



T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Grafen ve Naylon 6.6 Nano Elyaf Katkılı Yapıştırıcıların Alüminyum-Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Levhaların Yapıştırma Bağlantılarına Farklı Sıcaklık Koşulları Altında Etkisi

Muhammet Ali ŞENYURT

YÜKSEK LİSANS

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2017

KONYA

Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Grafen ve Naylon 6.6 Nano Elyaf Katkılı Yapıştırıcıların Alüminyum-Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Levhaların Yapıştırma Bağlantılarına Farklı Sıcaklık Koşulları Altında Etkisi

Muhammet Ali ŞENYURT

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU
2. Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mürsel EKREM

2017, 145 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU
Prof. Dr. Ahmet AVCI
Yrd. Doç. Dr. Ali ÖZTÜRK

Bu tez çalışmasında, elektro-eğirme yöntemiyle naylon 6.6 (N6.6) nano elyaf ve N6.6 ağırlığınca % 1, % 3, ve % 5 Grafen Nano Partikül (GNP) takviye edilmiş N6.6 nano elyaflar üretilmiştir. Daha sonra Epoksi, N6.6 nano elyaf ve N6.6 ağırlığınca farklı oranlarda GNP takviye ederek üretilen N6.6 nano elyafla güçlendirilen yapıştırıcıların tek taraflı bindirmeli bağlantıları üretilmiştir. Yapıştırılan malzeme olarak Al 2024-T3 levha, diğer tarafta ise 5 katmanlı karbon elyaf takviyeli kompozit levhalar kullanılmıştır. Oluşturulan bağlantıların kayma dayanımlarına sırasıyla -20, 0, 23 (oda sıcaklığı), 50 ve 80 °C farklı sıcaklıkların etkisi incelenmiştir. Modifiyeli yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için tek taraflı bindirmeli bağlantısı ASTM D1002-10 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma şekil değiştirmeleri deneysel olarak ölçülmüştür ve sıcaklık değişimlerine göre etkileri karşılaştırılmıştır. N6.6 nano elyaf ve GNP ile takviye edilen N6.6 nano elyafların karakterizasyonu Fourier dönüşümlü infrared spektrometre (FT-IR), diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) ve taramalı elektron mikroskopisi (SEM) ile incelenmiştir. Epoksi yapıştırıcının güçlendirilmesinde kullanılan GNP'lerin dağılımı ile N6.6 nano elyaf ve farklı oranlarda GNP takviyeli nano elyaf numunelerin kırılma yüzeylerin morfolojisi makroskobik görüntüler ve SEM analizleri ile görüntülenmiştir. Ayrıca kırılma yüzeylerinin hasar mekanizmaları ile kırılma tokluğuna etki eden faktörler araştırılmıştır.

Tek taraflı bindirmeli yapıştırma bağlantılarında N6.6 nano elyaf ve ağırlıkça sırasıyla % 1,% 3 ve % 5 oranlarında GNP takviyeli N6.6 nano elyafla güçlendirilmiş epoksi yapıştırıcıların -20, 0, 23, 50, 80 °C'deki sıcaklıklardaki kayma dayanımları önemli ölçüde artmıştır. Bunlar içerisinden ağırlıkça % 3 GNP katkılı N6.6 nano elyaf ile güçlendirilmiş epoksi ile yapıştırılan tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma mukavemeti en fazla artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektro-eğirme, farklı sıcaklık, grafen, kayma dayanımı, nano elyaflar, tek taraflı bindirmeli bağlantılar, kriyojenik etki, yapıştırma bağlantıları

ABSTRACT

MS THESIS

Effect of Graphene and Nylon 6.6 Nanofiber Adhesion Adhesive Bonding Joints of Aluminum-Carbon Fiber Reinforced Composite Plates under Different Temperature Conditions

Muhammet Ali ŞENYURT

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Prof.Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU
Co-Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mürsel EKREM

2017, 145 Pages

Jury
Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU
Prof. Dr. Ahmet AVCI
Assoc. Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

In this thesis study, nylon 6.6 (N6.6) nanofibers and N6.6 nano fibers reinforced with 1%, 3%, and 5% by weight graphene nanoparticles (GNP) were produced by electro-spinning method. Then unidirectional twisted connections of N6.6 nano fiber reinforced adhesives produced by reinforcing Epoxy, N6.6 nano fiber and GNP at different ratios of N6.6 weight were produced. Al 2024-T3 plate was used as the adhesive material and 5 layers of carbon fiber reinforced composite plates were used on the other side. The effects of different temperatures of -20, 0, 23 (room temperature), 50 and 80 ° C were investigated on the shear strength of the formed links, respectively. The single-sided clamping connection for the determination of the mechanical properties of the modified adhesives has been carried out in accordance with the standard ASTM D1002-10. Slip shape changes of single-sided fastening connections were experimentally measured and the effects of temperature changes were compared. Characterization of N6.6 nanofibers and GNP reinforced N6.6 nanofibers were investigated by Fourier transform infrared spectrometry (FT-IR), differential scanning calorimetry (DSC) and scanning electron microscopy (SEM). The morphology of the fracture surfaces of N6.6 nano-fibers and GNP-reinforced nano-fiber specimens at different ratios were analyzed by macroscopic images and SEM analyzes of the distribution of GNPs used in strengthening the epoxy adhesive. In addition, fracture surfaces, damage mechanisms and factors affecting fracture toughness were investigated.

The shear strengths of N6.6 nano-fibers and N6.6 nano-fiber-reinforced epoxy adhesives with GNP-reinforced N6.6 nano-fibers at weights of 1%, 3% and 5% respectively at temperatures of -20, 0, 23, 50, 80 °C were significantly increased. Among them, the shear strength of the single-sided superimposed joints bonded with N6.6 nano-fiber reinforced epoxy with 3% by weight GNP is increased.

Keywords: Adhesive joint, cryojenic effect, different temperature, elektro-spinning, graphene, nano fibers, shear strength, single lap joint

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans Tez çalışmamın yapılmasında ve tamamlanmasında her türlü desteği ve yardımı esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Hayrettin DÜZCÜKOĞLU ve ikinci danışmanım Yrd. Doç. Dr. Mürsel EKREM'e minnet ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen; elektro-eğirme yöntemini öğrenmemde, test ve analizlerin yapılması ve yorumlanmasında yardımcı olan Prof. Dr. Ahmet AVCI'ya, elektro-eğirme yöntemi ile nano elyaf üretiminde ve solüsyonların hazırlanmasında, tek tesirli bindirmeli bağlantıların yapıştırılmasında kullanılmak üzere üretmiş olduğum karbon elyaf kompozitlerin üretimindeki yardımlarından dolayı Ahmet Caner TATAR'a bu teze yaptıkları katkılardan dolayı en içten duygularımla teşekkür ederim.

Ayrıca, bu çalışmanın yapılabilmesi için deney numunelerin temin edilmesi ve incelenmesi gibi konularda 16201082 nolu proje ile maddi destek veren Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne ve 215M777 nolu TÜBİTAK MAG 1001 projesine teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, her zaman yanımda olan ve benden desteklerini hiç esirgemeyen sevgili aileme ve tüm arkadaşlarıma en içten duygularımla teşekkür ederim.

