) ve Diferansiyel Termal Analiz (DTA) testleri uygulanarak DTA testi ile üretilmiş yapıştırıcı numunelerinin camsı geçiş sıcaklığı (T_g), erime sıcaklığı (T_m), erime entalpisi (H_m) ayrıca TGA testleriyle de üretilen numunelerin kütle kaybına oranla bozulma sıcaklıkları elde edilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yapıştırıcı alanında çalışmalar sonucunda, yapıştırma bağlantıları; bağlantı güvenilirliğinin gerekli olduğu uçak, uzay ve otomotiv gibi sektörlerde alışılmış yöntemlerin yerine alternatif olarak kullanılmaktadır (Gültekin,2014).

Yapıştırıcılar uçak yapımında kullanılan yapıştırma bağlantılarında kullanıldığı gibi, aynı zamanda otomotiv sektöründe, motor bloğu sızdırmazlığında ve birçok cam, plastik gibi parçaların birleştirilmesinde oldukça geniş kullanıma sahiptir(Tek,2011).

Yapıştırma bağlantılarının tasarımı, genel olarak avantajlı olmasına rağmen bu bağlantıların dezavantajları da görülmektedir. İnce ve kalın malzemelerin birleştirilmesi, eşit gerilme dağılımı sağlaması, darbe ve titreşim sönümleme yeteneğinin iyi olması ve alışılmış birleştirme yöntemlerinden daha kaliteli olması avantajları olarak sıralanabilir. Yapıştırma ile birleştirme yöntemlerinin dezavantajları ise; mukavemetinin istenilen seviyede olmaması, bağlantının kimyasal ortam ve nem gibi çevresel faktörlerle etkilenmesi, yüzey hazırlığının gerektirmesi ve bağlantıların uçlarında gerilme yığılmasına bağlı erken kopma görülmesi bunlara örnektir (Edwards,1998).

Yapıştırma bağlantılarının karmaşık bir gerilme analizi vardır. Yapıştırıcı ile yapıştırılan malzemelerin yüzeylerinde oluşan dengesizlik ve karmaşık geometri, yapıştırıcı ile birleştirilmiş yapıştırma bağlantılarının analizini zorlaştırmaktadır (Ekrem,2015) ve 70 yılı geçen bir süredir bu konuda çalışmalar yapılmaktadır.

Bu alanda yapılan çalışmaların ilki olabilecek (Volkersen,1938) yaptığı çalışmada, mukavemeti yüksek malzemeleri, lineer elastik bir modele sahip ve yalnız kayma gerilmelerinden dolayı deforme olduğunu kabul ettiği bir yapıştırıcı ile tek tesirli bağlantı şeklinde birleştirerek çalışmasını gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışma sonucunda yapıştırıcı kısmındaki kayma gerilmelerinin bindirme yüzeyinin her iki kısmında en yüksek değerleri aldığını belirlemiştir.

(Kinloch,1987) tarafından yayınlanan ‘Adezyon ve Yapıştırıcılar’ isimli yayında yapışma olayı açıklanırken kullanılan teoriler irdelenerek, bağlantıların mekanik

davranışları, yapıştırma yüzeylerinin hazırlanması, kırılma mekaniği, sertleşme mekanizmaları ve adezyon olayı gibi konular hakkında bilgiler vermiştir.

(He,2011) yaptığı sonlu elemanlar analizinde yapıştırma bölgesinin orta kısımlarında gerilmelerin daha az olduğunu ve bağlantıların uçlarında yüksek gerilmeler oluştuğunu ifade etmiştir.

(Dodiuk ve ark.,2006) poliüretan yapıştırıcı içerisine ağırlıkça farklı oranlarda (%1, %3 ve %5) üç farklı nano parçacık kullanarak ürettikleri yapıştırıcıların, mekanik ve kimyasal özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan analizler sonucunda; termo mekanik ve yapışma özelliklerinin nano parçacıkların yoğunluğuna bağlı olduğunu belirtmiştir. Ek olarak yapıştırıcı içerisine üç farklı oranda eklenen katkıları, cam geçiş sıcaklığını önemli derecede artırmasına neden olduğunu gözlemlemiştir.

(Boutar ve ark.,2017) çalışmasında tek bileşenli poliüretan yapıştırıcıları, araç ağırlığını azaltmak ve otomotiv çarpma direncini arttırmak için geleneksel sert yapısal yapıştırıcılara alternatif olarak deneysel olarak incelemiştir. Alüminyum bakır alaşımlı plakaları tek bileşenli poliüretan yapıştırıcı kullanarak 0.5 mm, 1 mm ve 2 mm yapıştırıcı kalınlıklarında DCB ve ENF test modüllerini kullanarak mekanik davranışlarını incelemiştir. Kırılma enerjilerinin 1 mm kalınlığa kadar arttığını 1 ile 2 mm arasında kırılma enerjilerinin azaldığını ve pratik uygulamalarda 2 mm üzeri kalınlıkların imal edilmesinin zor olduğunu görmüştür.

(Alia ve ark.,2016) çalışmasında gemi yapımında kullanılmak üzere deniz suyuna batırılmış çelik-poliüretan-çelik yapıştırma bağlantılarının olumsuz çevre koşulların da çalışmasını incelemiştir. Numuneler 50 °C de 7 gün boyunca 0° ve 90° arası 7 farklı yükte tutularak deneysel sonuçlar incelenmiştir. Daha sonra aynı sıcaklık ve yüklerde kuru ortamda ve damıtılmış suda 0° ve 45° 'de test sonuçlarını incelenmiştir. Test sonuçları, deniz suyuna batırılmış çelik-poliüretan-çelik yapıştırma bağlantılarının, 60° ve 75° kayma gerilmelerine maruz kaldığında en iyi davranışı gösterdiği sonucuna varılmış ayrıca deniz suyu ortamında ileri derecede bozunma olduğu gözlemlenmiştir.

(Machado ve ark.,2019) çalışmasında otomotivde kullanılmak üzere poliüretan dayanıklılığında epoksi bazlı Nagase ChemteX firmasının XNR6852 E-3 yapıştırıcısını kullanarak -30 °C, 24 °C ve 80 °C sıcaklıklarda 1.5 mm ve 2 mm kalınlıklardaki alüminyum alaşım ve kompozit malzemeler (CFRP) kullanarak numunelerinin hapsedtiği enerjiyi deneysel olarak incelemiştir. CFRP+ CFRP numunelerin 80 °C en yüksek tokluğa (80J) sahip olduğunu AL 2 mm + AL 2 mm ve AL 1.5 mm + AL 1.5

mm numunelerinin 24 °C de en yüksek tokluğa (60 J) ulaştığını deneysel olarak elde etmiştir.

(Boutar ve ark.,2018) çalışmasında alüminyum alaşımlı numuneler hazırlayarak Alüminyum bakır alaşımının ve DINITROL 500 poliüretan yapıştırıcının yüzey pürüzlülüğünün yorulmaya etkisini araştırmıştır. Araştırmasında 0.3 mm'den 2 mm'ye kadar dört poliüretan yapıştırıcı kalınlığı ve $Ra \approx 0.6 \mu m$ - $Ra \approx 1.5 \mu m$ dört farklı yüzey pürüzlülüğü hazırlayıp dinamik yük altında mekanik davranışlarına ve SEM görüntülerine bakmıştır. Araştırmasının sonucunda $Ra \approx 0.6 \mu m$ ve yapıştırıcı kalınlığı 1mm'de en yüksek ömür değerini belirlemiştir.

(Galvez ve ark.,2019) çalışmasında çelik-kompozit numunelerini tek bileşenli poliüretan yapıştırıcı Sikaflex® 252 ve Silanlı hibrit tek bileşenli poliüretan yapıştırıcı Sikaflex® 552AT ile birleştirip oda sıcaklığında % 50 nem oranında 500 saate kadar bekletmiştir. Sikaflex® 252 yapıştırıcısı tek bileşenli olması nedeniyle Sikaflex® 552AT ' ye göre daha iyi sonuçları elde ettiğini görmüştür.

(Rodríguez ve ark.,2014) çalışmasında üç farklı nano parçacık türü (nano- Al_2O_3 , nano- SiO_2 ve nano- $CaCO_3$) ile bir termoset poliüretan içerisine katarak oluşturduğu yapıştırıcının mekanik özelliklerini, reolojik özelliklerini ve dağılım derecesini incelemiştir. Bulduğu sonuçlarda çekme dayanımının ve young modulünün arttığı hacimce %6 nano- SiO_2 karışımının en iyi sonuçları verdiğini gözlemlemiştir.

(Yagoub,2015) çalışmasında alüminyum 6013 numunelerinden üretilen tek taraflı bindirme bağlantısı kullanılarak Epoksi-Gflex 655 yapıştırıcısının kohezif özelliklerini karakterize etmiştir. Sıcaklığın bu bağlantının mekanik özelliklerine etkisini belirlemek için oda sıcaklığında ve +50 °C sıcaklığında testler yapılmıştır. Oda sıcaklığında kırılma enerjisini hesaplamak için DCB testi yapıştırıcının elastik karakteristiğini ve hasar başlangıcındaki gerilme oluşumunu belirlemek için aynı sıcaklıklarda çekme testi gerçekleştirilmiştir. Bulduğu sonuçları sonlu eleman yöntemi ile doğrulamıştır. DCB ve ENF testlerinde kohezif hasarın olduğu belirlenmiştir.

(Akpınar,2012) çalışmasında çekme ve eğilme yüklerine maruz çift destekli aynı anda iki farklı yapıştırıcı kullanılarak ve tek yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiş T-bağlantı konfigürasyonlarının mekanik davranışları deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Çalışmasının sonucunda yapıştırma işleminin gerçekleştirildiği bölgenin serbest uçlarında esnek karakterli yapıştırıcı orta bölgede ise sert karakterli yapıştırıcı kullanmak, destek parçalarını gömülü yapmak gibi geometrik ve materyal değişimleri yapıştırma bağlantısında oluşan gerilme ve şekil değiştirme dağılımlarında büyük

değişimlere neden olduğu ve yapıştırma bağlantılarının dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir.

(Gültekin,2018) çalışmasında yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mekanik özelliklerini geliştirmek için farklı karakterdeki yapıştırıcılara yeni bir yöntem ile farklı karbon nanoparçacık ilave edilerek elde edilen nanokompozit yapıştırıcıların mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca yapıştırıcı içerisine eklenen nanoparçacık türü ve katkı oranının etkisini incelemek için; üretilen nanokompozit yapıştırıcılar kullanılarak tek ve çift tesirli alüminyum ve kompozit bağlantı numuneleri üretilmiş, çekme ve eğme yükü altında mekanik özellikleri belirlenmiştir. Deneyler sonucunda geliştirilen yeni karıştırma yönteminin bağlantının güvenilirliğini ve tekrarlana bilirlğini iyileştirerek standart sapmayı minimize ettiği görülmüştür. Ayrıca, yapıştırıcıya nanoparçacık ilave edilerek elde edilen yapıştırıcıların bağlantı dayanımını artırdığı görülmüştür. Bununla birlikte bağlantı dayanımındaki artış oranı; yapıştırıcının yapısal özelliğine, nanoparçacık türüne ve oranına bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir.

(Bahattab ve ark.,2011) çalışmasında bir poliüretan yapıştırıcıya farklı parçacık boyutlarında üç nano silika ekleyerek paslanmaz çelik plakaları nano-silika takviyeli poliüretan yapıştırıcı ile birleştirerek oluşturduğu tek bindirmeli bağlantı numunelerine TGA, DMA, TEM, DSC ve temas açısı ölçümleri ile termal ve mekanik özelliklerini belirlemiştir. Yapılan çalışmada yapıştırıcıya Nano-silika dolgu maddesinin eklenmesi, nano-silika parçacık büyüklüğüne bağlı olarak poliüretandaki sert ve yumuşak bölümler arasındaki faz ayrılma derecesini değiştirdiğini göstermiştir. Aynı zamanda nano silika tanecik boyutunun arttırılması ile paslanmaz çelik-poliüretan yapıştırıcı birleşme yerlerinin yüzey enerjisi daha da arttırdığını gözlemlemiştir.

(Jia ve ark.,2016) çalışmasında düşük sıcaklıklarda (-20 °C ve -40 °C) Çekme Bölmeli Hopkinson bar kullanarak yüksek gerilme hızı yüklerine maruz kalan bir epoksi bazlı yapıştırıcının mekanik parametreler, mukavemet, young modülü gibi özelliklerini incelemiştir. Sonuçlar, oda sıcaklığında kuvvet ve sertliğin, gerilme oranının artmasıyla birlikte önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Bununla birlikte, düşük sıcaklıklarda mukavemet artışının önemsiz olduğunu fakat oda sıcaklığı ve 20 °C'de, gerilme oranlarının artmasıyla birlikte yüzey kusurlarının arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca 40 °C'de, gerilme oranının artmasıyla birlikte gerilme gerilimi azalır ve gerilme yumuşatma kaybolduğunu gözlemlemiştir. Yaptığı çalışmada yüksek gerilme oranlarının düşük sıcaklıklarda epoksi yapıştırıcılarda gerilme özelliklerinin literatürdeki poliüretan esaslı yapıştırıcılara göre farklı olduğunu gözlemlemiştir.

(Jia ve ark.,2019) çalışmasında poliüretan yapıştırıcının yapışma parametrelerini deneysel olarak farklı gerilme hızı koşulları altında test edilmesi sonucunda kompozit malzemelerle tek bindirmeli numuneler oluşturarak DCB, ENF, TAST yöntemlerini kullanarak elde ettiği sonuçları FEA sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırmıştır. Bu yöntemin yüksek yapıştırma oranı altında poliüretan yapıştırıcı ile kompozit bağlantıların mekanik davranışını tahmin etmek için etkili bir yöntem olduğu göstermiştir.

(Vervaeke ve ark.,2019) çalışmasında büyük kaynaklı sac konstrüksiyonun frezeleme işlemleri sırasında yapısal titreşimleri azaltma yöntemi olarak poliüretan yapıştırıcının titreşim sönümleme performansının incelemesini yapmıştır. Çalışmada yapıştırıcı köpüğün kalınlıklarını değiştirerek deneysel ve sayısal veriler almıştır. Sonuç olarak %58 oranla titreşimi sönümlemeyi başarmıştır.

(Jia ve ark.,2019) çalışmasında poliüretan yapıştırıcıların oda sıcaklığında ve farklı yükleme hızlarında düşük sıcaklıklarda kayma özellikleri deneysel olarak (TAST) numuneleriyle incelemiştir. Yükleme hızı 1000 mm/sn'ye yükseldiğinde, yarı-statik koşullar altındaki verilere kıyasla, yapıştırıcının kuvvetinin %177 arttığını gözlemlemiştir. Çalışmasında TAST örneklerinin farklı sıcaklıklarda darbe yükleri altındaki mekanik davranışları, ABAQUS tarafından 3D sonlu elemanlar yöntemi ile doğru sonuca ulaşmaya çalışmıştır. Ek olarak yapışma mukavemetinin yarı-statik yük altında oda sıcaklığındaki statik dayanımın, darbe yükleme koşullarında düşük sıcaklıklarda yapışkan birleşme noktalarını tasarlamak ve analiz etmek için kullanılamayacağı sonucuna varılmıştır.

(Berntsen ve ark.,2019) çalışmasında iki bileşenli poliüretan yapıştırıcıları deneysel olarak çalışmış ve sayısal olarak modellemiştir. Testlerini iki dikey dijital kamera ve bir termal kamera ile izlenerek, Hopkinson basınç çubuğunu (SHPB) kullanılarak çarpma testi ve tek eksenli çekme testini gerçekleştirmiştir. Yapılan deneyler, yapıştırıcının elastik bir yapıda davranışta olduğunu göstermiştir. Test sonuçlarına genel olarak bakıldığında ise oluşturulan sayısal modelin deneysel verilerle uyumunu görmüştür.

(Yıldırım,2011) çalışmasında malzemelerin yapıştırıcı ile birleştirilmesiyle yapılmış metal-metal, metal-kompozit ve kompozit-kompozit bağlantıların düşük hızlı darbe davranışlarını incelemiştir. Öncelikli olarak mekanik davranışlar sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırmıştır. Numunelerde oluşan hasar tipleri belirlenip, daha sonra sayısal düşük hızlı darbe analizleri yaparak sonlu elemanlar yöntemi ile elde

edilen sayısal sonuçlar deneysel veriler ile desteklemiştir. Metal-kompozit bağlantılarda kuvvet ile temas eden plakaların kompozit ya da metal olmasının hasar tipleri üzerinde çok büyük etkiye sahip olduğunu belirlemiştir.

(Can,2016) çalışmasında yapıştırıcı ile birleştirilmiş yapılar üzerinde, yapıştırıcı ve malzeme kalınlığının çekme dayanımına olan etkisini araştırmıştır. Malzeme olarak alüminyum, yapıştırıcı olarak uçak sanayisinde oldukça fazla tercih edilen Loctite 9394 kullanarak deneysel çalışmalar sonucunda kalınlığın artması ile yapıştırıcının çekme mukavemetine etkisinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca yapıştırıcı kalınlığının kuvvet dayanımına etkisinin doğru orantılı olmadığı gözlemlenmiştir.

(Ekrem,2015) çalışmasında elektro-eğirme yöntemiyle polivinil alkol nano elyaf, ağırlıkça %1.30 ve 5 çok cidarlı karbon nano tüpler içeren PVA nano elyaflar ve ÇCKNT takviyeli epoksi yapıştırıcı üretmiştir. Daha sonra Al 2024-T3 levha kullanarak tek taraflı bindirmeli numuneler elde etmiştir. Oluşturulan bağlantıların mekanik özellikleri incelenmiştir. Tek taraflı bindirmeli ve çift konsol kiriş test bağlantılarında ağırlıkça %1 ve 3 katkılı ÇCKNT takviyeli PVA nano elyaf ile desteklenmiş yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca ÇCKNT takviyeli PVA nano elyaf ve nano elyaf takviyeli yapıştırıcıların kırılma tokluğunda büyük artışlar elde etmiştir.

(Ahmed,2018) çalışmasında, epoksi yapıştırıcıyı güçlendirmek amacıyla üç farklı tip Nano malzeme (Nano-kil, Nano-silika ve Nano-grafen) sırasıyla (%1, 2, 3 ve %5), (% 1, 2 ve %3) ve (% 0.10, 0.20, 0.30, 0.40 ve % 0.50) eklemiştir. Daha sonra cam elyafı ile güçlendirilmiş polimer plakalar kullanarak numuneler elde etmiştir. Mekanik testlerden elde edilen sonuçlar, eklenen Nano malzemelerin yapıştırıcı kuvvetini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. Kayma ve eğilme dayanımındaki en yüksek değerler, sırasıyla %145 ve %100 grafen katkılı numunelerde gözlemlenmiştir. En kötü sonuçlar, grafen parçacıklarıyla hazırlanan bağlantıların kırılma yüzeylerinde gözlemlendiğini belirtmiştir.

(Saraç,2018) çalışmasında yapıştırma bağlantılarında, yapıştırıcı içerisine katılan farklı oranlarda Al_2O_3 , TiO_2 ve SiO_2 nanoparçacık eklenerek ve katkısız DP460 epoksi yapıştırıcı kullanılarak ve yapıştırılan malzeme olarak ise AISI 304 paslanmaz çelik plaka kullanılarak tek tesirli bindirme bağlantıları oluşturmuş ve bağlantıların mekanik özellikleri deneysel olarak incelemiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde; nanoparçacık katkılı yapıştırıcıların kullanılmasıyla elde edilen bağlantılarda, en büyük hasar yükü, %4- Al_2O_3 eklentili numunelerde elde edilmiştir. Statik testlerde

numunelerin yapışma yüzeyleri incelendiğinde katkısız yapıştırıcı kullanılan numunelerde hasar adezyon ayrılması şeklinde gözlemlenirken, nanoparçacık takviyesiyle hasar adezyon ve kohezyon karışımı şeklinde gözlemlenmiştir. Frekans 10 Hz, yükleme oranı (R) ise 0.1 olarak sabit alınarak yapılan yorulma deneyleri sonucunda Al_2O_3 ve SiO_2 katkılı bağlantıların yorulma dayanımı artarken TiO_2 katkılı numunelerde yorulma dayanımı azalmıştır.

(Aslan,2018) çalışmasında saf ve ÇCKNT takviyeli epoksi reçinenin korozyif ortamlardaki kimyasal ve mekanik davranışları ve alüminyum A2024 T3 ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler kullanılarak elde edilen tek taraflı bindirmeli bağlantılar ve çift konsol kiriş bağlantıların mekanik özelliklerini deneysel olarak araştırmıştır. Çalışmada saf epoksi reçine ve %1 ÇCKNT takviyeli epoksi reçine sülfürik asit çözeltisi (H_2SO_4), tuzlu su, de iyonize su ve hidroklorik asit (HCl) çözeltisi içerisinde 1, 168 ve 720 saat şartlandırılarak kimyasal değişimlerin özelliklerini anlamak için FT-IR, DSC ve TGA testlerini yapmıştır. Daha sonra reçinelerden üretilen çekme çubukları şartlandırılarak, şartlandırma sürecinin reçinelerin mekanik özelliklerine olan etkisi çekme testleri yapılarak belirlenmiştir. Anotlama yöntemiyle yüzeyleri hazırlanan A2024 T3 numuneler ile şartlandırılmış çift konsol kiriş bağlantıları ve tek taraflı bindirmeli bağlantılar oluşturularak kayma testleri (SLJ) ile çift konsol kiriş (DCB) testlerini yapmıştır. Mekanik testler neticesinde oluşan hasar yüzeyleri, SEM yardımıyla yorumlanarak mekanik ve kimyasal test sonuçlarıyla beraber değerlendirilmiştir. Sonuçlar irdelendiğinde, şartlandırma ortamlarının hem saf epoksi reçineye hem de ÇCKNT takviyeli epoksi reçineye kimyasal ve mekanik olarak oldukça etkilediğini, yapışma davranışının reçinelerin kendi özelliklerden oldukça farklı olduğu ve reçinenin çalışacağı ortama uygun malzeme seçimi yapılırsa, olumsuz etkilerin yok olacağını vurgulamıştır.

(Şenyurt,2017) çalışmasında, elektro-eğirme yöntemiyle naylon 6.6 (N6.6) nano elyaf ve ağırlığınca % 1, 3 ve 5 (grafen) takviye edilmiş nano elyaflar üreterek nano elyafla takviyeli yapıştırıcılar ve yapıştırılan malzeme olarak Al 2024-T3 levha, diğer tarafta ise 5 katmanlı karbon elyaf takviyeli kompozit levhalar ile tek taraflı bindirmeli bağlantılı numuneler üreterek, mekanik özelliklerinin belirlenmesi için kayma şekil değiştirmeleri deneysel olarak ölçülmüştür ve sıcaklığa göre etkileri karşılaştırılmıştır. Numunelerin son durumlarını diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) , Fourier dönüşümlü infrared spektrometre (FT-IR) ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile inceleyerek tek taraflı bindirmeli yapıştırma numunelerinin kayma dayanımları önemli

ölçüde arttığını gözlemlermiştir. Ayrıca numuneler içerisinde ağırlıkça %3 GNP katkılı N6.6 nano elyaf ile güçlendirilmiş epoksi ile yapıştırılan tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma mukavemeti en fazla olduğunu gözlemlemiştir.

(Kantar,2018) çalışmasında yapıştırıcı içerisine nano malzeme eklenerek elde edilen nano malzeme katkılı yapıştırıcıların kırılma davranışlarını ortam sıcaklığında ve termal çevrim şartı altında Çift Konsol Kiriş (DCB) testi kullanılarak incelemiştir. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş DCB bağlantılar üretiminde, yapıştırıcı olarak DP460 ve DP125 (tok ve esnek yapıştırıcılar) yapıştırılan malzeme olarak AA2024-T3 alüminyum alaşımı ve katkı olarak ise ağırlıkça %1 oranında karbon nanotüp, Fulleren-C60, Grafen-COOH kullanılmıştır. Sonuç olarak oluşturulan malzemelerin kırılma enerjileri incelendiğinde, numunelerde kırılma enerjisinin arttığı gözlenmiştir. Ek olarak DCB testi esnasında video ekstansometre ile elde edilen üst ve alt malzeme arasındaki çatlak deformasyonunu veren yer değiştirmeler ile doğrudan doğruya test cihazının stokundan elde edilen yer değiştirmeler arasında çok büyük farklar olduğunu gözlemlemiştir.

(Özdemir,2018) çalışmasında karbon nano tüp, grafen ve gümüş nanoparçacık katkılı epoksi yapıştırıcı ile Al 2024-T3 levhaların birleştirilmesiyle oluşturulan numunelerin termal ve mekanik özelliklerini araştırmıştır. Oluşturulan bağlantıların DTA testi ile camsı geçiş sıcaklığı, erime sıcaklığını TGA testleriyle ise üretilen numunelerin kütle kaybına oranla bozunma sıcaklıklarını belirlemiştir. SEM görüntüleri ile morfolojik yapı ve çaplar analizi, çekme testi ile kayma ve çekme dayanımlarını incelemiştir. Sonuç olarak katkıların yapıştırılmış bağlantılar üzerinde pozitif yönde etkisi olduğunu gözlemlemiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, kullanılan malzemelerin özellikleri, nanoparçacık katkılı poliüretan esaslı yapıştırıcı üretilmesi, levhaların yüzeylerinin hazırlanması, tek bindirmeli bağlantı numunelerin hazırlanması, çekme numunelerin hazırlanması ve numunelere uygulanan deneyler hakkında bilgiler yer almaktadır.

Çalışmada Alüminyum 2024-T3 alaşım levhalar ve karbon fiber takviyeli epoksi bazlı kompozit levhalar kullanılarak yapılan alüminyum-alüminyum, alüminyum-kompozit ve kompozit-kompozit olmak üzere tek taraflı bindirme bağlantılarının saf ve nano parçacık katkılı poliüretan yapıştırıcıya ait çekme numunelerinin mekanik ve termal özellikleri incelenmiştir. İlk olarak saf poliüretan yapıştırıcının içerisine yapıştırma dayanımını arttırmak için yapıştırıcı reçine içerisine Çizelge 3.1’de verilen ağırlıkça katkı oranlardaki miktarlarda (%0.05, % 0.10 ve % 0.15) grafen ve karbon nano tüp parçacıklar ilave edilerek mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testleri yapılmıştır. Daha sonra çekme numunelerinde kullanılan saf ve nanoparçacık katkılı poliüretan yapıştırıcı ile Al 2024-T3 levhalarının ve karbon fiber takviyeli kompozit levhaların yapıştırma işlemi yapılarak oluşturulan numunelerin çekme deneyi yapılmış ve ayrıca çekme deneyleri sonucunda kopan numunelerden parçalar alınarak SEM görüntüleri alınmış, TGA ve DTA testleri yapılmıştır. Nano parçacık katkılı poliüretan yapıştırıcının mekanik özellikleriyle saf poliüretan yapıştırıcı mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Bu analizler sonucunda poliüretan bazlı grafen ve karbon nano tüp katkılı yapıştırıcıların mekanik özelliklerine göre en yüksek dayanım değerlerinin elde edildiği katkı oranları belirlenmiştir. Daha sonra grafen ve karbon nano tüp nano parçacıklar oranlarının arttırılarak ve azaltılarak değişik varyasyonlarında iki nano parçacığın yapıştırıcıya eklenerek aynı kür içerisinde kullanılarak çekme ve alüminyum-alüminyum, alüminyum-kompozit ve kompozit-kompozit olmak üzere tek bindirmeli bağlantı numuneleri üretilmiş ve bu numunelerde aynı yöntemlerle incelenmiştir.

Çizelge 3.1. Nano parçacık ile güçlendirilmiş poliüretan yapıştırıcı numuneleri

Numune İsmi	Ağırlıkça Katkı Oranı (%)	
	Grafen	ÇCKNT
PU	-	-
05GR	0.05	-
10GR	0.1	-
15GR	0.15	-
05KNT	-	0.05
10KNT	-	0.1
15KNT	-	0.15
05GR05KNT	0.05	0.05
05GR10KNT	0.05	0.1
05GR15KNT	0.05	0.15
1GR05KNT	0.1	0.05
10GR10KNT	0.1	0.1
10GR15KNT	0.1	0.15
15GR05KNT	0.15	0.05
15GR10KNT	0.15	0.1
15GR15KNT	0.15	0.15

3.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Bu bölümde kullanılan, yapıştırıcı ve yapıştırıcı bağlantılar, yapıştırma prosesinin uygulanabildiği malzemeler, yapışma teorileri, yapıştırıcılar için kullanılan takviye malzemeleri, numunelerin yüzeylerinin hazırlanması, numunelerin üretilmesi numunelerin özellikleri ve numunelere uygulanan deneyler hakkında bilgiler yer almaktadır.

3.1.1. Yapıştırıcı

Günümüzde kullanılan yapıştırıcılar; organik, inorganik veya karma formda farklı bileşenlerin karışımı şeklinde olup, yüzey teması ile malzemeleri bir arada tutarlar. Yapıştırılacak malzemenin türü, yapıştırıcının fiziksel özelliği, bağlantının mukavemet özellikleri ve çalışma şartları yapıştırıcıları sınıflandırmada rol oynayan en önemli faktörlerdir (Shields,1984).

Yapısal yapıştırıcılar olarak bilinen kimyasal yapıştırıcılar, kimyasal reaksiyon ile sertleşerek çok güçlü bir yapışma sağlar. Aerobikler, akrilikler, epoksiler, siyanoakrilatlar, silikonlar, fenolikler ve poliüretanlar sıklıkla kullanılan ve kimyasal reaksiyon ile sertleşen kimyasal yapıştırıcı türleridir.

Fiziksel değişim ile sertleşen (yapısal olmayan yapıştırıcılar) yapıştırıcılar da vardır ki bunlar sıcak eriyikler, kauçuk yapıştırıcılar, polivinil asetatlar ve ultraviyole yapısal olmayan yapıştırıcılar sınıfına girmektedir (Aydın,2003).

Poliüretan yapıştırıcılar, iki bileşenli ve hızlı sertleşen yapıştırıcılardır. Darbeye dayanıklıdır. Cam esaslı kumaşları yapıştırmak için oldukça uygundur. Hızlı kuruma için makine ile yapıştırıcının uygulanması gerekir. Genellikle yapışma astarı ile beraber kullanılırlar (İşcan,2007). Genel olarak inşaat, otomotiv, çift cam ve tekne sektöründe kullanılırlar. Poliüretan mastikler kürleştiklerinde çekme (hacim kaybı) ihmal edilebilir derecede az olmasından ve UV dayanımları mükemmel olduğundan mastikler arasında önemli bir konuma sahiptir. Tek komponentli olanları mastik tabancası ile uygulanacak tipte formüle edilirler. Bu tiplerin esneme kapasiteleri $\pm\%25$ ile $\pm\%50$ arasındadır. İnşaat sektöründe metal ve plastik kapı/pencerelerin montajında, prefabrik elemanların bileşimlerinde, cephe kaplamalarında ve genişleyen derzlerin oluşturulmasında sıkça kullanılırlar (Köksal,2013).

Bu çalışmada yapıştırıcı olarak kullanılan poliüretan yapıştırıcı, Duratek firması tarafından temin edilen KLB 75 iki bileşenli poliüretan esaslı yapıştırıcısıdır. Firmadan alınan bilgiler doğrultusunda bu yapıştırıcı iki bileşen olmak üzere bu bileşenlerin %80'i içerisinde uygun oranlarda konulan katalist, silikon, renklendirici, kabartıcı ajan ve diğer kimyasalların oluşturduğu bir karışım polieter veya poliester bazlı olan poliollerle, %20'si poliöl sistemle karıştırıldığında onunla ekzotermik reaksiyona giren ve bünyesinde serbest azot, karbon ve oksijen taşıyan kimyasallardan olan kürleştirici izosiyanat karışımını içermektedir. KLB 75 yapıştırıcının viskozitesi oda sıcaklığında 1800 mPas'dır. Jelleşme zamanı oda sıcaklığında firmanın belirttiğı oranlarda kullanıldığında (ağırlıkça %80 poliöl , %20 izosiyanat) yaklaşık 1 ile 2 saattir. Tek taraflı bindirmeli bağlantıların yapıştırılması işleminde ve çekme numunelerinin kullanılan saf poliüretan yapıştırıcıya ait bazı mekanik özellikler Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. KLB 75 Poliüretan yapıştırıcının mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	
Yoğunluk (g/cm ³)	1.35±0.10
Viskozite (mPas)	2100±300
Eğilme mukavemeti (MPa)	13±2
Çekme mukavemeti (MPa)	12±3

Yapıştırma işlemi için yapıştırıcı hazırlama süreci yapıştırıcı olarak kullanılacak olan poliüretan miktarı belirlenerek cam beher yardımıyla hassas terazide tartılmıştır. Sonrasında poliüretan yapıştırıcıya ilave edilecek nanoparçacıklar tartılarak poliüretan reçineye eklenmiştir. Üretilen reçine ultrasonik karıştırıcı yardımıyla karıştırılmış ve içerisindeki hava kabarcıklarını sönmölemek amacıyla vakum ortamında 0.5 bar vakum altında 1 saat süreyle bekletilmiştir. Son olarak tartılan reçinenin içerisine %20 oranında poliüretan kürleştirici tartılarak karıştırma işlemi 5 dakika boyunca mekanik olarak gerçekleştirilmiştir. Bu işlemden sonra karışım içerisinde oluşan hava kabarcıklarını gidermek amacıyla tekrar oda sıcaklığında karışım vakum fırınında bekletilerek yapıştırma işlemine geçilmiştir.

3.1.2. Alüminyum Alaşımı (Al 2024-T3)

Al 2024 T3, birincil alaşım elementi bakır olan bir alaşım türüdür. Alüminyum alaşımları; fiziksel ve mekanik özellikleri, hafif ve kolay işlenebilir olması, korozyon direncinin yüksek olması gibi sebeplerden ötürü bu alaşım yapısal uygulamalarda; uçak sanayii, otomotiv, askeri ve makine sektörlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Al2024-T3 alüminyum alaşımının yüksek dayanıma sahip olması, ayrıca uluslararası standartların yapıştırıcıların bağlantı performansını değerlendirmesinde ve havacılık alanında sıklıkla kullanılması nedeniyle (Akpınar,2012); bu çalışmada 1.62 mm kalınlığında Al2024-T3 alüminyum alaşımı yapıştırılan malzeme olarak kullanılmıştır (ASTM D1002-10,2019a). Al2024-T3 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri Çizelge 3.3 ve kimyasal birleşim miktarları Çizelge 3.4'te verilmiştir (Akpınar,2012).

Çizelge 3.3. Al2024-T3 malzemesinin mekanik özellikleri (Gültekin,2018)

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

Çizelge 3.4. Al2024-T3 malzemesinin kimyasal bileşimi (Ekrem,2015)

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

3.1.3. Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Malzeme

Çalışmada yapıştırılan diğer malzeme olarak karbon fiber kumaş takviyeli (0-90°) düz dokuma kompozit levhalar (CFRP) kullanılmıştır. CFRP kompozit levhalar kompozitsan firması tarafından üretilmiştir. CFRP kompozit levhalar 8 tabakadır ve toplam kalınlığı 2 mm'dir. CFRP kompozit levhaların mekanik özellikleri Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. CFRP kompozit malzemesinin mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	
Elastisite modülü (GPa)	113
Çekme mukavemeti (MPa)	685
Çekme Yüzde kopması(%)	0.67

3.1.4. Nanoparçacıklar ve Özellikleri

Nanoteknoloji, atomlar veya molekülleri tek tek alıp hassas bir şekilde birleştirerek istenen ürünü elde etmek olarak tanımlanabilir (Rodríguez,2014). Nanoparçacık takviyeli polimerler için parçacıklar arası mesafenin, özellikle yüksek hacimlerde, çok küçük olduğuna dikkat edilmelidir. Bu mesafe, partikül ile etrafındaki yapılar veya partikül ile onu çevreleyen polimer arasındaki etkileşimi etkileyebilir ve polimerin yapısını değiştirebilir. Bu nedenle, parçacık takviyeli modifiye polimerin özellikleri, nanoparçacıkların veya mikro-partiküllerin kullanılıp kullanılmadığına bağlı olarak değişiklik gösterebilir (Ma ve ark.,2010).

Nanoteknolojinin ortaya çıkmasıyla birlikte, nanokompozit yapıştırıcılar havacılık, otomotiv ve medikal sektörlerindeki uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır (Kirkayak,2019). Yapıştırıcı içerisine nanoparçacık eklenerek elde edilen nanokompozit yapıştırıcılar üzerine birçok çalışma yapılmış ve yapılan çalışmalar incelendiğinde; nanoparçacık katkısının, yapıştırıcının fiziksel, kimyasal, mekanik ve termal özelliklerinde olumlu iyileşmeler yaptığı görülmüştür (Gültekin,2018).

Birçok nanoparçacık ışığın dalga boyundan (yaklaşık 400-700 nm) daha küçük olduğu için, yarı saydam bir polimer üzerine ilave edildiğinde, yarı saydam görünürler. Bunun bir sonucu olarak, nanoparçacık optik mikroskop kullanılarak görüntülemek için çok küçüktürler. Ancak transmisyon elektron mikroskobu (TEM), atomik kuvvet mikroskobu (AFM) veya alan taramalı elektron mikroskobu (SEM) gibi yüksek büyütme teknikleri ile görüntülenebilir. Nanoparçacıkların yapısı ayrıca X-ışını kırınımı veya diğer teknikler kullanılarak karakterize edilebilir (Wang,2001).

Partikülün şekli ve en/boy oranı, nanoparçacık ile modifiye edilmiş malzemelerin mekanik özelliklerinin (sertlik, akış karakteristikleri, mukavemeti vb.) belirlenmesinde önemlidir. Partiküllerin toplanması ve homojen dağılması da önemlidir ve mekanik özellikleri etkiler (Gültekin,2018).

Bu çalışmada poliüretan yapıştırıcı reçinesi içerisine nanoparçacık olarak grafen ve/veya çok cidarlı karbon nanotüp olmak üzere 2 çeşit nanoparçacık kullanılmıştır.

Çizelge 3.6. Farklı karbon nano malzemelerin fiziksel özellikleri (Ma,2010)

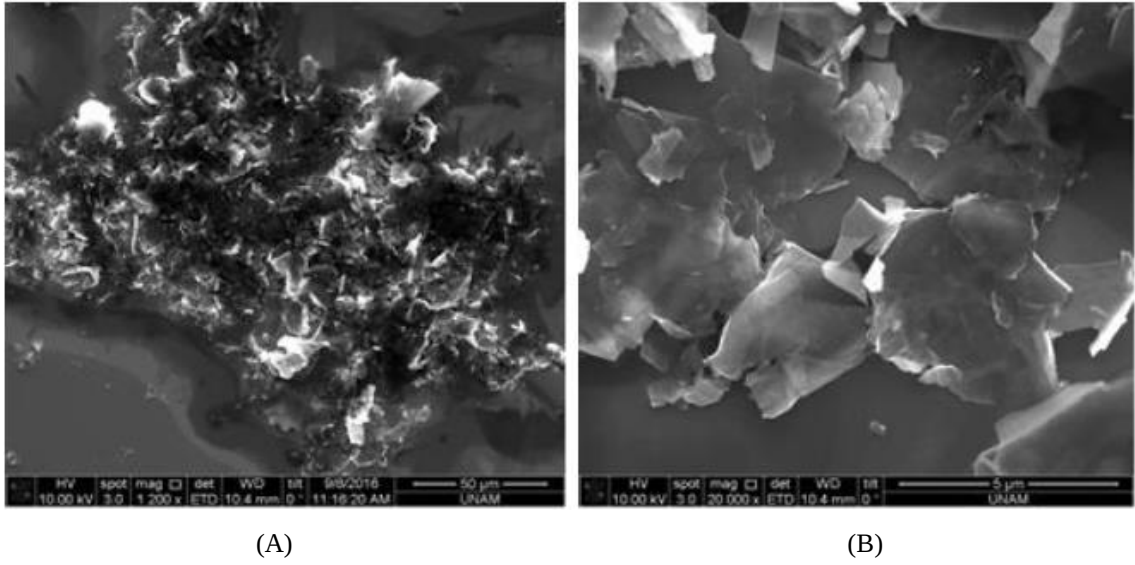
Özellikler	Fulleren	TCKNT	ÇCKNT
Özgül ağırlık (g/cm^3)	1.7	0.8	1.8
Elektrik iletkenliği (S/cm)	10-5	10^2 - 10^6	10^3 - 10^5
Elektron hareketliliği ($\text{cm}^2/\text{V s}$)	0.5-6	$\sim 10^5$	10^4 - 10^5
Isı iletkenliği (W / (m K))	0.4	6000	2000
Isıl genleşme katsayısı(K^{-1})	6.2×10^{-5}	önemsiz	önemsiz
Havada termal kararlılığı ($^{\circ}\text{C}$)	~ 600	>600	>600

3.1.4.1. Grafen

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

Diğer bir ifadeyle grafen, grafitin tek tabakalı, karbon atomunun bal peteği örgülü yapısıdır (Mikhail I,2007). Grafen üzerine yapılan çalışmalar, bu malzemeyi çok önemli bir noktaya getirmiştir (M. R. Aydın ve ark.,2018). Tek tabakalı grafenin yüzey alanı $2600 \text{ m}^2/\text{gr}$, kalınlığı 1-2 nm, termal iletkenliği 4840 - $5300 \text{ W}/(\text{m}^{\circ}\text{K})$, yoğunluğu 2.25 g/cm^3 , elastisite modülü 1 TPa olup, çekme mukavemeti yaklaşık 130 GPa'dır (Şenel,2018). Bu mekanik ve termal özellikleriyle şimdiye kadar keşfedilmiş en dayanıklı malzeme olarak adlandırılmıştır (J. Wei ve Inam,2017).