Muhammet Ali ŞENYURT
KONYA-2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

1. GİRİŞ **1**

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **7**

2.1. Yapışma, Yapıştırıcı ve Yapıştırıcı Bağlantıları 20
2.1.1. Yapışma 20
2.1.2. Yapıştırıcı çeşitleri 23
2.1.3. Yapıştırma bağlantıları 26
2.1.4. Yapışma bağlantılarında oluşan gerilmeler 28
2.1.5. Yapışma teorileri 35
2.1.6. Tek taraflı bindirmeli bağlantılar 46
2.2. Termoplastik Malzemeler 49
2.2.1. Naylon 6.6 49
2.3. Nanoteknoloji 50
2.3.1. Nano elyaf 54
2.3.2. Nano elyaf üretim yöntemleri 55
2.3.3. Elektro-eğirme yöntemi parametreleri 66
2.3.4. Grafen nanopartiküller 66

3. MATERYAL VE YÖNTEM **68**

3.1. Elektro-eğirme Yöntemiyle Nano Elyaf Üretimi 69
3.1.1. Elektro-eğirme yöntemiyle naylon 6.6 nano elyaf üretimi 70
3.1.2. Elektro-eğirme yöntemiyle GNP + N6.6 nano elyaf üretimi 72
3.2. Vakum İnfüzyon Yöntemi İle Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Malzeme Üretimi 74
3.2.1. Karbon fiberlerin özellikleri 74
3.2.2. Kompozit malzeme üretimi 75
3.2.3. Kompozit levha kesme ve yüzey hazırlama işlemi 81
3.3. Alüminyum Levhalar ve Yüzey Hazırlama İşlemi 83
3.3.1. Alüminyum levhalar 83
3.3.2. Alüminyum levhaların yüzey hazırlama işlemi 84
3.4. Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantıların Yapıştırma İşleminin Yapılması 89
3.4.1. Tek taraflı bindirmeli bağlantının çekme testine göre boyutlarının belirlenmesi 89
3.5. Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantıların Çekme Deneyinin Belirlenmesi 96

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA **98**

4.1. N6.6 Nano Elyaf Özellikleri 98
4.1.1. N6.6 nano elyafların SEM görüntüleri 99
4.1.2. Grafen katkılı N6.6 nano elyafların FT-IR analizleri 101
4.1.3. Grafen katkılı N6.6 nano elyafların DSC analizleri 103
4.2. Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantıların Mekanik Özellikleri 106
4.2.1. 23 °C (oda sıcaklığı)'de kayma dayanımı 106
4.2.2. 50 °C sıcaklığında kayma dayanımı 108
4.2.3. 80 °C sıcaklığında kayma dayanımı 111
4.2.4. 0 °C sıcaklığında kayma dayanımı 114
4.2.5. -20 °C sıcaklığında kayma dayanımı 117
4.2.6. Farklı sıcaklığın etkisi 120
4.3. Kırılma Yüzeylerinin Analizleri 122

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 130

5.1 Sonuçlar 130
5.2 Öneriler 133

KAYNAKLAR 135

EKLER 141

ÖZGEÇMİŞ 145

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

cm	: Santimetre
°	: Derece
°C	: Derece santigrat
g	: Gram
GPa	: Giga Paskal
N	: Newton
K	: Kelvin
MPa	: Mega Paskal
m	: Metre
m^2	: Metrekare
μm	: Mikrometre
mm	: Milimetre
nm	: Nanometre
torr	: Torr
V	: Polimer sarım hızı
V_0	: Polimer çıkış hızı
Ra	: Ortalama yüzey pürüzlülüğü
Rz	: Ortalama pürüz yüksekliği
W	: Polimer Debisi
%	: Yüzde
τ	: Kayma gerilmesi
γ	: Kayma şekil değiştirmesi
σ	: Soyulma gerilmesi

Kısaltmalar

AC	: Alternatif Akım
AFM	: Atomic Force Microscope (Atomik kuvvet mikroskopu)
Al	: Alüminyum
ASTM	: American Society for Testing and Materials
ÇCKNT	: Çok Cidarlı Karbon Nano Tüp
DC	: Doğrusal Akım
DSC	: Differantial scanning calorimetry (Diferansiyel taramalı kalorimetri)
FT-IR	: Fourier dönüşümü infrared spektroskopi
GNP	: Graphene nanoplate (Grafen nanotabaka)
KET	: Karbon elyaf takviyeli
KNT	: Karbon Nano Tüp
KBB	: Kimyasal Buhar Biriktirme
MMNK	: Metal matrisli nanokompozitler
N6.6	: Naylon 6.6
PAA	: Fosforik asit anodizasyon
PA6	: Poliamid 6
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı elektron mikroskobu)
TGA	: Termogravimetrik analiz
T_g	: Camsı geçiş sıcaklığı

1. GİRİŞ

Günümüzde hızla gelişmekte olan teknolojiye son yıllarda hızla ayak uyduran ülkemizin havacılık ve uzay sektörü, otomotiv sektörü, savunma sanayi ve yerli üretim teknolojileri gibi sektörler başta olmak üzere verdiği büyük önem sayesinde çeşitli ar-ge çalışmaları sürekli bir ivme kazanarak artmakta ve devletimizin de bu konuda gayretleri oldukça fazladır. İşte tam da burada bize düşen görev ülkemizin çıkarları için gerekli ar-ge çalışmalarına katkıda bulunmayı hedeflemek bu hedefi gerçekleştirirken yerli üretime de katkı sağlamaktır.

Türk savunma sanayi son yıllarda yaptığı hamlelerle birçok alanda başarılı projeler gerçekleştirmeyi başarmıştır. Milli tank, milli uçak ve milli uydu projeleri devletin büyük kararlılığı ile devam ederek başarıya ulaşmaktadır. Türkiye'nin bölgesinde liderlik iddiasını artıracak ve ordunun gücünü katlayacak yerli milli projeler kararlı bir şekilde devam etmektedir. T129 Atak Helikopteri, T-155 Fırtına Obüsü, Altay Milli Tankı, Akya Milli Torpidosu, Milgem Milli Gemisi, Anka İnsansız Hava Aracı, Arma Zırhlı Muharabe Aracı, BMC Kirpisi, Cobra - Zırhlı Tekerlekli Aracı, Göktürk Milli Keşif Uydusu, Gözcü Mini İnsansız Hava Aracı, Hürkuş Eğitim Uçağı, İda (İnsansız Deniz Aracı), Kasırga Tr-300 Füzesi, Pars Zırhlı Muharebe Aracı gibi yerli projelerin bir kısmının üretimi başarıya ulaşarak hizmet vermekte ya da servis ömrü için son kontrolleri yapılmakta, bir kısmının ise ar-ge çalışmaları kararlılıkla devam etmektedir. Tüm bunlar yapılırken belki de en önemli unsurlardan birisi olan malzeme teknolojisi ve hammadde, üretimi varsa ülke içinden üretimi yoksa yurtdışından tedarik edilmektedir. Özellikle yukarıda bahsedilen teknolojilerin gövdelerinde kullanılan malzemeler kompozit malzeme ve nano teknoloji alanlarının da gelişmesiyle iyi derecede mekanik özellikler, elektrik iletkenliği ya da yalıtkanlığı, radyasyon koruması, UV ışınlara dayanıklı, iyi termal özelliklere sahip, aşınma ve yorulma ömürlerinin uzun olması gibi üstün özellikler sağlayan malzemelerden yapılmaktadır. Gövdelerin hem hafif hem esnek olması, mukavemet ve tokluk gibi mekanik özellikleri, çalıştıkları ortama göre termal dayanımı, servis ömürlerinin uzun olması gerekmektedir. Eski teknolojilerde gövdelerde işlenmiş metalik malzemeler kullanılmaktayken günümüzde kompozit malzeme teknolojisi ve nanoteknolojinin gelişmesiyle metalik malzemelerin yerini bu malzemeler almaktadır. Bağlantı elemanları olarak da genellikle ve halen de kullanılmakta olan perçin, cıvata v.b. bağlantı elemanları ve kaynak, lehim v.b. birleştirme yöntemleri kullanılarak günümüz teknolojisinde kompozit malzemelerin sağladığı hafiflik ve yukarıda sayılan üstün

özellikleri sayesinde alüminyum/kompozit, kompozit/kompozit ya da alüminyum/alüminyum malzemeler bir arada kullanılarak gövdelerin hem hafiflemesi hem de üstün özellikler sağlaması istenmektedir. Dolayısıyla birbirileri ile kombine edilmiş şekilde kullanılan bu tip bağlantılarda yapıştırma teknolojisinin gelişmesiyle perçin veya cıvata bağlantılarının yerine özellikle demonte edilmeyecek parçalarda yapıştırma teknolojisi kullanılmaya başlanmıştır.

Üretim maliyetinin düşük olması, hafiflik, üretim ve kullanım kolaylığı açısından bakıldığında yapıştırma teknolojisinin birçok avantaj sağladığı görülmektedir. Yapıştırma bağlantılarında kullanılan yapıştırıcılar kauçuk, plastik v.b. malzemelerden üretilmektedir. Yapıştırıcı, yapıştırılması istenen parçaları bir arada tutturmak için parçaların yüzeylerine uygulanan kimyasal bağlayıcı bir malzeme olarak tanımlanabilir. Yapıştırılacak olan malzemeler birleştirilirken yüzeyler arasında bir çekim meydana gelir. Bu çekimi ifade etmek için ise genellikle yapışma terimi kullanılır.

Yapıştırıcıların havacılık ve uzay sanayi, otomotiv ve inşaat sektörleri, elektrik-elektronik, deniz taşıtları, bio-medikal alan, spor ekipmanları v.b. yapı elemanlarının bağlantılarında kullanımı giderek artmaktadır. Özellikle bağlantı güvenirliliği ve kararlılığının uzun zaman periyotlarında sürekliliğini sağlaması gerektiği havacılık, uzay, otomotiv, altyapı sistemi, tıp, elektronik paketleme, spor, inşaat ve deniz endüstrilerinde kullanılan yapıştırıcılar, son zamanlarda geleneksel bağlantı yöntemleri olan cıvata, perçin, lehim ve kaynak yöntemlerinin yerini hızla almaktadır.

Hafif ve yüksek dayanımlı malzemelerin gelişmesiyle ortaya çıkan kompozit malzemeler son 20 yılda önemli ölçüde gelişmiştir. Bu gelişmeler sayesinde polimer matrisli kompozit malzemeler hava araçlarının birçok parçasında uygulama alanı bulmaktadır. Kompozit malzeme üretim teknolojisi ve kompozit malzeme teknolojisindeki bu atılımlar yapısal elemanlardaki birleştirme yöntemlerinde de daha etkili ve güvenilir uygulamaların kullanılması gerekliliğini doğurmuştur. Bu gerekliliğin sonucu olarak mekanik birleştirme yöntemlerinden uzaklaşılarak yapıştırma ile birleştirme yöntemlerine eğilim artmaktadır. Yapıştırıcıların kullanımının hızla artmasından dolayı başaralı bir yapıştırma yapmak için gerekli parametrelerin belirlenmesi ve bu parametrelerin optimum seviyesinin belirlenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla bu parametrelerin belirlenmesi ve geliştirilmesi için birçok araştırma geliştirme ve mühendislik çalışmaları yapılmaktadır.

Günümüzde endüstriyel sistemlerin ihtiyacı olan enerji tüketimini azaltmak için çeşitli yollar denenmektedir. Yakıtta tasarruf sağlamanın en önemli yöntemlerinden bir

tanesi de bu sistemlerin ağırlığını azaltmaktır. Sistem elemanlarını birleştirmek için kullanılan cıvata, perçin ve kaynak gibi geleneksel bağlantı yöntemlerinin yerine daha hafif bir bağlantı şekli olan yapıştırıcıların kullanımı sistemleri daha hafif hale getirmiştir (Kaya, 2004, Ekrem, 2015).

Metaller mükemmel mekanik ve dayanım özelliklerinden dolayı en fazla tercih edilen malzemelerdir. Hâlbuki metallerin tasarımı büyük oranda korozyondan dolayı sınırlıdır. Korozyon, metallerin çevresel faktörler etkisinde bozulması olarak tanımlanabilir. Yapısal uygulamalarda kullanılan metallerin çoğu, oksijenli ortamlarda korozyona eğilimlidir ve bu eğilim yüksek sıcaklıklarda daha da artar. Korozyona uğrama oranı sulu ortamlarda daha hızlanır. Çünkü su, korozyonda birincil süreç olan elektrokimyasal reaksiyonlar için uygun bir ortam sağlar. Bisikletlerden köprülere, kovalardan büyük savaş gemilerine bütün yapıların çalışma ömürleri korozyon nedeniyle azalmaktadır (Ashby ve Jones, 1980). Mekanik borularla akışkanın taşındığı bir sistemde, borular korozyona uğradığı zaman, hasarlı bölgenin incelenmesi ve onarımı için sistem durur. Hasar fazla değilse, genellikle onarım için kaynak tercih edilir ve kusurlu parça genellikle değiştirilir. Eğer hasar onarılamayacak kadar fazla ise, kusurlu parça kesinlikle değiştirilmelidir. Sistem onarım için dururken, zaman, işgücü ve onarım maliyeti gibi kayıplar oluşur. Ayrıca ekonomik kayıpların yanında kaynakla onarımda patlama gibi tehlikeler söz konusudur. Mesela kusurlu bölge su altında akışkan taşınan bir taşıma ağında ise, kaynak yapmanın zorluğu daha da artar. Su altında kaynak, gemi teknolojisi gibi zor ve uğraştırıcı çevre şartlarında kaynak yapabilen teknik eleman gerektirir. Bunun gibi kaynak yapmadaki zorluklar ve ekonomik sebepler, yeni ve alternatif bir birleştirme ve onarım metodunu zorunlu kılmıştır (Lian, 1998).

Yapıştırıcılar insanlığın erken çağlarından beri kullanılmaktadır, ancak bir asır öncesine kadar, büyük çoğunluğu kemikler, deriler, balık, süt, ve bitkiler gibi doğal ürünlerden elde edilirdi. Sentetik polimerlere dayalı yapıştırıcılar sadece 20. yüzyılın başında geliştirilmiş, fakat bunların kullanımları yüksek maliyet ve düşük mekanik özelliklerinden dolayı sınırlı kalmıştır. Crocombe ve Ashcroft (2008) tarafından tartışıldığı gibi, 1940'larda başlayan yapışma olayının anlaşılması için daha çok bilimsel yaklaşımın gerektiğini söylediler. Bu gelişme yeni yapıştırmaların gelişmesini sağladı ve sonrasında yataklardaki yük kapasitesini artırdılar (da Cruz ve ark., 2013).