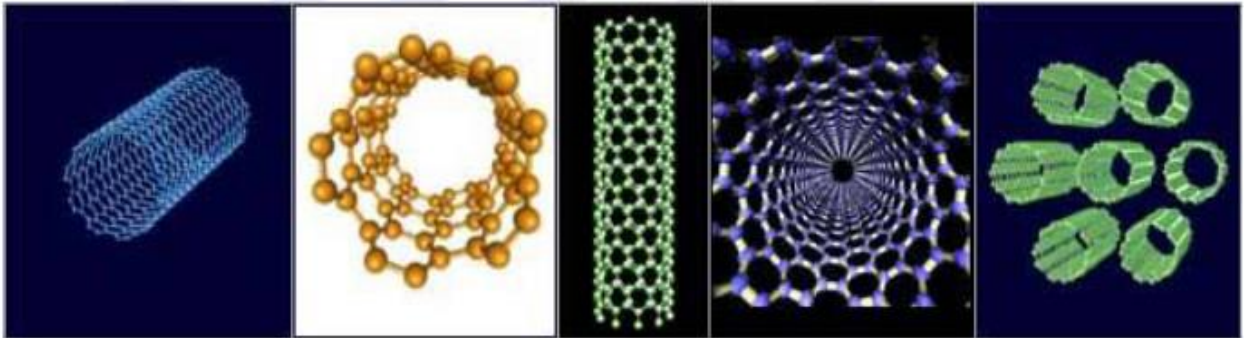
Bu çalışmada kullanılan grafenin özellikleri saflığı % 99.5, çapı $24 \mu\text{m}$, özgül yüzey alanı $150 \text{ m}^2/\text{g}$ ve elastisite modülü ise 0.5 TPa olmak üzere tedarikçi firma olan Nanografi firmasından temin edilmiş ve grafene ait taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Grafenin (a) 1200 ve (b) 20000 büyültmedeki SEM görüntüsü

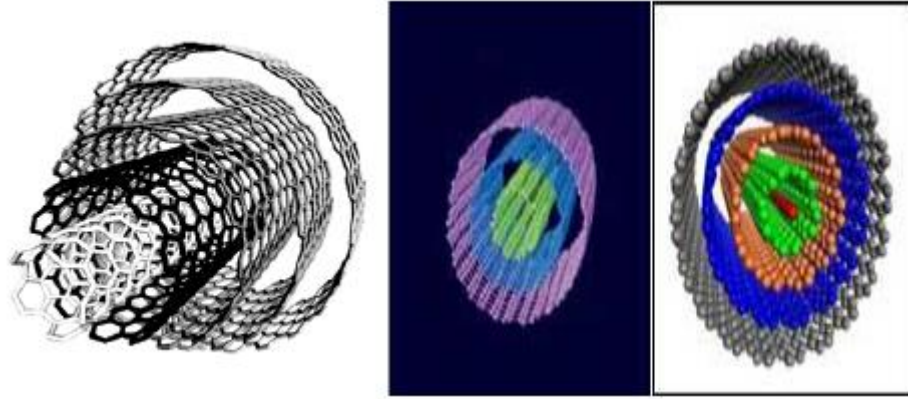
3.1.4.2. Karbon nanotüp (KNT)

Karbon nano tüpler, tek cidarlı, çok cidarlı, fonksiyonelleştirilmiş ve fonksiyonelleştirilmemiş olmak üzere sınıflandırılabilirler. Tek cidarlı karbon nano tüpler (TCKNT) oldukça önemli özelliklere sahiptir. Çünkü çok cidarlı nano tüplerde (ÇCKNT) bulunmayan elektriksel özellikleri vardır. TCKNT, modern elektronik biliminin şu anki dayanağı mikro elektromekanik ölçeğin ötesinde elektroniği daha küçük hale getirmek için en muhtemel adaydır. Bu sistemlerin en temel yapı bloğu elektrik telleridir ve TCKNT'ler mükemmel ileticiler olabilir. TCKNT'lerin yararlı bir uygulaması da intramoleküler (molekül, zerre içi) alan etkili transistörlerdir. TCKNT'lerin alan etkili transistör olarak kullanımı yoluyla ilk intramoleküler mantık geçidinin üretimi bugünlerde mümkün hale gelmiştir. TCKNT üretimi oldukça maliyetlidir ve bu durum TCKNT'ler üzerine daha detaylı çalışmalar yapılabilmesinin önündeki en önemli engeldir (Şekil 3.2) (Rafiee ve ark.,2009).



Şekil 3.2. Tek cidarlı karbon nano tüpler

ÇCKNT'ler tüp şeklini almak için kendi üzerinde kıvrılmış olan çoklu grafit katmanlardan meydana gelir. ÇCKNT'lerde tabakalar arası mesafe grafitteki grafen tabakaları arasındaki mesafeye yakındır, yaklaşık olarak 3.3 Angström (1 Angström= 0.1 nanometre). Burada ÇCKNT'lerin özel konumunun üzerinde durulmalıdır. Çünkü TCKNT'lerle karşılaştırıldığında, kimyasallara karşı direncini önemli ölçüde geliştirdiğimiz zaman çok benzer bir morfolojiyi ve özellikleri bir araya getirmektedir. Bu özellikle fonksiyonelleşme gerektiği zaman önemlidir (Bu, nano tüplerin yüzeyine kimyasal işlevlerin aşılması anlamına gelmektedir) (Du ve ark.,2017). TCKNT'lerde, kovalent fonksiyonelleşme bir takım C=C ikili bağını parçalayacaktır. Nano tüpün yapısında boşluklar bırakır ve bunun için mekanik ve elektriksel özelliklerinin ikisini birden düzenlemek gerekir. ÇCKNT durumunda ise, sadece dıştaki çeper düzenlenir. Şekil 3.3'de ÇCKNT'ler gösterilmektedir (Aslan,2018).

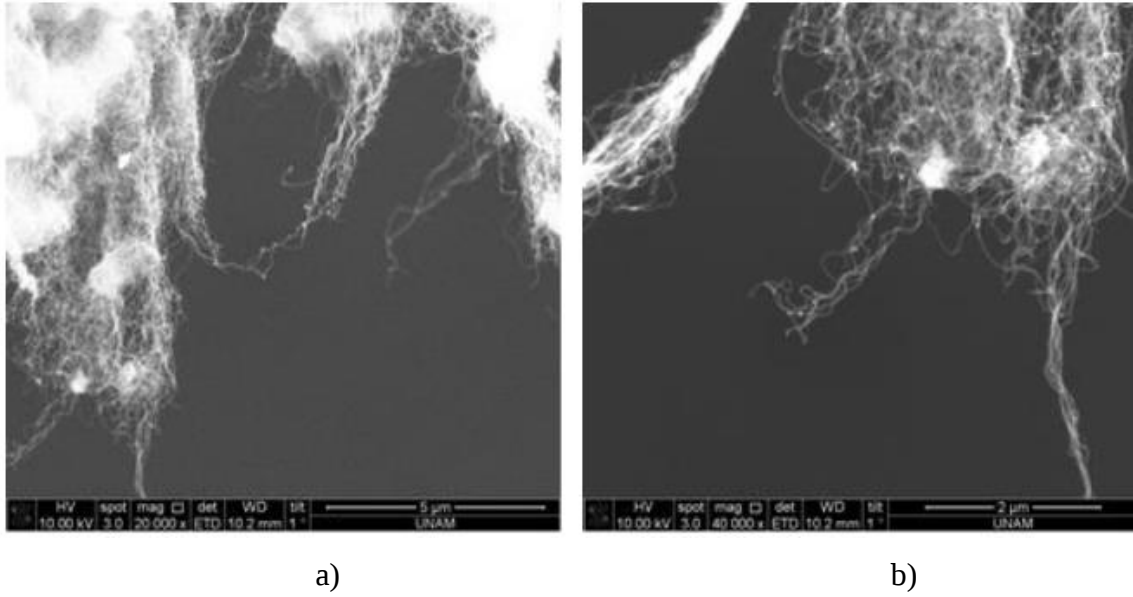


Şekil 3.3. Çok cidarlı karbon nano tüpler(ÇCKNT)

ÇCKNT'ler hafif, dayanıklı, yüksek termal ve elektriksel iletkenliğe sahip nano malzemelerdir. ÇCKNT'lerin özellikleri çaplarına, boylarına, yönlenmelerine, yüzeysel özelliklerine bağlıdır. Çizelge 3.7'de gösterilen mekanik özellikler ve SEM görüntüsü (Şekil 3.4) tedarikçi firma olan Nanografi şirketinden temin edilmiştir.

Çizelge 3.7. ÇCKNT'lerin mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	Çekme Dayanımı (GPa)	Elastiklik Modülü (TPa)	Yoğunluk(gr/cm ³)	% Uzama
ÇCKNT	10-60	1	1.3-2	10



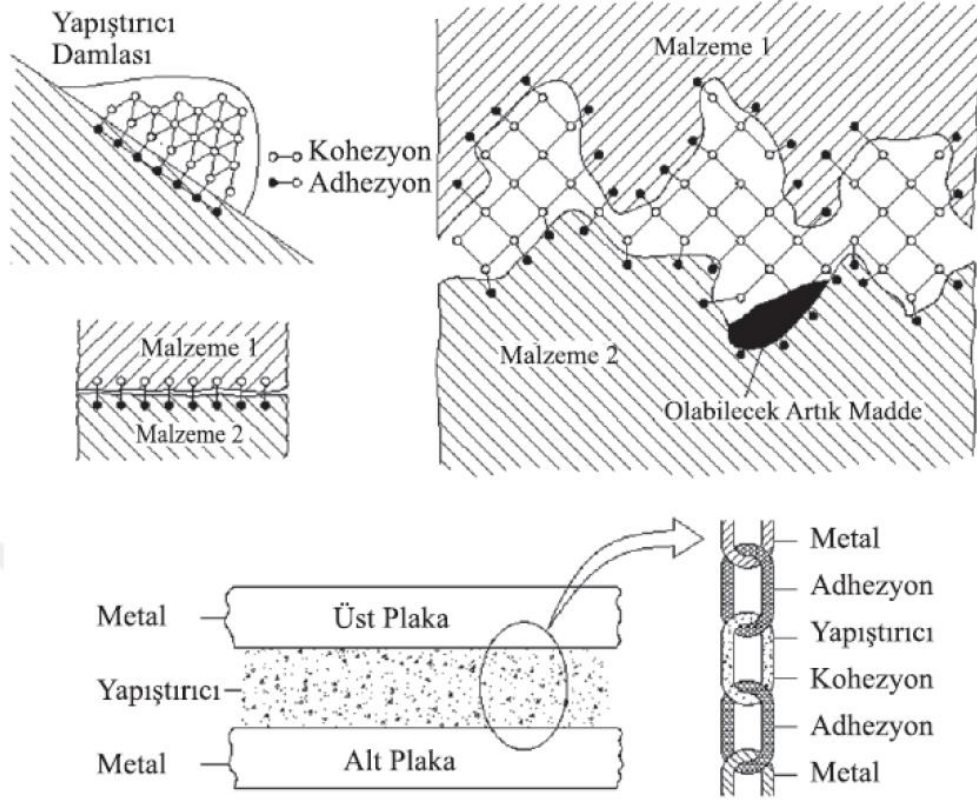
Şekil 3.4. ÇCKNT'lerin (A) 1200 ve (b) 20000 büyültmedeki SEM görüntüsü

3.2. Yapıştırıcı Bağlantıları ve Yapıştırıcıların Kuramsal Temelleri

3.2.1. Yapıştırma

Yapıştırıcı, malzemeleri bir arada tutan madde ve yapışma ise iki yüzeyin moleküller, iyonlar ve atomlar arası etkileşiminden dolayı oluşan çekim kuvvetleriyle bir arada tutturulması olarak tanımlanır ve yapışma, yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme yüzeyi arasında gerçekleşen bir olaydır (Kinloch,1987). Yapışmanın bir diğer tanımı ise iki aynı ya da farklı malzemenin yüzeysel kuvvetler yapıştırıcı ile yüzey (adezyon) ve yapıştırıcının kendi içinde oluşan kuvvetler (kohezyon) yardımıyla bir arada tutulması işlemidir (Wu,1982).

İyi bir yapışma ve uygun bağlantı performansı verecek yapıştırıcı-malzeme kombinasyonu için yapıştırıcının doğru seçilmesi, bağlantı şeklinin iyi seçilmesi, yapıştırılacak malzemenin seçilmesi, malzemeye uygun yüzey işlemlerinin yapılması, yapıştırıcının yapıştırma süreçlerinin takibi (katılaşma ve kürleşme) ve yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme arasında oluşan faktörlerin hesaba katılması gerekir (Ebnesajjad,2013).



Şekil 3.5. Adezyon ve kohezyon olayının şematik olarak gösterilmesi (Şekercioğlu,2012)

Yapışma olayı adezyon ve kohezyon olarak isimlendirilen iki temel mekanizmaya dayanmaktadır. Şekil 3.5’de görüldüğü üzere yapıştırıcı gerek kendi iç mukavemeti (kohezyon direnci) ve gerekse parça yüzeylerine yapışması (adezyon direnci) ile etkiyen dış kuvvetlerin karşılanmasını sağlar (Ebnesajjad,2013).

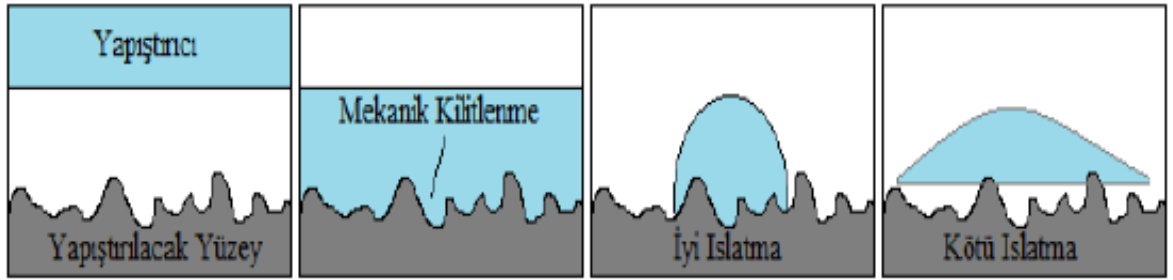
3.2.1.1. Adezyon Kuvveti

Adezyon farklı iki maddenin birbirine yapışmasını sağlayan çekim kuvvetidir. Adezyonu oluşturan iki farklı yüzey vardır; adezif uygulandığı maddeye aderent, adezyonu oluşturan maddeye ise adezif adı verilir. Adezyonun sağlanabilmesi için adezif ile aderent arasında tam bir temasın meydana gelmesi gerekir (Gültekin,2014).

Yapısal açıdan bağlantı dayanımı, yapıştırıcının yüzey pürüzlerine iyi girip giremediğine yani, yapışan yüzeylerin yüzey enerjileri ve yapıştırıcının viskozitesi tarafından belirlenen ıslatma kabiliyetine bağlı olarak değişmektedir. Katı yüzeyin yeterli seviyede ıslatılabilmesi için yapıştırıcının yüzey enerjisinin yapıştırılan malzemenin yüzey enerjisinden küçük olması gerekmekte ve aradaki bu farkın artmasıyla yapışma işlemi daha kolay gerçekleşmektedir (Loctite,1998).

Yapışma olayı için bu güne kadar birçok teori ortaya atılmıştır. Bunlardan önemli olanları mekanik tutunma, adsorpsiyon, difüzyon ve elektrostatik teorileridir (Wu,1982).

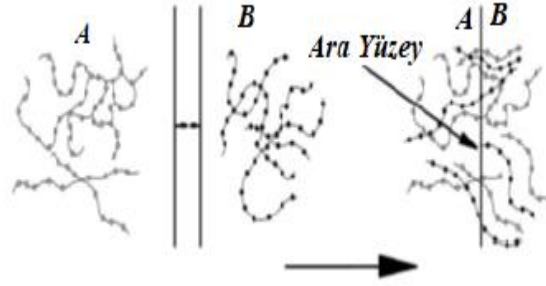
Mekanik Tutunma Teorisi; Yapıştırıcı moleküllerinin yüzeyinde girinti ve çıkıntıların mevcut bulunduğu katı yüzeylerdeki düzensizliklerden içeri girerek katılaşması ile sağlanan mekanik bağı ve malzeme ile yapıştırıcının mekanik olarak birbirine geçmesi ile yapışma olayının gerçekleşeceğini ifade eder (Şekil 3.6). Mekanik tutunma teorisine göre tam bir yapışmanın sağlanabilmesi için yapıştırıcının yüzeydeki tüm çukurların içine girip yayılması, yüzeydeki sıkışmış havayı tahliye etmesi ve yapışan yüzeyleri mekanik olarak kilitlemesi gerekmektedir. Yüzey pürüzlülüğü, teması sağlayan yüzey alanını arttırdığından dolayı bu teoride mekanik tutunmanın sağlanabilmesi açısından önemli bir etkiye sahiptir (Bharti,2018).



Şekil 3.6. Mekanik kilitleme mekanizması, yapıştırılan yüzeydeki iyi ıslatma ve kötü ıslatma görüntüsü (Aslan,2018)

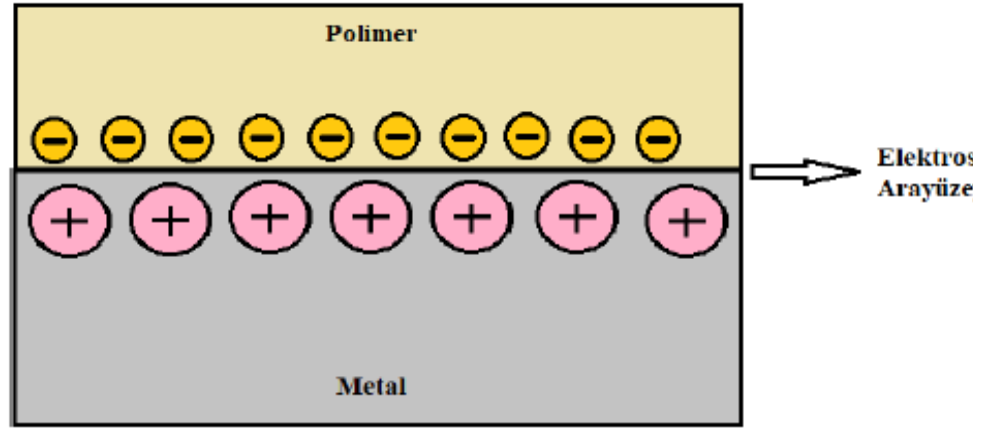
Adsorpsiyon Teorisi; İki yüzeyin angström düzeyindeki teması ile aralarında moleküller arası kuvvetlerin oluşumunu ifade etmektedir. Adezyon, Van der Waals kuvvetleri vasıtasıyla oluşan moleküller arası çekim kuvvetleri ile meydana gelmektedir. Yapıştırıcının yüzeyi ıslatması ve katılaşması esnasında oluşan bu çekim, kuvvetli bağların oluşumunu sağlamaktadır. Ancak Van der Waals kuvvetlerinin oluşabilmesi için yapıştırıcı ile yapışan yüzey arasında 5 Å 'dan kısa mesafe olması gerektiği belirtilmektedir (Petrie,1975).

Difüzyon Teorisi; Fazlar arasında molekül alışverişi olduğunu ifade eder (Şekil 3.7). Bu olay benzer polimerler arasında gerçekleşmesine rağmen, nadiren de olsa metal ve polimer ara yüzeylerinde de olabilecek bir durumdur. Yapıştırıcının yapıştırılacak madde içine difüzyon derecesi, yapıştırılacak maddenin serbest hacmine ve yapıştırıcı ile yapıştırılacak maddenin moleküler uygunluğuna, moleküler uygunluk ise, yapıştırıcı ve yapıştırılacak madde içindeki farklı polimerlerde mevcut olan fonksiyonel gruplar arasındaki çekime bağlıdır (Carpenter,1999).



Şekil 3.7. Difüzyonun aşamaları (Fourche,1995)

Elektrostatik Teori: Bu teori, elektronik bant yapıları aynı olmayan iki malzemenin teması ile ara yüzeyde adezyonu sağlayan iki katlı bir elektrostatik yük oluşacağını belirtmektedir (Şekil 3.8) Bu yüklerin toplam adezyona katkısının %10'dan daha az veya ihmal edilebilir bir düzeyde olduğu bulunmuştur (Ebnesajjad,2011).



Şekil 3.8. Polimer ve metal arasında gerçekleşen elektrostatik bağlanma(Aslan,2018)

3.2.1.1. Kohezyon Kuvveti

Kohezyon, yapıştırıcı molekülleri arasında bulunan ve yapıştırıcıyı bir arada tutan kuvvettir. Bu durum, yapıştırıcıyı meydana getiren kütle bileşenlerinin, yapıştırıcının polimerizasyonu esnasında meydana gelen kimyasal (bağ kuvvetleri) ve fiziksel (Van der Waals kuvvetleri) kuvvetler tarafından bir arada tutulması olayıdır.

Van der Waals Bağı: Küçük ya da büyük bir molekül için düşünüldüğünde, molekülün farklı yüklerine tesadüf eden pozitif ve negatif kutuplar bulunabilir. Böylece her molekülden ibaret küçük mıknatıslar ortaya çıkar. Burada aynen mıknatıslarda olduğu gibi, çeşitli dipoller elektromanyetik kuvvetlerle birbirlerine kenetlenmektedir. Bu arada oluşan bağlar Van der Waals bağı olarak adlandırılmaktadır. Oluşan bu Van der Waals bağları diğer bağlar kadar kuvvetli değildir.

Kovalent Bağ: Atomlar arasında elektron köprüleri kurularak kenetlenmeleri durumunda oluşur. Buradaki kuvvetler, ortak kullanılan elektronların kendi eksenleri etrafında birbirlerine zıt yönde dönmesinden dolayı ortaya çıkan elektromanyetik kuvvetlerdir. Zıt yönde dönen elektronların oluşturduğu elektromanyetik alanlar, birbirlerini bir mıknatısın artı ve eksi kutupları gibi çekerler (Çelebi,2018).

3.2.2. Yapıştırma Bağlantıları

Bağlama elemanları parçaları birbirine, gövdeye veya makinaları temele bağlayan bağlama elemanlarıdır. Bu elemanlar çözülme ve fiziksel olmak üzere iki esasa göre sınıflandırılabilir. Çözülme bakımından bağlantılar çözülebilen ve çözilemeyen bağlantılar olarak ayrılabilir. Çözilemeyen bağlantı elemanlarında bağlantı ancak herhangi bir dış etki ile tahrip edilerek çözülebilir.

Bu iki esasın yanı sıra bağlama elemanları dolaylı ve dolaysız olmak üzere de sınıflandırılabilir. Dolaysız bağlama yönteminde makine elemanları birbirine doğrudan bağlanmaktadır. Dolaylı bağlama yönteminde ise makine elemanları birbirine bir bağlama elemanı ile bağlanırlar. Bu anlatılanlara göre teknikte birçok bağlama yöntemleri kullanılır. Bunların arasında seçim yaparken yükleme (statik, değişken), darbe, sıcaklık, korozyon gibi çalışma koşulları, bağlantının esas fonksiyonunun yanı sıra sızdırmazlığı veya hem kuvvet iletimi hem sızdırmazlığı sağlama gibi ek fonksiyonlar dikkate alınarak tasarım yapılabilir (Akkurt,2012).

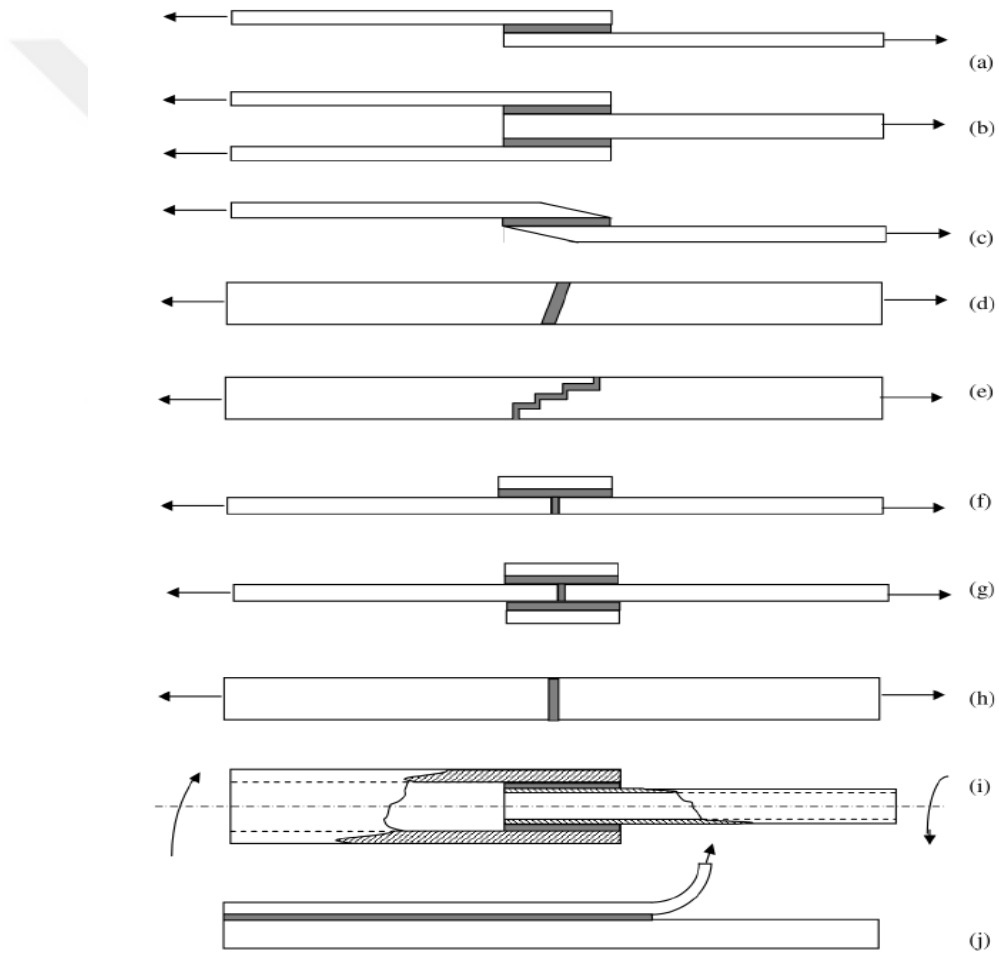
Bağlantılarda yukarıda anlatılan unsurlara ek, yapıştırma bağlantıları açısından durum yeniden ele alındığında; hafifliğin, rijitliğin ve güvenilirliğin önem arz ettiği hava taşıtlarında konstrüksiyon rijitliğine katkı sağlaması, araçlarda plastik ve türevlerini içeren parçaların kullanımını kolaylaştırma, güvenilirlik, maliyet, gürültü seviyesinde ve titreşim seviyesinde iyileşmeler sağlaması gibi birçok avantajından dolayı otomotiv endüstrisinde, inşaat, elektrik-elektronik, deniz taşıtları, biyomedikal gibi alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Aynı zamanda dezavantajları sıralandığında dikkatli yüzey hazırlığı gerektirdiğinden malzemeleri birleştirilmesinin zorluğu, zaman ve sıcaklığa bağlı olarak yapıştırıcının mekanik özellikleri değişmesi, düşük darbe dayanımına sahip olması, pratik olmayan bir kürleşme mekanizması olması ve çevresel etkilere bağlı olarak yapıştırıcının dayanımının değişmesi yapıştırıcı malzemelerinin kullanılmasını zorlaştırmaktadır (Şekercioğlu,2012).

Yapıştırma işleminde temel prensip, malzemeler arasında yükün emniyetli bir şekilde aktarılmasını sağlamak ve yüksek mukavemet elde etmektir. Uygun bir

yapıştırma bağlantısı yapabilmek için, yapıştırma bağlantısındaki gerilme dağılımı hakkında yeterli bilgiye sahip olmak gerekir (K. Wei ve ark.,2018). Tüm bu beklentiler yerine getirildiği takdirde bütün malzemeleri yapıştırıcı ile birleştirmek mümkündür.

Yapıştırma bağlantısının mukavemeti; uygulanan yüke, geometriye, yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemenin mekanik özellikleri gibi bazı parametrelere bağlı olduğu için bağlantının mekanik davranışını tahmin etmek zordur (K. Wei,2018).

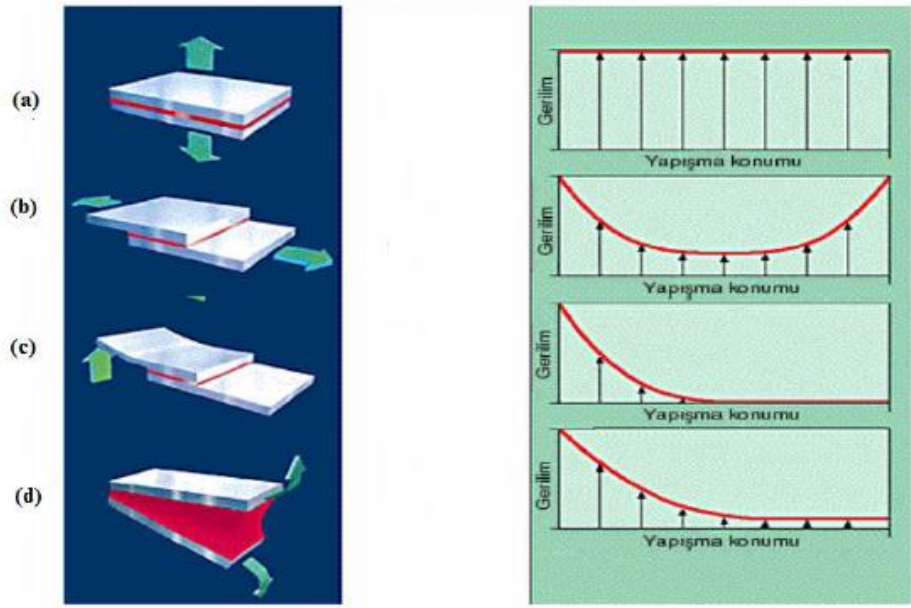
Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların yüksek mukavemete sahip olması için özel bağlantı tipleri kullanılmaktadır (Kirkayak,2019). Şekil 3.9’da yapıştırma bağlantı tipleri gösterilmektedir.



Şekil 3.9.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 takviyeli alın bağlantısı. (g) Çift taraflı takviyeli alın bağlantısı. (h) Alın bağlantısı, (i) Silindirik bindirmeli bağlantı, (j) Soyulma (Durmuş ve ark.,2017)

3.2.3. Yapıştırma Bağlantılarında Oluşan Gerilmeler

Yapıştırma bağlantıları, genellikle çeki veya bası, kayma, soyulma ve ayrılma gibi yüklere maruz kalır (Şekil 3.10). Bağlantı mukavemetinden en yüksek performans elde etmek için, bu yükleme türleri göz önünde bulundurulmalıdır. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılarda, hangi yükleme durumunda maksimum performans elde ediliyorsa, o yükleme durumuna uygun bağlantı türü seçilmelidir. Yapıştırma bağlantılarının, soyulma yüküne karşı dayanımları zayıf iken; çekme, basma ve kayma yüklerinin oluşturduğu gerilmelere karşı daha dayanıklıdır (Temiz,2003).



Şekil 3.10. En yaygın yük tipleri ve bindirme bölgesindeki gerilme dağılımları: (a) Çekme veya basma yükü, (b) Kesme yükü, (c) Soyulma yükü, (d) Ayrılma yükü (Loctite,1998)

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

Kesme (kayma) yükleri, yapıştırılan alanın tümüne eşit bir şekilde etki eder. Bu tür yükleme durumunda yapışma bağlantıları yüksek mukavemet gösterirler. Yapıştırma bağlantıları kayma yüküne maruz kalacak şekilde tasarlanmalıdır (Temiz,2003). Bağlantı kaymaya zorlandığında, gerilmeler uç kısımlarda yoğunlaşmaktadır. Bu durum yapıştırılan malzemeyi ayırmak için çalıştığınızda yapıştırıcının düzlemine etkili olan kuvvetler ile sonuçlanır. Kayma yükleri yapıştırılan alanın tümüne düzgün etki eder. Bu tür yüklemede 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. Çünkü yapıştırıcılar genellikle bağlı alanın tümünde bağlantı mukavemetine katkı sağladığından dolayı kayma gerilmesi altında çok kuvvetlidir (Petrie,1975).

Çekme veya basma kuvveti uygulandığında, kuvvet yapıştırıcı tabakasına dik olarak etki etmektedir ve bu yükleme durumunda gerilme üniform haldedir. Fakat bağlantıya sadece bu tür gerilmenin etki ettiğinden emin olmak her zaman mümkün değildir. Kuvvetler farklı eksenden etkidiği durumlarda, gerilmeler yapışma alanında eşit olmayacak ve dolayısıyla bağlantının bozulma ihtimali artacaktır. Ayrıca, bağlantının maruz kaldığı yük etkisinde bir eğilme meydana geliyorsa, gerilmeler düzgün bir şekilde dağılmayacaktır (Rudawska ve Abdel,2019).

Eksenden kaçık olan çekme yükü ve momentin etkisiyle oluşan yarıлма gerilmeleri ve diğer bir gerilme türü olan soyulma gerilmelerinde, yapışma alanı boyunca düzgün olmayan gerilme dağılımı oluşacağından dolayı bağlantı dayanımında azalma meydana gelecektir. Bu yüklerin oluşturacağı negatif etkilerin giderilmesi için çekme ve kesme gerilmelerine göre daha büyük bir alana ihtiyaç vardır ve bu da maliyette artışa sebep olmaktadır (Kayacan,1988).

3.2.4. Yapıştırma İşleminde Olası Hasar Mekanizmaları

Yapıştırma bağlantılarında genel olarak adezyon ve kohezyon olmak üzere iki hasar tipi mevcuttur (ISO 10365,1992). Adezyon hasarı; yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde meydana gelen ve gözle görülebilen ayrılmanın olduğu hasar türüdür. Yapıştırılan malzemelere yeterli yüzey hazırlığı yapılmaması veya uygun yapıştırıcı seçilmemesinden dolayı bu hasar oluşmaktadır. Kohezyon hasarı ise; aşırı yükleme, sıcaklık gibi olaylar sonucunda yapıştırıcı veya yapıştırılan malzemede oluşan hasar türüdür.

Yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin tespit edilmesinde hasar tiplerinin belirlenmesi de önem arz etmektedir. Normal şartlar altında yapıştırma bağlantılarının yüklenmesi esnasında kohezyon hasarının oluşması istenmektedir. Yapıştırma bağlantılarının uygun bir şekilde hazırlanmamasından dolayı adezyon hasarı oluşmakta ve mekanik özelliklerin doğru tespiti engellenmiş olmaktadır (Çizelge 3.8).

Çizelge 3.8. Temel hasar tipleri (ISO 10365,1992)

	Hasar Tipleri	Tanımlanma şekli
Yapıştırılan malzeme	 Yapıştırılan malzemelerin bir ya da ikisinde de hasarın oluşması	KY
	 Kohesiv yapıştırılan malzeme hasarı	KYH
	 Kalkma (delaminasyon) yoluyla hasar	DH
Yapıştırıcı	 Kohezyon hasarı	KH
	 Özel kohezyon hasarı	ÖKH
	 Adhezyon hasarı	AH

3.3. Analitik Yaklaşımlar

Yapıştırma bağlantılarının gerilme analizinde, karmaşık geometriler ve ayrıntılı malzeme modelleri için sayısal yöntemler vasıtasıyla çözümün daha kolay gerçekleştirilebilmesine rağmen bazı parametrelerin belirlenmesi açısından teorik çözümler daha etkilidir. Bundan dolayı yapıştırma bağlantılarının analitik analizleri, birçok araştırmacı tarafından farklı durumlar için gerçekleştirilmiştir.

Tek tesirli bindirme bağlantıları, üretimlerinin kolay ve analizlerinin diğer modellere göre daha basit olmasından dolayı yapıştırma bağlantılarının gerilme analizlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yapıştırıcıyla bağlama, aynı zamanda geleneksel olarak bağlantı malzemeleri ile karşılaştırıldığında, yapıştırıcının küçük birim hacminden dolayı ağırlık oranının dayanımında 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 (Ekrem,2015).

En basit analiz pratikte en yaygın bağlantılardan biri olan tek taraflı bindirmeli bağlantılarında olmaktadır. Tek taraflı bindirmeli bağlantılarda gerilme analizi için bazı yöntemler geliştirilmiş olmakla birlikte hesaplama kolaylığından dolayı ‘basit lineer elastik analiz yöntemi’ tercih edilmektedir. Bu analizde yapıştırıcı, sadece kayma yönünde deforme ve yapıştırılan malzemeler ise rijit olarak kabul edilir. Soyulma ve eğilme gerilmeleri ihmal edilir. Basit lineer elastik analiz yönteminde yapıştırıcıda oluşan, kayma gerilmesi (τ), üst üste binme uzunluğu boyunca sabittir ve (3.1) formülü ile hesaplanır (Banea ve da Silva,2009).

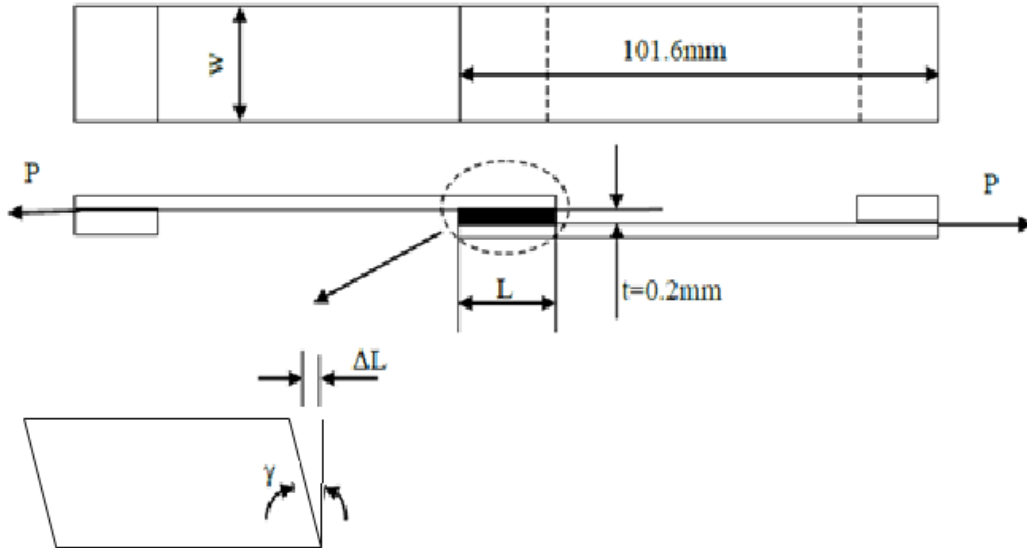
$$\tau = \frac{P}{w.L} \quad (3.1)$$

Burada;

P: Uygulanan kuvvet,

w: Bağlantının genişliği,

L: Bağlantının üst üste bindirme uzunluğudur.



Şekil 3.11. 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 yapılması sebebi ile çok gerçekçi değildir ama hala ASTM ve ISO standartları gibi birçok test durumlarında yapıştırıcı kesme mukavemetini hesaplamada temeldir. Şekil 3.11’de görüldüğü üzere

yapıştırıcının kayma yer değiştirmesi ΔL olarak ölçülebilir. Bu değer kullanılarak kayma birim şekil değiştirmesi Denklem 3.2 den hesaplanabilir:

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

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

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

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

(3.3) ve (3.4) denklemlerinde;

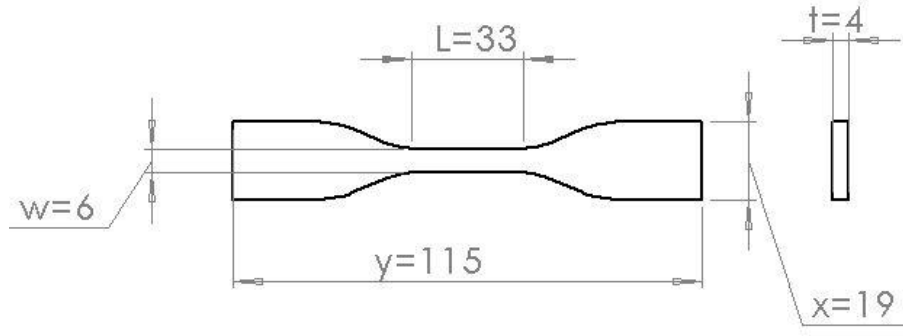
τ : yapıştırıcının kayma gerilmesi

A_{kayma} : yapıştırıcının kayma alanı ($w \times L$)

P : yapıştırılan malzemeye uygulanan çekme kuvveti

G : yapıştırıcının kayma modülüdür (Ekrem,2019).

Çalışmamızda nanoparçacık katkılı ve katkısız yapıştırıcıların çekme numuneleri (ASTM D638-10,2004) standardı dikkate alınarak üretilmiştir. (ASTM D638-10,2004) standardına göre üretilen çekme numunesinin boyutları Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. ASTM D638-10 standardına göre çekme numunesi ölçüleri

Plastiklerin mekanik özellikleri malzemenin kimyasal ve fiziksel haline bağlıdır. Plastiklerin mekanik özellikleri seramik ve metallerin aksine, yükün uygulandığı sıcaklıktan ve uygulama zamanından önemli oranda etkilenir. Çekme testi uygulanan malzeme için ölçülen boyut değişimi ve kuvvet miktarına göre, gerilme-birim şekil değiştirme grafiği oluşturulur. Gerilme-birim şekil değiştirme grafiği, malzemeye ait birçok mekanik özelliğin elde edilmesine yardımcı olur. Bulunan değerlerden çekme mukavemeti, eğme mukavemeti ve darbe mukavemeti malzemenin belirli bir koşul altındaki davranışı hakkında önemli bilgiler vermektedir.

Gerilme (σ) birim alana etkileyen yük anlamına gelmektedir Denklem 3.5'den hesaplanabilir. Denklem 3.5'te P :yapıştırılan malzemeye uygulanan çekme kuvveti A_0 ise kuvvetin etki ettiği alandır ($w \times t$). Birim Şekil Değiştirme (ε) ise Denklem 3.6'da görüleceği üzere malzemeye kuvvet uygulandığı zaman oluşan boy değişiminin (ΔL) kuvvet uygulanmadan önceki ilk boy (L) oranıdır. E : Elastisite modülü olup Denklem 3.7'den hesaplanabilir. Gerilme birim şekil değiştirme grafiğinde elastiklik sınırına kadar olan bölgede eğriye teğet düz doğrunun eğiminin hesaplanması ile bulunur (Tok,2017).

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (3.5)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.6)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.7)$$

Tokluk bir malzemenin kırılana kadar absorbe edebildiği toplam enerji miktarı demektir. Tokluk verileri gerilme-birim şekil değiştirme grafiği altındaki alanın toplamı hesaplanarak yani Denklem 3.8'deki formülle bulunur. Bu formüldeki ϵ malzeme kırılınca kadar meydana gelen en yüksek veya toplam birim şekil değiştirme miktarıdır. Denklemin integrasyonu sonucu tokluğun birimi J/m^3 olarak çıkar (Yazman,2018).

$$\int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \quad (3.8)$$

3.4. Yapıştırma Bağlantı Numunelerinin Yüzeylerinin Hazırlanması

Yapıştırılacak malzemelerin yüzeylerinin hazırlanması amaca uygun yapıştırma bağlantılarının elde edilebilirliği açısından en önemli basamaklardan biridir. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda, iyi bir yapışma sağlamak için yüzey işlemlerinin uygulanması gerekir. Yapıştırma işleminden önce eğer yapısal bir bağlantı oluşturulacaksa uygun yüzey işlemi uygulanması önerilmektedir. Uygulanacak özel yüzey işlemi, bağlantının şartlarına ve gerçekleştireceği koşullara bağlıdır. Maliyet faktörleri de dâhil olmak üzere; yapıştırıcı türü, geometri ve üretim şartları gibi faktörler, uygun yüzey işlemi seçilirken dikkate alınmalıdır (Temiz,2003).

Yapışma mekanizması, yapıştırıcının yüzeye yapışma kuvveti (adezyon) ve yapıştırıcının iç kuvvetine (kohezyon) bağlıdır. Doğru yüzey hazırlama tekniğinin uygulanması ile elde edilen yüksek dayanımlı yapıştırma bağlantılarında, bağlantının maruz kaldığı yük değerinin yapıştırıcının kohezyon kuvvetini aşması durumunda yapıştırıcı tabaka içerisinde kopmalar meydana gelmekte ve dolayısıyla uygun yüzey hazırlama vasıtasıyla nitelikli yapıştırma bağlantıları elde edilebilmektedir.

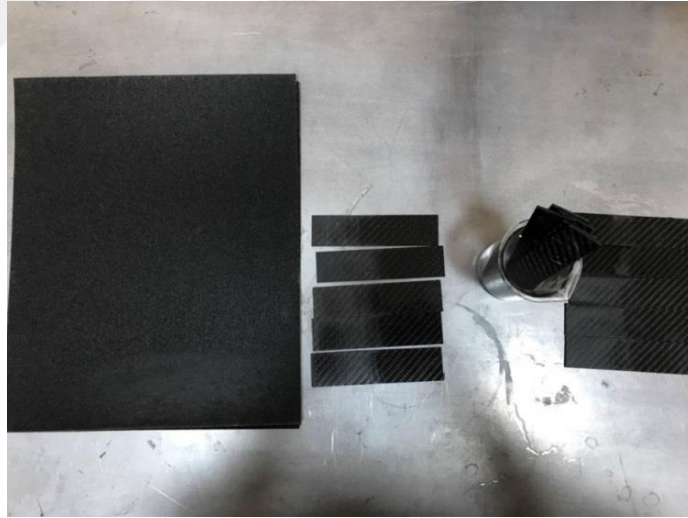
Yapışma kuvveti, yapıştırıcı ve yapıştırılacak yüzeyler arasındaki adezyon kuvveti ile belirlenir. Bundan dolayı yapıştırma dayanımını arttırmak için adezyon kuvvetini arttırmak gerekmektedir. Yağ alma, aşındırma, kimyasal işlem gibi yüzey hazırlama işlemleri ile yüzey tabakalarının temizlenmesi durumunda adezyon kuvveti artırılabilir.

Yüzey hazırlama yöntemleri ile en temelde yağ ve gres gibi kalıntıların yüzeyden uzaklaştırılması gerekmektedir. Genellikle birçok metal ve plastik malzeme için zımparalama, çözelti ile temizleme gibi yöntemlerin uygulanmasına rağmen bazı

metaller için iyi bağlantıların elde edilmesinde bu basit yüzey hazırlama yöntemleri yeterli olmamaktadır (Aydın,2003).

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların dayanımı, yapıştırılan malzemenin yüzeyinin kusursuz olmasına yani yüzey hazırlama metoduna bağlıdır. Bu amaçla çalışmamızda ilk olarak alüminyum ve kompozit levhalar hassas kesme yöntemiyle istenilen boyutlara getirilerek, alüminyum alaşımlarına aşağıda anlatılan yüzey hazırlama metodu uygulanmıştır (Akpınar,2014).

Düz dokuma karbon fiber kumaş takviyeli (0-90°) levhaların yüzey hazırlığında, ilk olarak kesme esnasında oluşan çapaklar 240 tane boyutundaki SiC zımpara ile giderilmiştir. Daha sonra kompozit malzemelerin yüzeyindeki yağ ve gres gibi atıklar toz deterjanla temizlenmiştir. Zımparalama, çekme yönüne dik doğrultuda yapılmıştır. Temizlenen numuneler; sırasıyla musluk suyu ve saf su ile durulandıktan sonra, asetonda 10 dakika bekletilmiştir. 60°C sıcaklıktaki steril bir etüv içerisinde 20 dakika bekletilerek kurutulan numunelerin yüzey hazırlama işlemleri tamamlanmıştır (Şekil 3.13) (Akpınar ve ark.,2017).



Şekil 3.13. Kompozit bağlantı numunelerinin yüzeylerinin hazırlanması

Yapıştırıcı bağlantılar kullanıldıkları yerlere göre genelde tek taraflı bindirmeli bağlantılarında kayma ve soyulma gerilmelerine maruz kalmaktadır. Alüminyum gibi metaller için (ASTM D 1002-05,2005) standartlarının aşamaları uygulanmaktadır.

Alüminyum numuneleri TTBB için 25 × 101.6 mm ölçülerinde, Bilgisayarlı Sayısal Kontrollü (CNC) Lazer Kesim Tezgâhında azot gazı ile kesildikten sonra yüzey hazırlama işlemi uygulandı. Havacılık sanayiinde en çok kullanılan yüzey hazırlama işlemi ve aynı zamanda yapısal yapıştırıcı bağlantılarında alüminyum yüzeylerin

hazırlanması için (ASTM-D2651-01,2001) standardı (dağlama sülfürik asit/ sodyum di kromat solüsyonu) ile (ASTM D3933-98,2010) standardı (fosforik asit anotlama) yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemleri kullanırken yapıştırılacak yüzeylere suyla yıkama ve uygulanacak çözelti işlemleri dışında herhangi bir şeyle anotlama bitene kadar dokunmamalıdır. "Islak" işlem aşamaları süresince, alkalın temizlemeden fosforik asit anotlamadan sonraki kurutma boyunca parçalar fosforik asit anotlamanın ardından durulamadan sonra fırında kurutmaya kadar herhangi bir zaman aralığında kurutulmamalı, işlemlerin sürekli kesintisiz bir sırayla yerine getirilmesi gerekmektedir.

(ASTM D3933-98,2010) standardında belirtilenlere göre bir alüminyum levhanın yapıştırma numunesinin hazırlanması aşamaları şu şekildedir: Öncelikle alüminyum levha, (ASTM D1002-10,2019b) standardında belirtilen boyutlarda kesildikten sonra kenarlarında oluşan çapaklar giderilmiştir. Daha sonra Şekil 3.13’de sunulduğu üzere 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 işlemten sonra numuneler 43°C’deki saf su ile minimum 5 dakika yıkanarak temizlenmiştir.

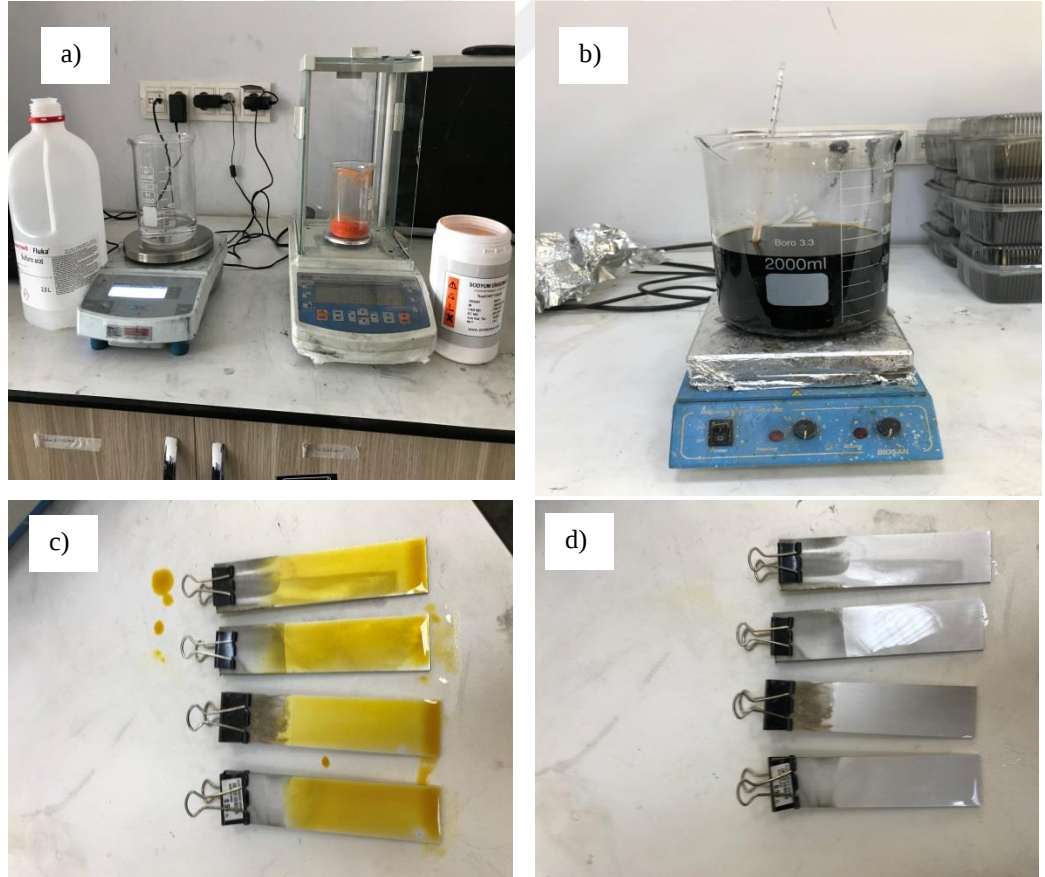


Şekil 3.14. (a) Alüminyum levhaların sodyum hidroksit çözeltisi ile temizlenmesi

(b) Saf su ile yıkama işlemi

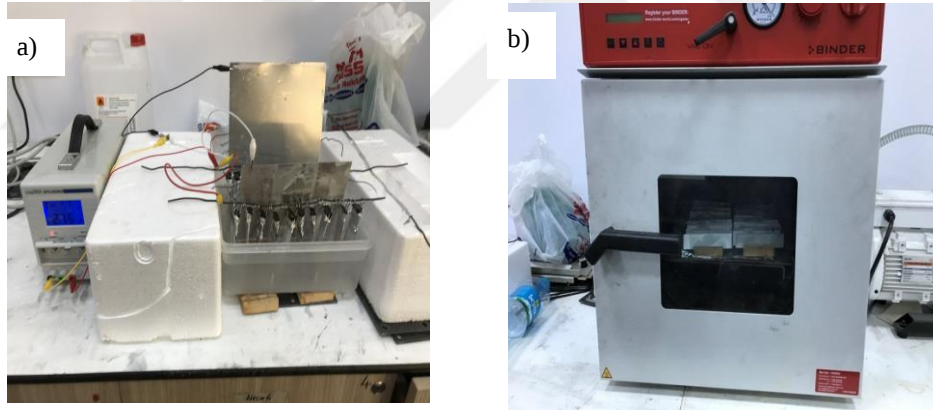
Sodyum hidroksit temizlemeden sonra asitle dağlama işlemi yapılmıştır. Bu uygulamanın amacı NaOH banyosuyla giderilemeyen yağ gibi lekeleri ortadan kaldırmaktır. Alüminyum yüzeylere asitle dağlama işlemi uygulanmadan önce kir ve yağın giderilmesi gerekir. Çünkü uygulanacak asit kir ve yağ tabakasıyla karşılaştığı için yüzeye homojen bir şekilde etki edemez. Yüzeydeki yağ ve kir giderildikten sonra

dağlama için uygulanan asit, yüzeye etki ederek oksit tabakasını kolayca çözer. Şekil 3.14'de alüminyum plakaların NaOH çözeltisi ile temizleme ve hemen ardından 43°C'deki saf suyla yıkama işlemleri görsel olarak sunulmuştur. Dağlamanın diğer bir amacı ise NaOH ile temizlenmiş yüzeye asitle oyma işlemi yapılarak yapıştırıcının yüzeye daha iyi tutunmasını sağlamaktır. Bu işlem (ASTM D2674-72,2012) standardında belirtilen usullere göre yapılmıştır. Yüzey hazırlama işlemi sırasında hem çözelti için hem de elektriksel anotlama yaparken kullanılacak olan sülfürik asit ve sodyum dikromat Sigma Aldrich, sodyum hidroksit ve fosforik asit Tekkim firmalarından temin edilmiştir. Dağlama için numuneler, standartta belirtildiği gibi ağırlıkça %26.7 sülfürik asit, %5 sodyum dikromat ve %68.3 saf sudan oluşan 65-71 °C'deki karışıma daldırılarak 12 dakika boyunca bekletilmiştir. Dağlama işlemi bu şekilde tamamlandıktan sonra numuneler oda sıcaklığındaki saf su ile yıkanmıştır. Şekil 3.15'de dağlama işlemi görsel olarak sunulmuştur. Görselden de fark edileceği üzere termometre yardımı ile ağırlıkça %26.7 sülfürik asit, %5 sodyum dikromat ve %68.3 saf sudan oluşan dağlama için kullanılan asidin sıcaklığı sürekli kontrol altında tutulmuştur.



Şekil 3.15. a) Sülfürik asit/sodyum dikromat tartılması, b) Sülfürik asit/sodyum dikromat çözeltisi ile dağlama, c) Dağlama sonrası plakalar d) Plakaların saf su ile yıkanması

Dağlama işleminden sonra anodizasyon işlemi uygulanmıştır. Bu işlemle metaller üzerindeki oksit tabakasının kalınlığının artırılması amaçlanır. Anodizasyon yüzeyde bir kaplama işlemi değil tamamen yüzeysel değişikliktir. Bu işlem için elektrolitik devre düzeneği kurulmuştur. Koruma amaçlı fosforik asit anodizasyonu yapılmıştır. Metale uygulanacak bu işleme anodizasyon denilmesinin sebebi ise, alüminyum metalinin devrede anot olarak kullanılmasıdır. Anodik oksit oluşumu ara yüzeylerde anyon, katyon taşınması ile gerçekleşir. Anadizasyonu 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 (Şekil 3.16a). Bu işlem sonrasında numuneler çıkartılarak saf su ile yıkanmıştır. Numuneler hava ile fazla temas ettirilmeden 80 °C sıcaklıkta 30 dakika boyunca kurutulmuştur (Şekil 3.16b). Bu işlem tamamlandıktan sonra numuneler temiz bir ortamda muhafaza edilerek 72 saat içinde yapıştırma işlemleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.17).



Şekil 3.16. a) Fosforik asit ile anotlama işlemi b) Kurutma işlemi



Şekil 3.17. Yüzeyleri hazırlanmış alüminyum ve kompozit levhalar

3.5. Nanoparçacık Katkılı Poliüretan Yapıştırıcının Hazırlanması

Nanoparçacık katkı ve katkısız nanokompozit yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin karşılaştırılması için, nanoparçacık katkı yapıştırıcılar hazırlanmıştır. Çözelti karıştırma yönteminde, temizliği yapılmış boş bir behere hassas terazi yardımıyla yapılması planlanan yapıştırıcı karışım (poliüretan-sertleştirici) miktarının bileşim oranına göre ağırlıkça %80 poliüretan reçine içine eklenen değişik oranlardaki nanoparçacıklar ultrasonik karıştırıcı kullanılarak homojen bir dağılım sağlayacak şekilde karıştırıldı. Ayrıca bu işlem poliüretan ve nanoparçacıkların yapısının bozulmasına sebep olacak olan fazla ısınmayı engellemek amacıyla buzlu su içeren beher içerisinde karıştırma işlemi gerçekleştirildi. Ultrasonik karıştırıcı olarak Bandelin HD 2200, 20 kHz ve 70 Watt gücünde olan cihaz kullanıldı. Karıştırma işlemi bu cihazın %25'lik gücünde gerçekleştirildi (Şekil 3.18). Poliüretan reçine içine belirlenen değişik yüzde ağırlık oranlarında grafen ve ÇCKNT katılarak toplam olarak 30 dakika karıştırıldı. Sonra hazırlanan bu solüsyon oda sıcaklığında 0.25 bar vakumda bekletilerek solüsyon içindeki hava kabarcıkların giderilmesi sağlandı. Daha sonra %20 oranında kürleştirici ilave edilerek mekanik olarak 10 dakika karıştırıldı. Ardından mekanik karıştırma sonucu oluşan hava kabarcıklarını gidermek için tekrar oda sıcaklığında 10 dk 0.25 bar vakum altında bekletildikten sonra nano yapıştırıcı kullanıma hazırlandı.



Şekil 3.18. Nanoparçacık katkı yapıştırıcının ultrasonik karıştırma ünitesi ile karıştırma işlemi

3.6. Çekme Numunelerinin Üretilmesi

Önceden hazırlanmış çekme numunesi döküm kalıpları numunelerin kalıptan kolay ayrılmalari amacı ile kalıp yüzeylerine kalıp ayırıcı sürülmüştür. Daha sonra katkılı ve katkısız olarak üretilen nano kompozit yapıştırıcılar bu kalıplara dökülmüştür. Yapılan döküm işleminden sonra çekme numunesi kalıbı kuruma işlemi için üretici firmanın tavsiyesi doğrultusunda 72 saat oda sıcaklığında bekletilerek numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarının güvenilirliğini sağlamak için aynı özellikteki numuneden 5 adet üretilmiştir. Katılaşma sonrasında çekme deney parçasının üst yüzeyindeki ölçü farklılıklarını gidermek için üst yüzey zımpara ile düzeltilmiştir (Şekil 3.19).



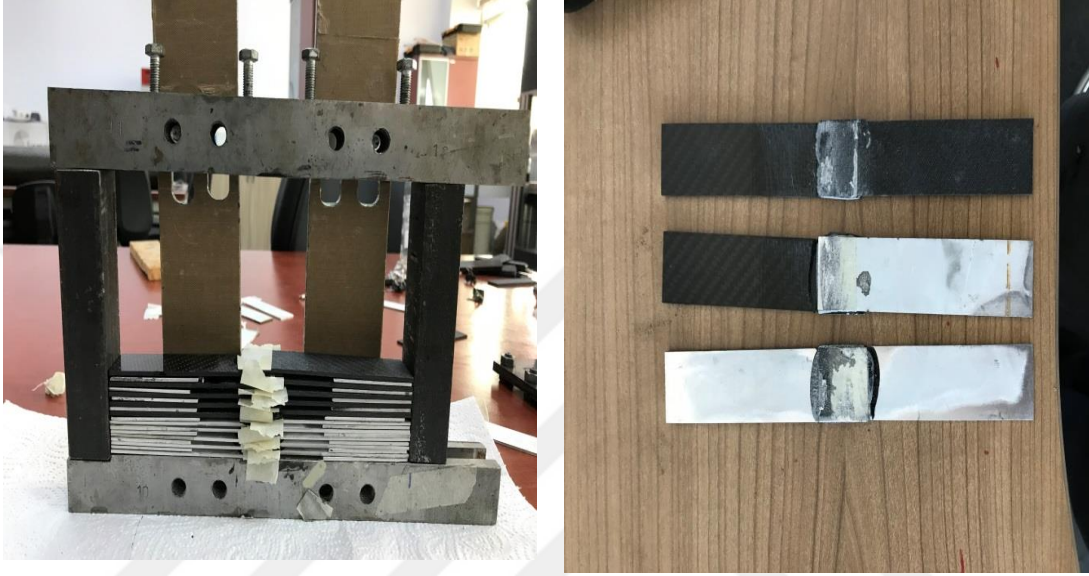
Şekil 3.19. Çekme numunesinin kalıba dökülmesi ve kalıptan çıkan çekme numuneleri

3.7. Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantıların Yapıştırılması

Yapılan çalışmada çekme yüklerine maruz poliüretan yapıştırıcı ve farklı nanoparçacık katkı oranlarında (%0.05, %0.1 ve %0.15) grafen, karbon nanotüp nanoparçacık içeren yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek taraflı bindirmeli alüminyum ve kompozit bağlantı numuneleri üretilmiştir. Üretilen nano yapıştırıcılar önceden çapakları alınan, yüzey hazırlığı yapılan Al 2024-T3 ve kompozit plakalara Şekil 3.11'deki görselde bulunan ölçülerde olacak şekilde alüminyum-alüminyum, alüminyum-kompozit ve kompozit-kompozit olmak üzere tek taraflı bindirmeli olarak yapıştırılmıştır.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıları hazırlarken, malzemelerin kaymayarak sabit kalması ve istenilen yapıştırıcı kalınlığının ayarlanabilmesi için özel tasarlanmış bir aparatın kullanılmıştır. Yapılacak olan deneylerin güvenilirliği açısından her

numuneden 5'er adet üretilmiştir. Üretilen kayma dayanımı test numuneleri 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 72 saat oda sıcaklığında bekletilerek kurutma işlemi yapılmıştır (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. Üretilen tek taraflı bindirmeli numunelerin yapıştırma ve kurutma süreci

Üretilen alüminyum-alüminyum, alüminyum-kompozit ve kompozit-kompozit TTBB numunelerinin nanoparçacık katkı oranları ve numune isimlendirmeleri sırasıyla Çizelge 3.9, Çizelge 3.10 ve Çizelge 3.11'de verilmiştir.

Çizelge 3.9. Alüminyum-Alüminyum TTBB numunelerinin katkı oranları

Numune İsmi	Ağırlıkça Katkı Oranı (%)	
	Grafen	ÇCKNT
PU AL-AL	-	-
05GR AL-AL	0.05	-
10GR AL-AL	0.1	-
15GR AL-AL	0.15	-
05KNT AL-AL	-	0.05
10KNT AL-AL	-	0.1
15KNT AL-AL	-	0.15
05GR05KNT AL-AL	0.05	0.05
05GR10KNT AL-AL	0.05	0.1
05GR15KNT AL-AL	0.05	0.15
10GR05KNT AL-AL	0.1	0.05
10GR10KNT AL-AL	0.1	0.1
10GR15KNT AL-AL	0.1	0.15
15GR05KNT AL-AL	0.15	0.05
15GR10KNT AL-AL	0.15	0.1
15GR15KNT AL-AL	0.15	0.15

Çizelge 3.10. Alüminyum-Kompozit TTBB numunelerinin katkı oranları

Numune İsmi	Ağırlıkça Katkı Oranı (%)	
	Grafen	ÇCKNT
PU AL-KOMP	-	-
05GR AL-KOMP	0.05	-
10GR AL-KOMP	0.1	-
15GR AL-KOMP	0.15	-
05KNTAL-KOMP	-	0.05
10KNTAL-KOMP	-	0.1
15KNT AL-KOMP	-	0.15
05GR05KNT AL-KOMP	0.05	0.05
05GR10KNT AL-KOMP	0.05	0.1
05GR15KNT AL-KOMP	0.05	0.15
10GR05KNT AL-KOMP	0.1	0.05
10GR10KNT AL-KOMP	0.1	0.1
10GR15KNT AL-KOMP	0.1	0.15
15GR05KNT AL-KOMP	0.15	0.05
15GR10KNT AL-KOMP	0.15	0.1
15GR15KNT AL-KOMP	0.15	0.15

Çizelge 3.11.Kompozit-Kompozit TTBB numunelerinin katkı oranları

Numune İsmi	Ağırlıkça Katkı Oranı (%)	
	Grafen	ÇCKNT
PU KOMP-KOMP	-	-
05GR KOMP-KOMP	0.05	-
10GR KOMP-KOMP	0.1	-
15GR KOMP-KOMP	0.15	-
05KNT KOMP-KOMP	-	0.05
10KNT KOMP-KOMP	-	0.1
15KNT KOMP-KOMP	-	0.15
05GR05KNT KOMP-KOMP	0.05	0.05
05GR10KNT KOMP-KOMP	0.05	0.1
05GR15KNT KOMP-KOMP	0.05	0.15
10GR05KNT KOMP-KOMP	0.1	0.05
10GR10KNT KOMP-KOMP	0.1	0.1
10GR15KNT KOMP-KOMP	0.1	0.15
15GR05KNT KOMP-KOMP	0.15	0.05
15GR10KNT KOMP-KOMP	0.15	0.1
15GR15KNT KOMP-KOMP	0.15	0.15

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Yapılan bu çalışma termal ve mekanik deneyler olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada grafen ve ÇCKNT nanoparçacık katkılı poliüretan yapıştırıcı üretimi ve bu üretilen yapıştırıcılar ile alüminyum-alüminyum, alüminyum-kompozit ve kompozit-kompozit olmak üzere tek taraflı bindirmeli bağlantılarının ve çekme numunelerinin üretimi yapılarak test numunelerinin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Çekme deneyleri sonucunda kırılan numunelerin kırılma yüzeyleri SEM’de incelenerek mekanik deneylerde elde edilen sonuçlar ile ilişkilendirilmiştir. İkinci aşamada ise üretilen numunelerinin, TGA ve DTA testleri yapılarak termal özellikleri belirlenmiştir.

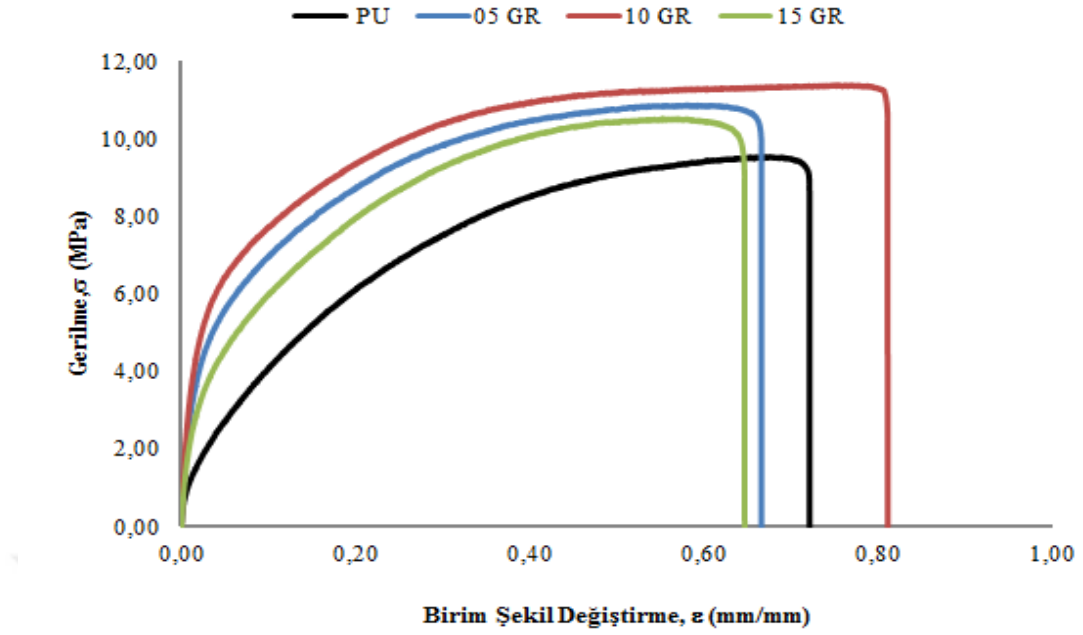
4.1. Çekme Numunelerinin Test Sonuçları

Çekme deneyleri için numuneler her birinden beşer adet olacak şekilde ilk başta saf poliüretan olarak Çizelge 3.1’de verilen oranlarda hazırlanmıştır, Literatürde yapılan araştırmalar sonucunda nanoparçacık katkılı yapıştırıcılar için grafen ve ÇCKNT katkı oranlarının ağırlıkça toplamda %0.3 olarak yani her iki parçacık toplamının %0.3’ü geçmeyecek şekilde eklenmesine karar verilmiştir (Yazman,2018). Çekme testleri için (ASTM D638-10,2004) standardı baz alınarak numunelerin üretimi gerçekleştirilmiş olup poliüretan ve nano parçacık katkılı yapıştırıcıların çekme test sonuçları alt başlıklarda aşağıdaki gibi incelenmiştir.

4.1.1. Grafen Katkılı Poliüretan Yapıştırıcıların Çekme Testleri

Grafen nanoparçacık katkılı ve katkısız yapıştırıcılarla elde edilen çekme numunelerin sergiledikleri gerilme-şekil değiştirme davranışlarını belirleyebilmek için numuneler kopma gerçekleşinceye kadar 2 mm/dk sabit çekme hızında yüklenmiştir. Öncelikle, deneyler sonucunda kuvvet-uzama eğrileri elde edilmiştir. Daha sonra bu eğrilerden, Denklem 3.5 ve Denklem 3.6 kullanılarak yapıştırıcılar için gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen eğrilerin altında kalan alanlar hesaplanarak tokluk değerleri bulunmuştur. Grafen nanoparçacık katkılı ve katkısız yapıştırıcılara ait gerilme-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 4.1’de verilmiştir. Aşağıda verilen birim şekil değişimi değerleri kopma esnasında oluşan birim şekil değişimi değerlerine eşittir.

Grafikler incelendiğinde yapıştırıcı içerisine %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında grafen ilavesi yapıştırıcının nanoparçacık miktarı artıkça çekme dayanımı değerini artırırken, grafen miktarının en büyük birim şekil değişimi üzerinde negatif bir etkisi olduğu görülmektedir. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi saf poliüretan için çekme dayanımı 9.55 MPa iken en büyük çekme dayanımı 10GR numunesi için %19 artışla 11.41 MPa olarak elde edilmiştir. 05GR numunesinin çekme dayanımı ise %13.93 artışla 10.88 MPa olarak elde edilmiştir. Ayrıca en düşük çekme dayanımı saf poliüretan yapıştırıcıya oranla %10.16 artışla 10.52 MPa değeri ile 15GR numunesinde görülmüştür. Şekil 4.1’de numunelerin birim şekil değiştirmelerine bakıldığında PU numunesinin birim şekil değiştirmesi 0.72 mm/mm olarak belirlenmiştir. PU numunesi ile kıyaslanması durumunda en yüksek birim şekil değişimi değeri 0.81 mm/mm değeriyle 10GR numunesinde görülmektedir. 05GR numunesinin birim şekil değiştirmesi 0.67 mm/mm ve grafen katkılı yapıştırıcılar arasında en düşük birim şekil değiştirmesi 0.65 mm/mm ile 15GR numunesinde görülmektedir. Tokluk olarak en büyük değer 7.11 kJ/m^3 ile 10GR numunesinde görülürken grafen katkılı yapıştırıcı numunelerinin tokluk değeri PU numunesinin tokluk değerine göre yükseldiği görülmektedir (Çizelge 4.1). Yapıştırıcı içerisine grafen nanoparçacıkların eklenmesi, yapıştırıcının gerilme, tokluk, elastisite modülü ve şekil değiştirme değerlerini artırmaktadır.



Şekil 4.1. Poliüretan yapıştırıcı ve Grafen nanoparçacık katkıli yapıştırıcılara ait gerilme-birim şekil değişirme eğrileri

Poliüretan yapıştırıcı ve grafen katkıli poliüretan yapıştırıcıların çekme test sonuçlarında elde edilen çekme dayanımı, elastisite modülü, en büyük birim şekil değişirme ve tokluk değerleri Çizelge 4.1’de sunulmuştur.

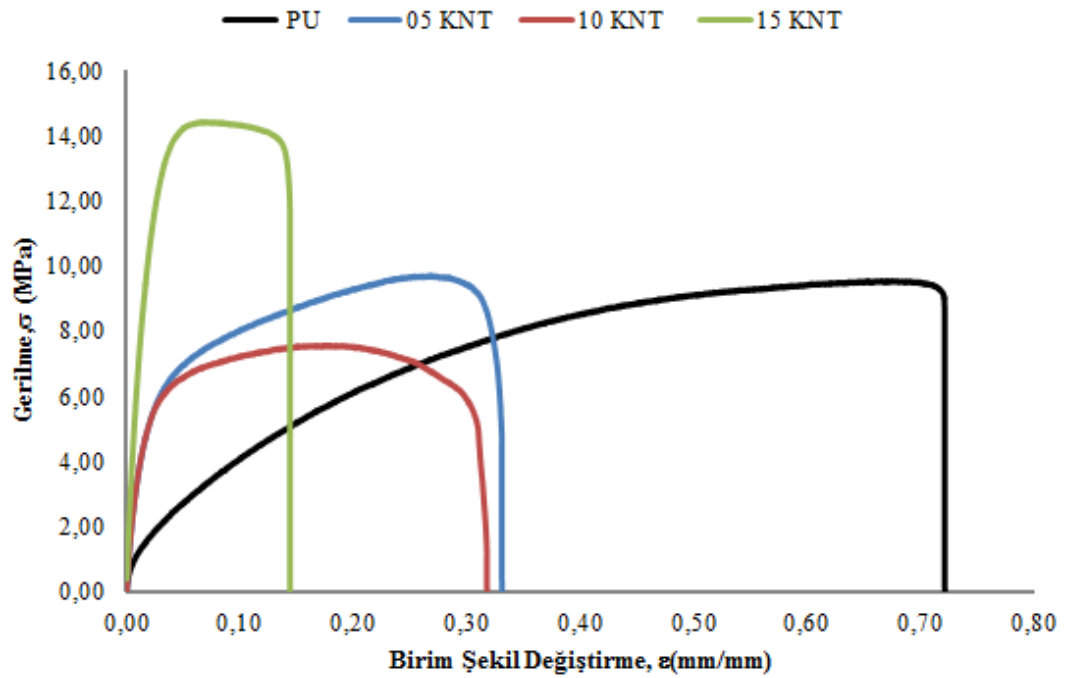
Çizelge 4.1. Saf poliüretan yapıştırıcı ve Grafen katkıli poliüretan yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin ortalama değerleri

Numuneler	Çekme Dayanımı (MPa)	En Büyük Birim Şekil Değişimi (mm/mm)	Yüzde Değişim (%)	Tokluk (kJ/m ³)	Elastisite Modülü (GPa)
PU	9.55±0.76	0.72±0.15	-	5.22±1.61	12.25±0.98
05GR	10.88±0.46	0.67±0.10	13.93	6.12±1.06	14.61±1.43
10GR	11.41±0.39	0.81±0.04	19.48	7.11±0.47	13.97±0.86
15GR	10.52±0.39	0.65±0.10	10.16	5.51±1.18	14.54±0.78

4.1.2. ÇCKNT Katkıli Poliüretan Yapıştırıcıların Çekme Testleri

ÇCKNT katkıli poliüretan esaslı yapıştırıcı numuneleri ve katkısız poliüretan yapıştırıcının gerilme-şekil değişim grafiği Şekil 4.2’de verilmiştir. Aşağıda verilen birim şekil değişimi değerleri kopma esnasında oluşan birim şekil değişimi değerlerine eşittir. Şekildeki grafikler incelendiğinde PU numunesinin çekme dayanımı 9.55 MPa iken, 15KNT numunesinin çekme dayanımı %51.10 artışla 14.43 MPa olduğu bulunmuştur. 05KNT numunesinde % 1.68 artışla 9.71 MPa ve 10KNT numunesinde

ise çekme dayanımı %20.73 azalışla 7.57 MPa olarak elde edilmiştir. Şekil 4.2’ de numunelerin birim şekil değiştirmelerine bakıldığında PU numunesinin birim şekil değiştirmesi 0.72 mm/mm olarak belirlenmiştir. ÇCKNT katkılı numunelerin birim şekil değiştirmeleri katkısız poliüretan numunesi ile kıyaslanması durumunda en büyük birim şekil değişimi değeri 0.33 mm/mm değeriyle 05KNT numunesinde görülmektedir. 10KNT numunesinin birim şekil değiştirmesi 0.31 mm/mm ve ÇCKNT katkılı yapıştırıcılar arasındaki en küçük birim şekil değiştirme, 0.14 mm/mm ile 15KNT numunesinde görülmektedir. Poliüretan yapıştırıcısına ÇCKNT eklenmesi nanokompozit yapıştırıcının çekme dayanım değerlerini artırmaktadır. Ayrıca en iyi artışın %0.15 katkı oranında olduğu görülmektedir. Tokluk ve elastisite modülü değerlerine bakıldığında ise tüm numunelerin PU numunesine göre artış gösterdiği görülmektedir. %0.10 ÇCKNT ilaveli numunede ise mekanik özelliklerin düşüş sebebi olarak homojenliğin tam olarak sağlanamadığı için kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.2. Poliüretan yapıştırıcı ve ÇCKNT nanoparçacık katkılı yapıştırıcılara ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

Çizelge 4.2’de saf poliüretan yapıştırıcı ve ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcıların çekme test sonuçlarından elde edilen çekme dayanımı, elastisite modülü, en büyük birim şekil değiştirme ve tokluk değerleri sunulmuştur.

Çizelge 4.2. Poliüretan yapıştırıcı ve Grafen katkılı poliüretan yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin ortalama değerleri

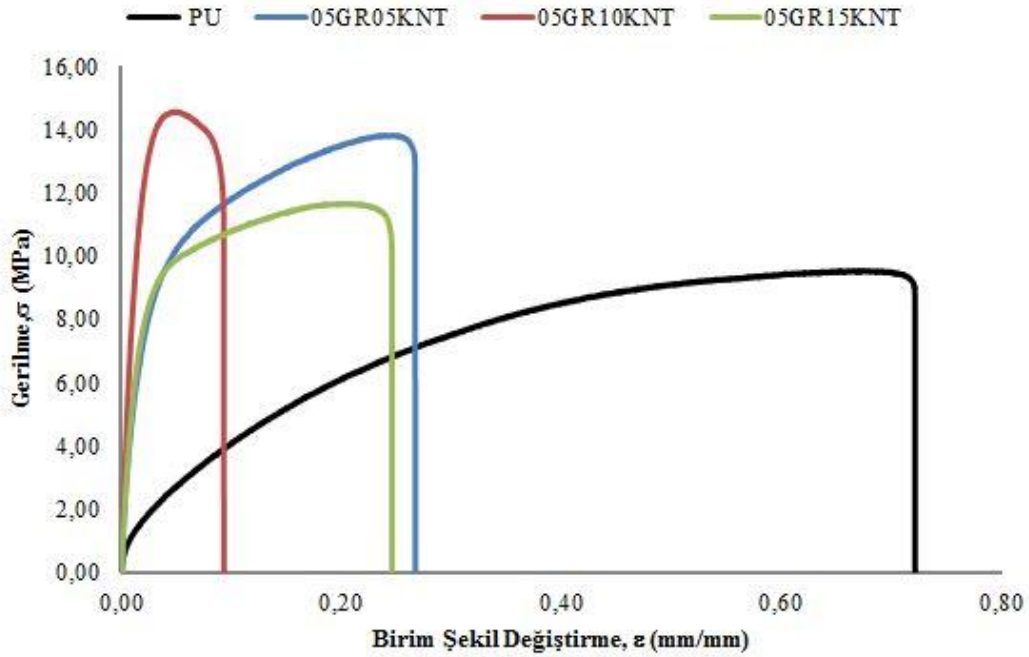
Numuneler	Çekme Dayanımı (MPa)	En Büyük Birim Şekil Değişimi(mm/mm)	Yüzde Değişim (%)	Tokluk (kJ/m ³)	Elastisite Modülü (GPa)
PU	9.55±0.76	0.72±0.15	-	5.22±1.61	12.25±2.22
05KNT	9.71±1.09	0.33±0.08	1.68	2.71±1.02	26.09±3.97
10KNT	7.57	0.31	-20.73	1.88	24.48
15KNT	14.43	0.14	51.10	2.06	28.72

4.1.3. Grafen ve ÇCKNT Katkılı Poliüretan Yapıştırıcıların Çekme Testleri

Hibrit olarak oluşturulan grafen ve ÇCKNT nanoparçacık katkılı yapıştırıcıların çekme numunelerinin testleri üç ayrı gruba ayrılmıştır. Grupların oluşturulmasında Çizelge 3.1’den de görüldüğü üzere önce grafen oranı sabit tutularak ve ÇCKNT oranı artırılarak daha sonra ise ÇCKNT oranı sabit tutularak grafen oranı artırılıp PU numunesi ile karşılaştırma yapılmıştır.

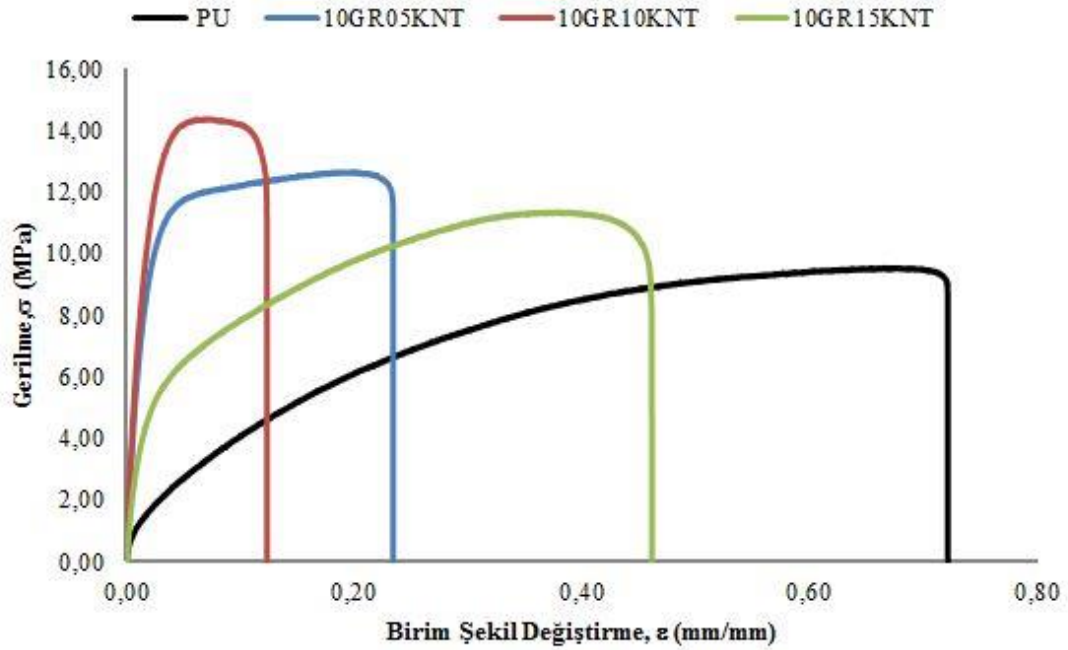
Birinci grup testler için grafen ve ÇCKNT katkılı poliüretan esaslı üretilen yapıştırıcı numuneleri ve poliüretanın karşılaştırılması Şekil 4.3’deki grafikte verilmiştir. Aşağıda verilen birim şekil değişimi değerleri kopma esnasında oluşan birim şekil değişimi değerlerine eşittir.

Grafikler incelendiğinde poliüretana göre tüm numunelerin çekme dayanımının arttığı ve poliüretan içerisindeki katkı oranının artmasıyla numunelerin poliüretanın çekme dayanımına göre artış miktarının azaldığı görülmektedir. Saf poliüretanın çekme dayanımı 9.55 MPa iken, 05GR05KNT numunesinin çekme dayanımı 13.83 MPa olduğu bulunmuştur. 05GR10KNT numunesinin çekme dayanımı 14.58 MPa ve en küçük çekme dayanımı 05GR15KNT numunesinde 11.67 MPa olarak elde edilmiştir. Saf poliüretan ile kıyaslanması durumunda hibrit yapıştırıcılarda en yüksek birim şekil değişimi değeri 0.27 mm/mm değeriyle 05GR05KNT numunesinde görülmektedir. 05GR15KNT numunesinin birim şekil değiştirmesi 0.25 mm/mm ve 05GR10KNT numunesinin birim şekil değiştirmesi 0.09 mm/mm olarak görülmektedir. Çizelge 4.3’te görüldüğü üzere birim şekil değiştirmedeki düşüşler tüm numunelerdeki tokluk değerlerinin düşmesine neden olmuştur.