Yapıştırma teknolojisi endüstriyel anlamda yeni kullanılmaya başlanmış olsa da aslında yapıştırma için kullanılan yapıştırıcı malzemeler M.Ö. 4000 yıllarına kadar dayanmaktadır. Yapıştırıcının tarihçesi için başvurulan kaynaklarda yapıştırıcı

maddelerle ilgili ilk yazılı kayıtlarsa MÖ 2000'li yıllara ait, hayvansal yapıştırıcıların hazırlanışıyla ilgili olan yazılı kayıtlardır. Roma dönemine ait, MÖ 1500-1000 yıllarına ait kimi kayıtlardaysa yapıştırıcı maddenin hazırlanışından çok yapıştırma yöntemleri üzerinde durulurken aynı döneme bazı duvar resimlerinde de ağaç yapıştırmaya yönelik tekniklerin uygulanışı ayrıntılı bir biçimde resmedildiği görülmektedir. Araştırmaların ortaya koyduğu bir başka gerçek de benzer tekniklerin ve hayvansal yapıştırıcıların aynı dönemde eski Mısır'da özellikle kral tabutlarının hazırlanışı sırasında kullanılıyor olduğudur. Yapıştırıcının tarihçesi detaylarında MS 500'lü yıllarda ahşap işleme sanatının ve ağaç kakmacılığının iyi örneklerinin veren Roma ve Yunanlılarda yapıştırıcıların ve yapıştırma tekniklerinin ilerlediği görülmektedir. Dönemin ustaları, o güne değin bilinen yapıştırıcıların yanı sıra balık yağından yumurta akına, kan, kemik ya da deriden süt, peynir ya da çeşitli tahıllara hatta çeşitli sebzelere kadar pek çok bitkisel ve hayvansal maddeyi kullanarak yapıştırıcı elde etmişlerdir. Hatta ilk kez katran ve balmumu kullanarak gemilerde sızdırmazlığı (su yalıtımını) sağlayanlar da Romalılardır. 18. yüzyıla gelindiğinde, yapıştırıcıların önemli bir endüstriyel ürün haline geldiği görülmektedir. Hammadde olarak hayvan derisini kullanan ilk yapıştırıcı fabrikası da yüzyılın başlarında Hollanda'da açılmıştır. Bu alandaki ilk patentse 1750'li yıllarda İngiltere'de balık tutkalı üreten bir firmaya verilmiştir. Bunu bitkisel kauçuktan kemiğe, nişastadan süte kadar farklı hammaddelerden elde edilen yapıştırıcılar için alınan patentler izlemiştir. 1900'lere gelindiğinde özellikle sanayileşmiş ülkelerde açılan pek çok fabrika üretime geçmiştir.

1900'lü yıllardan bu yana bitkisel esaslı yapıştırıcılar, kâğıt gibi gözenekli yüzeye sahip malzemelerin yapıştırılmasında kullanılırken, yaklaşık 50 yıl öncesine kadar hayvansal esaslı yapıştırıcılar, daha çok kullanılmaktaydı. Örneğin kasein yapıştırıcılar, I. Dünya Savaşı'nda ahşap uçak kontrüksiyonları için kullanılmış, ancak bu tip yapıştırıcıların neme karşı düşük mukavemet ve dirence sahip oldukları görülmüştür. Doğal ürünlerdeki gibi sınırlamaları olmayan ve metal malzemeleri metal olmayan gözeneksiz malzemelere bağlayabilen sentetik reçinelerin gelişmesinden dolayı, son zamanlarda endüstriyel alanlarda yapıştırıcıların kullanımında ivmeli artış meydana gelmiştir. Tarihte üretilen İlk sentetik reçine, kereste parçalarının birbirlerine yapıştırılmasında kullanılan fenol formaldehittir. II. Dünya Savaşı sırasında savaş uçakların gövdelerindeki yapısal metalik malzemelerin birleştirilmesi fenolik reçineler ve epoksi reçinelerin kullanılmasıyla havacılık alanında yapıştırıcılar önemli bir yer edinmiştir. Bu sayede yapılan ar-ge çalışmaları hızlanmış, gün geçtikçe dayanım ve şekil

değiştirme kabiliyeti artırılıp ve yorulma dayanımları da iyileştirilerek servis ömürleri uzatılmıştır. Bunun yanında gün geçtikçe titreşim sönümleme kabiliyeti fazla olan ve daha esnek özelliklere sahip olan daha iyi yapıştırıcılar ve yapışma bağlantıları elde edilmiştir (Şekercioğlu, 2001, Ekrem, 2015).

Denizcilik Araştırma Kurumu tarafından rapor edilen bazı araştırmalara göre, İngiltere'de Kuzey Denizi açıklarında su altında yapıştırıcı kullanılarak çelik yapılar onarılmıştır (Bowditch ve ark., 1987, Ekrem, 2015). Bu tarz yapıştırıcı kullanarak yapılan onarımlarda yapıştırıcı kullanılmadan önce, hem sadece yapıştırıcının bulk (yapıştırma malzemesini çekme numunesi halinde üreterek çekme testinin yapılması ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi) testini yapmak gerekir hem de bağlantıdaki yapıştırıcının mekanik özelliklerine, çevre ve ortamın etkilerinin iyi bir şekilde araştırılması ve bilinmesi gerekir. Aksi halde su altında yapılan yapıştırıcı ile birleştirme bağlantılarının nasıl davranış göstereceği saptanamaz.

Yapıştırıcılar, yüzeylere sürülüp katılaştırıldığında parçaları birbirine bağlama özelliğine sahiptir. Yapıştırıcılar birkaç farklı şekilde sınıflandırılabilir. Form açısından; tek bileşenli sıvı yapıştırıcılar, iki bileşenli sıvı yapıştırıcılar, film yapıştırıcılar ve köpükler gibi fiziksel hallerine göre sınıflandırmayı; metal-metal yapıştırıcılar, kâğıt yapıştırıcılar ve ahşap yapıştırıcılardır. Bu malzemeye göre sınıflandırmaktır. Epoksi yapıştırıcılar, siyanoakrilit yapıştırıcılar ve polikloropen yapıştırıcılar da kimyasal formlarına göre sınıflandırmaya birkaç örnektir. Yapıştırma şartlarına göre sınıflandırmaya ise çözücü ile katılaşan yapıştırıcılar, soğuk katılaşan yapıştırıcılar ve erimiş durumda uygulanan ve soğuyup sertleştiğinde yapışma sağlayan (hot-melt) yapıştırıcılar örnek gösterilebilir (Kinloch, 1987).

Yapıştırma bağlantıları, kullanılmadan önce bağlantı yapılacak koşullar iyi bir şekilde analiz edilmelidir. Bağlantının mukavemeti, maruz kalacağı yüke, uygun yapıştırıcı seçilmesine, yapıştırıcıya ait özelliklere, yapışma yüzeylerinin ön işlemlerine ve yapışma işleminin sağlıklı yapılıp yapılmadığına bağlıdır.