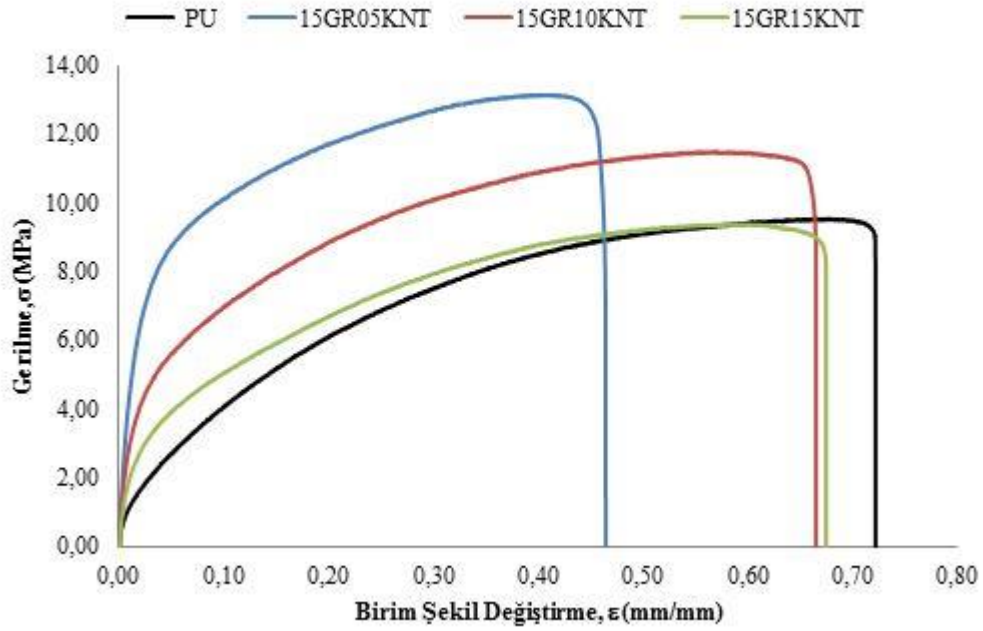
Şekil 4.3. Poliüretan yapıştırıcı ve Ağırılıkça %0.05 Grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcılara ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

İkinci grup testler için ağırlıkça % 0.10 grafen ve artan oranlarda ÇCKNT katkılı poliüretan esaslı üretilen yapıştırıcı numuneleri ve saf poliüretanın karşılaştırılması Şekil 4.4'deki grafikte verilmiştir. Şekildeki grafikler incelendiğinde saf poliüretana göre tüm numunelerin çekme dayanımının arttığı ve poliüretan içerisindeki katkı oranının artmasıyla numunelerin çekme dayanımlarının saf poliüretanın çekme dayanımına göre artış miktarının azaldığı görülmektedir. Saf poliüretanın çekme dayanımı 9.55 MPa iken, 10GR05KNT numunesinin çekme dayanımı 12.66 MPa olduğu bulunmuştur. 10GR10KNT numunesinde ise çekme dayanımı 14.37 MPa olduğu ve 10GR15KNT numunesinin çekme dayanımı 10.57 MPa olarak elde edilmiştir. Şekil 4.4'de numunelerin birim şekil değiştirmelerine bakıldığında saf poliüretan ile kıyaslanması durumunda en yüksek birim şekil değişimi değeri 0.46 mm/mm değeriyle 10GR15KNT numunesinde görülmektedir. 10GR10KNT numunesinin en büyük birim şekil değiştirmesi 0.23 mm/mm ve 10GR05KNT numunesinin birim şekil değiştirmesi 0.12 mm/mm olarak görülmektedir. Çizelge 4.3'te görüldüğü üzere birim şekil değiştirmedeki düşüşler tüm numunelerdeki tokluk değerlerinin düşmesine neden olmuştur.



Şekil 4.4. Poliüretan yapıştırıcı ve Ağırlıkça %0.10 Grafen ve %0.05,0.10 ve 0.15 ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcılara ait gerilme-şekil değiştirme eğrileri

Üçüncü grup testler için ağırlıkça % 0.15 grafen ve artan oranlarda ÇCKNT katkılı poliüretan esaslı üretilen yapıştırıcı numuneleri ve saf poliüretanın karşılaştırılması Şekil 4.5’de ki grafikte verilmiştir. Şekildeki grafikler incelendiğinde poliüretana göre tüm numunelerin çekme dayanımının arttığı ve poliüretan içerisindeki katkı oranının artmasıyla numunelerin saf poliüretanın çekme dayanımına göre artış miktarının azaldığı görülmektedir. Poliüretanın çekme dayanımı 9.55 MPa iken, 15GR05KNT numunesinin çekme dayanımı 13.15 MPa olduğu bulunmuştur. 15GR10KNT numunesinde ise çekme dayanımı 11.51 MPa olduğu ve 15GR15KNT numunesinin çekme dayanımı 9.71 MPa olarak elde edilmiştir. Şekil 4.5’de numunelerin en yüksek çekme gerilmesinde oluşan birim şekil değiştirmesine bakıldığında saf poliüretan ile kıyaslanması durumunda ise en yüksek birim şekil değişimi değeri 0.67 mm/mm değeriyle 15GR15KNT numunesinde görülmektedir. 15GR10KNT numunesinin birim şekil değiştirmesi 0.66 mm/mm ve 15GR05KNT numunesinin birim şekil değiştirmesi 0.46 mm/mm’dir.



Şekil 4.5. Ağırlıkça %0.15 Grafen ve %0.05,0.10 ve 0.15 ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcılara ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

Çizelge 4.3’de katkısız poliüretan, grafen ve ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcıların çekme test sonuçlarından elde edilen çekme dayanımı, elastisite modülü, en büyük birim şekil değiştirme ve tokluk değerleri sunulmuştur. Tokluk değerlerine bakıldığında PU numunesinin tokluk değeri 5.22 kJ/m^3 olduğu halde ÇCKNT katkısı tokluk değerlerini düşürürken grafen katkısı ise tokluk değerlerini arttırmaktadır. Tokluk değeri bakımından en düşük değer 1.17 kJ/m^3 ile 05GR10KNT numunesinde görülürken, en büyük değer 6.30 kJ/m^3 ile 15GR10KNT numunesinde görülmektedir. Tüm numunelerde elastisite modülünün yükseldiği görülmektedir.

Çizelge 4.3.Grafen ve ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin ortalama değerleri

Numuneler	Çekme Dayanımı (MPa)	En Büyük Birim Şekil Değişimi(mm/mm)	Yüzde Değişim (%)	Tokluk (kJ/m ³)	Elastisite Modülü (GPa)
PU	9.55±0.76	0.72±0.15	-	5.22±1.61	12.25±0.22
05GR05KNT	13.83±0.95	0.27±0.05	44.82	3.07±0.49	46.18±5.78
05GR10KNT	14.58±1.49	0.09±0.012	52.67	1.17±0.19	72.9±12.25
05GR15KNT	11.67±0.56	0.25±0.08	22.20	2.56±0.97	48.25±6.23
10GR05KNT	12.66±0.99	0.23±0.04	32.57	2.71±0.57	45.53±7.56
10GR10KNT	14.37±1.34	0.12±0.03	50.47	1.66±0.58	53.22±5.93
10GR15KNT	10.57±0.52	0.46±0.05	10.68	4.02±0.54	19.94±2.37
15GR05KNT	13.15±0.59	0.46±0.07	37.70	5.22±0.79	25.92±5.23
15GR10KNT	11.51±0.84	0.66±0.09	20.52	6.31±0.98	16.53±3.15
15GR15KNT	9.71±0.91	0.67±0.12	3.98	5.33±0.67	13.41±2.21

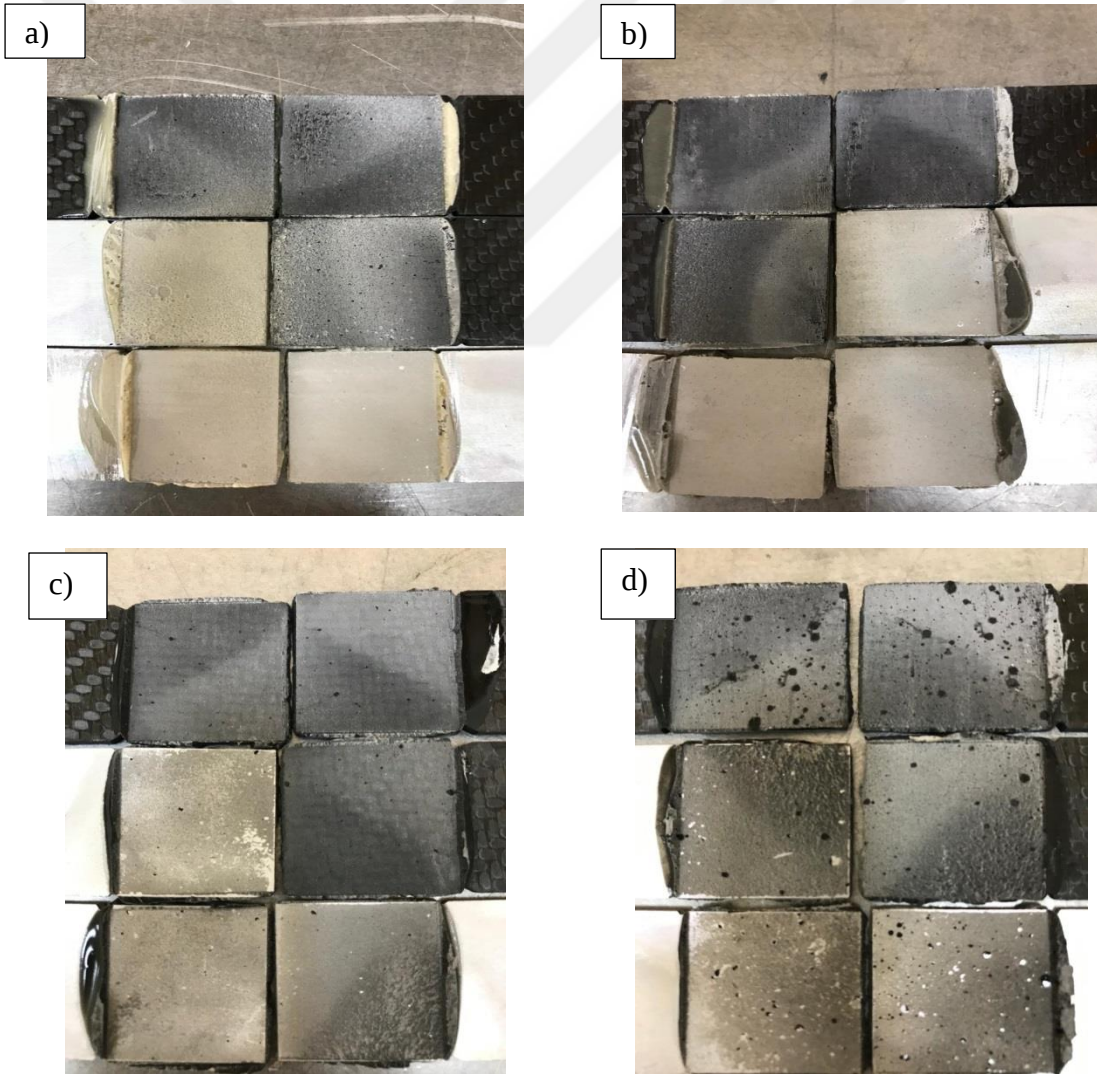
4.2. Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantılarının Kayma Testleri

Alüminyum-alüminyum, alüminyum-kompozit ve kompozit-kompozit iki plakanın birleştirilmesi için kullanılan yapıştırıcının tek taraflı bindirmeli bağlantıları kayma dayanımı deneyleri (ASTM D1002-10,2019b) standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Bu deneylerin yapılması için Shimadzu AGS-X çekme test cihazı ile Trapezium-x yazılımı ve yapıştırma bölgesi şekil değiştirmelerinin ölçülmesi için Epsilon 3560 model ekstansometre kullanılarak tek taraflı bindirmeli bağlantı numunelerinin testleri 1 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.6).

**Şekil 4.6.**Yapıştırılmalı bağlantının Shimadzu AGS-X cihazında çekme testi.

Poliüretan yapıştırıcı içerisine ilave edilen malzemeler ile elde edilen nano parçacık katkılı yapıştırıcılardan oluşan TTBB'lerin kayma gerilmesi deney sonuçları alt başlıklarda aşağıdaki gibi incelenmiştir. Aşağıda verilen kayma birim şekil değişimi değerleri kopma esnasında oluşan kayma birim şekil değişimi değerlerine eşittir.

Şekil 4.7'de TTBB ait kayma dayanım testleri sonucunda oluşan mekanik özellikler açısından en iyi özellikleri gösteren numunelere ait kopma yüzeyleri sunulmuştur. Hasar yüzeyleri arasında farklı nano parçacık katkılı yapıştırıcılar için kopma yüzeylerinde çıplak gözle belirgin bir farklılık görülmemiştir. Hemen hemen tüm TTBB'lerde oluşan hasarlı yüzeylerin çıplak gözle bakıldığında görünüşleri yaklaşık olarak aynıdır. TTBB numunelerinin hasar mekanizmalarının kohezif hasar olduğu görülmektedir.



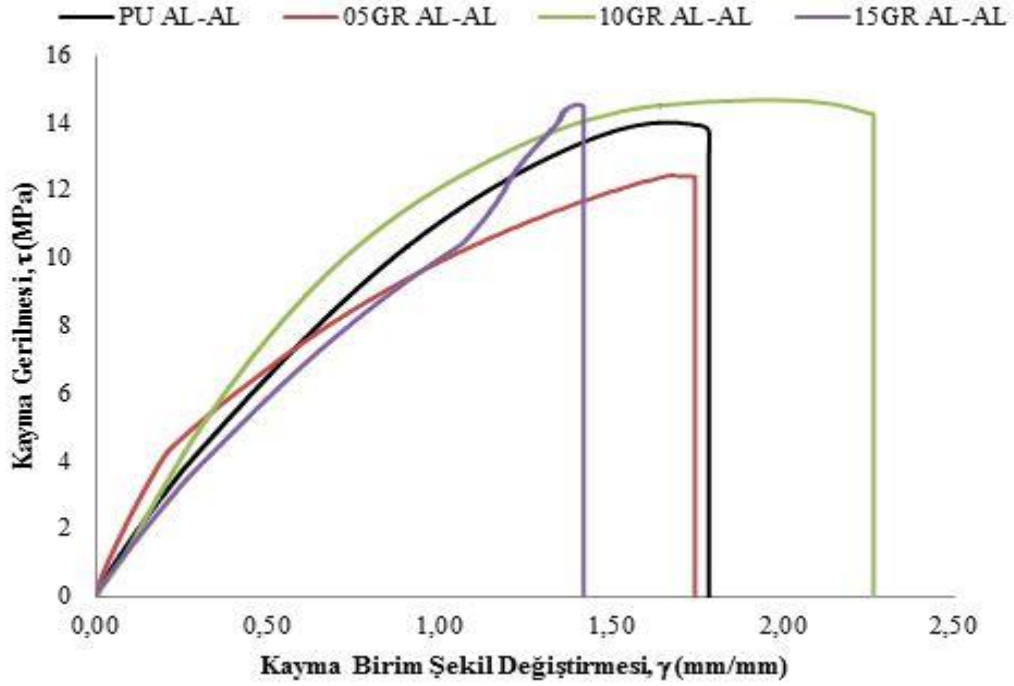
Şekil 4.7. Komp-Komp, Al-Komp ve Al-Al numunelerinin kayma dayanım testleri sonucunda oluşan hasar yüzeyleri (a) PU b) 05GR c) 05KNT d) 15GR15KNT)

4.2.1. Grafen Katkılı Poliüretan Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantılarının Kayma Testleri

Bu çalışmada ilk önce poliüretan içerisine ağırlıkça %0.05, 0.10 ve 0.15 oranlarında grafen ilave edilerek üretilen yapıştırıcı ile alüminyum-alüminyum, alüminyum-kompozit ve kompozit-kompozit tek taraflı bindirmeli bağlantıların (TTBB) kayma testleri yapılmıştır ve saf poliüretan ile birleştirilmiş bağlantıların kayma testi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Aşağıda verilen kayma birim şekil değişimi değerleri kopma esnasında oluşan kayma birim şekil değişimi değerlerine eşittir.

TTBB çekme deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-uzama değerleri, Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 kullanılarak kayma gerilmesi-KBŞD grafikleri çizilmiştir. Denklem 3.3 kullanılarak Gerilme-KBŞD değerinin doğrusal değiştiği bölgede kayma modülü hesaplanmıştır. Alüminyum-alüminyum bağlantılarına ait tipik gerilme-şekil değişimi grafikleri Şekil 4.8.'de verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi poliüretan yapıştırıcı, % 0.05 grafen katkılı, % 0.10 grafen katkılı ve % 0.15 grafen katkılı yapıştırıcılarla birlikte kullanılarak yapılan AL-AL TTBB'lerin kayma dayanımının arttığı görülmektedir. Poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş TTBB'nin maksimum kayma dayanımı 14.02 MPa iken % 0.05 grafen katkılı TTBB'nin 12.5MPa, % 0.1 grafen katkılı yapıştırıcı ile birleştirilmiş AL-AL TTBB'nin ise kayma dayanımı değeri 14.48 MPa, % 0.15 grafen katkılı yapıştırıcı ile birleştirilmiş AL-AL bağlantının 14.54 MPa olduğu görülmektedir.

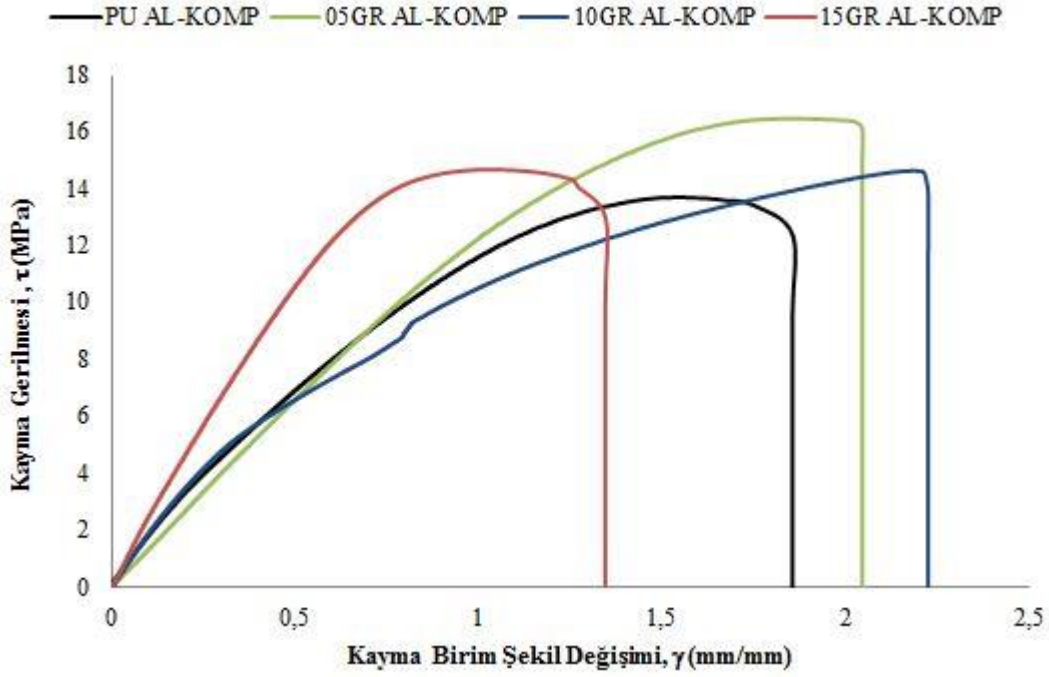
Ayrıca elde edilen sonuçlardan alüminyum-alüminyum TTBB numunelerin kayma birim şekil değişimleri incelendiğinde poliüretan yapıştırıcının kayma birim şekil değişimi 1.78 mm/mm olduğu görülmüştür. En yüksek kayma birim şekil değişiminin 2.26 mm/mm ile 10GR AL-AL numunesinde olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte en düşük kayma birim şekil değişiminin 1.42 mm/mm değeri ile 15GR AL-AL numunesinde olduğu grafikten görülmektedir. 15GR AL-AL numunesine ait kayma birim şekil değişiminin saf poliüretana göre daha küçük olması, grafenin şekil değiştirebilirliğinin az olmasından dolayı poliüretanın şekil değiştirebilirliğinde negatif etki gösterdiği düşünülmektedir.



Şekil 4.8. Grafen katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş AL-AL TTBB numunelerin kayma test sonuçları

Çekme deneyleri sonucunda elde edilen alüminyum-kompozit TTBB numunelerine ait tipik Gerilme-KBŞD grafikleri Şekil 4.9' da verilmiştir. Nanoparçacık katkılı ve katkısız alüminyum-kompozit bağlantı numunelerin çekme testinden elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde bağlantıların kayma dayanımının katkısız poliüretan yapıştırıcıya göre arttığı görülmektedir. Poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıda maksimum kayma dayanımı 13.71 MPa iken bağlantıların hasar yükü açısından en iyi sonuçlar poliüretan yapıştırıcılarıyla ağırlıkça %0.05 grafen katkı içeren nanokompozit yapıştırıcılarda 16.48 MPa olduğu görülmüştür. 10GR AL-KOMP numunesinin kayma dayanımı 14.64 MPa ve 15GR AL-KOMP numunesinin kayma dayanımı 14.69 MPa bulunmuştur.

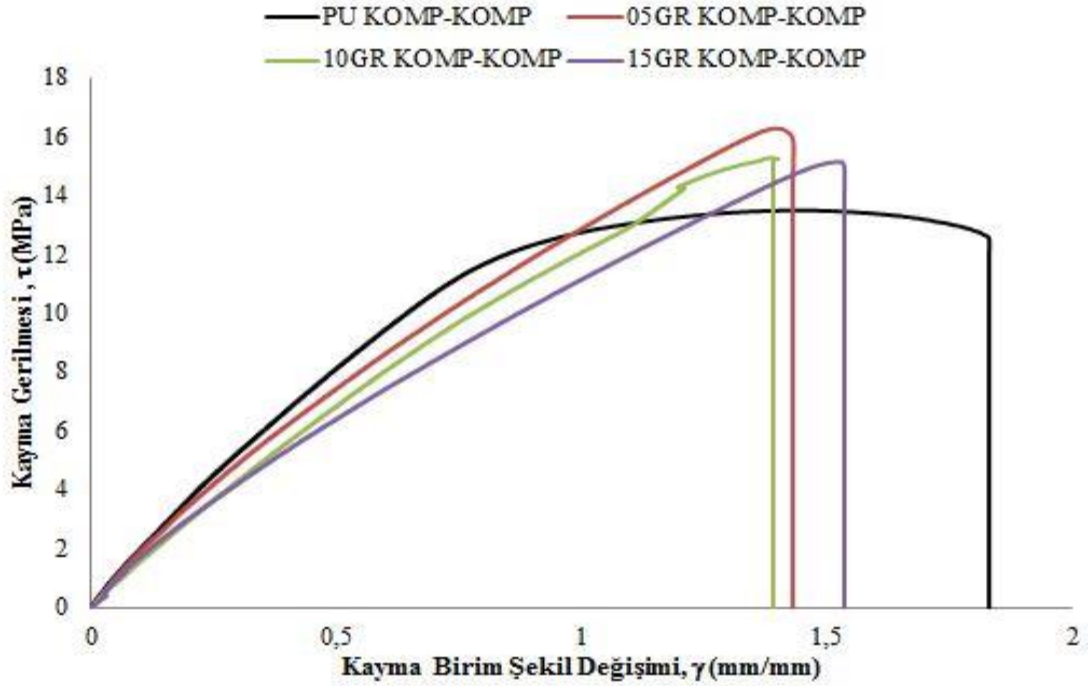
Ayrıca elde edilen sonuçlardan alüminyum-kompozit TTBB numunelerin kayma birim şekil değişimleri incelendiğinde poliüretan yapıştırıcının kayma birim şekil değişiminin 1.85 mm/mm olduğu görülmüştür. En yüksek KBŞD'nin 2.26 mm/mm ile 10GR AL-KOMP numunesinde olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte en düşük kayma birim şekil değişiminin 1.34 mm/mm değeri ile 15GR AL-KOMP numunesinde olduğu grafikten görülmektedir.



Şekil 4.9. Grafen katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş AL-KOMP TTBB numunelerinin kayma test sonuçları

Çekme deneyleri sonucunda elde edilen kompozit-kompozit bağlantılarının Gerilme-KBŞD grafikleri Şekil 4.10'da verilmiştir. Nanoparçacık katkılı ve katkısız kompozit-kompozit bağlantı numunelerin çekme testinden elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde bağlantıların kayma dayanımının katkısız poliüretan yapıştırıcıya göre arttığı görülmektedir. Poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılarda maksimum kayma dayanımı 13.51 MPa iken bağlantıların hasar yükü açısından en iyi sonuçlar poliüretan yapıştırıcıya ağırlıkça %0.05 grafen eklenen nanokompozit yapıştırıcılarda 16.28 MPa olduğu görülmüştür. 10GR KOMP-KOMP numunesinin kayma dayanımı 15.29 MPa ve 15GR AL-KOMP numunesinin kayma dayanımı 15.15 MPa bulunmuştur.

Ayrıca elde edilen sonuçlardan alüminyum-kompozit TTBB numunelerin kayma birim şekil değişimleri incelendiğinde poliüretan yapıştırıcının KBŞD 1.83 mm/mm olduğu görülmüştür. En yüksek değerin 1.53 mm/mm KBŞD ile 15GR KOMP-KOMP numunesinde olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte en düşük kayma birim şekil değişiminin 1.39 mm/mm değeri ile 15GR KOMP-KOMP numunesinde olduğu grafikten görülmektedir.



Şekil 4.10. Grafen katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş KOMP-KOMP TTBB numunelerinin kayma test sonuçları

Çizelge 4.4’de saf poliüretan ve grafen katkılı tüm yapıştırma bağlantılarının kayma dayanımı, kayma birim şekil değişimi miktarları ve kayma modülü değerleri verilmektedir.

Çizelge 4.4. Poliüretan yapıştırıcı ve grafen katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş TTBB numunelerinin mekanik özelliklerinin ortalama değerleri

Numuneler	Kayma Dayanımı(MPa)	Kayma Birim Şekil Değişimi (mm/mm)	Kayma Modülü (GPa)
PU AL-AL	14.02±1.21	1.78±0.86	8.45±1.67
05GR AL-AL	12.5±0.65	1.74±0.57	7.41±3.39
10GR AL-AL	14.48±0.64	2.26±0.55	7.28±2.14
15GR AL-AL	14.54±2.48	1.42±0.92	10.35±1.86
PU AL-KOMP	13.71±0.85	1.85±0.55	8.90±0.32
05GR AL-KOMP	16.48±0.87	2.05±0.47	8.96±1.06
10GR AL-KOMP	14.64±1.29	2.22±0.63	6.72±1.18
15GR AL-KOMP	14.69±1.84	1.34±0.10	14.19±0.12
PU KOMP-KOMP	13.51±0.43	1.83±0.20	9.32±1.83
05GR KOMP-KOMP	16.28±0.32	1.39±0.10	11.71±0.98
10GR KOMP-KOMP	15.29±1.16	1.43±0.42	10.06±1.4
15GR KOMP-KOMP	15.15±0.26	1.53±0.11	15.78±1.04

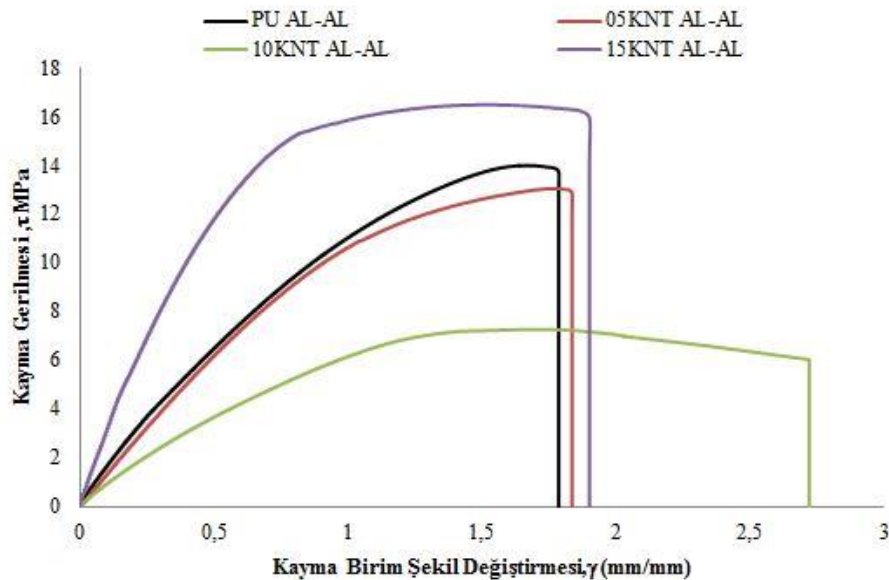
4.2.2. ÇCKNT Katkılı Poliüretan Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Tek Taraflı

Bindirmeli Bağlantıların Kayma Testleri

Ağırlıkça %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkılı poliüretan esaslı yapıştırıcılar ile birleştirilmiş alüminyum-alüminyum, alüminyum-kompozit ve kompozit-kompozit tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma testleri yapılmıştır.

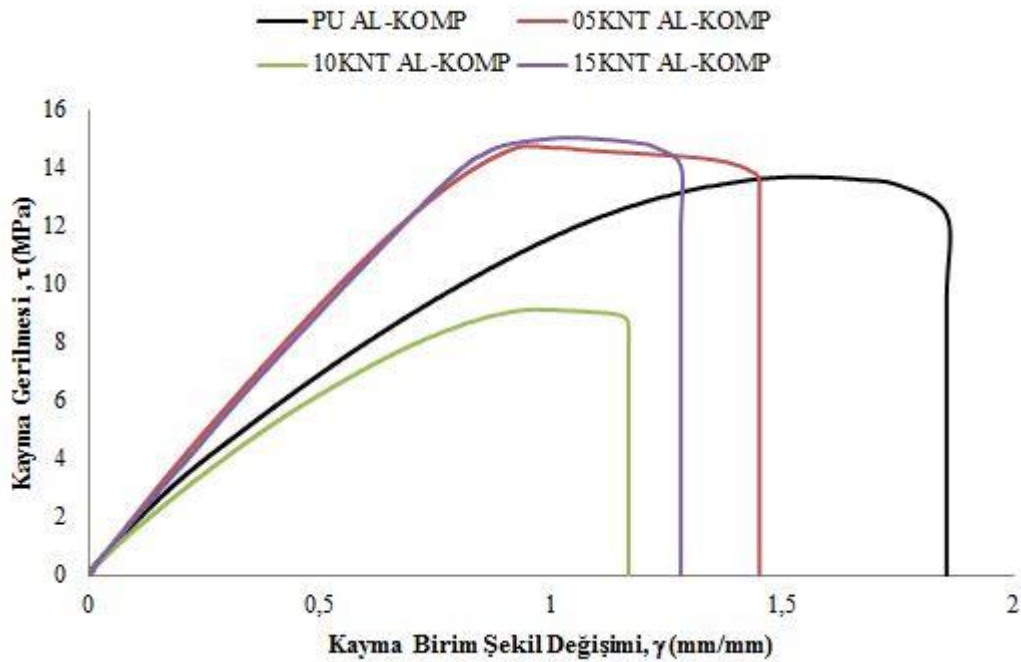
TTBB çekme deneyleri sonucunda elde edilen ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş alüminyum-alüminyum bağlantılarına ait Gerilme-KBŞD grafikleri Şekil 4.11'de verilmiştir. Aşağıda verilen kayma birim şekil değişimi değerleri kopma esnasında oluşan kayma birim şekil değişimi değerlerine eşittir.

Nanoparçacık katkılı ve katkısız alüminyum-alüminyum TTBB numunelerinin çekme testinden elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde; poliüretan yapıştırıcıya ait PU AL-AL numunesinin kayma dayanımı 14.02 MPa bulunmuştur. En yüksek kayma dayanımına sahip 15KNT AL-AL numunesinin kayma dayanımı değeri 16.51 MPa olduğu görülmektedir. 05KNT AL-AL numunesinin kayma dayanımı değeri 13.06 MPa olduğu görülmektedir. 10KNT AL-AL numunesinin kayma dayanımı değeri 7.29 MPa olarak bulunmuştur. Ayrıca saf poliüretan yapıştırıcıya oranla en düşük kayma dayanımı 7.29 MPa değeri ile 10KNT AL-AL numunesinde görülmüştür. Nanoparçacıkların poliüretan reçine içerisinde ÇCKNT'lerin homojen dağılmayarak topaklanması ve çözeltilerin yüksek nanoparçacık takviye içermesi nedeniyle mekanik özelliklerde düşüş görüldüğü düşünülmektedir. Şekil 4.6'da numunelerin kayma birim şekil değiştirmelerine bakıldığında PU AL-AL numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 1.78 mm/mm bulunmuştur. Bu gruptaki en yüksek kayma birim şekil değişimi değeri 2.72 mm/mm değeriyle 10KNT AL-AL numunesinde görülmektedir. 05KNT AL-AL numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 1.83 mm/mm ve 15KNT AL-AL numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 1.9 mm/mm'dir.



Şekil 4.11. ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş AL-AL TTBB numunelerinin kayma test sonuçları

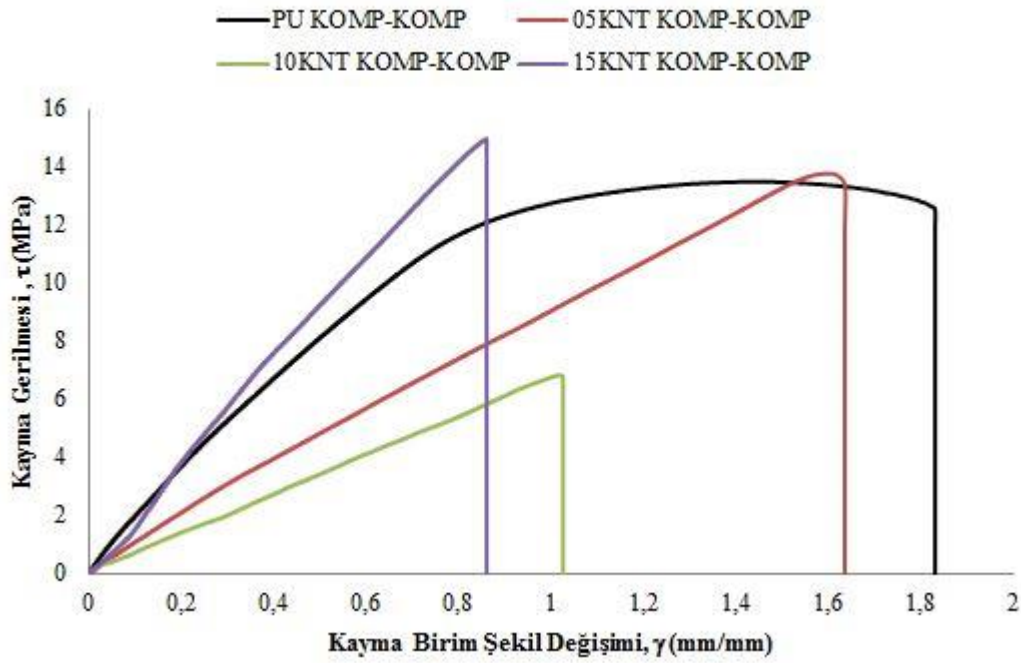
Aynı şekilde TTBB çekme deneyleri sonucunda elde edilen ÇCKNT katkılı poliüretan ile birleştirilmiş alüminyum-kompozit bağlantılarına ait Gerilme-KBŞD grafikleri Şekil 4.12'de verilmiştir. Nanoparçacık katkılı ve katkısız alüminyum-kompozit bağlantı numunelerinin çekme testinden elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde; PU AL-KOMP numunesinin kayma dayanımı 13.71 MPa iken 15KNT AL-KOMP numunesinin kayma dayanımı değerinin 15.06 MPa olduğu görülmektedir. 05KNT AL-KOMP numunesinin kayma dayanımı ise 14.77 MPa olarak bulunmuştur. Ayrıca poliüretan yapıştırıcıya oranla en düşük kayma dayanımı 9.15 MPa değeri ile 10KNT AL-KOMP numunesinde görülmüştür. Şekil 4.12'de numunelerin kayma birim şekil değiştirmelerine bakıldığında en yüksek kayma birim şekil değiştirmesi 1.45 mm/mm değeriyle 05KNT AL-KOMP numunesinde gözlemlenmiştir. 10 KNT AL-KOMP numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 1.16 mm/mm ve 15KNT AL-KOMP numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 1.28 mm/mm olarak bulunmuştur.



Şekil 4.12. ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş AL-KOMP TTBB numunelerinin kayma test sonuçları

TTBB çekme deneyleri sonucunda elde edilen ÇCKNT katkılı kompozit-kompozit bağlantılarının Gerilme-KBŞD grafikleri Şekil 4.13'de verilmiştir. Nanoparçacık katkılı ve katkısız kompozit-kompozit bağlantı numunelerinin çekme testinden elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde; PU KOMP-KOMP numunesinin kayma dayanımı değeri 13.51 MPa iken 15KNT KOMP-KOMP numunesinin kayma dayanımı değeri 14.99 MPa bulunmuştur. 05KNT KOMP-KOMP numunesinin kayma

dayanımı değeri 13.78 MPa ve 10KNT KOMP-KOMP numunesinin kayma dayanımı 6.85 MPa olarak bulunmuştur. Ayrıca elde edilen sonuçlardan kayma birim şekil değişimi miktarları incelendiğinde; PU KOMP-KOMP numunesinin kayma birim şekil değişimi 1.83 mm/mm olduğu ve en yüksek KBŞD değerinin 1.63 mm/mm ile 05KNT KOMP-KOMP numunesinde olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte en düşük kayma birim şekil değişiminin 0.86 mm/mm değeri ile 15KNT KOMP-KOMP numunesinde olduğu grafikten görülmektedir.



Şekil 4.13. ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş KOMP-KOMP TTBB numunelerinin kayma test sonuçları

ÇCKNT katkılı yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma dayanımı, kayma modülü ve kayma birim şekil değişimi miktarları Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Poliüretan yapıştırıcı ve ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş TTBB numunelerinin mekanik özelliklerinin ortalama değerleri

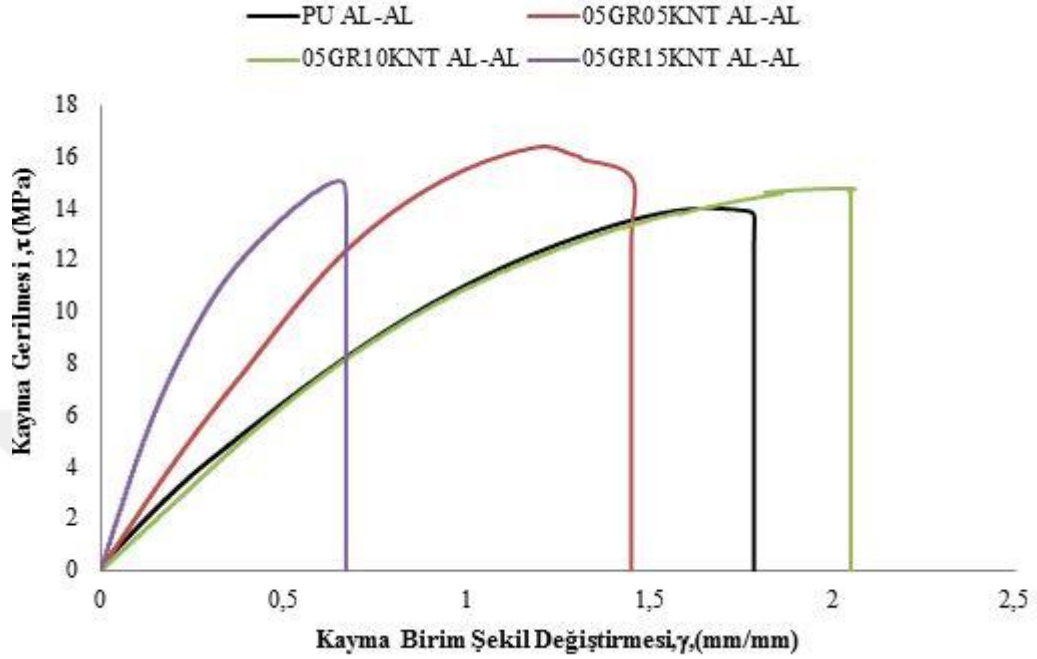
Numuneler	Kayma Dayanımı(MPa)	Kayma Birim Şekil Değişimi (mm/mm)	Kayma Modülü (GPa)
PU AL-AL	14.02±1.21	1.78±0.86	8.45±1.67
05KNT AL-AL	13.06±2.66	1.74±0.69	7.38±0.49
10KNT AL-AL	7.29±0.72	2.72±0.14	4.67±0.88
15KNT AL-AL	16.51±0.64	1.90±0.35	9.77±1.22
PU AL-KOMP	13.71±0.85	1.85±0.55	8.90±0.32
05KNT AL-KOMP	14.77±1.58	1.45±0.24	15.55±1.31
10KNT AL-KOMP	9.15±0.1	1.16±0.32	8.71±0.85
15KNT AL-KOMP	15.06±0.30	1.28±0.45	15.53±0.46
PU KOMP-KOMP	13.51±0.43	1.83±0.20	9.32±1.83
05KNT KOMP-KOMP	13.78±1.31	1.63±0.51	8.56±1.95
10KNT KOMP-KOMP	6.85±0.32	1.02±0.62	7.97±1.42
15KNT KOMP-KOMP	14.99±1.20	0.86±0.42	9.43±3.47

4.2.3. Grafen ve ÇCKNT Katkılı Poliüretan Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantılarının Kayma Testleri

Düşük katkı oranlarında mukavemet değerinin fazla, şekil değiştirebilirliğinin az olması sebebiyle her iki nanoparçacık toplamının %0.3'ü geçmeyecek şekilde karıştırılmasına karar verilmiştir. Testler üç gruba ayrılmıştır. Nanoparçacık katkılı yapıştırıcılar gruplandırıldıktan sonra alüminyum-alüminyum, alüminyum-kompozit ve kompozit-kompozit olmak üzere tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma testleri yapılmıştır. Aşağıda verilen kayma birim şekil değişimi değerleri kopma esnasında oluşan kayma birim şekil değişimi değerlerine eşittir.