Bu çalışmanın ana amacı, elektro-eğirme yöntemiyle üretilen naylon 6.6 (N6.6) nano elyaf ve ağırlıkça %1, % 3, ve % 5 GNP' ler ile takviye edilmiş N6.6 nano elyafların yatırıldığı epoksi yapıştırıcı ile bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma gerilmesi çekme testi ve farklı sıcaklıkların etkisi incelenmiştir. Yapıştırıcı olarak epoksi reçine (DiGlisidil Eter Bisfenol A-DGEBA) ve yapıştırılan malzeme ise Al 2024-T3 ve karbon elyaf/epoksi kompozit levhalar kullanılmıştır. Modifiyeli yapıştırıcının mekanik özelliklerinin belirlenmesi için ASTM D1002-10 standardına göre tek tesirli bindirmeli

bağlantılar çekme testlerine maruz bırakılmıştır. Bu deneyler sonucunda N6.6 nano elyafların ve N6.6 nano elyafların kayma gerilmelerin farklı sıcaklıklar altındaki etkileri araştırılmıştır.

Ayrıca, N6.6 nano elyafların ve GNP takviyeli N6.6 nano elyafların karakterizasyonu Fourier dönüşümlü infrared spektrometri (FT-IR), diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve taramalı elektron mikroskopisi (SEM) analizleri ile incelenmiştir. Kırık yüzeylerin morfolojisi taramalı elektron mikroskobuyla (SEM) ile numunelerin kırılma yüzeyleri araştırılmıştır.

İkinci bölümde yapmış olduğumuz tez çalışmamız için kaynak araştırması yapılarak ilgili literatür özetleri ve teorik esasları aşağıda maddeler halinde verilen başlıklar ve bunların alt başlıkları altında sunulmuştur.

a) Yapışma, yapıştırıcı ve yapıştırma bağlantıları

b) Termoplastik malzemeler

c) Nanoteknoloji

d) Elektro-eğirme yöntemiyle nano elyaf üretilmesi

e) Grafen nano partiküller

Üçüncü bölümde epoksi reçine, elektro-eğirme yöntemiyle üretilen naylon 6.6 (N6.6) nano elyaf ve ağırlıkça % 1, % 3, ve % 5 oranlarında GNP'ler ilave edilmiş N6.6 nano elyafların üretimine ait gerekli olan malzemeler, bu malzemelerin özellikleri ve yapılan üretim yöntemleri ortaya koyulmuştur. Üretilen nan elyaflarla güçlendirilmiş tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma gerilmesi, kayma birim uzaması ve kırılma yüzeyleri bu bölümde incelenmiştir. Aynı zamanda tek taraflı bindirmeli bağlantıların farklı sıcaklıklar altında da çekme testleri yapılarak yapıştırma bağlantılarına farklı sıcaklıkların etkisi incelenmiş ve sonuçlar ortaya konmuştur. Dördüncü bölümde ise elde edilen sonuçların nedenleri ortaya koyularak tartışılmış ve değişikliklere neden olan mekanizmalar ortaya konulmuştur. Son olarak bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlara binaen ileride çalışmanın genişletilmesi açısından neler yapılabileceği açıklanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Havacılık ve uzay, otomotiv, savunma sanayi gibi birçok önemli alanda kullanılmaya başlayan yapıştırma teknolojisinin önemi gün geçtikçe hızla artmaktadır. Yapışrıcıların birçok çalışmaya konu olmasının sebebi sağladığı üstün avantajlarıdır. Bunlardan biri de uçak gövdelerinde birbiri ile kaynak bağlantısı olamayacak parçaların yapıştırma teknolojisi ile birleştirilebilmesidir. Bunun yerine kullanılan perçin-cıvata bağlantılarında gerilme yığılması ve fazladan ağırlık meydana gelirken yapıştırma ile birleştirilmiş parçalarda hem gerilme homojen bir şekilde dağılmış olmakta hem de fazladan yük olayı ortadan kalkmaktadır.

Yapıştırma işleminde de yapıştırıcı ile yapıştırılan malzemelerin arayüzeylerinde meydana gelen dengesizlik ve karmaşık geometri, yapıştırıcı ile birleştirilmiş yapıştırma bağlantılarının analizini zorlaştırmaktadır. Bu da bazı problemlerin önceden öngörülmesini ve tasarımı zorlaştırmaktadır. Bu sebeple yapıştırıcı ile birleştirilmiş yapıştırma bağlantılar birçok bilim adamı ve araştırmacıların çalışma konusu olmaktadır. Genellikle bu alanda yapılan araştırmalarda analitik, deneysel ve nümerik yöntemler kullanılmaktadır (Ekrem, 2015).

Shields (1974) tarafından yayınlanan kitapta yapıştırma işleminin tanımlaması, avantajları, dezavantajları, yapıştırıcı malzemeler ve özellikleri, yapıştırılacak malzeme özellikleri, yükleme şekillerinin etkisi vs. konulara yer verilmiştir.

Kinloch (1987) tarafından yapışma olayı açıklanırken kullanılan teoriler irdelenerek, yapışma olayının tek bir teori ile açıklanmasının mümkün olmayacağı anlaşılmıştır. Yapışmanın ancak birkaç teorinin bir araya gelmesiyle meydana geldiğini belirtmiştir. Yapıştırılan malzemelerin yapıştırma öncesi yüzey hazırlığı ve yapıştırıcı kürleşme mekanizmaları hakkında bilgiler vererek bu alana ışık tutmuştur. Ayrıca yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışları ve kırılma mekaniği hakkında açıklamalar yapmıştır. Yapıştırma bağlantılarının statik ve dinamik yükleme durumları hakkında bilgiler verilmiştir.

Yapıştırma prosesine başlarken, yapıştırıcının birleştirilecen malzemelerin yüzeylerinde iyi bir temasının sağlanması için yapıştırıcı sıvı formda olmalıdır. Yapıştırmada iyi bir temasın sağlanmasına ıslatma ya da yayılma denir. Yapıştırıcı malzeme, birleştirilen malzemelerin yüzeyini iyice ıslattıktan sonra katı forma geçer. Yapıştırıcının sıvı halden katı hale dönüşmesi, çözücünün uçması, yapıştırıcının soğuması ya da kimyasal reaksiyonlarla sağlanır (Bowditch ve ark., 1987).

Yapıştırma bağlantıların mühendislik uygulamalarındaki mekanik birleştirmelere ve alışılmış mekanik bağlantılara (cıvata, perçin v.b.) karşın birçok avantaj sağlaması alternatif olarak kullanılmasını artırmaktadır. Kompozit parçaları böyle yapıştırma yöntemi ile birleştirmek için epoksi gibi polimer yapıştırıcılar yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit parçaları birleştirmek için yapıştırıcı kullanımı, düşük maliyet, ağırlık oranına göre yüksek mukavemet, düşük stres konsantrasyonu, daha az işlem gereksinimleri ve üstün yorulma direnci ve çevre direnci gibi birçok avantaj sağlamaktadır (Hsiao ve ark., 2003) .

Yukarıdaki konuya atıfta bulunan Vietri ve ark. (2014) epoksi/nanoyapılı karbon formlarına dayalı yeni yapıştırıcı formulasyonları geliştirmeyi amaç edinmişlerdir. Havacılık yapıştırıcıları olan epoksi reçine geliştirmek için farklı tiplerdeki nano takviyeler epoksi matriks içerisine dağıtılmıştır. Buharla biriktirilmiş karbon nanofiber takviyeli bu yapıştırıcılar kompozitleri birleştirmek için kullanılmıştır. Alından birleştirimiş ve tek tesirli bindirmeli çekme test numuneleri farklı birleştirme konfigürasyonlarının mekanik mukavemet ve yapışma özelliklerini ölçmek için hazırlanmıştır. İçerisinde karbon nano takviyeler ihtiva eden epoksi yapıştırıcıların tek tesirli bindirmeli bağlantıların kayma testinde kırılma modunu değiştirerek birleşme noktalarındaki yapıştırma kuvvetlerinin önemli ölçüde artmasına sebep olduğunu gözlemlemişlerdir. Karbon nano-takviyeler ağırlıkça % 1.37'den % 5'ye doğru arttıkça yapıştırma performansının da önemli ölçüde değiştiği gözlemlenmiştir. Yapıştırma performansının önemli ölçüde değişimi ağırlıkça % 1.37'den % 5'e doğru artan karbon nano-takviyelerin ağırlık fraksiyonu olarak gözlemlenmiştir. Nano-takviye ve yapıştırma yüzeyleri arasındaki yapışma Taramalı Elektron Mikroskobu vasıtasıyla incelenmiştir.

Gültekin ve ark. (2016) çalışmalarında tek tesirli bindirmeli bağlantılarda dört farklı yöntem kullanarak yapışkana nanopartikül ekleyerek elde edilen nanokompozit yapıştırıcının çekme mukavemetini deneysel olarak belirlemeyi hedeflemişlerdir. Çalışma için, malzeme olarak AA2024-T3 alüminyum alaşımı, nanoyapı olarak grafen ve yapışkan olarak DP460 sıvı yapısal epoksi kullanılarak birleştirilmiş tek tesirli yapıştırma bağlantılarını üretmişlerdir. Deneylerden elde edilen hasar yükünü incelediklerinde, nano takviye yöntemlerinin yapıştırma bağlantılarının hasar yükü ve standart sapmanın üzerinde büyük etkisi olduğu literatürde gösterilmesine rağmen, bu çalışmada yapıştırma bağlantılarının hasar yükünü artıran ve standart sapmayı minimize eden yeni bir metod geliştirmişlerdir. Bu geliştirmelerin yapıştırma bağlantılarının güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini artırdığını belirtmektedirler.

Yu ve ark. (2009), çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNTs) takviye edilmiş epoksi yapıştırıcı ile bağlanmış alüminyum bağlantıların nemli ortamlarda mekanik davranışını ve dayanıklılıklarını incelemişlerdir. Benzer bir şekilde Hsiao ve ark. (2003) MWCNT takviye edilmiş epoksi yapıştırıcılar ile karbon grafit elyaflı epoksi kompozitleri yapıştırmış ve mekanik dayanımını incelemişlerdir.

Bunun yanında bazı araştırmacılar da benzer olmayan karbon elyaf epoksi kompozitler ile alüminyum alaşımları nanokatkılı epoksi yapıştırıcılar ile yapıştırarak yapışma özelliklerini incelemişlerdir (Meguid ve Sun, 2004). Bu üç çalışmanın her birinde de sonuç olarak, yapıştırcı içinde homojen olarak dağılmış CNTs takviyesi ile bağlanma mukavemeti, young modülü ve yapıştırıcı nihai gerilme mukavemetini artırmanın mümkün olduğu bulunmuştur.

Sydlik ve ark. (2013) multipl kovalent fonksiyonelleştirme metodu ile üç farklı tip çok duvarlı karbon nanotüp katkılı epoksi (EpCNT) hazırlamışlardır. EpCNTs kovalent fonksiyonalizasyonu teyit etmek için termogravimetrik analizi (TGA), kızıl ötesi spektroskopi (FTIR) ve raman spektroskopisi ile karakterize etmişlerdir. Yapışkan özelliği farklı kimyaları etkisi ağırlıkça % 0.5, 1, 2, 3, 5 ve 10 olarak fonksiyonelleştirilmiş ve fonksiyonelleştirilmemiş çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) kullanarak saf ticari epoksi (Hexion formülasyon 4007) ile karşılaştırılmıştır. ASTM D1002 test cihazı kullanılarak yapılan teslerde ağırlıkça % 1 katkılı EpCNT'nin kayma mukavemeti saf epoksiden % 36 ve modifiye edilmemiş % 1 MWCNT katkılı kontrol numunesinden ise % 27 oranında arttığını gözlemlemişlerdir. Yapışkan mukavemetindeki artışın sebebini açıklamak için alınan SEM görüntüleri, EpCNT birleştirilmesi ve gömülü CNTs yerinde çatlak cephesinde bir sapma ile birlikte kırılma yüzey morfolojisinde bir değişim olduğunu ortaya koymuşlardır. Reolojik çalışmaları sayesinde, doğrusal olmayan bir viskozite ve DSC sertleşme çalışmaları artan CNT konsantrasyonu ile sertleşme kinetiklerinde bir değişiklik olduğunu ve bu etkilerin EpCNT için daha belirgin olduğunu göstermişlerdir.

Adams ve ark. (1992) sıcaklık etkisinin sıcaklık ve kürleşmeden dolayı bağlantıdaki büzülme ya da uyumsuzluğa bakılmaksızın birleştirme bağlatılarının gerilme durumlarında önemli değişikliklere sebep olduğu göstermişlerdir. Aynı zamanda, polimerik yapıştırıcıların stres/ gerinim özellikleri sıcaklık ile değiştiğini ve bu faktörlerin birleşik etkisini, tek tesirli bindirmeli bağlantıların mukavemetlerindeki değişimlerle göstermişlerdir.

Da Cruz ve ark. (2013) çalışmalarında epoksi yapıştırıcılar içerisinde grafen dağılımı ve bunların UVA ışığına maruz bırakılarak yaşlandırılmasının etkisi incelemişlerdir. Bu amaca ulaşmak için, iki yaklaşım kullanmışlardır. İlkinde nano takviyeli AR300 / AH15 numuneleri dört yüz saat UV ışığına doğrudan maruz bırakmışlardır. Yaşlanma sürecinin ardından nanoindentation testlerini gerçekleştirmişlerdir. İkinci yaklaşımları ise yaşlandırılmış tek tesirli bindirmeli bağlantıların (SLJ) çekme deneylerine dayanmaktadır. Numunelerin hiç birinin sertliği üzerinde bir azalma olmadığı için AR300/ AH15 nano katkılı yapıştırıcıların içerisine katılan grafenlerin yaşlandırma prosesini engellediğini gözlemlemişlerdir. Nanoindentation tarafından elde edilen kuvvet- deplasman eğrileri ayrı yolda ortaya konan eğrilerin büyük çoğunluğu iyi bir dağılma prosesinin olduğunu göstermektedir. Sırasıyla yüz saat yaşlandırılan tek tesirli bindirmeli bağlantıların test sonuçlarında yatak-yükleme kapasitelerinde ağırlıkça % 1'de % 40.96 ve % 2'de % 72.03 artış gözlemlemişlerdir. Yaşlandırılmamış AR300/ AH15 tek tesirli bindirmeli bağlantılardan sırasıyla % 27.03 ve % 58.19 daha yüksek yükleme kapasitesine sahip olmasına rağmen yaşlanma iki yüz saate ulaştığında yüz saat yaşlandırmanın sonuçlarıyla karşılaştırıldığında yük kapasitesi üzerinde bir azalma meydana gelmekte olduğunu gözlemlemişlerdir. 400 saat sonra, sırasıyla % 1 ve % 2 grafen için diğer bir yük taşıma kapasitesi ile ilgili bir artış, yani, % 32.06 ve % 74.43'lük bir artış olduğunu ortaya koymuşlardır. Bir sonlu eleman simülasyonu ile yapıştırıcı kenarında soyma ve kesme gerilmelerinin % 82 arttığını ortaya koymuşlardır. FTIR testi ile bu davranışın sebebinin hidroksil, karbonil ve epoksi bileşenleri üzerinde meydana gelen kimyasal değişimlerin olabileceğini gösterdiğini ileri sürmüşlerdir. Epoksi yapıştırıcılar içerisindeki grafen dağılımı bir yandan yapıştırıcı bağlantılarının kapasitesini artırırken diğer yandan da UVA ışığının yaşlanma etkisini engelleyerek iki yönlü bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuşlardır.