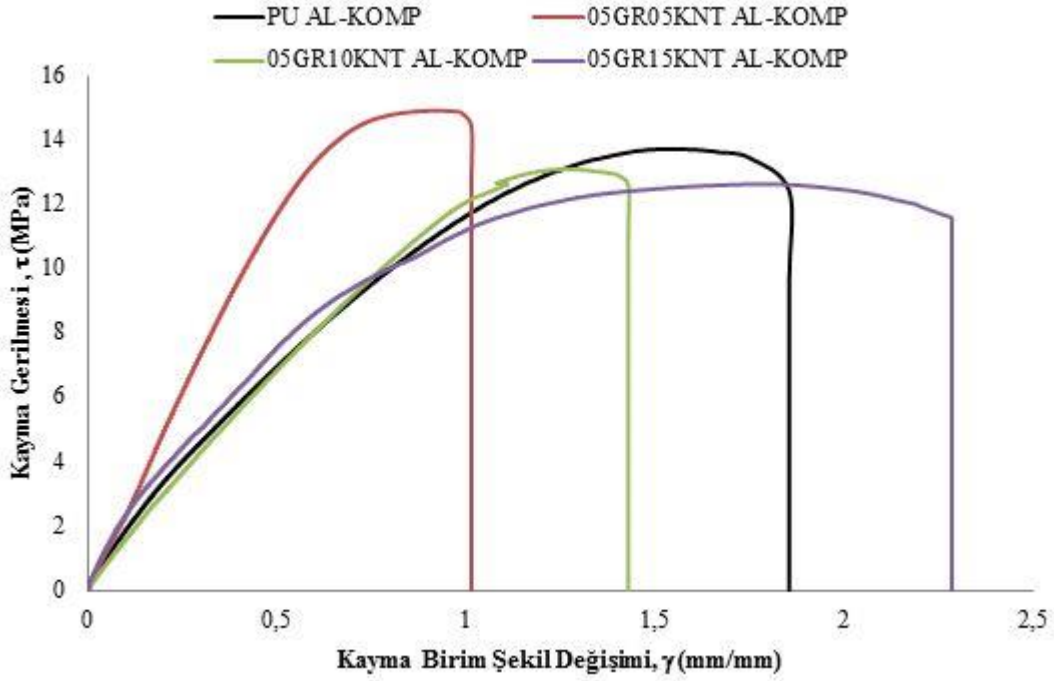
Birinci gruptaki numunelere ait alüminyum-alüminyum tek taraflı bindirmeli bağlantıların grafen miktarı ağırlıkça %0.05 te sabit tutularak sırasıyla %0.05, %0.10 ve %0.15 ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcıların kayma gerilmesi- kayma birim şekil değiştirmesi Şekil 4.14'deki gibidir. Nanoparçacık katkılı ve katkısız poliüretan yapıştırıcılarla birleştirilmiş alüminyum-alüminyum TTBB numunelerin çekme testinden elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde; bağlantıların kayma dayanımının katkısız poliüretan yapıştırıcıya göre tüm numunelerde arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.14'te PU AL-AL numunesinin kayma dayanımı 14.02 MPa iken 05GR05KNT AL-AL katkılı poliüretan esaslı yapıştırıcının kayma dayanımı değerinin 16.41 MPa olduğu ve 05GR15KNT AL-AL numunesinin kayma dayanımı değeri 15.07 MPa olarak görülmüştür. Ayrıca bu gruptaki hibrit yapıştırıcılar arasında en düşük kayma dayanımı 14.79 MPa değeri ile 05GR10KNT AL-AL numunesinde görülmüştür. Şekil 4.14'te numunelerin kayma birim şekil değiştirmelerine bakıldığında PU AL-AL numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 1.78 mm/mm, 05GR10KNT

AL-AL numunesin kayma birim şekil değışimi değeri 2.06 mm/mm, 05GR05KNT AL-AL numunesinin kayma birim şekil değıştirmesi 1.45 mm/mm ve en düşük kayma birim şekil değıştirmesi 0.67 mm/mm ile 05GR15KNT AL-AL numunesinde görölmektedir.



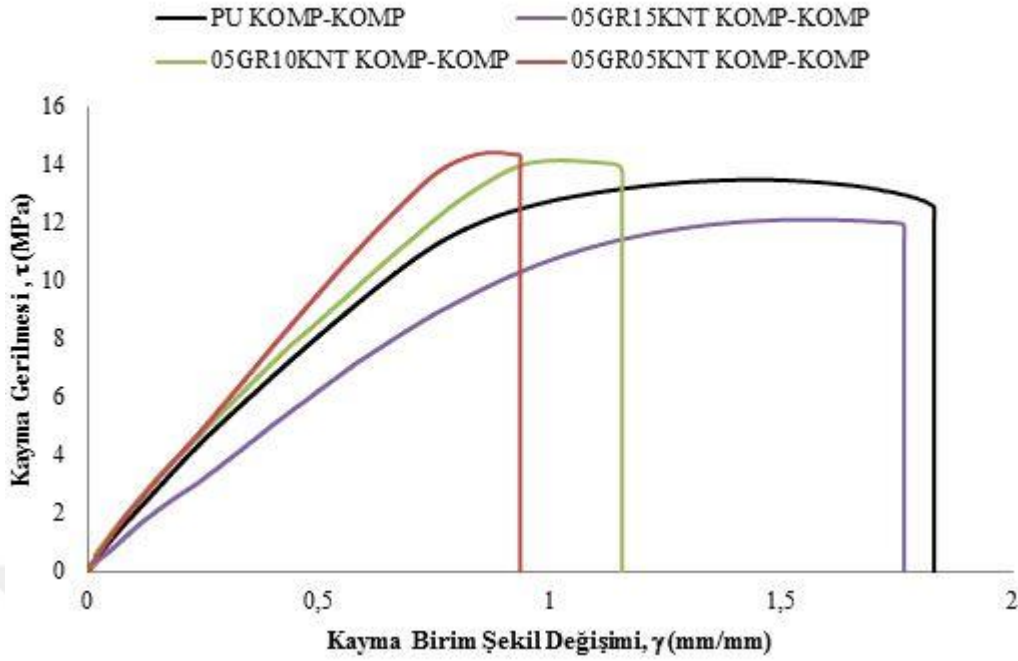
Şekil 4.14. %0.05 Grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkıli Poliüretan yapıştııcı ile birleştirilmiş AL-AL TTBB numunelerinin kayma test sonuçları

Birinci grup için alüminyum-kompozit nanoparçacık katkıli ve katkısiz TTBB numunelerinin çekme testinden elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde; bağlantıların kayma dayanımının katkısiz poliüretan yapıştııcıya göre sadece 05GR05KNT AL-KOMP numunesinde artışı görölmektedir. Şekil 4.15’de poliüretan yapıştııcının kayma dayanımı 13.71 MPa iken üretilen en yüksek kayma dayanımına sahip katkıli poliüretan esaslı yapıştııcının değeri 14.91 MPa olduğu görölmektedir. 05GR10KNT AL-KOMP numunesi ise 13.08 MPa olarak görölmüştür. Bu gruptaki hibrit yapıştııcılara oranla en düşük kayma dayanımı 12.62 MPa değeri ile 05GR15KNT AL-KOMP numunesinde görölmüştür. Şekil 4.15’de numunelerin kayma birim şekil değışimlerine bakıldığında PU AL-KOMP numunesinin kayma birim şekil değıştirmesi 1.85 mm/mm olarak belirlenmiştir. 05GR15KNT AL-KOMP numunesinin kayma birim şekil değışimi değeri 2.28 mm/mm, 05GR10KNT AL-KOMP numunesinin kayma birim şekil değışimi değeri 1.43 mm/mm ve en düşük kayma birim şekil değıştirme 1.02 mm/mm değeri ile 05GR05KNT AL-KOMP numunesinde görölmektedir.



Şekil 4.15. %0.05 Grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT Katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş AL-KOMP TTBB numunelerinin kayma test sonuçları

Birinci grup için kompozit-kompozit nanoparçacık katkılı ve katkısız TTBB numunelerin çekme testinden elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 4.16’da görüldüğü üzere PU KOMP-KOMP numunesinin kayma dayanımı 13.51 MPa iken 05GR05KNT KOMP-KOMP numunesinin kayma dayanımı değerinin 14.45 MPa, 05GR10KNT KOMP-KOMP numunesinin kayma dayanımı değeri 14.17 MPa olarak bulunmuştur. Ayrıca bu gruptaki en düşük kayma dayanımı 12.13 MPa değeri ile 05GR15KNT KOMP-KOMP numunesinde görülmüştür. Şekil 4.16’da numunelerin kayma birim şekil değiştirmelerine bakıldığında PU KOMP-KOMP numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 1.76 mm/mm, 05GR15KNT KOMP-KOMP numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 1.57 mm/mm, 05GR10KNT KOMP-KOMP numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 1.15 mm/mm ve bu gruptaki en düşük kayma birim şekil değiştirmesi 0.93 mm/mm ile 05GR05KNT KOMP-KOMP numunesinde görülmektedir.



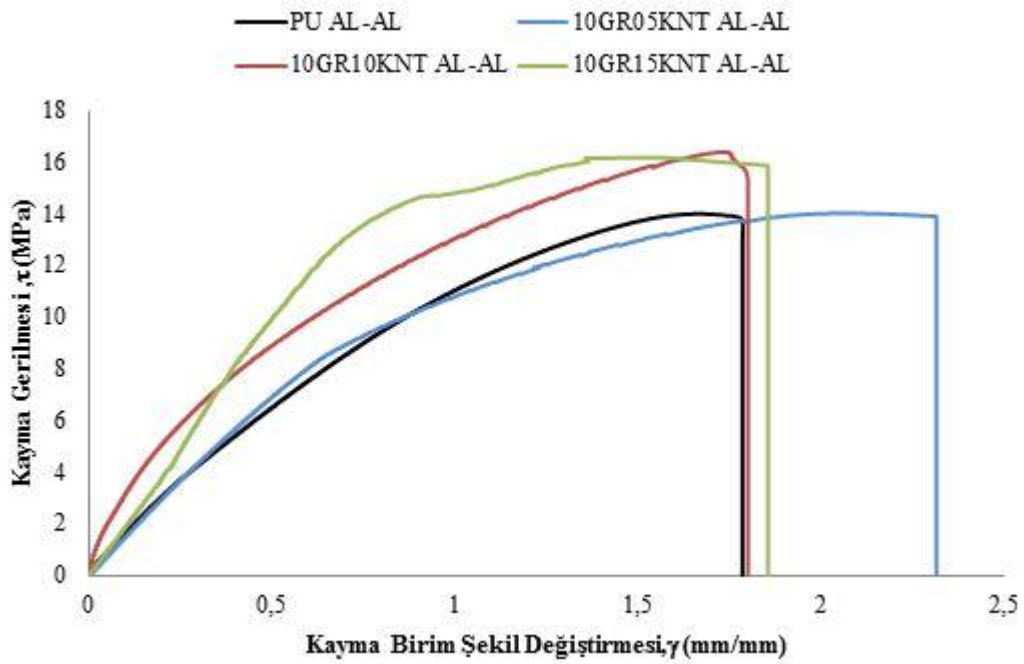
Şekil 4.16. %0.05 Grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş KOMP-KOMP TTBB numunelerinin kayma test sonuçları

%0.05 grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma dayanımı, kayma modülü ve kayma birim şekil değişimi miktarları Çizelge 4.6’da verilmiştir. Katkı oranı toplamı %0.10’u geçmesi durumunda PU numunelerine göre kayma dayanımının düştüğü görülmektedir.

Çizelge 4.6. Poliüretan yapıştırıcı ve %0.05 Grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT Katkılı TTBB numunelerinin mekanik özelliklerinin ortalama değerleri

Numuneler	Kayma Dayanımı(MPa)	Kayma Birim Şekil Değişimi (mm/mm)	Kayma Modülü (GPa)
PU AL-AL	14.02±1.21	1.78±0.86	8.45±1.67
05GR05KNT AL-AL	16.41±1.53	1.45±0.61	13.56±3.56
05GR10KNT AL-AL	14.79±2.56	2.06±0.80	7.21±2.81
05GR15KNT AL-AL	15.07±0.69	0.67±0.15	23.18±3.24
PU AL-KOMP	13.71±0.85	1.85±0.55	8.90±0.32
05GR05KNT AL-KOMP	14.91±2.49	1.02±0.61	15.85±1.23
05GR10KNT AL-KOMP	13.08±1.70	1.43±0.59	10.30±5.05
05GR15KNT AL-KOMP	12.62±1.04	2.28±0.25	6.47±1.97
PU KOMP-KOMP	13.51±0.43	1.83±0.20	9.32±1.83
05GR05KNT KOMP-KOMP	14.45±0.97	0.93±0.50	9.20±3.71
05GR10KNT KOMP-KOMP	14.17±0.82	1.15±0.40	13.50±1.24
05GR15KNT KOMP-KOMP	12.13±1.07	1.76±0.29	13.78±4.19

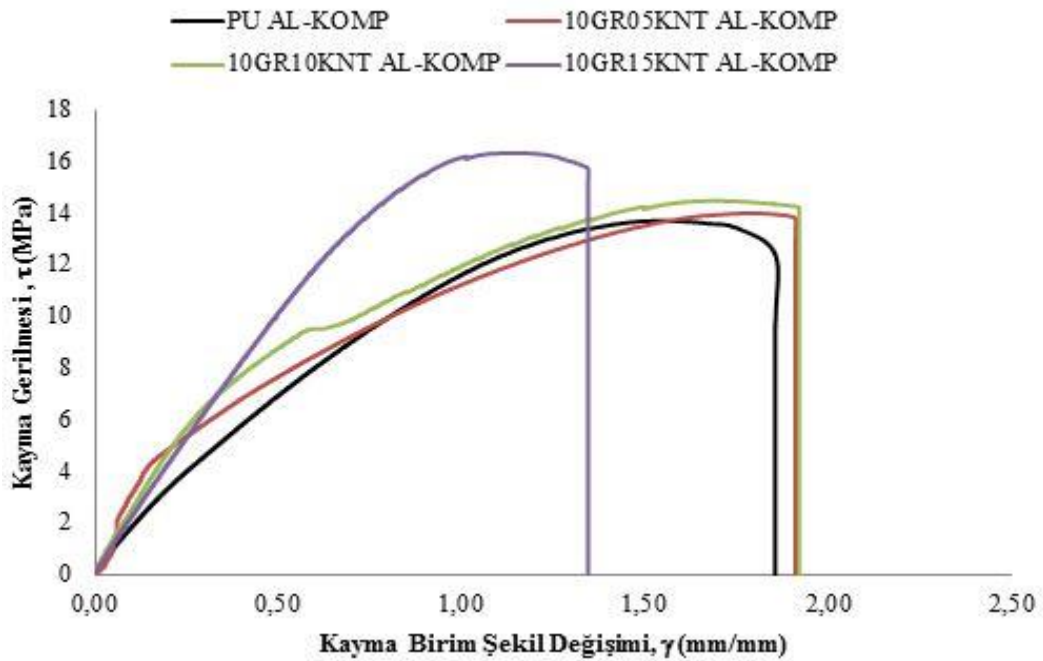
İkinci gruptaki numunelere ait alüminyum-alüminyum tek taraflı bindirmeli bağlantıların grafen miktarı ağırlıkça %0.10'te sabit tutularak sırasıyla %0.05, %0.10 ve %0.15 ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcıların kayma gerilmesi-kayma birim şekil değiştirme grafiği Şekil 4.12'deki gibidir. Nanoparçacık katkılı ve katkısız alüminyum-alüminyum TTBB numunelerin çekme testinden elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde katkısız poliüretan yapıştırıcıya göre katkılı alüminyum-alüminyum TTBB numunelerinin kayma dayanımının yükseldiği gözlemlenmektedir. Şekil 4.12'de PU AL-AL numunesinin kayma dayanımı 14.02 MPa iken 10GR15KNT AL-AL numunesinin kayma dayanımı değeri 16.21 MPa, 10GR10KNT AL-AL numunesinin kayma dayanımı değeri ise 16.41 MPa olarak görülmüştür. Ayrıca bu gruptaki en düşük kayma dayanımı 14.04 MPa değeri ile 10GR05KNT AL-AL numunesinde görülmüştür. Şekil 4.12'de numunelerin kayma birim şekil değiştirmelerine bakıldığında PU AL-AL numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 1.78 mm/mm, 10GR05KNT AL-AL numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 2.31 mm/mm, 10GR15KNT AL-AL numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 1.85 mm/mm ve bu gruptaki en düşük kayma birim şekil değiştirmesi 1.8 mm/mm ile 10GR10KNT AL-AL numunesinde görülmektedir.



Şekil 4.17. %0.10 Grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş AL-AL TTBB numunelerinin kayma test sonuçları

İkinci grup için nanoparçacık katkılı ve katkısız alüminyum-kompozit TTBB numunelerin çekme testinden elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde katkılı TTBB numunelerinin katkısız TTBB numunelerine göre kayma dayanımı değerlerinin

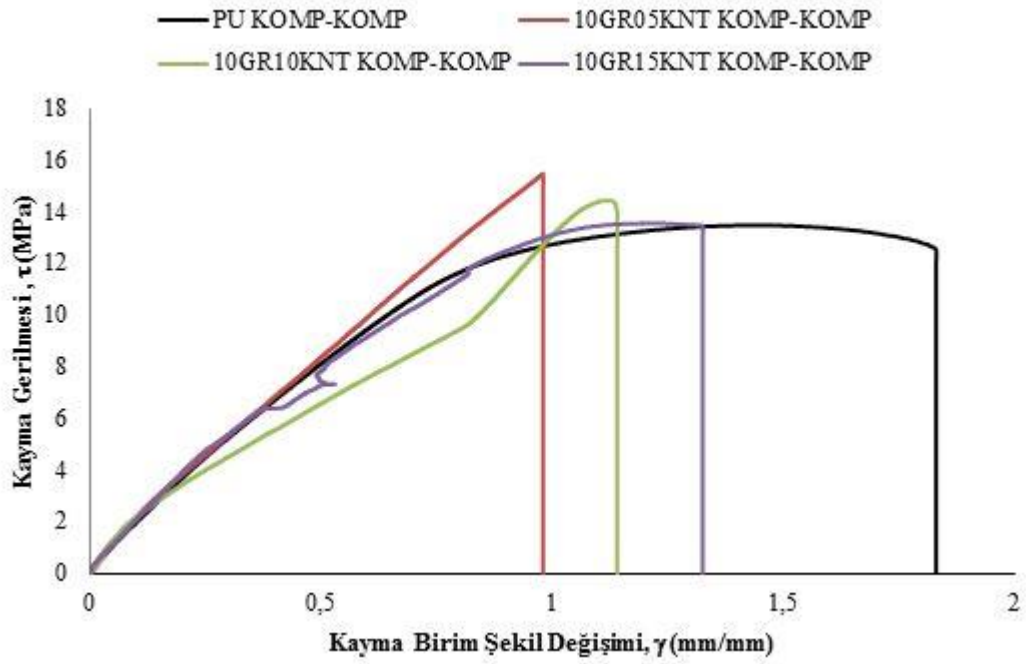
arttığı görülmektedir. Şekil 4.18’de PU AL-KOMP numunesinin kayma dayanımı 13.71 MPa iken en yüksek kayma dayanımına sahip 10GR15KNT AL-KOMP numunesinin kayma dayanımı değerinin 16.34 MPa olduğu görülmektedir. 10GR10KNT AL-KOMP numunesinin kayma dayanımı değeri 14.49 MPa olarak görülmüştür. Bu gruptaki TTBB numuneler arasında en düşük kayma dayanımı 14.01 MPa değeri ile 10GR05KNT AL-KOMP numunesinde görülmüştür. Şekil 4.18’de numunelerin kayma birim şekil değiştirmelerine bakıldığında PU AL-KOMP numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 1.85 mm/mm olarak belirlenmiştir. Katkısız poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş TTBB numunesiyle kıyaslanması durumunda en yüksek kayma birim şekil değişimi değeri 1.92 mm/mm değeriyle 10GR10KNT AL-KOMP numunesinde görülmektedir. 10GR05KNT AL-KOMP numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 1.91 mm/mm ve en düşük kayma birim şekil değiştirmesi 1.34 mm/mm ile 10GR15KNT AL-KOMP numunesinde görülmektedir.



Şekil 4.18. %0.10 Grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkıli poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş AL-KOMP TTBB numunelerinin kayma test sonuçları

İkinci grup için kompozit-kompozit nanoparçacık katkıli ve katkısız TTBB numunelerinin çekme testinden elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde bağlantıların hepsinin kayma dayanımı değerlerinin değerlerinin nanoparçacık katkısı ile arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.19’da PU KOMP-KOMP numunesinin kayma dayanımı değeri 13.51 MPa iken en yüksek kayma dayanımı 10GR05KNT KOMP-KOMP 15.51 MPa olduğu görülmektedir. 10GR10KNT KOMP-KOMP numunesi ise

14.46 MPa olarak görülmüştür. Ayrıca en düşük kayma dayanımı 13.57 MPa değeri ile 10GR15KNT KOMP-KOMP numunesinde görülmüştür. Şekil 4.19'da numunelerin kayma birim şekil değiştirmelerine bakıldığında PU KOMP-KOMP numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 1.83 mm/mm olarak bulunmuştur. 10GR15KNT KOMP-KOMP numunesinin kayma birim şekil değişimi değeri 1.32 mm/mm, 10GR10KNT KOMP-KOMP numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 1.14 mm/mm ve en düşük kayma birim şekil değiştirmesi 0.98 mm/mm ile 10GR05KNT KOMP-KOMP numunesinde görülmektedir.



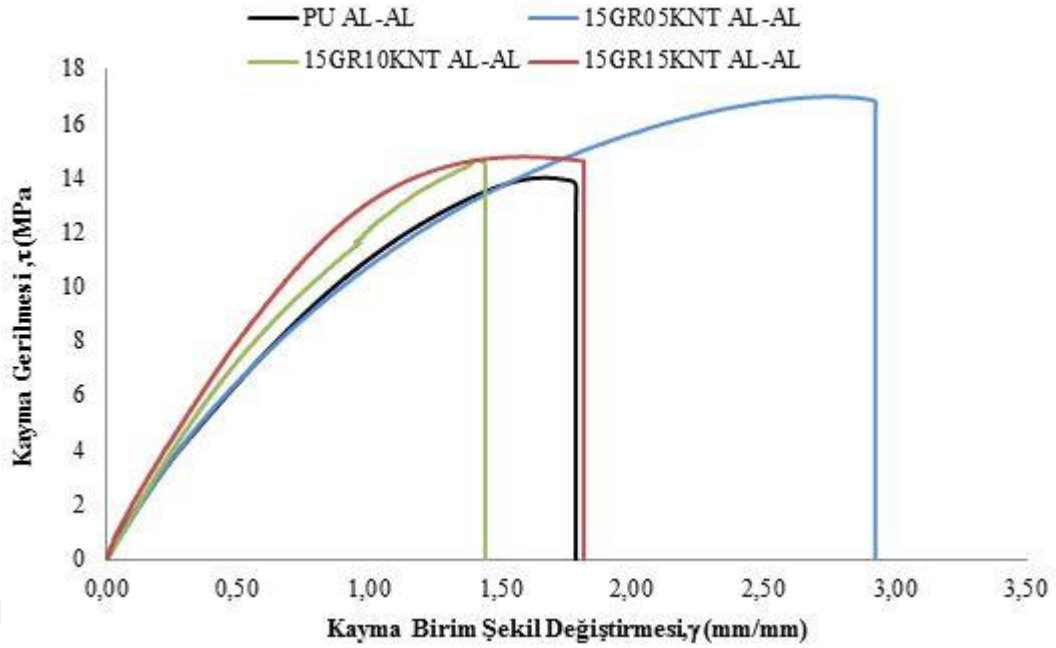
Şekil 4.19. %0.10 grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş KOMP-KOMP TTBB numunelerinin kayma test sonuçları

%0.10 grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş TTBB numunelerinin kayma dayanımı, kayma modülü ve kayma birim şekil değişimi miktarları Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Poliüretan yapıştırıcı ve %0.10 grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkılı TTBB numunelerinin mekanik özelliklerinin ortalama değerleri

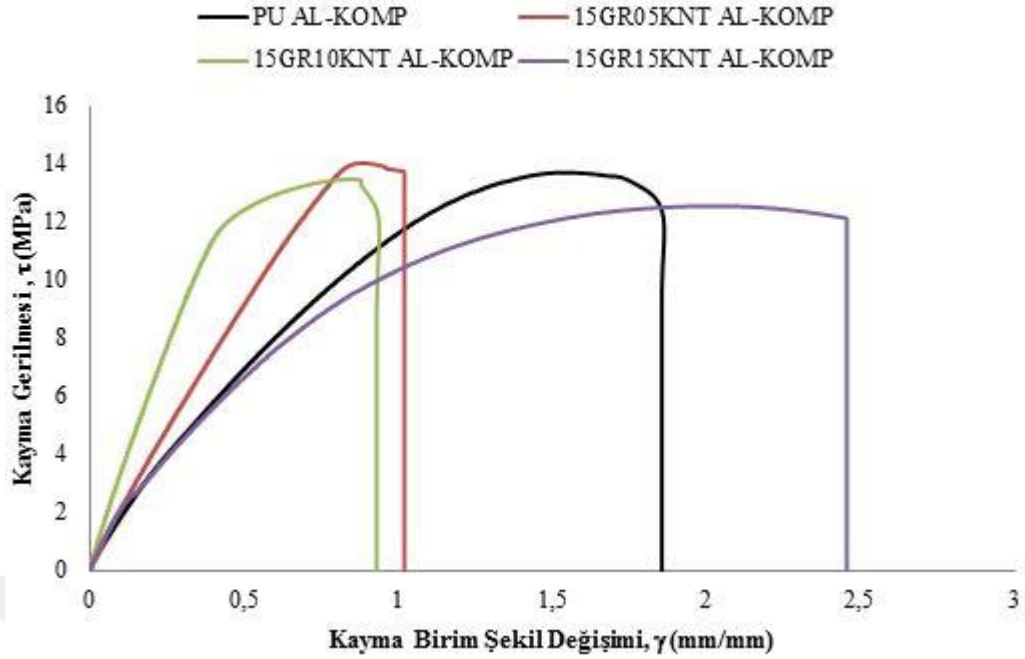
Numuneler	Kayma Dayanımı(MPa)	Kayma Birim Şekil Değişimi (mm/mm)	Kayma Modülü (GPa)
PU AL-AL	14.02±1.78	1.78±0.86	8.45±1.67
10GR05KNT AL-AL	14.04±1.14	2.31±0.64	6.78±1.32
10GR10KNT AL-AL	16.41±1.66	1.8±0.68	9.45±1.57
10GR15KNT AL-AL	16.21±0.82	1.85±0.77	10.58±2.1
PU AL-KOMP	13.71±0.85	1.85±0.55	8.90±0.32
10GR05KNT AL-KOMP	14.01±1.23	1.91±0.41	12.18±3.59
10GR10KNT AL-KOMP	14.49±0.55	1.92±0.63	8.09±1.23
10GR15KNT AL-KOMP	16.34±1.37	1.34±0.32	9.56±1.62
PU KOMP-KOMP	13.51±0.43	1.83±0.20	9.32±1.83
10GR05KNT KOMP-KOMP	15.51±0.82	0.98±0.27	16.44±3.06
10GR10KNT KOMP-KOMP	14.46±1.72	1.14±0.56	12.91±4.20
10GR15KNT KOMP-KOMP	13.57±1.75	1.32±0.29	11.12±1.63

Üçüncü gruptaki numunelere ait alüminyum-alüminyum tek taraflı bindirmeli bağlantıların grafen miktarı ağırlıkça %0.15'te sabit tutularak sırasıyla %0.05, %0.10 ve %0.15 ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcılarla birleştirilmiş TTBB numunelerinin kayma gerilmesi-kayma birim şekil değiştirme grafiği Şekil 4.20'deki gibidir. Nanoparçacık katkılı ve katkısız alüminyum-alüminyum TTBB numunelerin çekme testinden elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde bağlantıların kayma dayanımının katkısız poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş TTBB numunelerine göre kayma dayanımlarının arttığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.20'de PU AL-AL numunesinin kayma dayanımı 14.02 MPa iken hibrit yapıştırıcılarla birleştirilen numunelerde en yüksek kayma dayanımına sahip 15GR05KNT AL-AL katkılı poliüretan esaslı yapıştırıcının değerinin 16.01 MPa olduğu görülmektedir. 15GR15KNT AL-AL numunesinin kayma dayanımı ise 14.79 MPa olarak görülmüştür. Ayrıca en düşük kayma dayanımı 14.67 MPa değeri ile 10GR10KNT AL-AL numunesinde görülmüştür. Şekil 4.20'de numunelerinin kayma birim şekil değiştirmelerine bakıldığında PU AL-AL numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 1.78 mm/mm, 15GR05KNT AL-AL numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 2.92 mm/mm, 15GR15KNT AL-AL numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 1.81 mm/mm ve bu gruptaki en düşük kayma birim şekil değiştirmesi 1.44 mm/mm ile 15GR10KNT AL-AL numunesinde görülmektedir.



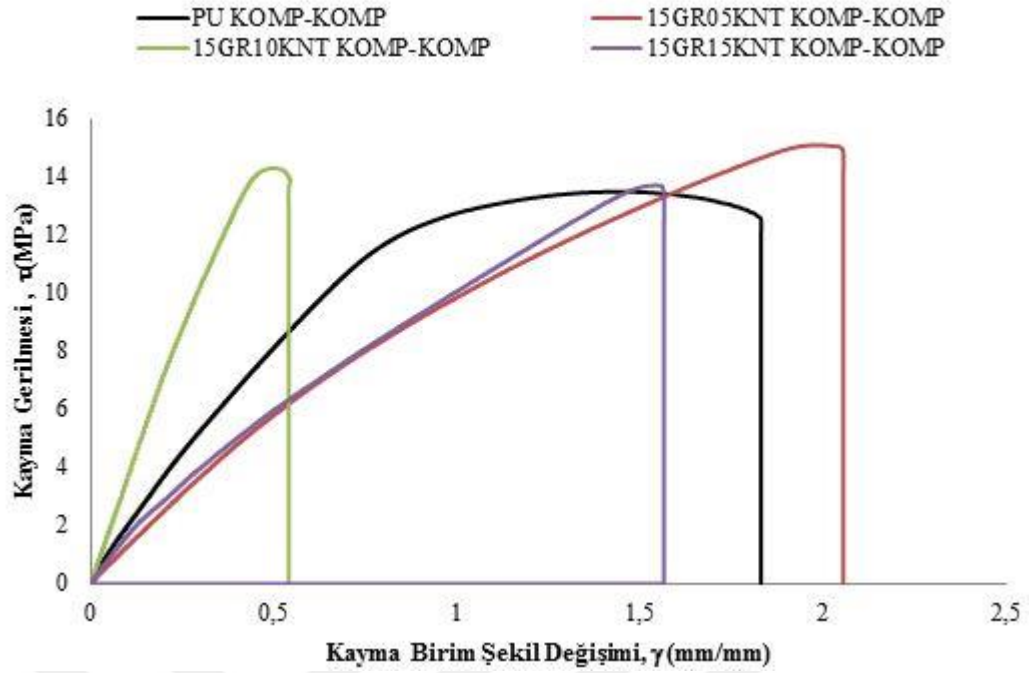
Şekil 4.20. %0.15 Grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkıli poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş AL-AL TTBB numunelerinin kayma test sonuçları

Üçüncü grup için alüminyum-kompozit nanoparçacık katkıli ve katkısız TTBB numunelerin çekme testinden elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde bağlantıların kayma dayanımının arttığı görülmektedir. Şekil 4.21’de PU AL-KOMP numunesinin kayma dayanımı 13.71 MPa iken bu bölümdeki hibrit yapıştırıcılarla birleştirilen numunelerde en yüksek kayma dayanımına sahip 15GR05KNT AL-KOMP numunesinin kayma dayanımı değerinin 14.04 MPa olduğu görülmektedir. 15GR10KNT AL-KOMP numunesi kayma dayanımı değerinin ise 13.48 MPa olarak görülmüştür. Ayrıca saf poliüretan yapıştırıcıya oranla en düşük kayma dayanımı 12.56 MPa değeri ile 15GR15KNT AL-KOMP numunesinde görülmüştür. Şekil 4.21’de numunelerin kayma birim şekil değiştirmelerine bakıldığında PU AL-KOMP numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 1.85 mm/mm, 15GR15KNT AL-KOMP numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 2.45 mm/mm, 15GR05KNT AL-KOMP numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 1.02 mm/mm ve bu bölümdeki en düşük kayma birim şekil değiştirme değeri 0.93 mm/mm ile 15GR10KNT AL-KOMP numunesinde görülmektedir.



Şekil 4.21. %0.15 grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş AL-KOMP TTBB numunelerinin kayma test sonuçları

Üçüncü grup için kompozit-kompozit nanoparçacık katkılı ve katkısız TTBB numunelerin çekme testinden elde edilen deneysel sonuçlar incelendiğinde bağlantıların kayma dayanımının arttığı görülmektedir. Şekil 4.22’de PU KOMP-KOMP numunesinin kayma dayanımı 13.51 MPa iken 15GR05KNT KOMP-KOMP numunesinin kayma dayanımı 15.11 MPa olarak bulunmuştur. 15GR10KNT KOMP-KOMP numunesinin kayma dayanımı değeri ise 14.31 MPa olarak bulunmuştur. Ayrıca poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş kompozit-kompozit TTBB numunesine oranla en düşük kayma dayanımı 13.72 MPa değeri ile 15GR15KNT KOMP-KOMP numunesinde görülmüştür. Şekil 4.22’de numunelerin kayma birim şekil değiştirmelerine bakıldığında PU KOMP-KOMP numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 1.83 mm/mm, 15GR05KNT KOMP-KOMP numunesinin kayma birim şekil değişimi değeri 2.05 mm/mm, 15GR15KNT KOMP-KOMP numunesinin kayma birim şekil değiştirmesi 1.56 mm/mm ve bu gruptaki en düşük kayma birim şekil değiştirmesi 0.54 mm/mm ile 15GR10KNT KOMP-KOMP numunesinde görülmektedir.



Şekil 4.22. %0.15 Grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş KOMP-KOMP TTBB numunelerinin kayma test sonuçları

%0.15 grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş TTBB numunelerinin kayma dayanımı, kayma modülü ve kayma birim şekil değişimi miktarları Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Poliüretan yapıştırıcı ve %0.15 grafen ve %0.05, 0.10 ve 0.15 oranında ÇCKNT Katkılı poliüretan yapıştırıcıların TTBB numunelerinin mekanik özelliklerinin ortalama değerleri

Numuneler	Kayma Dayanımı(MPa)	Kayma Birim Şekil Değişimi (mm/mm)	Kayma Modülü (GPa)
PU AL-AL	14.02±1.21	1.78±0.86	8.45±1.67
15GR05KNT AL-AL	16.01±0.94	2.92±1.06	5.91±2.11
15GR10KNT AL-AL	14.67±2.08	1.44±0.63	10.40±2.89
15GR15KNT AL-AL	14.79±1.5	1.81±0.69	9.19±1.28
PU AL-KOMP	13.71±0.85	1.85±0.55	8.90±0.32
15GR05KNT AL-KOMP	14.04±0.80	1.02±0.61	12.32±5.37
15GR10KNT AL-KOMP	13.48±1.59	0.93±0.33	15.86±1.98
15GR15KNT AL-KOMP	12.56±0.25	2.45±0.74	5.34±0.11
PU KOMP-KOMP	13.51±0.43	1.83±0.20	9.32±1.83
15GR05KNT KOMP-KOMP	15.11±2.07	2.05±0.63	9.81±2.07
15GR10KNT KOMP-KOMP	14.31±1.21	0.54±0.72	7.19±1.74
15GR15KNT KOMP-KOMP	13.72±1.45	1.56±0.03	26.90±2.57

4.3.Yapıştırıcıların TGA ve DTA Sonuçları

TGA-DTA analizleri Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde (BİTAM) Setaram-Labsys Evo marka cihaz kullanılarak yapılmıştır. Test numuneleri azot atmosferinde 10 °C/dk ısıtma oranında ve 25°C ile 600 °C arasında ısıtılarak termal kararlılık, bozunma sıcaklıkları ve kalıntı kütle TGA, yutulan enerji değişimi DTA ile incelenmiştir.

Termalgravimetrik analiz (TGA), malzemelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde meydana gelen değişikliklerin, sıcaklık artışının veya zamanın bir fonksiyonu olarak kontrollü bir atmosferde ölçüldüğü termal bir analiz yöntemidir (Raju,2013). TGA tekniği ile malzemenin bozunmasına, oksidasyonuna ya da bileşenlerinden uçucu moleküllerin kaybına bağlı olan kütledeki artış ya da azalış değerleri elde edilir. Ağırlık değişimleri proliz, kuruma, kimyasal reaksiyonlar, organik bileşikler, termal bozunma, dehidrasyon veya uçucu bileşenlerin buharlaşması gibi nedenlerle meydana gelmektedir. Analizlerde sıcaklık aralığı genellikle 25 °C ile 900 °C arasında değişmekte ve 1200 °C'ye kadar çıkılabilmektedir. Numune ağırlığı 1 mg ila 150 mg arasında değişebilmektedir. TGA ölçümleri sonunda kütlede sıcaklığa ya da zamana karşı değişimi grafiği elde edilmekte, bu grafiklere termogram veya TGA eğrisi adı verilmektedir.

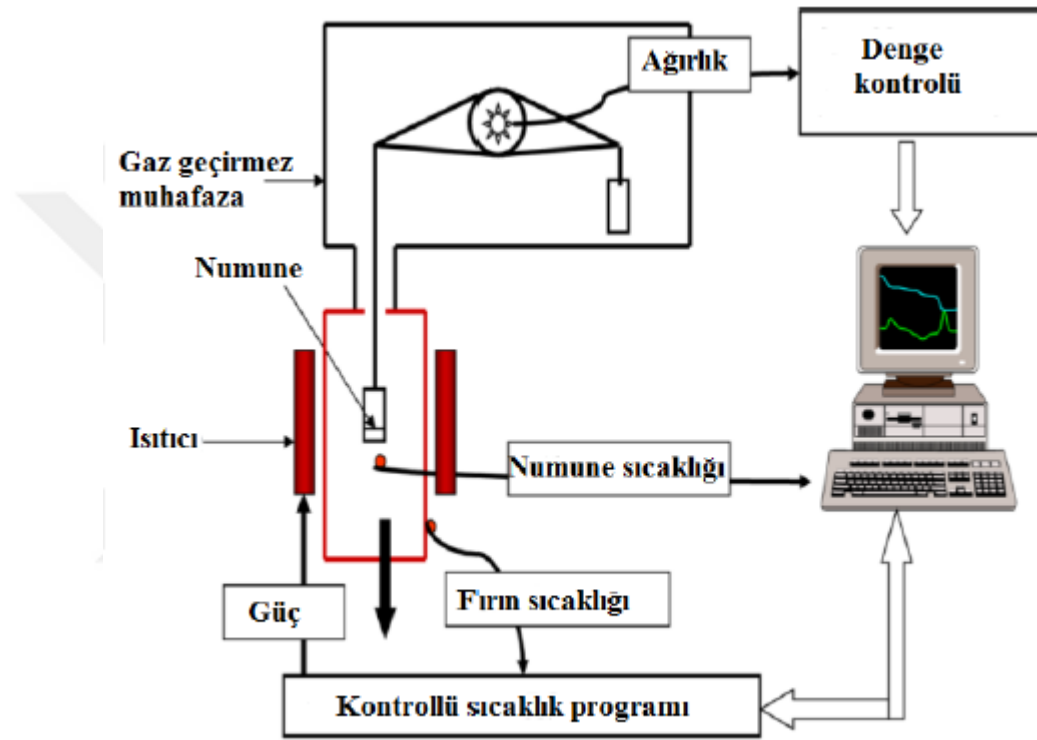
TGA ölçümlerinde analiz edilecek numune iki kollu hassas terazinin bir koluna konulur, kontrollü atmosferde sabit bir hızda ısıtmak suretiyle sıcaklık değiştirilerek terazide meydana gelen değişiklikler denge kontrolü yardımıyla bilgisayara aktararak kütle kayıplarının sıcaklığa göre değişimleri hesaplanır. TGA ölçümleri malzeme hakkında önemli bilgiler sağlayarak, malzemenin veya ürünün kullanılacağı son yere göre ürünün performansını öngörmeye ve ürün kalitesini arttırmada yardımcı olur (Şükür,2019).

Diferansiyel termal analizde (DTA) bir kimyasal sistem ile inert bir referans bileşik arasındaki sıcaklık farkı ölçülerek sistemin yuttuğu ısı gözlenir. DTA analizi, sıcaklık artışı ile malzemenin yuttuğu ve verdiği enerjiyi gösterir.

DTA analizinde Diferansiyel termogramın ordinatı watt/sn veya milikalori/saniye cinsinden verilir. DTA grafiğinin sol tarafındaki ilk pikten sonraki düşüşün başladığı noktadaki sıcaklık camı geçiş (T_g) sıcaklığını göstermektedir. Bu T_g değerinden sonra malzeme katılığını kaybeder ve viskoz özellikler kazanmaya başlar. Sıcaklığın artmasından sonra bu ilk pik oluşumundan sonra bir pik daha oluşur. Bu pik yukarı doğru ise malzemenin hızla erimeye başlayarak enerji yuttuğunu gösterir ve

endotermik reaksiyon olarak nitelenir. Eğer pik aşağı doğru ise malzeme dışarı doğru ısı vermektedir ve bu reaksiyonda ekzotermik reaksiyon olarak adlandırılır. 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 (H_m) hesaplanabilir (Özdemir, 2018).

Termogravimetrik analiz (TGA) ve diferansiyel termal analiz (DTA) eş zamanlı bir teknik olup cihaz düzeneği Şekil 4.23’de gösterilmiştir.



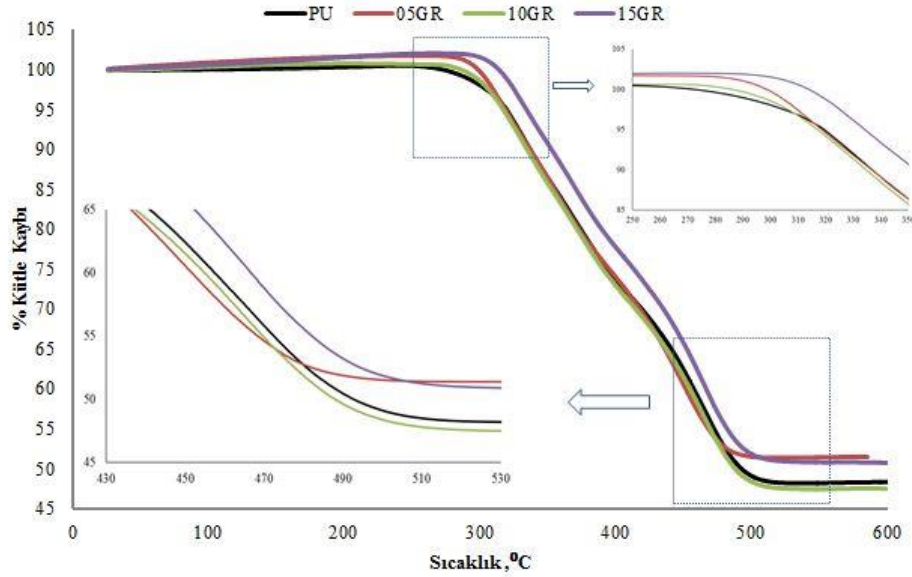
Şekil 4.23. TG/DTA sisteminin şematik diyagramı (Raju, 2013)

4.3.1. Grafen Katkılı Poliüretan Yapıştırıcının TGA ve DTA sonuçları

Poliüretan yapıştırıcı ve ağırlıkça %0.05, 0.10 ve 0.15 grafen katkılı poliüretan yapıştırıcı numunelerinin TGA ve DTA analizleri yapılmış termal kararlılıkları Şekil 4.24’de bulunan TGA grafikleri ile camsı geçiş sıcaklıkları (T_g), erime sıcaklıkları (T_m) ve Erime entalpisi (H_m) değerleri Şekil 4.25’deki DTA grafiğinden tespit edilerek Çizelge 4.9’da toplu halde verilmiştir.

Şekil 4.24’de değişik yüzde oranlarında grafen katkılı poliüretan esaslı yapıştırıcı ile poliüretan yapıştırıcının TGA analiz sonuçları verilmektedir. Sırasıyla %5, %25 kütle kaybı ve tamamen bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar saf poliüretan için 319.5, 393.99 ve 492.51°C iken, 05GR numunesinde 333.88, 462.08, 502.55 °C, 10GR

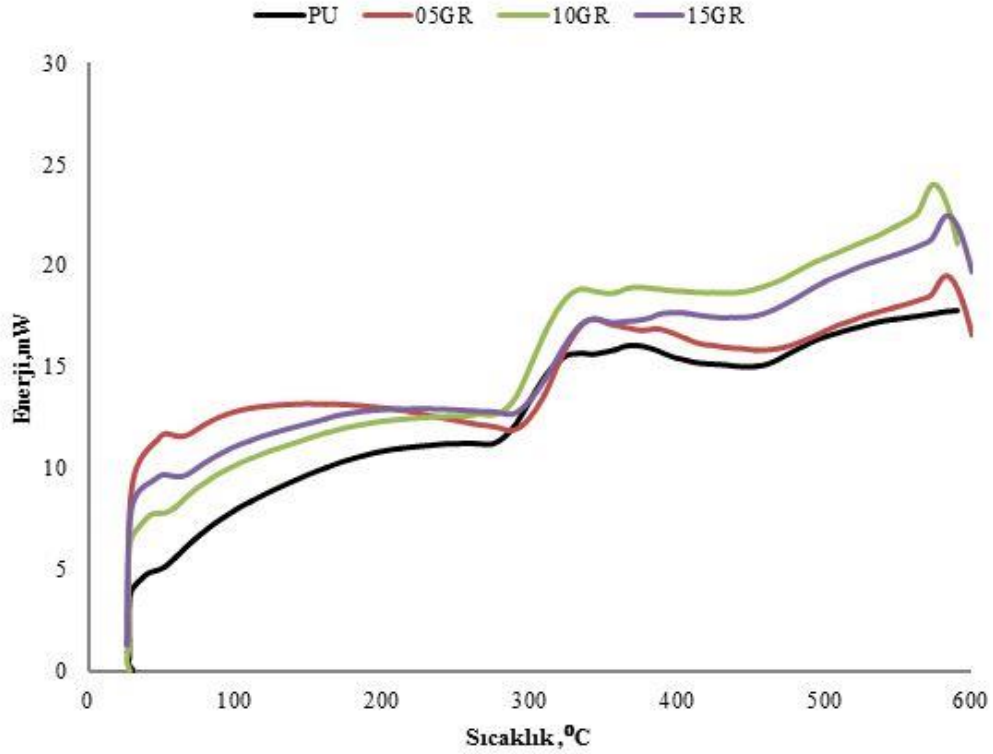
numunesinde 317.99, 391.52, 488.76°C ve 15GR numunesinde 332.81, 414.06, 498.4 °C olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.24. Saf poliüretan ve ağırlıkça %0.05, 0.10 ve 0.15 grafen katkılı poliüretan numunelerinin TGA grafiği

Grafen katkılı poliüretan yapıştırıcıların DTA analiz sonuçları 4.25’de verildiği üzere, poliüretan yapıştırıcı numunesinin T_g değeri 50.18°C, 05GR numunesinin T_g değeri 52.85 °C, 10GR T_g değeri 56.54 °C ve en düşük T_g değeri 51.04 °C ile 15GR numunesindedir. Bu değerlerden anlaşıldığı üzere en düşük camsı geçiş sıcaklığına sahip olan ve ilk önce katılığını kaybeden yapıştırıcı PU numunesidir. Ayrıca saf poliüretanın camsı geçiş sıcaklığının tüm grafen katkılı yapıştırıcılara göre düşük olması katkı malzemelerinin camsı geçiş sıcaklığını artırarak termal kararlılık yarattığını göstermektedir. 4.25’den saf poliüretanın T_m sıcaklığı 292.15 °C iken, üretilen grafen katkılı poliüretan yapıştırıcı numunelerinden en yüksek T_m sıcaklık değeri 300.36 °C ile 05GR numunesinde gözlenirken, 10GR numunesinin T_m sıcaklık değeri 296.53 ve en düşük T_m sıcaklık değeri 293.4 °C ile 15GR numunesinde gözlenmiştir. T_m değerinin saf poliüretanda 292.15 °C, 05GR için 300.36 °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 katkısız poliüretanın T_m değerine yakın erime sıcaklıkları elde

edilmiştir. Erime entalpisi değerlerine bakıldığında ise tüm değerlerin PU numunesinin entalpi değerine göre düştüğü görülmüştür.



Şekil 4.25. Saf Poliüretan ve ağırlıkça %0.5,0.10 ve 0.15 grafen katkılı poliüretan numunelerinin DTA grafiği

Çizelge 4.9’da saf poliüretan yapıştırıcı ve ağırlıkça %0.05,0.10 ve 0.15 grafen nanoparçacık katkılı poliüretan yapıştırıcıların termal özellikleri tablo halinde sunulmuştur.

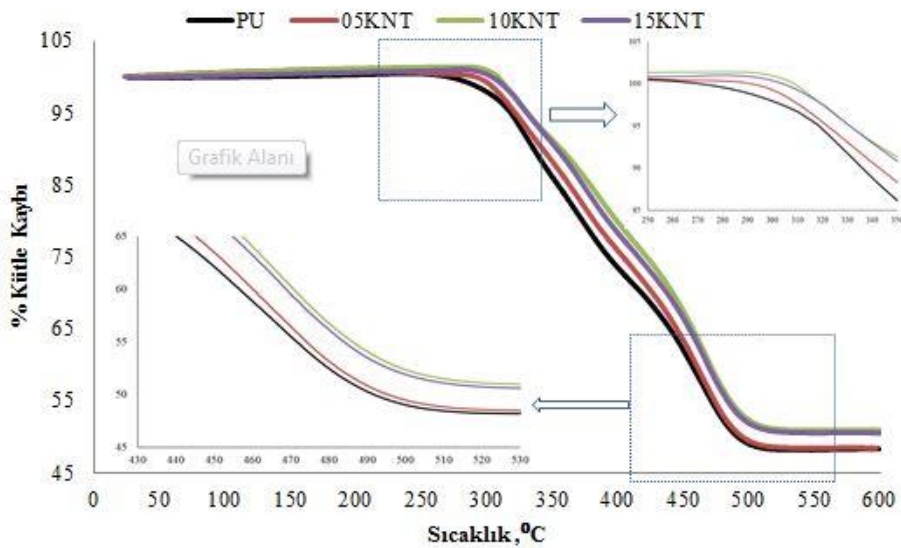
Çizelge 4.9. Poliüretan ve ağırlıkça %0.05,0.10 ve 0.15 grafen katkılı poliüretan numunelerinin termal özellikleri

Numuneler	% 5 Kütle Kaybındaki Bozunma Sıcaklığı $T_5(^{\circ}\text{C})$	% 75 Kütle Kaybındaki Bozunma Sıcaklığı $T_{75}(^{\circ}\text{C})$	Kütle Kaybının Durduğu Sıcaklık $T_s(^{\circ}\text{C})$	Camsı Geçiş Sıcaklığı $T_g(^{\circ}\text{C})$	Erime Sıcaklığı $T_m(^{\circ}\text{C})$	Erime Entalpisi $H_m(\text{J/gr})$
PU	319.5	393.99	492.51	50.18	292.15	41.05
05GR	333.88	462.08	502.55	52.85	300.36	33.28
10GR	317.99	391.52	488.76	56.54	296.53	35.73
15GR	332.81	414.06	498.4	51.4	293.4	24.29

4.3.2. ÇCKNT Katkılı Poliüretan Yapıştırıcıların TGA ve DTA Sonuçları

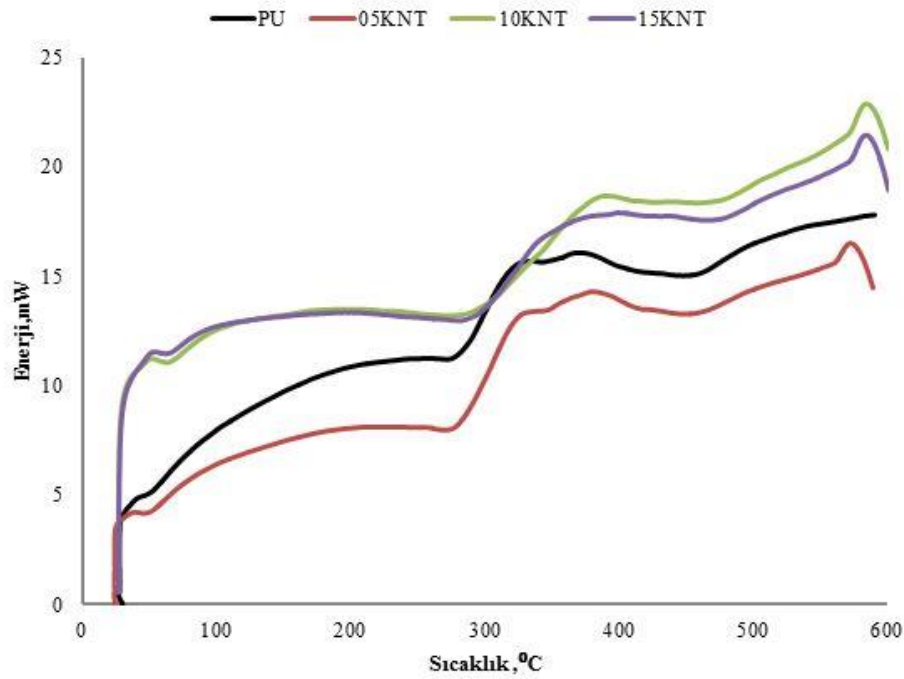
Saf poliüretan yapıştırıcı ve ağırlıkça %0.05, 0.10 ve 0.15 ÇCKNT nanoparçacık katkılı poliüretan yapıştırıcı numunelerinin TGA ve DTA analizleri yapılmış termal kararlılıkları Şekil 4.26'de bulunan TGA grafikleri ile numunelerin camsı geçiş sıcaklıkları (T_g) değerleri bulunmuştur. Erime sıcaklıkları (T_m), erime entalpisi (H_m) değerleri Şekil 4.27'deki grafikten tespit edilerek Çizelge 4.11'da toplu halde verilmiştir.

Şekil 4.26'da değişik yüzde oranlarında ÇCKNT katkılı poliüretan esaslı yapıştırıcı ile saf poliüretan yapıştırıcının TGA analiz sonuçları verilmektedir. Sırasıyla %5, %25 kütle kaybı ve tamamen bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar saf poliüretan için 319.5, 393.99 ve 492.51°C iken, 05KNT numunesinde 324.75, 406.93 ve 491.83 °C, 10KNT numunesinde 331.26, 422.56 ve 527.7°C ve 15KNT numunesinde 331,415.8 ve 512.4 °C olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde ÇCKNT katkısının bozunma sıcaklığında artış yaptığı açıkça görülebilir. Grafen katkı oranlarının etkileri incelendiğinde ÇCKNT katkıların daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Bunun sebebi: ÇCKNT'ler daha yüksek ısı iletkenliğe ve ısı kapasitesine sahiptir bu nedenle ÇCKNT'ler termal enerjiyi soğurma eğilimi grafenden yüksek olup grafen katkılı poliüretandan daha yüksek sıcaklıkta bozunmasına sebep olmuştur (Gojny ve ark.,2006).



Şekil 4.26. Saf poliüretan ve ağırlıkça %0.05,0.10 ve 0.15 ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı numunelerinin TGA grafiği

ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcıların DTA analiz sonuçları Şekil 4.27 verildiği üzere, poliüretan yapıştırıcı numunesinin T_g değeri 50.18°C , en büyük T_g değeri 53.05°C ile 15KNT numunesinde elde edilmiştir. 10KNT numunesinin T_g değeri 52.65°C ve en düşük T_g değeri 50.61°C ile 05KNT numunesindedir. Ayrıca Şekil 4.27’de saf poliüretanın T_m sıcaklığı 292.15°C iken, ÇCKNT katkılı poliüretan bazlı numunelerden 15KNT numunesinin T_m değeri 293.83°C , en yüksek T_m sıcaklığı 298.47°C ile 10KNT numunesinde ve en düşük T_m sıcaklığı 292.92°C değeriyle 05KNT numunesinde görülmüştür. H_m erime entalpisi değerine bakıldığında ise sadece 05KNT numunesinin 49.98 J/gr değeri ile yükseldiği ve diğer numuneleri H_m değerinin düştüğü görülmektedir. Bunun sebebi olarak ÇCKNT katkısının poliüretan 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 olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.27. Saf poliüretan yapıştırıcı ve ağırlıkça %0.05, 0.10 ve 0.15 ÇCKNT nanoparçacık katkılı poliüretan yapıştırıcı numunelerinin DTA grafiği

Çizelge 4.10’da Saf poliüretan yapıştırıcı ve ağırlıkça %0.05, 0.10 ve 0.15 ÇCKNT nanoparçacık katkılı poliüretan yapıştırıcıların termal özellikleri tablo halinde sunulmuştur.

Çizelge 4.10. Saf poliüretan yapıştırıcı ve ağırlıkça %0.05, 0.10 ve 0.15 grafen nanoparçacık katkılı poliüretan yapıştırıcıların termal özellikleri

Numuneler	% 5 Kütle Kaybındaki Bozunma Sıcaklığı $T_5(^{\circ}\text{C})$	% 75 Kütle Kaybındaki Bozunma Sıcaklığı $T_{75}(^{\circ}\text{C})$	Kütle Kaybının Durduğu Sıcaklık $T_s(^{\circ}\text{C})$	Camsı Geçiş Sıcaklığı $T_g(^{\circ}\text{C})$	Erime Sıcaklığı $T_m(^{\circ}\text{C})$	Erime Entalpisi $H_m(\text{J/gr})$
PU	319.50	393.99	492.51	50.18	292.15	41.05
05KNT	324.75	406.93	491.83	50.61	292.92	49.98
10KNT	331.26	422.56	527.7	52.65	298.47	26.10
15KNT	331	415.8	512.4	53.5	293.83	29.57

Grafen ve ÇCKNT nanoparçacık katkılı poliüretan yapıştırıcıların termal özellikleri; karşılaştırma yapılması açısından Çizelge 4.11’de toplu olarak verilmiştir.

Çizelge 4.11. Grafen ve ÇCKNT nanoparçacık katkılı poliüretan yapıştırıcıların termal özellikleri

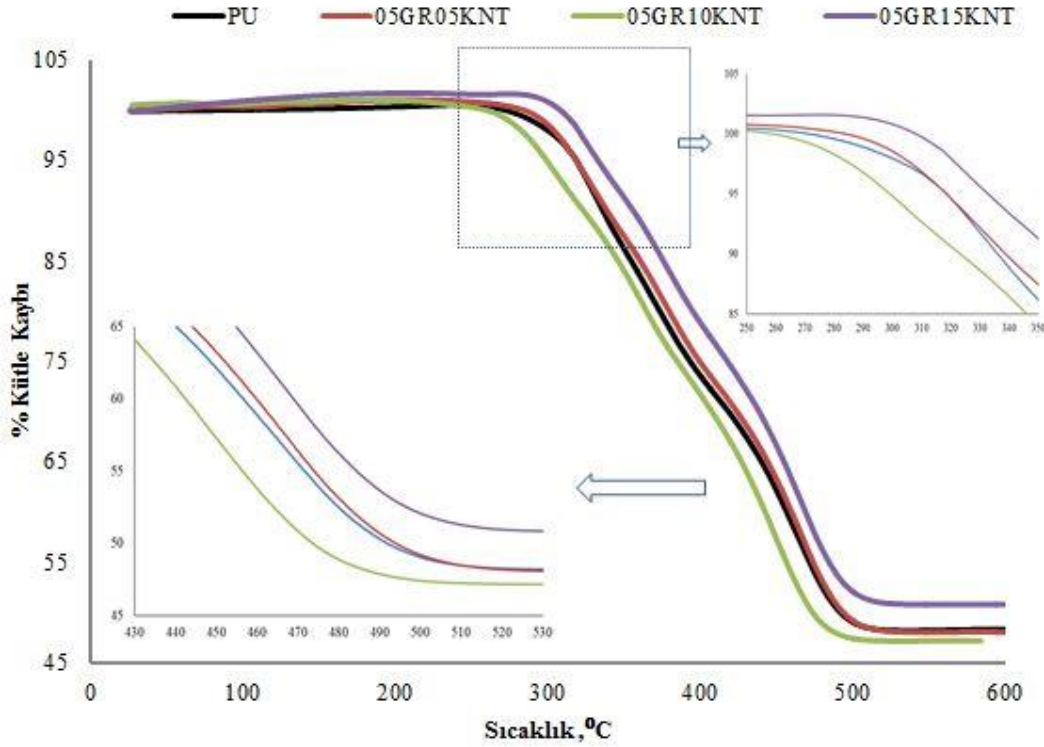
Numuneler	% 5 Kütle Kaybındaki Bozunma Sıcaklığı $T_5(^{\circ}\text{C})$	% 75 Kütle Kaybındaki Bozunma Sıcaklığı $T_{75}(^{\circ}\text{C})$	Kütle Kaybının Durduğu Sıcaklık $T_s(^{\circ}\text{C})$	Camsı Geçiş Sıcaklığı $T_g(^{\circ}\text{C})$	Erime Sıcaklığı $T_m(^{\circ}\text{C})$	Erime Entalpisi $H_m(\text{J/gr})$
PU	319.5	393.99	492.51	50.18	292.15	41.05
05GR	333.88	462.08	502.55	52.85	300.36	33.28
10GR	317.99	391.52	488.76	56.54	296.53	35.73
15GR	332.81	414.06	498.4	51.4	293.4	24.29
05KNT	324.75	406.93	491.83	50.61	292.92	49.98
10KNT	331.26	422.56	527.7	52.65	298.47	26.10
15KNT	331	415.8	512.4	53.5	293.83	29.57

4.3.3. Grafen ve ÇCKNT Katkılı Poliüretan Yapıştırıcıların TGA ve DTA Sonuçları

Hibrit olarak oluşturulan grafen ve ÇCKNT nanoparçacık katkılı poliüretan yapıştırıcıların TGA ve DTA analizleri için numuneler üç ayrı gruba ayrılmıştır. Birinci grupta grafen oranı ağırlıkça %0.05 olarak sabit tutulmuş, buna karşılık ÇCKNT oranı ağırlıkça %0.05, 0.10 ve 0.15 olarak seçilmiştir. İkinci grupta grafen oranı ağırlıkça %0.10 olarak sabit tutulurken ÇCKNT oranı ağırlıkça %0.05, 0.10 ve 0.15 olarak seçilmiştir. Son grupta ise grafen oranı ağırlıkça %0.15 olarak sabit tutulmuş ve ÇCKNT oranı ağırlıkça %0.05, 0.10 ve 0.15 olarak seçilmiştir.

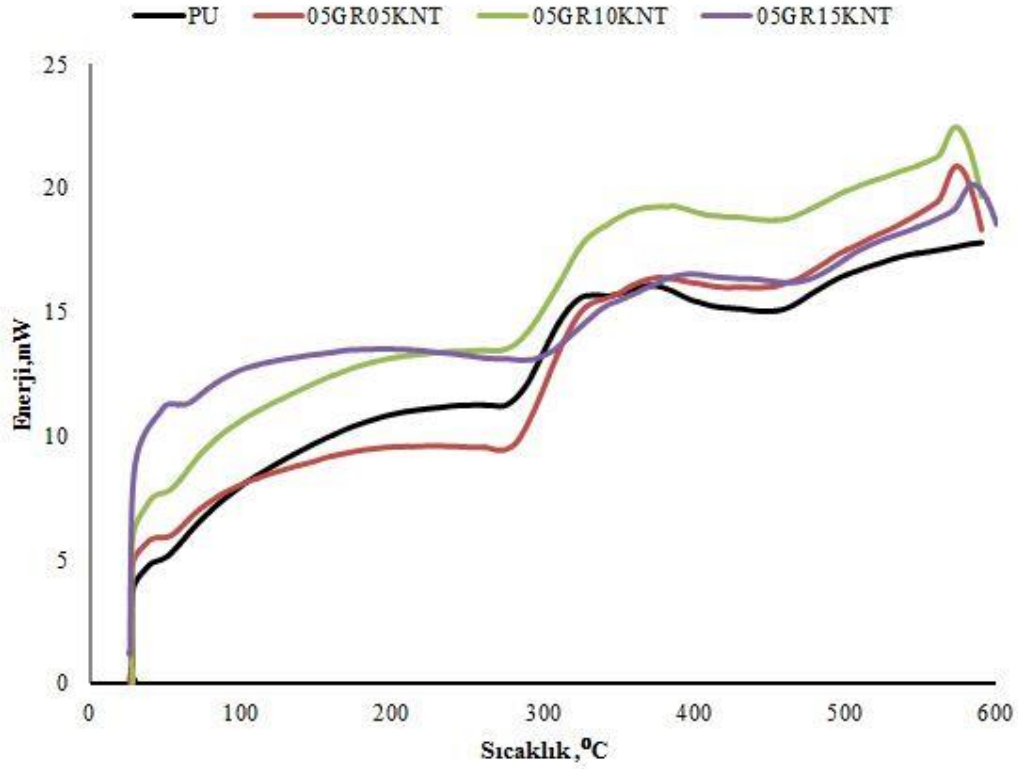
Birinci grup için Şekil 4.28’de hibrit poliüretan yapıştırıcı ile saf poliüretan yapıştırıcının TGA analiz sonuçları verilmektedir. Grafik incelendiğinde sırasıyla %5, %25 kütle kaybı ve tamamen bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar saf poliüretan için 319.5, 393.99 ve 492.51°C iken, 05GR05KNT numunesinde 318.48, 399.55 ve 493.93°C, 05GR10KNT numunesinde 316.20, 401.43 ve 490.10°C ve 05GR15KNT

numunesinde 333.10, 417.98 ve 513.63 °C olarak tespit edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde hemen hemen tüm numunelerde ÇCKNT katkısının bozunma sıcaklığında artış yaptığı açıkça görülebilir.



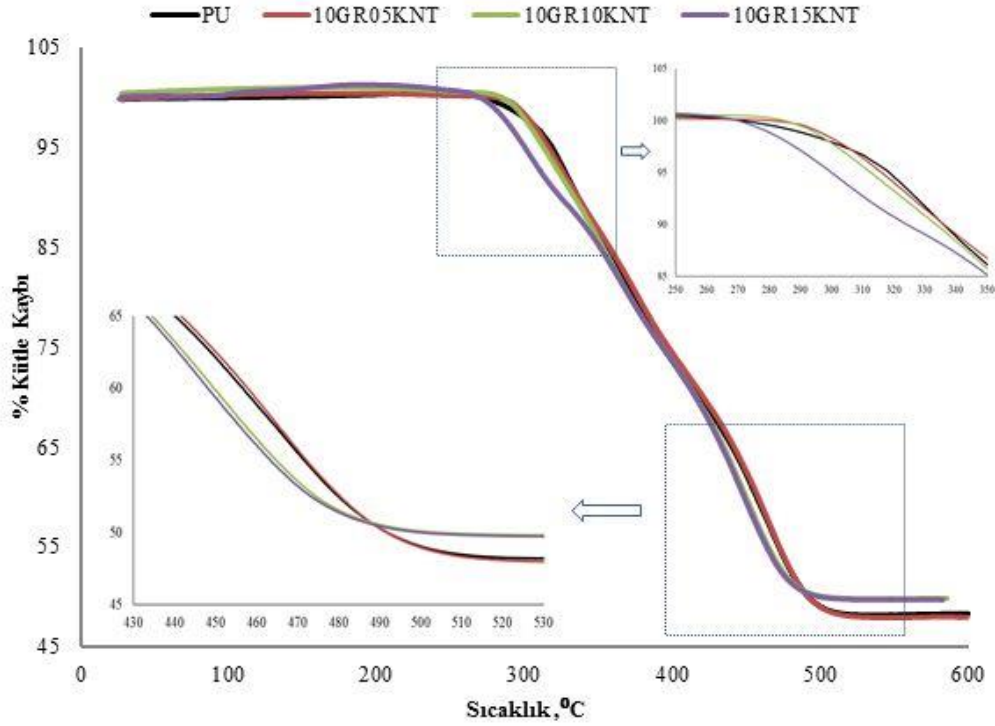
Şekil 4.28. Saf poliüretan ve ağırlıkça % 0.05 grafen oranı sabit %0.05,0.10 ve 0.15 ÇCKNT katkılı poliüretan numunelerinin TGA grafiği

Birinci grup katkılı poliüretan yapıştırıcıların DTA analiz sonuçları Şekil 4.29’da verildiği üzere, poliüretan yapıştırıcı numunesinin T_g değeri 50.18°C, 05GR05KNT numunesinin T_g değeri 55.27°C, 05GR15KNT numunesinin T_g değeri 52.79°C ve en düşük T_g değeri 48.35°C ile 05GR10KNT numunesindedir. Ayrıca Şekil 4.29’da saf poliüretanın T_m sıcaklığı 292.15°C iken, katkılı poliüretan bazlı numunelerden en yüksek T_m sıcaklığı 300.01°C ile 05GR15KNT numunesinde, 05GR05KNT numunesinin T_m değeri 293.09 ve en düşük T_m sıcaklığı 290.63°C değeriyle 05GR10KNT numunesinde görülmüştür. Ek olarak H_m değerlerinde önemli bir değişim görülmemiştir.



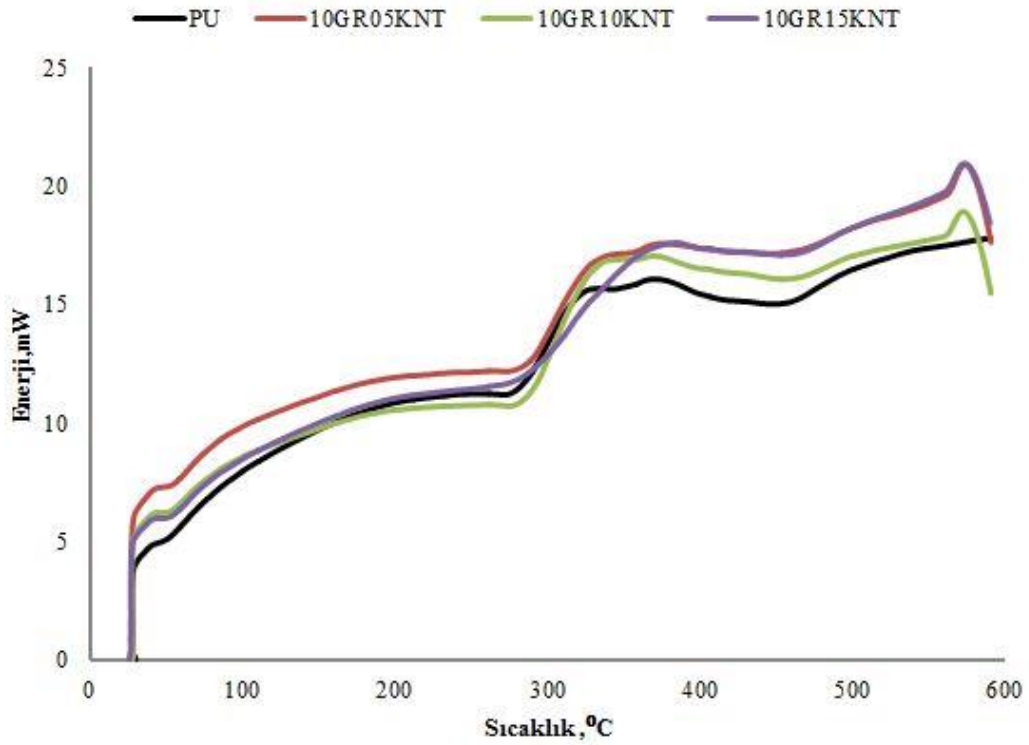
Şekil 4.29. Saf poliüretan ve ağırlıkça % 0.05 grafen oranı sabit %0.05,0.10 ve 0.15 ÇCKNT katkılı poliüretan numunelerinin DTA grafiği

İkinci grup için Şekil 4.30’da hibrit poliüretan yapıştırıcı ile saf poliüretan yapıştırıcının TGA analiz sonuçları verilmektedir. Grafik incelendiğinde sırasıyla %5, %25 kütle kaybı ve tamamen bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar saf poliüretan için 319.5, 393.99 ve 492.51°C iken, 10GR05KNT numunesinde 317.61, 398.70 ve 492.99°C, 10GR10KNT numunesinde 328.27, 408.17 ve 516.16°C ve 10GR15KNT numunesinde 318.99, 411.92 ve 518.55 °C olarak tespit edilmiştir. 10GR05KNT, 10GR10KNT ve 10GR15KNT numunesinde ise termal kararlılık yönünden saf poliüretana göre yükseliş görülmektedir.



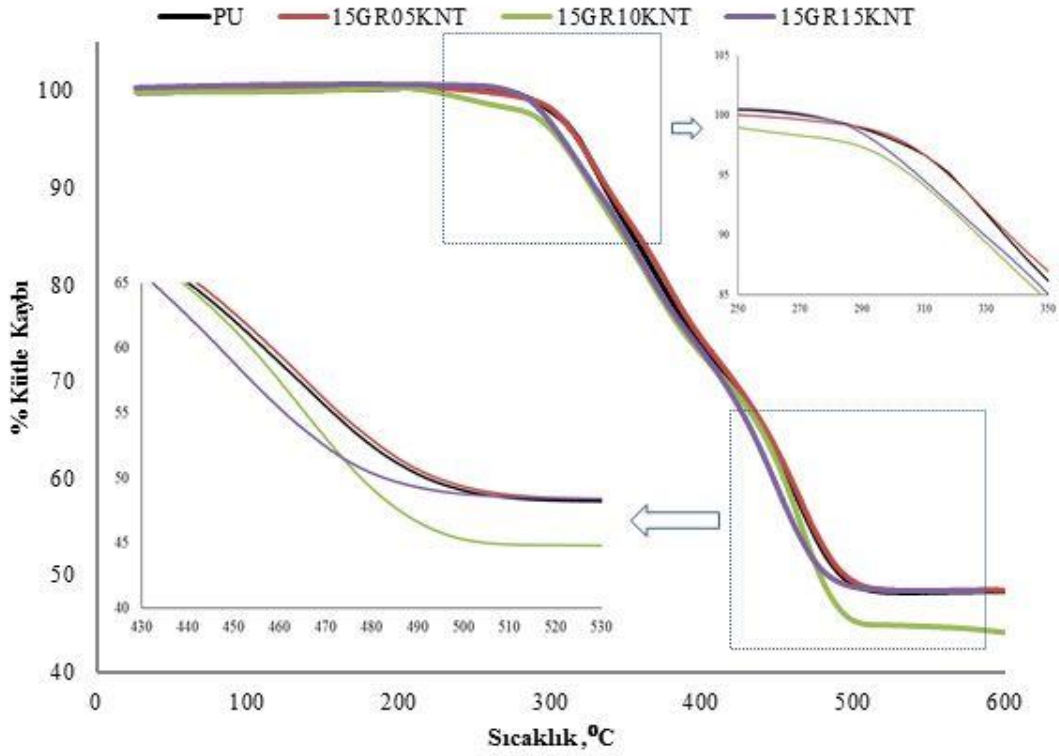
Şekil 4.30. Saf poliüretan ve ağırlıkça % 0.10 grafen oranı sabit %0.05,0.10 ve 0.15 ÇCKNT katkıli poliüretan numunelerinin TGA grafiği

İkinci grup yapıştırıcıların DTA analiz sonuçları Şekil 4.31’de verildiği üzere, saf poliüretan yapıştırıcı numunesinin T_g değeri 50.18°C , 10GR15KNT numunesinin T_g değeri 55.74°C , 10GR10KNT numunesinin T_g değeri 55.91°C ve en düşük T_g değeri 50.24°C ile 10GR05KNT numunesindedir. Ayrıca Şekil 4.31’den saf poliüretanın T_m sıcaklığı 292.15°C iken, katkıli poliüretan bazlı numunelerden en yüksek T_m sıcaklığı 297.10°C ile 10GR05KNT numunesinde, 05GR15KNT numunesinin T_m değeri 293.09 ve en düşük T_m sıcaklığı 290.63°C değeriyle 05GR15KNT numunesinde görülmüştür. Sonuçlarda tüm numunelerin H_m , T_g ve T_m değerlerinin saf poliüretana göre arttığı açıkça görülmektedir.



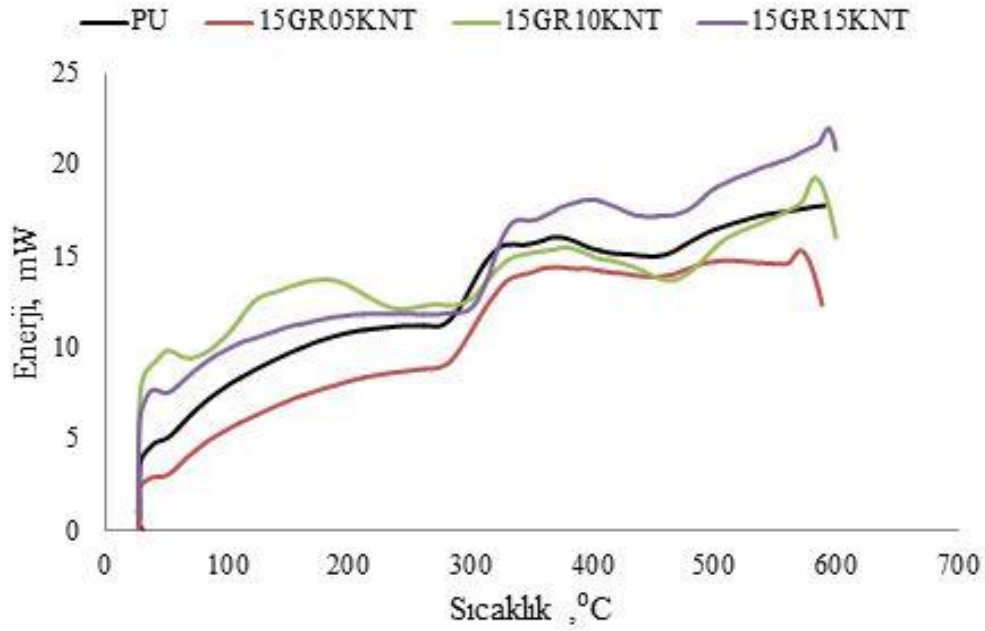
Şekil 4.31. Saf poliüretan ve ağırlıkça % 0.10 grafen oranı sabit %0.5, 0.10 ve 0.15 ÇCKNT katkılı poliüretan numunelerinin DTA grafiği

Üçüncü grup için Şekil 4.32’de hibrit poliüretan yapıştırıcı ile saf poliüretan yapıştırıcının TGA analiz sonuçları verilmektedir. Grafik incelendiğinde sırasıyla %5, %25 kütle kaybı ve tamamen bozunmanın gerçekleştiği sıcaklıklar saf poliüretan için 319.5, 393.99 ve 492.51°C iken, 15GR05KNT numunesinde 318.75, 397.66 ve 494.89°C, 15GR10KNT numunesinde 306.48, 388.78 ve 478.32°C, 15GR15KNT numunesinde 324.20, 406.39 ve 498.67°C olarak tespit edilmiştir. 15GR05KNT, 15GR10KNT ve 15GR15KNT numunelerinde ise termal kararlılık yönünden saf poliüretana göre yükseliş görülmektedir.



Şekil 4.32. Saf poliüretan ve ağırlıkça % 0.15 grafen oranı sabit %0.05,0.10 ve 0.15 ÇCKNT katkıli poliüretan numunelerinin TGA grafiği

Üçüncü grup katkıli poliüretan yapıştırıcıların DTA analiz sonuçları Şekil 4.33’de verildiği üzere, saf poliüretan yapıştırıcı numunesinin T_g değeri 50.18°C , 15GR05KNT numunesinin T_g değeri 51.16°C , 15GR10KNT numunesinin T_g değeri 51.35°C ve en düşük T_g değeri 49.03°C ile 15GR15KNT numunesindedir. Ayrıca Şekil 4.33’den saf poliüretanın T_m sıcaklığı 292.15°C iken, katkıli poliüretan bazlı numunelerden en yüksek T_m sıcaklığı 299.24°C ile 15GR15KNT numunesinde, 15GR10KNT numunesinin T_m değeri 297.44°C ve en düşük T_m sıcaklığı 295.45°C değeriyle 15GR05KNT numunesinde görülmüştür. Sonuçlarda tüm numunelerin H_m , T_g ve T_m değeri saf poliüretana göre artış olduğu görülmektedir.



Şekil 4.33. Saf poliüretan ve ağırlıkça % 0.15 grafen oranı sabit %0.05,0.10 ve 0.15 ÇCKNT katkılı poliüretan numunelerinin DTA grafiği

Çizelge 4.12’de grafen ve ÇCKNT katkılı tüm numunelerin kütle kaybı, T_g , H_m ve T_m değerleri toplu halde sunulmuştur. Elde edilen bu sonuçlara göre grafen oranının %0.10 den fazla olması durumunda katkılı poliüretanın 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. T_m değerlerine bakıldığında ise tüm numunelerin erime sıcaklığında artış gözlemlenmiştir. H_m değerinin en yüksek olduğu numune 45.64 J/gr değeriyle 10GR10KNT numunesinde görülmüştür.

Çizelge 4.12. Saf poliüretan yapıştırıcı, hibrit grafen ve ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcıların termal özellikleri

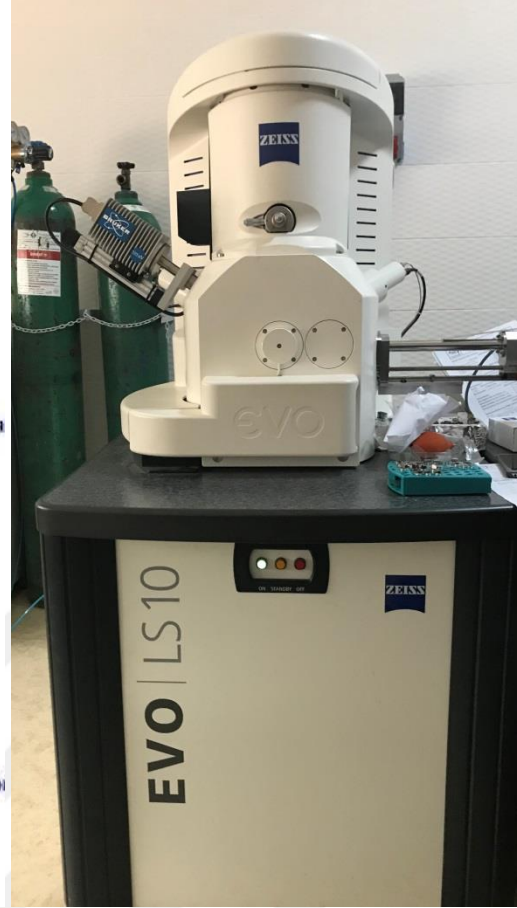
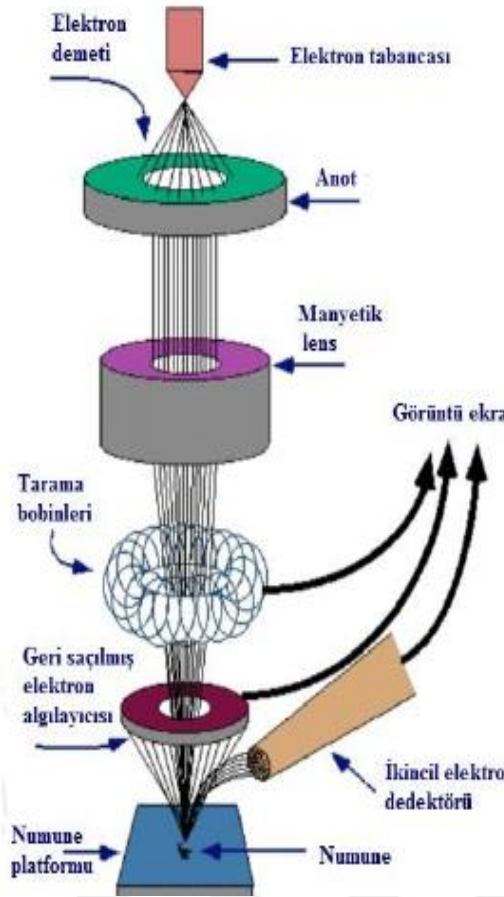
Numuneler	% 5 Kütle Kaybındaki Bozunma Sıcaklığı $T_5(^{\circ}\text{C})$	% 75 Kütle Kaybındaki Bozunma Sıcaklığı $T_{75}(^{\circ}\text{C})$	Kütle Kaybının Durdugu Sıcaklık $T_s(^{\circ}\text{C})$	Camsı Geçiş Sıcaklığı $T_g(^{\circ}\text{C})$	Erime Sıcaklığı $T_m(^{\circ}\text{C})$	Erime Entalpisi $H_m(\text{J/gr})$
PU	319.50	393.99	492.51	50.18	292.15	41.05
05GR05KNT	318.48	399.55	493.93	55.27	293.09	41.51
05GR10KNT	316.20	401.43	490.10	48.35	290.63	34.04
05GR15KNT	333.10	417.98	513.63	52.79	300.01	24.19
10GR05KNT	317.61	398.70	492.99	50.24	297.10	36.62
10GR10KNT	328.27	408.17	516.16	55.91	295.44	45.64
10GR15KNT	318.99	411.92	518.55	55.74	293.07	29.61
15GR05KNT	318.75	397.66	494.89	51.16	295.45	45.27
15GR10KNT	306.48	388.78	478.32	51.35	297.44	37.81
15GR15KNT	324.20	406.39	498.67	49.03	299.24	38.54

4.4. Kırılma Yüzeylerinin Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntü

Analizi

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), elektron ışınıyla taranan numune üzerinden yüksek vakum altında, yüksek büyütme oranları (5x ila 300.000x arasında) ve yüksek çözünürlükte görüntü elde etmek için kullanılmaktadır. Katı numunelerin yüzeyinde çok küçük bir alana odaklanan yüksek enerjili elektronlardan oluşan odaklanmış bir ışın ile yüzeyin taranmasıyla çeşitli sinyallerin üretilmesi prensibiyle çalışmaktadır. Elektron tabancasından gönderilen elektron demetleri, yüksek gerilimli anot plakasıyla hızlandırılmakta ve mercekler ile numune yüzeyinde odaklanarak yüzeyin taramasını yapmaktadır. Elektronlar ile numune arasındaki girişimler neticesinde oluşan çeşitli elektron ve ışımlar uygun algılayıcılarla toplanarak, sinyal çoğaltıcıdan geçirildikten sonra dijital sinyallere dönüştürülüp görüntü ekranına verilmektedir. Bu teknik ile sıvı olmayan her türlü malzeme analiz edilebilmektedir. SEM analizi, yüzeyin dış morfolojisi (doku), kimyasal bileşimi, kristal yapısı ve numuneyi oluşturan malzemelerin dizilimi, gibi birçok bilgi vermektedir (Walock,2012).