Oh ve ark. (2014) bu çalışmada, kompozitlerin arayüzey yapışmasını artırmak için elekrospin kullanılarak meta-aramid nanofiberler ile epoksi karışımının bir çekirdek/ kabuk yapısı hazırlamışlardır. Meta-aramid/ epoksi nanofiberlerin çekirdek / kabuk yapısını, alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ve transmisyon elektron mikroskopisi (TEM) ile karakterize etmişlerdir. Nanofiberlerdeki kimyasal bileşiminin incelenmesi için X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) ve Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) gerçekleştirmişlerdir. Meta- aramid nanofiber takviyeli yapıştırıcı kullanarak metal- metal birleştirmelerdeki yapışma mukavemetini

değerlendirmek için tek tesirli bindirmeli bağlantı testi uygulanmıştır. Elektrospin yöntemi ile yerinde nano-arayüz çekirdek/ kabuk yapısı oluşumu yoluyla meta-aramid/ epoksi üretmek için kullanılan takviyeli epoksi yapıştırıcının yapışma mukavemetinde bir gelişme elde etmişlerdir.

Prolongo ve ark. (2009) bu çalışmalarında karbon fiber- epoksi tabakalı kompozitlerin yapıştırmasını çalışmış ve yapıştırıcı olarak da epoksi kullanmışlardır. Epoksi yapıştırıcıların, mekanik ve elektrik özellikleri artırmak için karbon nanofiberler (CNFs) ile modifiye etmişlerdir. Ayrıca, kum püskürtme, sıyırma katının ve plazma gibi farklı yüzey işlemleri, uygulamışlardır. Nihai dönüşüm hala yüksek olmasına rağmen CNFs ilavesi, epoksi yapıştırıcının kür reaksiyonunu yavaşlatmakta olduğunu gözlemlemişlerdir. Laminat yüzeyinin üzerindeki nano güçlendirici yapıştırıcıların temas açısının düzgün epoksi reçinesinden daha düşük olduğunu gözlemlemişlerdir. Ancak, ıslanabilirlik bu artışın pek tur kesme mukavemetini güncellenmiştir. Plazma işlemi, belirgin ortak gücü artırılması, laminat yüzey enerjisinin önemli bir artışa neden olur. Bu çalışmada test edilen yapışkan eklemlerin kırılma mekanizmaları laminat uygulanan yüzey işlemleri üzerinde kuvvetle bağlıdır.

Bu çalışmada, kompozit yapıştırmalar nano takviyelerle güçlendirilmiş yapıştırıcılarla yapıştırılarak birleştirilmiş tek tesirli bindirmeli bağlantıların performansları üzerinde yüksek yükleme oranlarının etkileri sistematik olarak incelenmiş ve statik ve yarı-statik sonuçlarına göre karşılaştırma yapılmıştır. Karbon/ epoksi ve cam/ epoksi üzerine yapışmış bağlar 1.5 ve 3 mm/ dk'lık çekme yüklerine ve 2.04E + 5 mm/ dk'lık çok yüksek yükleme hızına tabi tutuldu. Yüksek yükleme hızı testleri, özel olarak tasarlanmış bir darbe yük aktarma aparatı ile donatılmış, modifiye enstrümental bir sarkaç kullanarak gerçekleştirildi. Yüksek yük oranı testlerinin sonuçları, yapışkan/ birleştiricilerin yükleme hızındaki hassasiyetini ve nano takviyenin olumlu etkisini ortaya koydu. Toplamda, artan yükleme oranları ve nano takviye ile yapıştırıcının genel sertliği ve mukavemeti arttı. Birkaç durumda nano takviyesinin etkisinin yükleme hızının etkisini de üstesinden geldiği, aynı nano parçacık miktarındaki küçük artışların bile aynı epoksi reçine tabanını kullanarak yüklenme oranındaki muazzam artışı aşabileceği anlamına geldiği anlaşıldı. Gözlenen hasar mekanizmaları taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile incelendi (Soltannia ve Taheri, 2013).

Sayman ve ark. (2015) yaptıkları bir çalışmada, tek eksenli statik gerilme yüklemesinde tek katlı yapışkanla birleştirilen kompozit-kompozit yapıştırma bağlantılarının son darbe sonrası hasar tepkilerinin değerlendirilmesi, mevcut deneysel

çalışmalarının asıl amacı olmuştur. İlk olarak, farklı sıcaklıklarda (-20, 0, oda sıcaklığı, 50 ve 80 °C) çeşitli enerji seviyelerine (10, 15, 20 ve 25 J) sahip eksenel çekme darbeleri gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra, numuneler, ikincil olarak, ortam sıcaklığında statik çekme yüklemesine tabi tutuldu, böylece farklı yükleme koşullarında gerçekleştirilen darbelerden kaynaklanan birleşme mukavemetlerinde düşüşler değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak, herhangi bir yükleme durumunda yapılan eksenel darbelerin her birinin, nihai mukavemet kuvvetleri üzerinde, hareket etme durumuna orantılı olarak belirgin bir etkisi olduğunu kanıtlamışlardır. Ayrıca, yüksek enerji ve sıcaklık kombinasyonu bazen eksenel statik testler yapmadan anında ortaya çıkan etki, hasarın nedeni olarak görülüyordu. Uygulandığında, oda sıcaklığından enerji ve / veya mutlak fark artar, daha düşük yapıştırma direnci, ikincil gerilme testleri sırasında ölçülebilir olduğunu ortaya koymuşlardır.

Sayman ve ark. (2013) bir çalışmalarında, deneysel yöntem ile bir yapıştırıcı ile yapıştırılmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların yük-taşıma kapasitelerini incelemişlerdir. Yapıştırılan malzeme olarak cam fiber-epoksi kompozit malzemeler kullanmışlardır. Kompozit malzemeler vakum destekli reçine infüzyon metodu (VARIM) ile üretmişlerdir. Yapıştırıcı malzeme olarak Loctite 9466 A&B2 kullanmışlarıdır. Bu deneysel çalışmada, iki farklı yüzey (sert ve yumuşak yüzey), dört farklı sıcaklık (-20, 23, 50 ve 80 °C) ve dört farklı darbe enerjisi (5, 10, 15 ve 20 J) düşünmüşlerdir. Sonuçlar gösterdi ki sıcaklık arttığında ya da azaldığında, yapıştırma bağlantılarında düşüş meydana gelmekte ve yumuşak yüzeyliye göre sert yüzeylide yüksek mukavemet sağlamaktadır. Yük- taşıma kapasiteleri 5, 10 ve 15 J'de düşerken 20 J'de artmış olduğunu ortaya koymuşlardır.