SEM görüntü analizleri Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde (İLTEK) ZEISS Evo LS 10 marka cihaz kullanılarak yapılmıştır. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analiz şeması ve test yapılan cihaz Şekil 4.34'te verilmiştir.



Şekil 4.34. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analiz şeması (Şükür,2019) ve ZEISS Evo LS 10 marka cihaz

SEM görüntü analizi yapılacak olan numuneler; yapıştırılan yüzeyler, nanoparçacık türü, katkı oranı gibi parametreler referans alınarak 3 gruba ayrılmış ve daha sonra hibrit numunelerden en iyi mekanik ve termal özellik gösteren numuneler seçilerek SEM görüntü analizi yapılmıştır. Yapılan SEM görüntü analizlerinde kırılmanın sünek ya da gevrek karakterli olması, yapıştırıcı içindeki malzemelerin homojen dağılımı, topaklanma gibi durumlar değerlendirilmiştir.

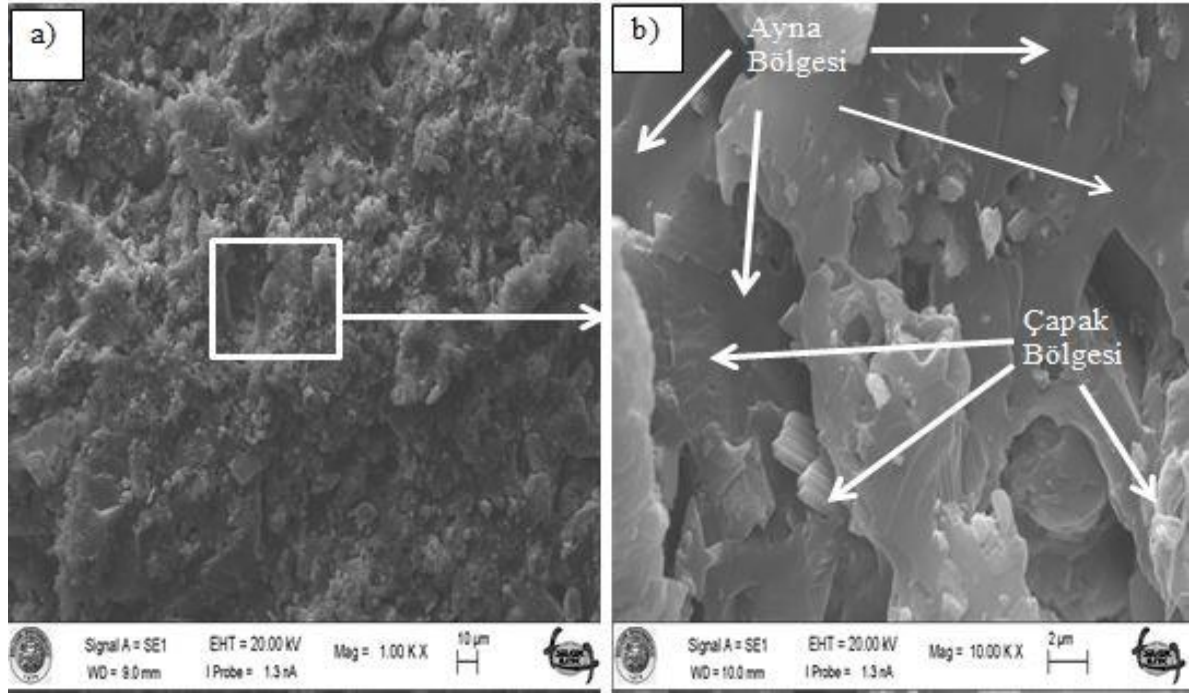
4.4.1. Çekme Numunelerinin Kırılma Yüzeyi SEM Görüntü Analizleri

Nanoparçacık katkısı içermeyen PU, ağırlıkça %0.15 grafen içeren 15GR, ağırlıkça %0.15 karbon nano tüp içeren 15KNT numunesi, ağırlıkça % 0.10 grafen ve %0.10 karbon nanotüp içeren 10GR10KNT numunesi kopma yüzeylerinin 1000 ve 10000 büyütme olarak SEM görüntü analizleri gerçekleştirilmiştir.

Poliüretan reçine polimer bir yapıdır. Çekme deneyi sonrasında termoset grubundaki polimerlerin kırılma yüzeylerinde kırılma esnasında çatlak yavaşça büyürken birden hızlanarak pürüzsüz denilebilecek ayna isimli bölge oluşur. Ayna

bölgesinin ardından deformasyon hızlanmaya başladığında nihai çatlak hızında, yüksek miktarda pürüzlü kaba bir yapıya sahip olan ve belirgin akıntı çizgileri içeren çapak bölgesi oluşur (Şekil 4.35 b) (Goyat ve ark.,2015).

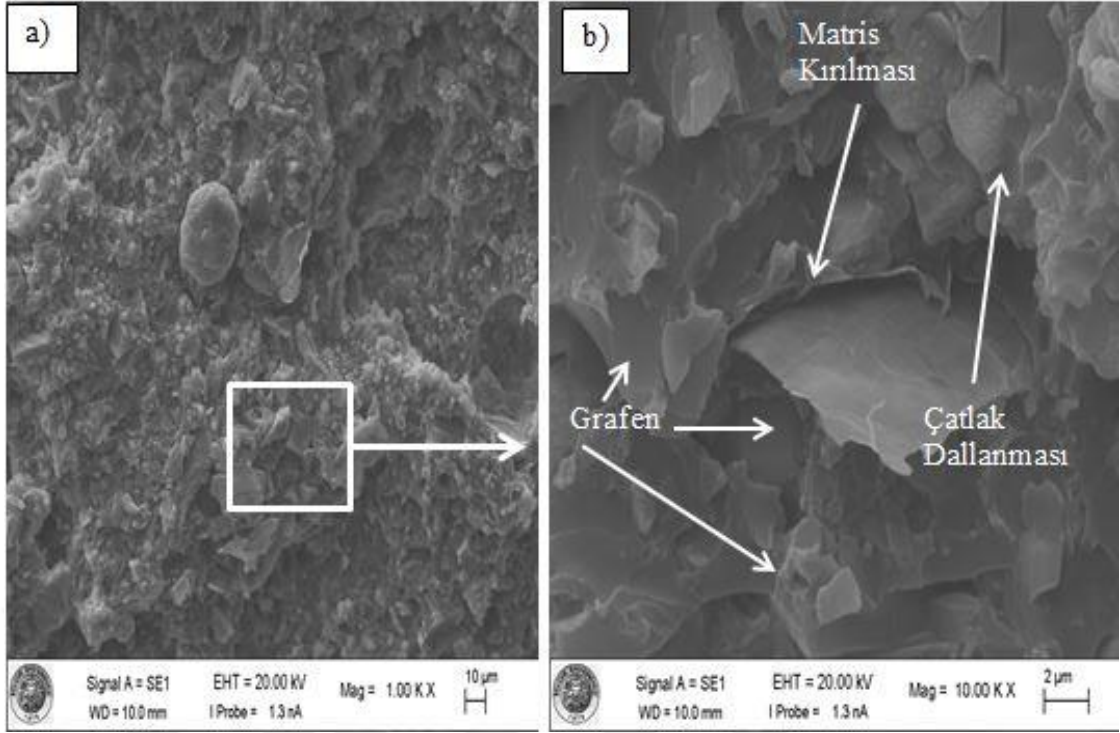
Polimer yapıdaki yapıştırıcılar ayna bölgelerinin yoğunluğundan dolayı, nanoparçacık katkılı yapıştırıcılara kıyasla daha kırılgan olduğu, çatlak başlangıcına ve yayılmasına karşı dirençlerinin daha zayıf olduğu şeklinde yorumlanabilir (Rashad ve ark.,2013).



Şekil 4.35. Çekme Testleri Kırılma Yüzeyleri SEM Görüntüleri a) PU numunesi 1000 büyütme görüntüleri b) PU numunesi 10000 büyütme

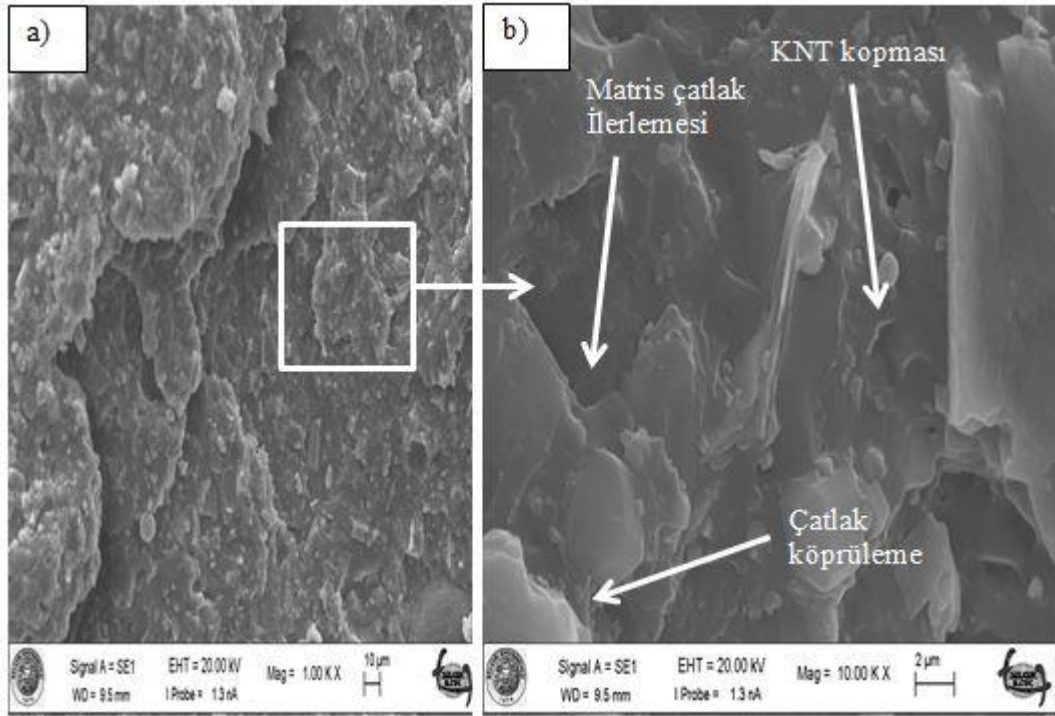
Poliüretan yapıştırıcıya ilave edilen nanoparçacıklar kompozit yapı içerisinde nanoparçacık kırılması, çatlak saptırma, köprüleme, kayma bantları, plastik deformasyon ve çatlak ucu pimleme, çatlak eğilmesi gibi tokluk arttırma işlevi gören çeşitli mukavemetlendirme mekanizmaları sayesinde mekanik özelliklerin iyileştirilmesine yardımcı olmaktadır (Ghadami ve ark.,2016).

15GR numunesine ait SEM görüntüleri Şekil 4.36'da sunulmuştur. Şekil 4.36 b'de kırık yüzeye gömülü grafenler ve matris kırılmasının olduğu bölge işaretlenmiştir. Bu görüntüler kıyaslandığında yüzeyin daha pürüzlü yapıda olduğu ve grafenin çatlak ilerlemesini engellediği görülmektedir.



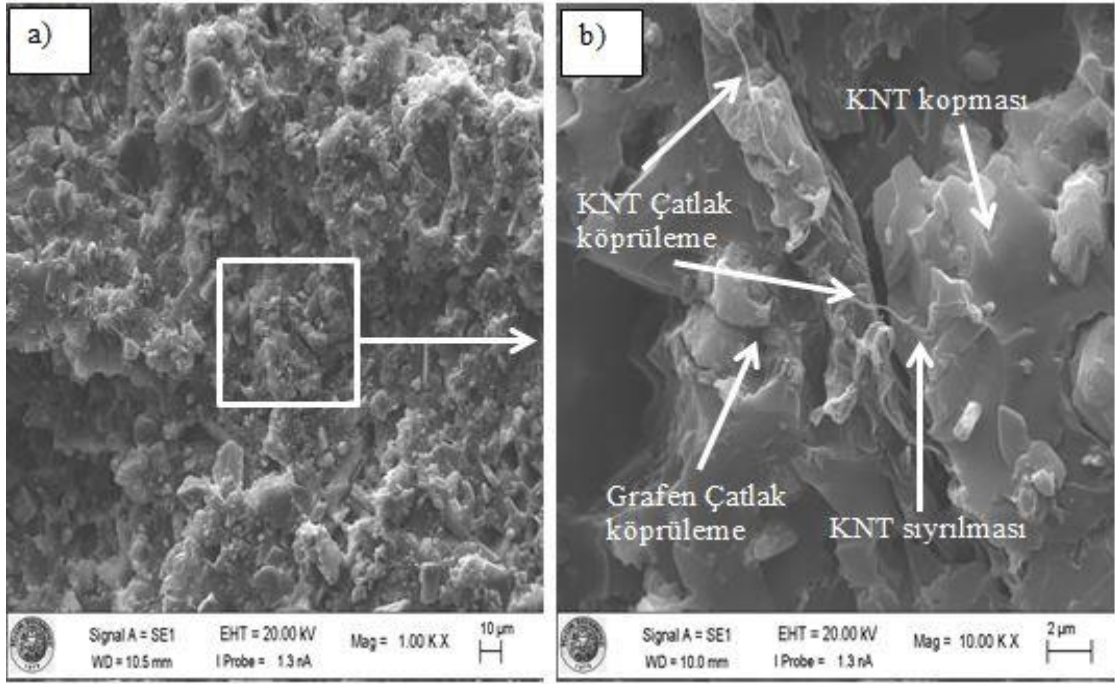
Şekil 4.36.Çekme Testleri Kırılma Yüzeyleri SEM Görüntüleri a) 15GR numunesi 1000 büyültme, b) 15GR numunesi 10000 büyültme

Enerji yayılımının bazı önemli mekanizmaları ÇCKNT'ler ile takviyelendirilmiş poliüretan yapıştırıcılarda tanımlanmıştır. Bunlar ÇCKNT'lerin kopması, sıyrılması, parçacık yapışmaması, çatlak köprüleme ve matris kırılmasıdır. Bu mekanizmaların hepsi enerji yutan mekanizmalar olup, kırılma tokluğunun artmasına yardımcı olur (Ekrem,2015). Şekil 4.37'de 15KNT numunesine ait SEM görüntüleri incelendiğinde enerji absorbe ederek tokluğun artmasını sağlayan hasar tipleri belirlenmiştir. ÇCKNT ile modifiye edilmiş yapıştırıcı matriste kırılma yüzeyleri arasında ilerleyen çatlak köprülenme etkisiyle durdurduğu veya çatlak dalandığını söyleyebiliriz. Bu hasar tiplerinin oluşumu, iyi karışım sağladığımızı ve yapıştırıcının mukavemetini ve tokluğunu artırmak amacıyla yaptığımız takviyelerin başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.37.Çekme Testleri Kırılma Yüzeyleri SEM Görüntüleri a) 15KNT numunesi 1000 büyültme, b) 15KNT numunesi 10000 büyültme

Şekil 4.38’de 10GR10KNT numunesine 1000 ve 10000 büyültmeli SEM görüntüleri sunulmuştur. 10000 büyültmeli SEM görüntüsünde yapıştırıcının homojene yakın olarak karıştığı ve topaklanmış yapıların oluşmadığı görülmüştür. SEM görüntüsünde nehir yatağı görüntüsüne benzer şekiller tespit edilmiştir. Bu görüntüler çatlak ilerlemesinin yapıştırıcı malzeme içerisine eklenen nanoparçacıklar ile yönünün değişmesinin sağlandığı gözlemlenmiştir. Ayrıca işaretlenen yerlerde ÇCKNT kırılması ve ÇCKNT sıyrılması mekanizmaları gösterilmiştir. Oluşan mekanizmalardan dolayı enerji emilim miktarı artmış ve buna bağlı olarak numunenin tokluğu artmıştır.



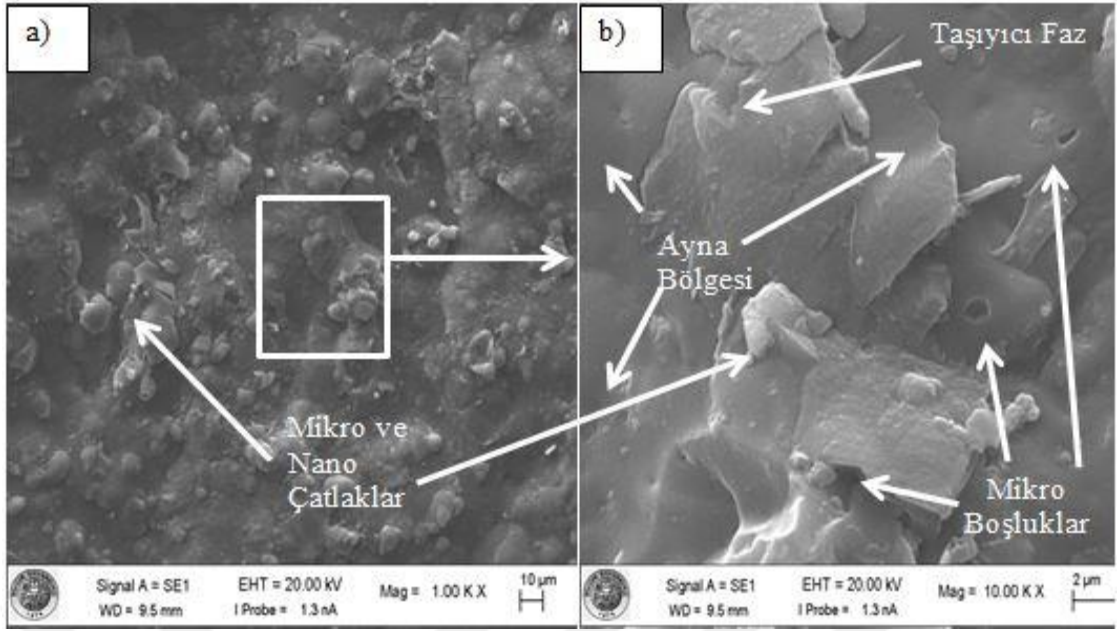
Şekil 4.38. Çekme Testleri Kırılma Yüzeyleri SEM Görüntüleri a) 10GR10KNT numunesi 1000 büyültme, b) 10GR10KNT numunesi 10000 büyültme

4.4.2. Tek Taraflı Bindirmeli Alüminyum-Alüminyum Bağlantıların Kırılma Yüzeyi SEM Görüntüleri

SEM görüntüleri için tıpkı çekme numunelerinde olduğu gibi tek taraflı bindirmeli Alüminyum-Alüminyum bağlantılarda da en yüksek miktarda (ağırlıkça %0.15) grafen içeren 15GR AL-AL en yüksek miktarda (ağırlıkça %0.15) ÇCKNT içeren 15KNT AL-AL numunesi ile en iyi mekanik özellik gösteren ağırlıkça % 0.05 grafen ve %0.05 ÇCKNT içeren 05GR05KNT numunesi seçilmiştir. Numunelerin kayma yüzeyleri 1000 ve 10000 büyültmeli olarak SEM görüntü analizleri gerçekleştirilmiştir.

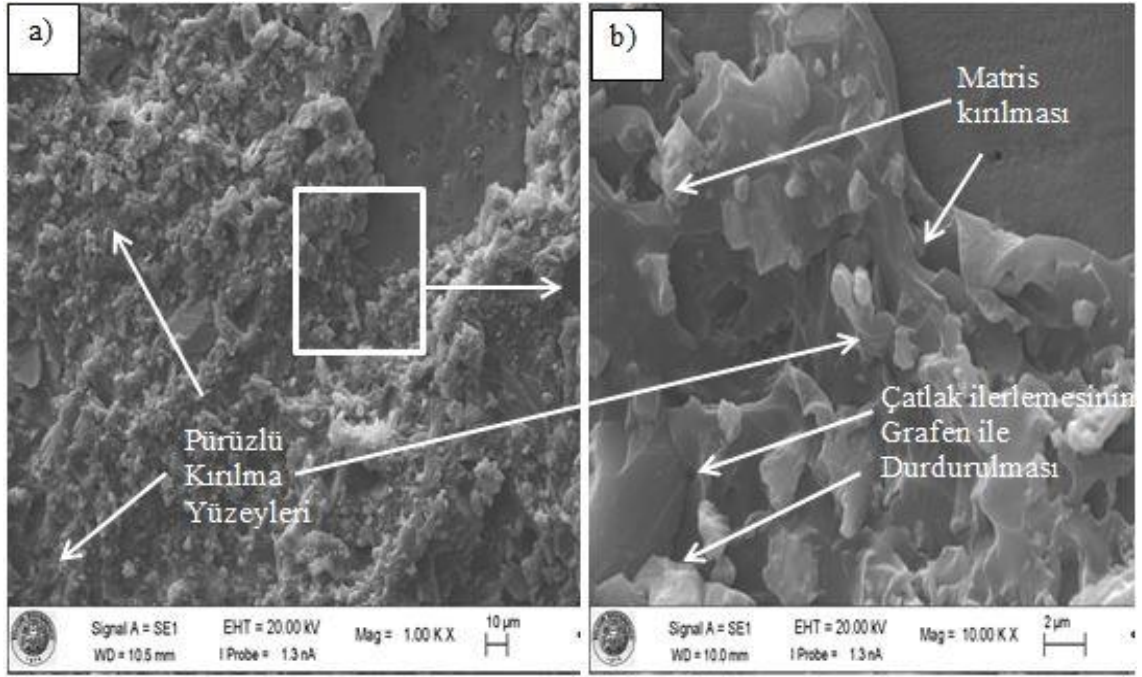
Tek taraflı bindirmeli bağlantıların kırılma yüzeyleri, kırılma davranışlarında nanoparçacık katkılarının etkileri ve kırılma mekanizmaları hakkında ilk bilgiyi verir.

Şekil 4.39b' ye bakıldığında hasar sebebiyle oluşan taşıyıcı faz görülmektedir. Taşıyıcı fazı çevreleyen bölge ise adezif hasar göstergesi olan ayna bölgesi bulunmaktadır. Taşıyıcı faz içerisinde oluşan mikro ve nano çatlaklar, rijit sürekli faz bölgesine doğru dallanarak bu bölgenin başlangıcında gevrek kırılma sebebiyle kaybolmaktadır. Poliüretan reçinenin kırılma yüzeyleri incelendiğinde tipik gevrek kırılma sürecinde olduğu gibi çatlakın başlaması ve ilerlemesi için zayıf direncinin doğasını ortaya çıkaran yüzey daha düz ve pürüzsüzdür.



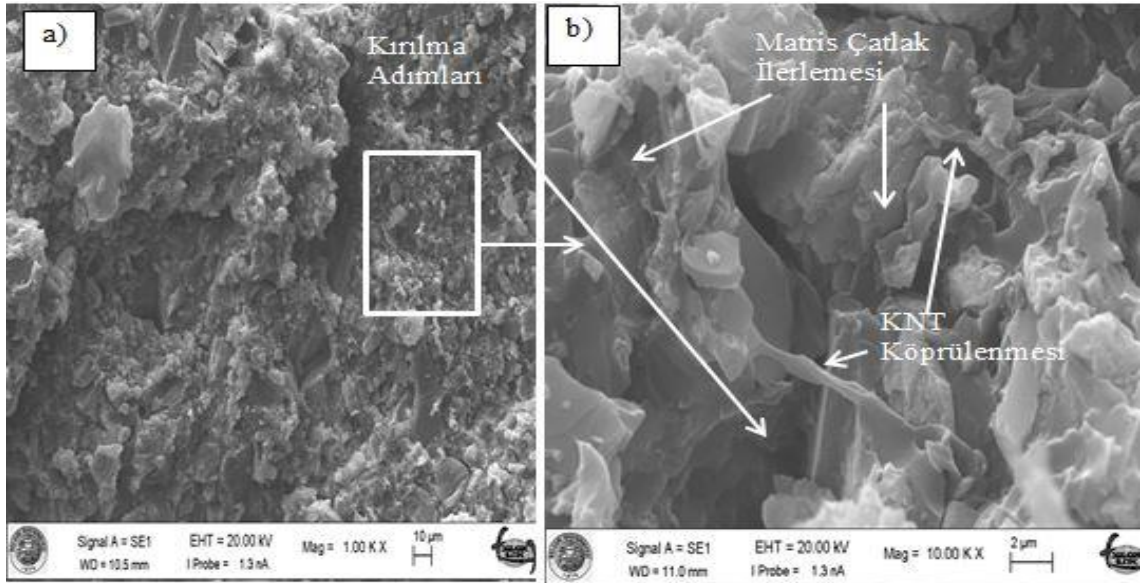
Şekil 4.39. Tek taraflı bindirmeli Alüminyum-Alüminyum bağlantıların çekme testi sonrasında oluşan kırık yüzeylerin SEM Görüntüleri a) PU AL-AL numunesi 1000 büyültme, b) PU AL-AL numunesi 10000 büyültme

Şekil 4.40’ta 15GR katkılı poliüretan ile birleştirilmiş AL-AL bağlantılarının çekme testi sonrasında oluşan kopma yüzeyinin SEM görüntüleri sunulmuştur. SEM görüntüleri karşılaştırıldığında katkılı yapıştırıcı numunesi daha kaba kırılma yüzeyleri sergiler ve yüzeyinde oluşan sarp yamaçlı yapılar görülmektedir. Normal olarak gelişmiş yüzey pürüzlülüğü matrisin plastik deformasyon oluşturulmasına eşlik etmektedir ve böylece daha çok kırılma enerjisi harcanır. Bu nedenle matris içinde grafen takviyeli yapıştırma bağlantılarında daha iyi dağılım ve dağıtım hali, kırılma süreci esnasında enerji dağılımının artmasıyla daha yüksek kayma dayanım ve tokluk değerine neden olur. Tüm bu göstergeler yapıştırıcı bölgesinden kohezif hasarın oluştuğunun dolayısı ile hazırlanan alüminyum yüzeylerin ve oluşturulan nanokompozit yapıştırıcının kaliteli olduğunun bir göstergesidir.



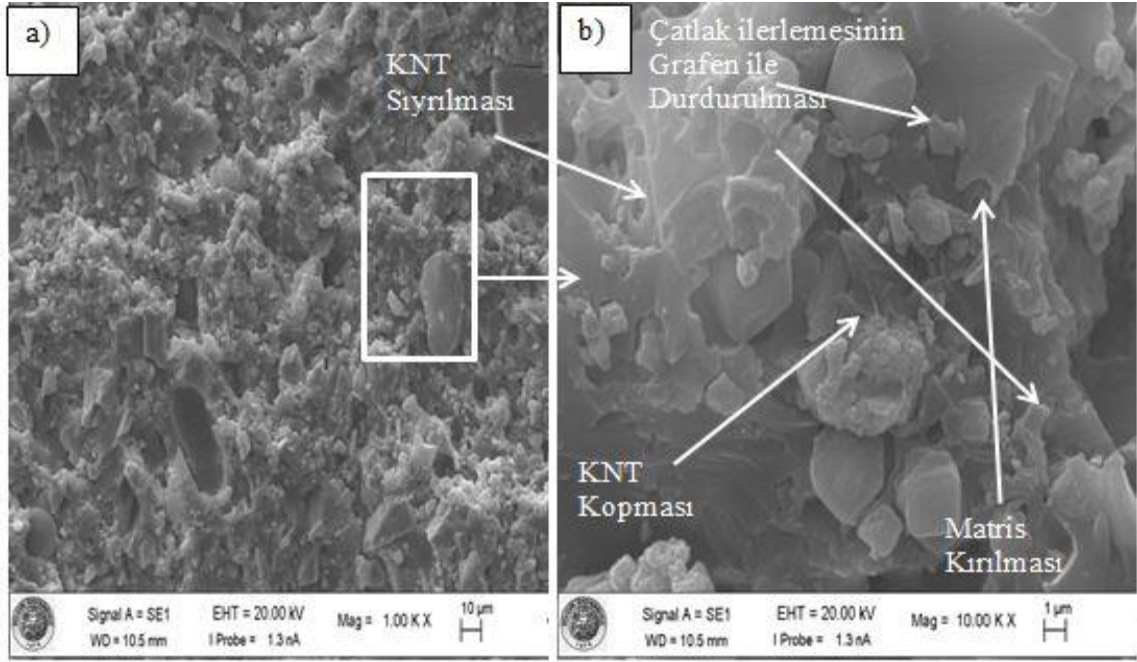
Şekil 4.40. Tek taraflı bindirmeli Alüminyum-Alüminyum bağlantıların çekme testi sonrasında oluşan kırık yüzeylerin SEM Görüntüleri a) 15GR AL-AL numunesi 1000 büyültme, b) 15GR AL-AL numunesi 10000 büyültme

Şekil 4.41’de ağırlıkça %0.15 ÇCKNT katkılı 15KNT numunesinin SEM görüntülerine bakıldığında ÇCKNT’nin matriste kırılma yüzeyleri arasında ilerleyen çatlak köprülenme etkisiyle durdurduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca görüntüde herhangi bir boşluğun olmaması, yüzeylerin pürüzlü olması dolayısı ile kohezif hasarın oluşması ve nano parçacıktan kaynaklı topaklanma olmaması homojen bir karışımın olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 4.41. Tek taraflı bindirmeli Alüminyum-Alüminyum bağlantıların çekme testi sonrasında oluşan kırık yüzeylerin SEM Görüntüleri a) 15GR AL-AL numunesi 1000 büyültme, b) 15GR AL-AL numunesi 10000 büyültme

Şekil 4.42’de ağırlıkça % 0.05 ÇCKNT ve %0.05 grafen katkılı 05GR05KNT AL-AL hibrit numunenin SEM görüntülerine bakıldığında ise 15GR ve 15KNT numunelerini yüzeylerine göre daha belirgin daha kaba kırılma yüzeyleri ve yüzeyinde oluşan daha sert sarp yamaçlı yapılar görülmektedir. Bu yapılar çatlak ilerleme yönünü değiştirmiş ve buna bağlı olarak yapıştırıcı numuneyi kırmak için gerekli olan enerji miktarı artmıştır. Bu da yapıştırıcının tokluğunu arttırmıştır.



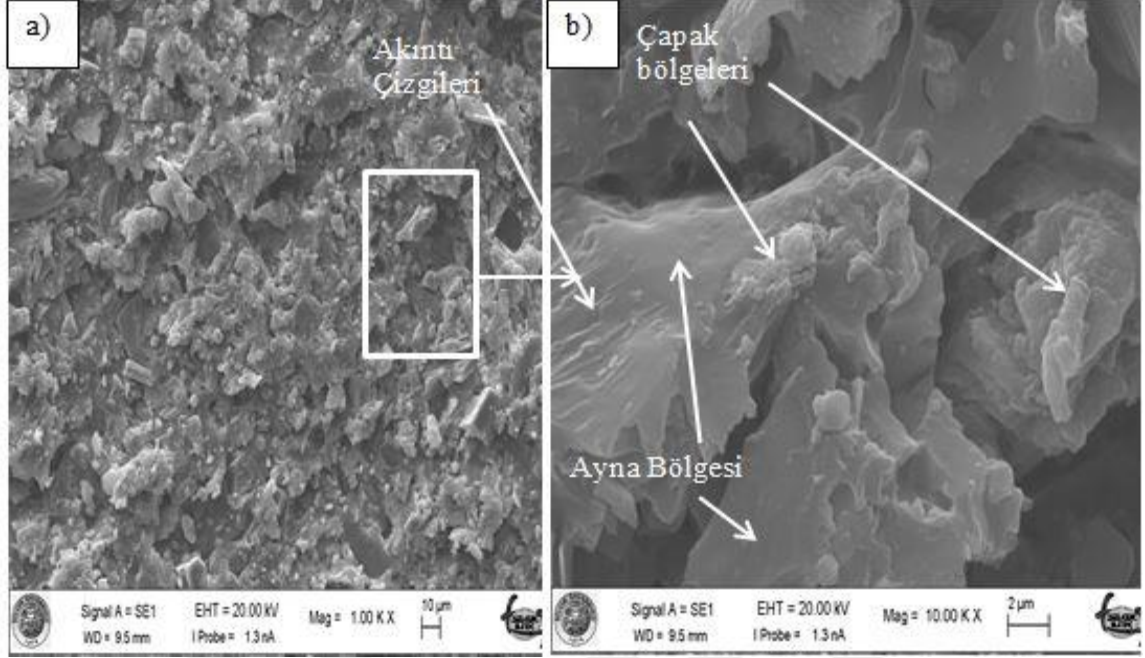
Şekil 4.42. Tek taraflı bindirmeli Alüminyum-Alüminyum bağlantıların çekme testi sonrasında oluşan kırık yüzeylerin SEM Görüntüleri a) 05GR05KNT AL-AL numunesi 1000 büyültme, b)05GR05KNT AL-AL numunesi 10000 büyültme

4.4.3. Tek Taraflı Bindirmeli Kompozit-Kompozit Bağlantıların Kırılma Yüzeyi SEM Görüntüleri

SEM görüntüleri için tek taraflı bindirmeli kompozit-kompozit bağlantılarda içerisinde katkı içermeyen PU KOMP-KOMP numunesi referans seçilmiştir. Ayrıca ağırlıkça %0.05 grafen içeren 05GR KOMP- KOMP numunesi, ağırlıkça %0.05 karbon nano tüp içeren 05KNT KOMP-KOMP numunesi ve ağırlıkça % 0.05 grafen ve %0.05 karbon nanotüp içeren 05GR05KNT numunesi seçilerek katkısız poliüretan yapıştırıcı SEM görüntüleriyle karşılaştırılması yapılmıştır.

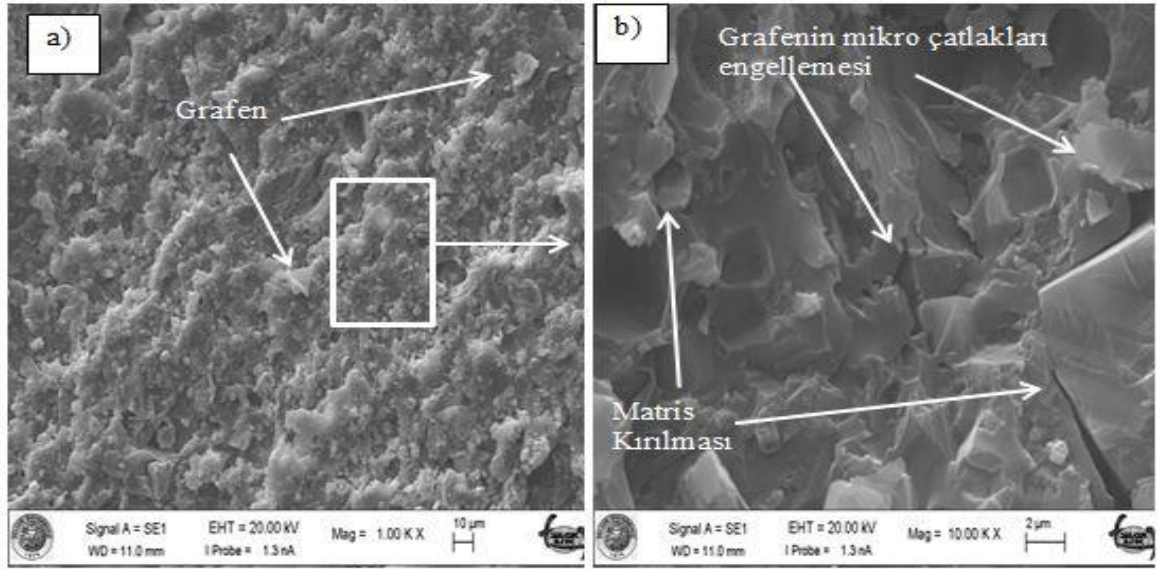
Şekil 4.43’de katkı maddesi içermeyen poliüretan ile birleştirilmiş kompozit malzemenin yüzeyine ait SEM görüntüleri sunulmuştur. Görüntülerde tıpkı alüminyum bağlantılarda ve çekme numunelerinde olduğu gibi termoset grubundaki polimerlerin kırılma yüzeylerinde kırılma esnasında çatlak yavaşça büyürken birden hızlanarak

pürüzsüz denilebilecek ayna isimli bölge görülmektedir. Ayna bölgesinin ardından deformasyon hızlanmaya başladığında nihai çatlak hızında, yüksek miktarda pürüzlü kaba bir yapıya sahip olan ve belirgin akıntı çizgileri içeren çapak bölgesi oluştuğu görülmektedir.



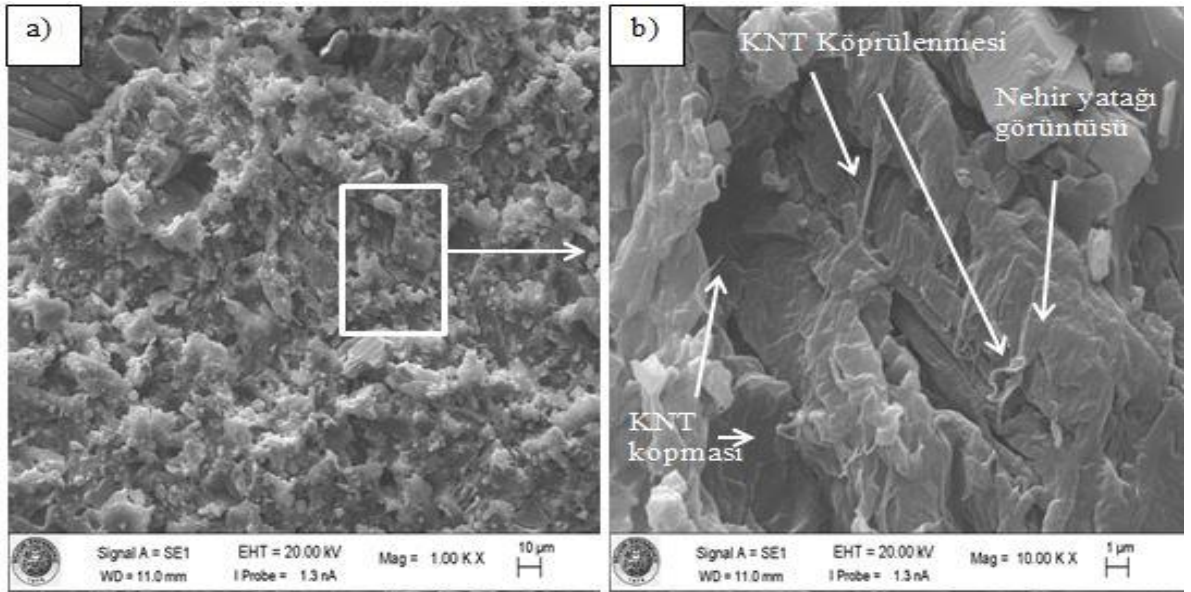
Şekil 4.43. Tek taraflı bindirmeli Kompozit-Kompozit bağlantıların çekme testi sonrasında oluşan kırık yüzeyleri SEM Görüntüleri a) PU KOMP-KOMP numunesi 1000 büyültme, b) PU KOMP-KOMP numunesi 10000 büyültme

Şekil 4.44'e bakıldığında ise içerisinde ağırlıkça %0.05 grafen içeren 05GR KOMP-KOMP numunesinin SEM görüntülerinde grafen katkılı yapıştırıcıların kırık yüzeylerinde saf poliüretana göre daha pürüzlü ve katmanlı görünümde bölgeler görülmektedir.



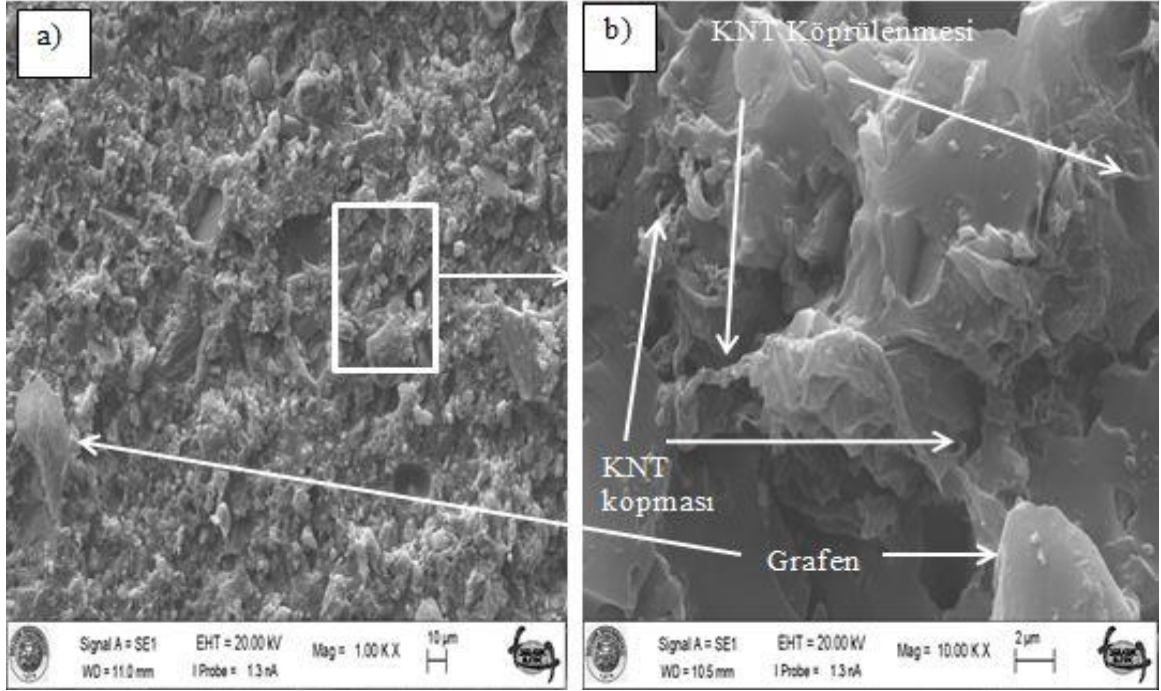
Şekil 4.44. Tek taraflı bindirmeli Kompozit-Kompozit bağlantıların çekme testi sonrasında oluşan kırık yüzeyleri SEM Görüntüleri a) 05GR KOMP-KOMP numunesi 1000 büyültme, b)05GR KOMP-KOMP numunesi 10000 büyültme.

İçerisinde ağırlıkça %0.05 ÇCKNT içeren 05KNT KOMP-KOMP numunesinin SEM görüntülerinde (Şekil 4.45) ÇCKNT katkılı yapıştırıcıların kırık yüzeylerinde saf poliüretana göre daha pürüzlü bölgeler görülmektedir. ÇCKNT'lerin nanotüp kopması, sıyrılması ve köprülenme gibi çatlak ucunun yön değiştirmesi veya çatallanması ÇCKNT ile takviye edilmiş poliüretan yapıştırıcılarda gözlenen önemli tokluk mekanizmaları açıkça görülmektedir.



Şekil 4.45. Tek taraflı bindirmeli Kompozit-Kompozit bağlantıların çekme testi sonrasında oluşan kırık yüzeyleri SEM Görüntüleri a) 05KNT KOMP-KOMP numunesi 1000 büyültme, b)05KNT KOMP-KOMP numunesi 10000 büyültme

Şekil 4.46'da içerisinde ağırlıkça %0.05 grafen ve %0.05 ÇCKNT içeren 05GR05KNT KOMP-KOMP numunesinin SEM görüntülerinde ise kırık yüzeye gömülü grafenler ve matris kırılmasının olduğu bölge işaretlenmiştir. Bu görüntüler kıyaslandığında yüzeyin daha pürüzlü yapıda olduğu ve grafenin çatlak ilerlemesini engellediği görülmektedir. ÇCKNT ile yapıştırıcı matriste kırılma yüzeyleri arasında ilerleyen çatlağı köprülenme etkisiyle durdurduğu veya çatlağın dallandığını söyleyebiliriz.



Şekil 4.46. Tek taraflı bindirmeli Kompozit-Kompozit bağlantılarının çekme testi sonrasında oluşan kırık yüzeyleri SEM Görüntüleri a) 05GR05KNT KOMP-KOMP numunesi 1000 büyültme, b)05GR05KNT KOMP-KOMP numunesi 10000 büyültme

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, endüstriyel uygulama alanı geniş olan poliüretan yapıştırıcıların mekanik ve termal özelliklerini iyileştirmek amacı ile grafen ve ÇCKNT nanoparçacıklar eklenerek oluşturulan poliüretan hibrit yapıştırıcıların TTBB ve çekme numuneleri hazırlanarak mekanik ve termal özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

Literatürde yapılan çalışmalar doğrultusunda; nanoparçacık katkı oranını ağırlıkça toplam % 0.3 olacak şekilde karışımlar yapılmıştır.

Çekme numuneleri kopma gerçekleşinceye kadar yüklenmiş ve hasar anına kadar sergiledikleri gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, yapıştırıcı içerisine nanoparçacık ilave edilmesi; genel olarak poliüretan yapıştırıcılarda yapıştırıcının çekme dayanımı değerlerini artırırken, şekil değiştirmelerini azalttığı görülmüştür.

Mekanik testler sonucunda katkısız poliüretan yapıştırıcının çekme dayanımı 9.55 MPa tokluk değeri 5.22 kJ/m³ ve kopma birim şekil değişimi 0.72 mm/mm olarak bulunmuştur. Nanoparçacık katkılı yapıştırıcıların incelenmesinde ise;

- Grafen katkılı poliüretan bazlı yapıştırıcıların yapılan çekme dayanımı testlerinde en yüksek çekme dayanımı değeri ve en yüksek birim şekil değiştirmeye sahip 10GR yapıştırıcı numunesinin, katkısız poliüretan numunesine kıyasla %19.48 artışla 11.41 MPa çekme dayanımı değerine sahip olduğu ve % 12.5 artışla 0.81 mm/mm ile en yüksek kopma birim şekil değişimine sahip olduğu görülmüştür. 05GR ve 15GR numunelerine bakıldığında ise saf poliüretan numunesine göre çekme dayanımları artışı gözlemlenirken aynı zamanda katkı oranlarının artmasıyla birbirlerine kıyasla hem çekme dayanımlarının hem de toplam uzama miktarlarının düştüğü görülmüştür. Tokluk bakımından incelendiğinde ise en yüksek tokluk değerine sahip 10GR numunesinin tokluk değeri 7.11 kJ/m³ olarak bulunmuştur. Grafen katkılı çekme numunelerinin tamamının tokluk değerlerinde ve elastisite modüllerinde artış gözlemlenmiştir
- ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcıların çekme dayanımı testlerinde en yüksek çekme dayanımı değeri katkısız poliüretan numunesine göre %29.11 artışla 14.43 MPa çekme dayanımı değerine sahip olan 15KNT numunesinde görülürken, tüm numunelerin birim şekil değiştirmelerinin ÇCKNT'nin

yapısından dolayı katkısız poliüretana göre düştüğü gözlemlenmiştir. 05KNT ve 10KNT numunelerine bakıldığında ise poliüretan numunesine göre çekme dayanımlarının azaldığı gözlemlenirken aynı zamanda katkı oranlarının artmasıyla iki numunenin birbirlerine kıyasla çekme dayanımlarının düştüğü görülmüştür. Tokluk bakımından incelendiğinde ise ÇCKNT katkılı çekme numunelerinin kopmadaki birim şekil değiştirmelerinin azalmasından dolayı tamamının tokluk değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Fakat tüm ÇCKNT katkılı numunelerde elastisite modülünün arttığı görülmektedir. Buda elastikliğin arttığının bir ölçüsü olarak değerlendirilmektedir.

- Ağırlıkça % 0.05 grafen oranı sabit %0.05, 0.10 ve 0.15 ÇCKNT nanoparçacık katkılı poliüretan yapıştırıcı numunelerde en yüksek çekme dayanımı değerinin poliüretan numunesine göre %52.67 artışla 14.58 MPa değeriyle 05GR10KNT numunesinin sahip olduğu,
- Ağırlıkça % 0.10 grafen oranı sabit %0.05,0.10 ve 0.15 ÇCKNT nanoparçacık katkılı poliüretan yapıştırıcı numunelerde en yüksek çekme dayanımı değerinin saf poliüretan numunesine göre %50.47 artışla 14.37 MPa değeriyle 10GR10KNT numunesinin sahip olduğu,
- Ağırlıkça % 0.15 grafen oranı sabit %0.05,0.10 ve 0.15 ÇCKNT nanoparçacık katkılı poliüretan yapıştırıcı numunelerde en yüksek çekme dayanımı değerinin saf poliüretan numunesine göre %37.70 artışla 13.15 MPa değeriyle 15GR05KNT numunesinin sahip olduğu,

Yukarıda bahsi geçen üç grup için üretilen diğer hibrit yapıştırıcılarla karşılaştırma yapabilmek için nanoparçacık katkılı poliüretan yapıştırıcıların çekme deneyi sonuçlarına göre en yüksek çekme dayanımı değeri 14.58 MPa ile 05GR10KNT numunesinde elde edilmiştir. Çekme testi sonuçlarına göre en büyük kopma uzaması ise 0.81 mm/mm ile 10 GR numunesinde elde edilmiştir.

Çekme deneyi sonuçlarına göre en düşük çekme dayanımı değeri 7.57 MPa ile 10KNT numunesinde elde edilmiştir. Çekme testi sonuçlarına göre en küçük kopma uzaması ise 0.09 mm/mm ile 05GR10KNT numunesinde elde edilmiştir.

ÇCKNT katkı oranının ağırlıkça %0.05'den büyük olduğu durumlarda çekme dayanımının düşme eğiliminde olduğu ve hazırlanan hibrit yapıştırıcıların tamamında saf poliüretanın kopmadaki birim şekil değiştirmesine kıyasla katkılı yapıştırıcıların kopmadaki birim şekil değiştirmelerinde büyük düşüşlerin olduğu gözlemlenmiştir.

Birim şekil değiştirmelerdeki düşüşten dolayı hibrit yapıştırıcılarda tokluk değerlerinin büyük bölümünde azalma görülürken sadece ağırlıkça %0.15 grafen ve ağırlıkça %0.05,0.10 ve 0.15 ÇCKNT içeren hibrit yapıştırıcılara ait sırasıyla 5.48 kJ/m³, 6.31kJ/m³ ve 5.33 kJ/m³ olmak üzere 15GR05KNT,15GR10KNT ve 15GR15KNT numunelerinin tokluk değerlerinde artış görülmüştür.

Elde edilen çekme numune sonuçları incelendiğinde, PU numunesinin çekme dayanımı 9.55 MPa, birim şekil değiştirmesi 0.72 mm/mm, tokluk 5.22 kJ/m³ve elastisite modülü 12.25 GPa olarak bulunmuştur. Yapıştırıcı içerisine %0.5,0.1,0.15 oranlarında grafen nanoparçacık ilave edilmesi sonucunda 05GR numunesinin çekme dayanımı 10.88 MPa, birim şekil değiştirmesi 0.67 mm/mm, tokluk 6.12 kJ/m³ ve elastisite modülü 14.61 GPa, 10GR numunesinin çekme dayanımı 11.41 MPa, birim şekil değiştirmesi 0.81 mm/mm, tokluk 7.11 kJ/m³ ve elastisite modülü 13.97 GPa, 15GR numunesinin çekme dayanımı 10.52 MPa, birim şekil değiştirmesi 0.65 mm/mm, tokluk 5.51 kJ/m³ve elastisite modülü 14.54 GPa bulunmuştur. Grafen katkısı ile yapıştırıcıda çekme dayanımı, birim şekil değiştirme, tokluk ve elastisite modülü değerlerinde artış gözlemlenmiştir. %0.5,0.1,0.15 oranlarında ÇCKNT nanoparçacık ilave edilmesi durumunda ise 05KNT numunesinin çekme dayanımı 9.71 MPa, birim şekil değiştirmesi 0.33 mm/mm, tokluk 2.71 kJ/m³ ve elastisite modülü 26.09 GPa, 10KNT numunesinin çekme dayanımı 7.57 MPa, birim şekil değiştirmesi 0.31 mm/mm, tokluk 1.88 kJ/m³ ve elastisite modülü 24.48 GPa, 15KNT numunesinin çekme dayanımı 14.43 MPa, birim şekil değiştirmesi 0.14 mm/mm, tokluk 1.28 kJ/m³ ve elastisite modülü 28.72GPa bulunmuştur. ÇCKNT katkılı numunelerde çekme dayanımı ve elastisite modülü değerlerinde artış; tokluk ve birim şekil değiştirme değerlerinde ise düşüş gözlemlenmiştir. Bu durum yüksek dayanım ve birim şekil değiştirme tercihinde grafen katkılı yapıştırıcıların ve yüksek elastik modülü tercihlerinde ise ÇCKNT katkılı yapıştırıcıların kullanılabileceğinin bir göstergesidir.

Hibrit yapıştırıcılarda birinci grupta 05GR05KNT numunesinin çekme dayanımı 13.83 MPa, birim şekil değiştirmesi 0.27 mm/mm, tokluk 3.07 kJ/m³ ve elastisite modülü 46.18 GPa, 05GR10KNT numunesinin çekme dayanımı 14.58 MPa, birim şekil değiştirmesi 0.09 mm/mm, tokluk 1.17 kJ/m³ ve elastisite modülü 72.09 GPa, 05GR15KNT numunesinin çekme dayanımı 11.67 MPa, birim şekil değiştirmesi 0.25 mm/mm, tokluk 2.56 kJ/m³ ve elastisite modülü 48.25 GPa bulunmuştur. İkinci grupta 10GR05KNT numunesinin çekme dayanımı 14.66 MPa, birim şekil değiştirmesi 0.23 mm/mm, tokluk 2.71 kJ/m³ ve elastisite modülü 45.53 GPa, 10GR10KNT

numunesinin çekme dayanımı 14.37 MPa, birim şekil değiştirmesi 0.12 mm/mm, tokluk 1.66 kJ/m³ ve elastisite modülü 53.22 GPa, 10GR15KNT numunesinin çekme dayanımı 10.57 MPa, birim şekil değiştirmesi 0.46 mm/mm, tokluk 4.02 kJ/m³ ve elastisite modülü 19.94 GPa bulunmuştur. Birinci grup numuneleri olan %0.5 grafen ve %0.5,0.1,0.15 ÇCKNT katkılı yapıştırıcılarda ve ikinci grup numuneleri olan %0.1 grafen ve %0.5,0.1,0.15 ÇCKNT katkılı yapıştırıcılarda sadece grafen ve ÇCKNT katkılı yapıştırıcılara oranla daha yüksek çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri elde edilmiştir. Tokluk ve birim şekil değiştirme değerleri ise sadece grafen katkılı yapıştırıcılara oranla düşüş gösterirken, sadece ÇCKNT katkılı yapıştırıcılara oranla hemen hemen aynıdır. Üçüncü grup numunelerde (%0.15 grafen ve %0.5,0.1,0.15 ÇCKNT katkılı yapıştırıcılarda) ise 15GR05KNT numunesinin çekme dayanımı 13.15 MPa, birim şekil değiştirmesi 0.46 mm/mm, tokluk 5.22 kJ/m³ ve elastisite modülü 25.92 GPa, 15GR10KNT numunesinin çekme dayanımı 11.51 MPa, birim şekil değiştirmesi 0.66 mm/mm, tokluk 6.31 kJ/m³ ve elastisite modülü 16.53 GPa, 15GR15KNT numunesinin çekme dayanımı 9.71 MPa, birim şekil değiştirmesi 0.67 mm/mm, tokluk 5.33 kJ/m³ ve elastisite modülü 13.41 GPa bulunmuştur. Sadece grafen, sadece ÇCKNT, birinci ve ikinci gruptaki hibrit yapıştırıcılara oranla daha yüksek çekme dayanımı, elastisite modülü, tokluk ve birim şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir. Üçüncü gruptaki 15GR10KNT numunesi diğer tüm numunelerle karşılaştırıldığında çekme dayanımı, elastisite modülü, tokluk ve birim şekil değiştirme değerleri açısından en iyi sonuçları vermektedir.

Alüminyum-alüminyum, alüminyum-kompozit ve kompozit-kompozit TTBB numunelerinin saf poliüretan ile birleştirilmiş TTBB numunelerinin çekme testi sonuçlarına göre kayma dayanımları sırasıyla 14.02 MPa, 13.71 MPa ve 13.51 MPa ve bu değerlerdeki kayma birim şekil değiştirmeleri ise 1.78 mm/mm, 1.85 mm/mm ve 1.83 mm/mm bulunmuştur. Diğer katkı oranlarının kayma dayanımları karşılaştırıldığında;

- Grafen katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş TTBB numunelerinin saf poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılara oranla alüminyum-alüminyum bağlantılarda çekme testi sonuçlarına göre en yüksek kayma dayanımı 14.54 MPa olan 15GR AL-AL numunesinde bulunmuştur. Ayrıca Alüminyum-kompozit bağlantılarda kayma dayanımı 16.48 MPa olan 05GR AL-KOMP numunesinde ve kompozit-kompozit bağlantılarda ise kayma dayanımı 16.28 MPa olan 05GR KOMP-KOMP numunesinde görülmüştür. Genel olarak bakıldığında ise tüm bağlantı tiplerinde kayma dayanımları saf poliüretanla

birleştirilmiş bağlantıların kayma dayanımlarına göre artış göstermesine rağmen katkı oranı artıkça dayanım ve en büyük kayma gerilmesindeki kayma birim şekil değişimlerinin düştüğü gözlemlenmiştir.

- ÇCKNT katkılı poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş TTBB numunelerinin saf poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş TTBB numunelerine oranla alüminyum-alüminyum TTBB numunelerinde en yüksek kayma dayanımı 16.51 MPa ile 15KNT AL-AL numunesinde görülmüştür. Alüminyum-kompozit bağlantılarda ise en yüksek kayma dayanımı 15.06 MPa olan 15KNT AL-KOMP numunesinde ve kompozit-kompozit bağlantılarda en yüksek kayma dayanımı 14.99 MPa olan 15KNT KOMP-KOMP numunesinde görülmüştür. Genel olarak bakıldığında tüm ÇCKNT katkılı bağlantılarının kayma birim şekil değişiminin düştüğü gözlemlenmiştir.
- Ağırlıkça %0.05 grafen ve değişik oranlarda ÇCKNT katkılı TTBB numunelerinin katkısız poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılara oranla alüminyum-alüminyum bağlantılarda en yüksek değer kayma dayanımı 16.41 MPa olan 05GR05KNT AL-AL numunesinde görülmüştür. Ayrıca alüminyum-kompozit bağlantılarda en yüksek kayma dayanımı değeri 14.91 MPa olan 05GR05KNT AL-KOMP numunesinde ve kompozit-kompozit bağlantılarda kayma dayanımı 14.45 MPa olan 05GR05KNT KOMP-KOMP numunesinde görülmüştür. Ek olarak ağırlıkça %0.05 grafen miktarı sabit olan TTBB’lerde ÇCKNT miktarının %0.05 ten büyük olduğu durumlarda saf poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılara oranla kayma dayanımlarında ve kayma birim şekil değişimlerinde düşüş görülmüştür.
- Ağırlıkça %0.10 grafen ve değişik oranlarda ÇCKNT katkılı TTBB numunelerinin saf poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş TTBB numunelerine oranla alüminyum-alüminyum bağlantılarda en yüksek kayma dayanımı değeri 16.41 MPa olan 10GR10KNT AL-AL numunesinde görülmüştür. Ayrıca alüminyum-kompozit bağlantılarda en yüksek kayma dayanımı değeri 16.34 MPa ile 10GR15KNT AL-KOMP numunesinde ve kompozit-kompozit bağlantılarda en yüksek kayma dayanımı değeri 16.11 MPa ile 10GR05KNT KOMP-KOMP numunesinde görülmüştür. Ek olarak ağırlıkça %0.10 grafen miktarı sabit olan alüminyum-alüminyum ve alüminyum-kompozit bağlantıların kayma dayanımlarında saf poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılara oranla yükseliş görülmüştür. ÇCKNT miktarının %0.05 ten büyük olduğu

durumlarda kompozit-kompozit bağlantılarda saf poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılara oranla kayma dayanımlarında ve alüminyum-alüminyum bağlantılar hariç tüm bağlantıların kayma birim şekil değişimlerinde düşüş görülmüştür.

- Ağırlıkça %0.15 Grafen ve değişik oranlarda ÇCKNT katkılı TTBB numunelerinin saf poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılara oranla en yüksek kayma dayanımı değeri alüminyum-alüminyum bağlantılarda 16.01 MPa ile 15GR05KNT AL-AL numunesine aittir. Alüminyum-kompozit bağlantılarda ise en yüksek kayma dayanımı değeri 14.04 MPa ile 15GR05KNT AL-KOMP numunesinde ve kompozit-kompozit bağlantılarda en yüksek kayma dayanımı değeri 15.11 MPa ile 15GR05KNT KOMP-KOMP numunesinde görülmüştür. Tüm bunlara genel olarak bakıldığında alüminyum-kompozit bağlantıların kayma dayanımlarında ağırlıkça %0.15 grafen miktarı sabit ÇCKNT miktarının %0.10'dan büyük olduğu durumlarda mekanik özellikler açısından saf poliüretan yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılara oranla düşüş görülmüştür.

Hibrit yapıştırıcılarla birleştirilmiş tüm TTBB'lar ile karşılaştırma yapıldığında çekme testi sonucuna göre en yüksek bağlantı dayanımı 16.48 MPa ile 05GR AL-KOMP numunesinde görülmüştür. TTBB numuneleri arasında kopmadaki en büyük kayma birim şekil değişimi ise 2.92 mm/mm ile 15GR05KNT AL-AL numunesinde bulunmuştur. TTBB'lar içinde çekme testi sonucuna göre en küçük bağlantı dayanımı 6.85 MPa ile 10KNT KOMP-KOMP numunesinde görülmüştür. TTBB numuneleri arasında kopmadaki en düşük kayma birim şekil değişimi ise 0.54 mm/mm ile 15GR10KNT KOMP-KOMP numunesinde bulunmuştur.

Yapılan mekanik testler sonucunda belirli numunelerin SEM görüntüleri alınmıştır. Alınan SEM görüntülerinde genel olarak yapıştırıcı içerisinde dağılmış grafenin, büyüyen çatlakları köprüleyerek, çatlak ilerlemesini engellemekte ve bu olaylar nanokompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir. ÇCKNT'lerin SEM görüntüleri incelendiğinde ise enerji absorbe ederek tokluğun artmasını sağlayan hasar tipleri görüntülenmiştir. Görüntülerde ÇCKNT ile modifiye edilmiş yapıştırıcı matriste ÇCKNT'nin kırılma yüzeyleri arasında ilerleyen çatlağı köprülenme etkisiyle durdurduğu veya çatlağın dallandırdığı belirlenmiştir. Bu hasar tiplerinin oluşumu, iyi karışım sağladığımızı ve yapıştırıcının mukavemetini ve tokluğunu artırmak amacıyla yaptığımız nanoparçacık takviyesi nedeniyle sonuçların başarılı olduğu düşünülmektedir.

TGA ve DTA testleri sonucunda saf poliüretanın %5, %25 ve tamamen kütle kaybı için bozunma sıcaklıkları 319.5, 393.99 ve 492.51 °C olarak tespit edilmiştir. Ayrıca camısı geçiş sıcaklığı (T_g), 50.18 °C, erime sıcaklığı (T_m) 292.15 °C ve erime entalpisi (H_m) 41.5 J/gr bulunmuştur. Bu değerlere karşılık üretilen nano parçacık katkılı yapıştırıcı numunelerinden en iyi değerlere sahip numuneler;

- Grafen katkılı poliüretan bazlı yapıştırıcı numunelerden %5, %25 ve tamamen kütle kaybı için en yüksek bozunma sıcaklıkları sırasıyla 333.88 °C, 462.08 °C ve 502.55 °C olmak üzere 05GR numunesinde görülmüştür. En yüksek camısı geçiş sıcaklığı (T_g) 56.85 °C ile 10GR numunesinde görülürken en yüksek erime sıcaklığı (T_m) 300.36 °C değerleriyle 05GR numunesinde bulunmuştur. En yüksek erime entalpisi değeri (H_m) ise 35.73 J/gr ile 10GR numunesinde görülmüştür.
- ÇCKNT katkılı poliüretan bazlı yapıştırıcı numunelerinde ise %5, %25 ve tamamen kütle kaybı için en yüksek bozunma sıcaklıkları sırasıyla 331.26 °C, 422.56 °C ve 527.7 °C olmak üzere 10KNT numunesinde, en yüksek camısı geçiş sıcaklığı (T_g) 52.65 °C ve en yüksek erime sıcaklığı (T_m) 298.47 °C değerleriyle 10KNT numunesinde bulunmuştur. En yüksek erime entalpisi değeri (H_m) ise 49.98 J/gr ile 05KNT numunesinde görülmüştür.
- Hibrit ÇCKNT ve grafen katkılı poliüretan bazlı yapıştırıcı numunelerde ise %5, %25 ve tamamen kütle kaybı için en yüksek bozunma sıcaklıkları sırasıyla 333.10 °C, 417.98 °C ve 513.63 °C olmak üzere 05GR15KNT numunesinde, en yüksek camısı geçiş sıcaklığı T_g , 65.23 °C ile 10GR10KNT numunesinde ve en yüksek erime sıcaklığı (T_m) 300.01 °C değerleriyle 05GR15KNT numunesinde bulunmuştur.

Sonuç olarak termal özellikler açısından değerlendirildiğinde üretilen tüm numunelerden en yüksek kütle kaybı başlangıç sıcaklığı 333.88 °C ile 05GR numunesinde, en yüksek tamamen bozulma sıcaklığı 527.7 °C ile 10KNT numunesinde, en yüksek erime sıcaklığı (T_m) 300.36 °C ile 05GR numunesinde ve en yüksek camısı geçiş sıcaklığı (T_g) sıcaklığı 56.54 °C ile 05GR numunesinde elde edilmiştir.

Elde edilen tüm bulgulara göre:

Yüksek dayanım özelliği istenen; alüminyum-alüminyum yapıştırırmalı TTBB'lerde %0.15 ÇCKNT katkı oranlı, alüminyum-kompozit yapıştırırmalı

TTBB'lerde %0.15 grafen katkı oranlı, kompozit-kompozit yapıştırırmalı TTBB'lerde %0.15 grafen katkı oranlı,

Yüksek şekil değiştirilebilirlik özelliği istenen; alüminyum-alüminyum yapıştırırmalı TTBB'lerde %0.15 grafen ve %0.05 ÇCKNT katkı oranlı, alüminyum-kompozit yapıştırırmalı TTBB'lerde %0.15 grafen ve %0.15 ÇCKNT katkı oranlı katkı oranlı, kompozit-kompozit yapıştırırmalı TTBB'lerde %0.15 grafen ve %0.05 ÇCKNT katkı oranlı,

Yüksek enerji yutma yeteneği istenen numunelerde %0.05 grafen katkı oranlı, yüksek termal kararlılık (T_g) istenen numunelerde ise %0.10 grafen katkı oranlı poliüretan yapıştırıcıların kullanılmasının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.



6. GELECEK ÇALIŞMALAR

- Tek taraflı bindirme bağlantılarına ilaveten çift taraflı bindirmeli ve silindirik bindirmeli bağlantılar yapılarak mekanik özellikler belirlenebilir.
- Bulunan sonuçlara istinaden poliüretan yapıştırıcı haricindeki yapıştırıcılar kullanılarak ve aynı katkı malzemeleri eklenerek poliüretan yapıştırıcının kazandığı mekanik özellikler ile yeni yapılan hibrit yapıştırıcıların mekanik özellikleri karşılaştırılabilir.
- Çalışmamızda karışım yöntemleri ve yapıştırıcı içerisinde oluşan hava kabarcıklarından dolayı birçok hata görülmüştür. Oluşan hataların giderilmesi açısından daha uygun yeni karıştırma ve vakumlama yöntemleri kullanılarak yeni çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, Bilal. 2018. “Investigation of the effect of nanoparticles on adhesion of single lap joints in composites”. *Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi ,Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.*
- Akkurt, Mustafa. 2012. “Makine Elemanları Cilt 1”. Birsen Yayınevi.
- Akpınar, Iclal Avinc, Kürşat Gültekin, Salih Akpınar, Hamit Akbulut, ve Adnan Ozel. 2017. “Research on strength of nanocomposite adhesively bonded composite joints”. *Composites Part B: Engineering.*
- Akpınar, Salih. 2014. “The strength of the adhesively bonded step-lap joints for different step numbers”. *Composites Part B: Engineering.*
- Akpınar, Salih. 2012. “Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş T-Bağlantılarda Üç Boyutlu Gerilme Analizi”. *Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.*
- Alia, Cristina, José M. Arenas, Juan C. Suárez, ve Paz Pinilla. 2016. “Mechanical behavior of polyurethane adhesive joints used in laminated materials for marine structures”. *Ocean Engineering* 113:64–74.
- Aslan, Abdullah. 2018. “Korozif ortamın yapıştırıcı ve yapıştırıcı bağlantıları üzerine etkilerinin incelenmesi”. *Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi ,Fen Bilimleri Enstitüsü,Konya.*
- ASTM. 2001. “ASTM 2651-01 standard guide for the preparation of metal surfaces for adhesive bonding”.
- ASTM D 1002-05. 2005. “Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)”. *Standards.*
- ASTM D1002-10. 2019. “Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)”. *Ss. 1–5 içinde ASTM Book of Standards. ASTM International.*
- ASTM D2674 - 72. 2012. “Standard Methods of Analysis of Sulfochromate Etch

Solution Used in Surface Preparation of Aluminum”.

ASTM D3933-98. 2010. ASTM Standard D3933 - Standard Guide for Preparation of Aluminum Surfaces for Structural Adhesives Bonding (Phosphoric Acid Anodizing).

ASTM D638-10. 2004. “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics”. ASTM Standards (January):1–15.

ASTM D907. 2011. “Standard Terminology of Adhesives”. American Society for Testing and Materials.

ASTM International. 2019. “ASTM D1002-10(2019) Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)”. içinde ASTM Book of Standards.

AYDIN, Muhammet Raci, Volkan ACAR, Furkan YAPICI, Kaan YILDIZ, Muhammed Vefa TOPCU, ve Ömer GÜNDOĞDU. 2018. “Influence of Fiber Stacking Sequence in Inter-ply Hybrid Composites Structures on the Mechanical and Dynamics Properties”. Journal of the Institute of Science and Technology 255–63.

Aydın, Murat Demir. 2003. “Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Tek Tesirli Bindirme Bağlantısının Mekanik Özelliklerinin Deneysel ve Teorik İncelenmesi”. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Bahattab, Mohammed A., Jessica Donate-Robles, Vanesa Garca-Pacios, ve Jos Miguel Martn-Martnez. 2011. “Characterization of polyurethane adhesives containing nanosilicas of different particle size”. International Journal of Adhesion and Adhesives 31(2):97–103.

Banea, M. D. ve L. F. M. da Silva. 2009. “Adhesively bonded joints in composite materials: An overview”. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications 223(1):1–18.

Bedeloğlu, Ayşe. 2016. “Graphene And Its Production Methods”. AKU J. Sci. Eng 16:31203–544.

Berntsen, John Fredrick, David Morin, Arild Holm Clausen, ve Magnus Langseth.

2019. "Experimental investigation and numerical modelling of the mechanical response of a semi-structural polyurethane adhesive". *International Journal of Adhesion and Adhesives* 95.
- Bharti, Srijita. 2018. "Adhesives and Adhesion Technologies: A Critical Review". *American Journal of Polymer Science and Technology* 4(1):36.
- Boutar, Y., S. Naïmi, S. Mezlini, R. J. C. Carbas, L. F. M. da Silva, ve M. Ben Sik Ali. 2018. "Fatigue resistance of an aluminium one-component polyurethane adhesive joint for the automotive industry: Effect of surface roughness and adhesive thickness". *International Journal of Adhesion and Adhesives* 83:143–52.
- Boutar, Yasmina, Sami Naïmi, Salah Mezlini, Lucas F. M. da Silva, ve Moez Ben Sik Ali. 2017. "Characterization of aluminium one-component polyurethane adhesive joints as a function of bond thickness for the automotive industry: Fracture analysis and behavior". *Engineering Fracture Mechanics* 177:45–60.
- Can, Haşim. 2016. "T-bağlantılarda (T-joint) yapıştırıcı ve malzemenin çekme dayanımına etkisinin araştırılması". Yüksek Lisans Tezi,Türk Hava Kurumu Üniversitesi ,Fen Bilimleri Enstitüsü ,Ankara.
- Carpenter, William. 1999. Characterizing the chemistry of yellow-poplar surfaces exposed to different surface energy environments using DCA, DSC, and XPS Recommended Citation.
- Çelebi, Elanur. 2018. "Yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışlarının dijital görüntü korelasyon tekniği ile incelenmesi". Yüksek Lisans Tezi,Erzurum Teknik Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü,Erzurum.
- Dodiuk, H., I. Belinski, A. Dotan, ve S. Kenig. 2006. "Polyurethane adhesives containing functionalized nanoclays". *Journal of Adhesion Science and Technology* 20(12):1345–55.
- Du, Xusheng, Helezi Zhou, Weifu Sun, Hong Yuan Liu, Guangnan Zhou, Huamin Zhou, ve Yiu Wing Mai. 2017. "Graphene/epoxy interleaves for delamination toughening and monitoring of crack damage in carbon fibre/epoxy composite laminates". *Composites Science and Technology* 140:123–33.

- Durmuş, Fırat, Mürsel Ekrem, ve Gürol Önal. 2017. “Elektro-eğirme Yöntemiyle ÇCKNT Takviye Edilerek Güçlendirilmiş Naylon-6,6 Nanoelyafların Üretimi ve Karakterizasyonu”. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*.
- Ebnesajjad, Sina. 2011. *Handbook of Adhesives and Surface Preparation*.
- Ebnesajjad, Sina. 2013. *Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding: Second Edition*. Elsevier Inc.
- Edwards, K. L. 1998. “Brief insight into the selection and use of engineering adhesives for preliminary joint design”. *Materials and Design* 19(3):121–23.
- Ekrem, Mürsel. 2015. “Karbon nanotüp ve polivinil alkol nanoelyafla güçlendirilmiş epoksi yapıştırıcıların alüminyum bağlantılar üzerindeki kırılma davranışları”. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Ekrem, Mürsel. 2019. “The effects of carbon nanotubes added polyvinyl alcohol nanofibers on mechanical properties of carbon reinforced composite laminates”. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences* 44(8).
- Fourche, Georges. 1995. “An overview of the basic aspects of polymer adhesion. Part I: Fundamentals”. *Polymer Engineering & Science*.
- Galvez, Pedro, Juana Abenojar, ve Miguel Angel Martinez. 2019. “Durability of steel-CFRP structural adhesive joints with polyurethane adhesives”. *Composites Part B: Engineering* 165:1–9.
- Ghadami, F., M. R. Dadfar, ve M. Kazazi. 2016. “Hot-cured epoxy-nanoparticulate-filled nanocomposites: Fracture toughness behavior”. *Engineering Fracture Mechanics* 162:193–200.
- Gojny, Florian H., Malte H. G. Wichmann, Bodo Fiedler, Ian A. Kinloch, Wolfgang Bauhofer, Alan H. Windle, ve Karl Schulte. 2006. “Evaluation and identification of electrical and thermal conduction mechanisms in carbon nanotube/epoxy composites”. *Polymer* 47(6):2036–45.
- Goyat, M. S., Sumit Suresh, Sumit Bahl, Sudipta Halder, ve P. K. Ghosh. 2015. “Thermomechanical response and toughening mechanisms of a carbon nano bead

- reinforced epoxy composite”. *Materials Chemistry and Physics* 166:144–52.
- Gültekin, Kürşat. 2014. “Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Bağlantılarda Malzeme Genişliğinin Ve Kalınlığının Bağlantının Yük Taşıma Kapasitesine Etkisi”. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Gültekin, Kürşat. 2018. “Havacılık alanında kullanılan nanoyapı katkılı yapısal yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi”. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Gültekin, Kürşat, Salih Akpınar, ve Adnan Özel. 2014. “The effect of the adherend width on the strength of adhesively bonded single-lap joint: Experimental and numerical analysis”. *Composites Part B: Engineering*.
- He, Xiaocong. 2011. “A review of finite element analysis of adhesively bonded joints”. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 31(4):248–64.
- İşcan, Bahattin. 2007. “Yapıştırıcı malzeme ile birleştirilmiş Z tipi bağlantılarının mekanik analizi”. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- ISO 10365. 1992. “ISO - ISO 10365:1992 - Adhesives — Designation of main failure patterns”.
- Jia, Zhemin, David Hui, Guoqing Yuan, John Lair, Kin tak Lau, ve Fujun Xu. 2016. “Mechanical properties of an epoxy-based adhesive under high strain rate loadings at low temperature environment”. *Composites Part B: Engineering* 105:132–37.
- Jia, Zhemin, Guoqing Yuan, Xiaoping Feng, ve Yun Zou. 2019. “Numerical study on the mechanical behavior of a polyurethane adhesive under high strain rate”. *Composites Part B: Engineering* 158:131–40.
- Jia, Zhemin, Guoqing Yuan, Xiaoping Feng, Yun Zou, ve Jingyan Yu. 2019. “Shear properties of polyurethane ductile adhesive at low temperatures under high strain rate conditions”. *Composites Part B: Engineering* 156:292–302.
- Kanar, Belin. 2018. “Nanoyapı katkılı yapıştırıcıların ortam sıcaklığı ve termal çevrim altında kırılma davranışının incelenmesi”. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

- Kaya. 2004. “Ana Hatlarıyla Yapıştırıcılar”. İstanbul, Birsen Yayınevi, p. 240.
- Kayacan, R. 1988. “Yapıştırma ve Metal Bağlantılar İçin Yapıştırıcı Kullanımı”. Yüksek Lisan Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kinloch, A. J. 1987. Adhesion and Adhesives. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Kirkayak, Levent. 2019. “Yapıştırma bağlantılı kompozitlerde yapıştırma geometrisinin gerilme dağılımına etkisi”. Araştırma Makalesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İstanbul 25(1):27–33.
- Köksal, Hasan. 2013. “Yapıştırıcılı ve çok pimli kompozit plakaların analizi”. Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.
- Loctite. 1998. Worldwide Design Handbook. Loctite Corp.
- Ma, Peng Cheng, Naveed A. Siddiqui, Gad Marom, ve Jang Kyo Kim. 2010. “Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review”. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 41(10):1345–67.
- Machado, J. J. M., P. D. P. Nunes, E. A. S. Marques, ve Lucas F. M. da Silva. 2019. “Adhesive joints using aluminium and CFRP substrates tested at low and high temperatures under quasi-static and impact conditions for the automotive industry”. Composites Part B: Engineering 158:102–16.
- Mikhail I, Katsnelson. 2007. “Graphene : carbon in Carbon is one of the most intriguing elements in the Periodic Table .” Materialstoday 10(1):20–27.
- Özdemir, Yasin. 2018. “Nanoparçacık Katkılı Epoksi Esaslı Yapıştırıcıların Mekanik ve Termal Özelliklerinin Araştırılması”. Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Petrie. 1975. “Plastics and adhesives as adhesives”.
- Rafiee, Mohammad A., Javad Rafiee, Zhou Wang, Huaihe Song, Zhong Zhen Yu, ve Nikhil Koratkar. 2009. “Enhanced mechanical properties of nanocomposites at low graphene content”. ACS Nano 3(12):3884–90.

- Raju, Missak Swarup. 2013. "Infiltration Growth processing of YBCO nano-composites: shape forming, microstructural and magnetic studies".
- Rashad, Muhammad, Fusheng Pan, Aitao Tang, Yun Lu, Muhammad Asif, Shahid Hussain, Jia She, Jun Gou, ve Jianjun Mao. 2013. "Effect of graphene nanoplatelets (GNPs) addition on strength and ductility of magnesium-titanium alloys". *Journal of Magnesium and Alloys* 1(3):242–48.
- Rodríguez, R., B. Pérez, ve S. Flórez. 2014. "Effect of different nanoparticles on mechanical properties and curing behavior of thermoset polyurethane adhesives". Ss. 848–59 içinde *Journal of Adhesion*. C. 90. Taylor and Francis Inc.
- Rudawska, Anna, Magd Abdel Wahab, Dalibor Barta, ve Saugirdas Pukalskas. 2019. "The effect of technological and structural factors on the strength of polyethylene adhesive joints". içinde *Lecture Notes in Mechanical Engineering*.
- Saraç, İsmail. 2018. "Tek tesirli yapıştırma bağlantılarında epoksi yapıştırıcı içerisinde nanopartikül kullanılmasının bağlantının statik ve yorulma mukavemetine etkisinin araştırılması". Doktora Tezi, Batman Üniversitesi ,Fen Bilimleri Enstitüsü ,Batman.
- Şekercioğlu, Tezcan. 2012. "Metallerin Yapıştırılmasında Yüzey Hazırlama Yöntemlerinin İncelenmesi". *TMMOB MMO Mühendis ve Makine Dergisi*, cilt 53, sayı 627, s.43-50.
- Şenel, Mahmut Can. 2018. "Alüminyum-Grafen Kompozit Yapılarda Çekme Dayanımının, Aşınma Direncinin ve Mikroyapının İncelenmesi".
- Şenyurt, Muhammet Ali. 2017. "Grafen ve naylon 6.6 nano elyaf katkılı yapıştırıcıların alüminyum-karbon elyaf takviyeli kompozit levhaların yapıştırma bağlantılarına farklı sıcaklık koşulları altında etkisi". Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi,Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Shields, J. 1984. *Adhesives Handbook*. Butterworths.
- Şükür, Emine Feyza. 2019. "Korozif Ortamın Grafen Katkılı Bazalt/Epoksi Nanokompozitlerin Mekanik ve Aşınma Özelliklerine Etkisi". Doktora Tezi,Konya Teknik Üniveristesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

- Tek, Gökhan. 2011. “Tek ve Çift Tesirli Yapıştırma Bağlantılarında Gerilme Analizi”. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Temiz, Şemsettin. 2003. “Yapıştırma bağlantılarının mekanik özellikleri üzerine çevresel faktörlerin etkisinin incelenmesi”. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Vervaeke, R., S. Debruyne, ve D. Vandepitte. 2019. “Numerical and experimental analysis of vibration damping performance of polyurethane adhesive in machine operations”. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 90:47–54.
- Volkersen, O. 1938. “Die Nietkraftverteilung in Zugbeanspruchten Nietverbindungen mit Konstanten Laschenquerschnitten”. *Luftfahrtforschung* 15(1/2):41–47.
- Walock, J. 2012. “Nanocomposite coatings based on quaternary metal-nitrogen and nanocarbon systems”. *disertasi* 57–77.
- Wang, Zhong Lin. 2001. “Characterization of Nanophase Materials”. *Particle & Particle Systems Characterization* 18(3):142.
- Wei, Jiacheng ve Fawad Inam. 2017. “Processing of Epoxy/Graphene Nanocomposites: Effects of Surfactants”. *J Polym Sci Appl* 1–7.
- Wei, Kai, Yiwei Chen, Maojun Li, ve Xujing Yang. 2018. “Strength and Failure Mechanism of Composite-Steel Adhesive Bond Single Lap Joints”. *Advances in Materials Science and Engineering* 2018:1–10.
- Wu, S. 1982. “Polymer interface and adhesion”.
- Yagoub, S. 2015. “Taşıtlarda Kullanılan Yapıştırıcıların Mekanik Karakterizasyon Deneyleri ve Sonlu Elemanlar Analizi”. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, BURSA.
- Yıldırım, Mustafa. 2011. “Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların düşük hızlı darbe davranışları”. Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mehmet TONGUR
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : KONYA- 05.08.1989
Telefon : +90 554 743 07 00
Faks : -
E-Mail : mehmettongur@ahievran.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Çumra Anadolu Lisesi, Çumra, Konya	2008
Üniversite	: Atatürk Üniversitesi, Erzurum	2014
Yüksek Lisans	: Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya	2020
Doktora	: -	-

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2014-2018	Konya Şeker San. Ve Tic. AŞ.	Bakım-Onarım Mühendisi
2018-	Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Kaman MYO	Öğretim Görevlisi

UZMANLIK ALANI

YABANCI DİLLER

YAYINLAR