Akderya ve ark. (2016), Fiber/epoksi kompozit tek taraflı bindirmeli yapıştırma bağlantılarının üç farklı sıcaklıkta termal yaşlanmanın bağlantılarındaki çekme özelliklerine etkisini bulmak için deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Öncelikle yapıştırma bağlantı numuneleri -18 °C, 25 °C ve 70 °C sıcaklıklarda termal yaşlandırma yapılmıştır. Sonrasında tek taraflı bindirmeli bağlantılara farklı enerjilerde (5, 10, 15, 20, 25 ve 30J) serbest düşüş darbe testi uygulanmıştır. Termal yaşlanmanın ve serbest düşüş darbe testinin çekme özelliği üzerindeki etkisini belirlemek için -18 °C, 25 °C ve 70 °C üç farklı sıcaklıkta çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlardan -18 ° C'deki termal yaşlanmanın yapıştırma bağlantılarının yük taşıma kapasitesini arttırdığını, bağlantılara uygulanan darbeleri azalttığını tespit etmişlerdir. Buna ek olarak -18 °C ve 70 °C'deki çekme testlerinde yapıştırma bağlantılarının hasar yüklerinde düşüş gözlemlemişlerdir.

Kompozit malzemeler günümüzde taşıma endüstrisinde kullanılmaktadır. Ghanbari ve ark. (2016), kompozit malzemelerin birleştirilmesi hem yapıştırma bağlantıları ile hem de diğer mekanik birleştirmeler ile gerçekleştirmişlerdir. Yapıştırma bağlantısı kullanımları kolay olduğu, ışık geçirmeyen ve gerilme konsantrasyonu ki tasarım için çok önemli, diğer bağlantı yöntemlerine göre daha çok öne çıkarak daha çok olanak sunmakta olduğunu belirtmişlerdir. Vakum yardımlı reçine infüzyon metodu (VARIM) ile üretilen örgü kumaş cam fiber/epoksi kompozit malzemeler yapıştırmada kullanılmıştır. Yapıştırıcı olarak FM73 epoksi film yapıştırıcı ve DP-460 tutkal yapıştırıcılar kullanılmıştır. Çeşitli yükleme şartlarında, 5, 10 ve 15J mümkün olan gerçekleşecek servis ömrü göz önünde bulundurmuşlardır. Bu testler oda sıcaklığı (25 °C), 50 °C ve 80 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, farklı yapıştırma tiplerinde ve sıcaklıklarda tek taraflı bindirmeli bağlantıların yükleme-taşıma kapasitelerindeki değişiklikleri elde etmişlerdir.

Düşük sıcaklıkta farklı gerinim oranlarına tabi olan bir polimer esaslı yapıştırıcının gerilme özellikleri araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, gerilme hızının artması ve sıcaklığın azalması ile yapışkan mukavemetinin belirgin şekilde arttığını gösterdi. Sonuçlara göre, düşük sıcaklıkta (<40 ° C) yapışkan mukavemeti ve yüksek gerinim hızı, oda sıcaklığında ve aynı gerinim oranı ile karşılaştırıldığında artmaktadır. Gerinim hızının ve düşük sıcaklığın yapıştırıcının mukavemeti üzerindeki etkisi basitçe üstüste binmekle kalmaz. Bu arada gerilme hızı ve düşük sıcaklık ile gerilme mukavemeti, kırılma gerilmesi, Young modülü ve kırılma enerjisine bağlanma etkileri de bu makalede tartışılmaktadır. Yüksek gerilme hızında ve düşük sıcaklıktaki yapışkan bir yapışma modeli önerilmiştir (Jia ve ark., 2016).

Karbon nanotüpler (CNTs) ile güçlendirilmiş epoksi yapıştırıcılar geliştirilmiştir. CNT' lerin epoksi matriks içindeki dağılımı, transmisyon elektron mikroskobu ile gözlenmiştir. Alüminyum 2024-T3' ler CNT ilave edilmiş epoksi yapıştırıcılarla yapıştırılmıştır. Yapıştırma bağlantılarının dayanıklılığı 60 ° C'de su altında kama testi ile incelendi. CNT'lerin epoksiye eklenmesiyle yapışkan mukavemet dayanıklılığının büyük ölçüde geliştiği gözlemlendi. Kama testi numuneleri suya konmadan önce elde edilen % 1 CNT katkılı yapıştırma bağlantılarının başlangıç çatlak uzunluğu saf epoksi ile birlikte sadece yaklaşık % 7 idi. Numunelerin 60°C suya batırıldıktan 3 saat sonra saf epoksi ile yapıştırılan bağlantılar başarısız olurken 90 saatlik deney süresinden sonra bile CNT'lerin farklı fraksiyonlarıyla birleştirilmiş olan tüm yapıştırma bağlantıları hala bir arada bulunmakta olduğu gözlemlenmiştir. Yapışkan mukavemetinin CNT'ler tarafından

önemli ölçüde arttırılması, esas olarak, CNT'lerin yüksek mekanik özelliklerine ve suya direnme yeteneğine dayandırılmıştır. Ancak deney sonuçlarına göre yapıştırma bağlantılarının sağlamlığının yaklaşık % 1 CNT'lerde optimum bir değer göstermiştir ve CNT oranı arttıkça yapıştırma bağlantısının mukavemetinde düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ek olarak yapıştırma bağlantılarının failure mekanizması arayüz bozulması ve kohezyon yetmezliği açısından da incelenmiştir. Ağırlıkça % 1 CNT ilave edilmiş epoksi ile birleştirilmiş yapıştırma bağlantısındaki failure için kohesive etkisinin baskın olduğu bulunmuştur (Yu ve ark., 2009).

Bu çalışmada, epoksi yapışkan film SY14 kullanılarak bağlanan Karbon / Epoksi kompozit laminatların çift kat kayma eklemlerinin mekanik davranışındaki higrotermal etkileri araştırılmaya çalışıldı. İlk olarak, çeşitli ortam koşullarında yapışkanın higrotermal bağımlı özelliklerini ve kompozit laminat çift tesirli bindirmeli bağlantıların statik tepkisini değerlendirmek için deneysel yöntem kullanılmıştır. Numuneler, oda sıcaklığı/ kuru (RD), oda sıcaklığı/ ıslak (RW), yükseltilmiş sıcaklık/ kuru (ED) ve yükseltilmiş sıcaklık / ıslak (EW) olmak üzere gruplandırıldı. Islak numuneler 90 °C'de 60 saat boyunca deiyonize suya daldırılmış ve yükseltilmiş sıcaklık 95 °C'dir. Çekme testleri oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta (95 °C) kontrollü bir odada gerçekleştirildi. Sonuçlar, nem ortamına maruz bırakıldıktan sonra elastik modülün ve çekme mukavemetinin sırasıyla % 24 ve % 27 oranında azaldığını gösterdi ve plastisite kayda değer hale gelirken yüksek sıcaklığa maruz kalındığında büyük bir bozulma gözlemlenmiştir. Çift tarflı bindirmeli bağlantıların hasar modları görsel inceleme ile incelendi. Oda sıcaklığında kuru numuneler için hem yapışkan hem de kohezyon yetmezliğinin olduğu bulundu. Hasar modları, nem maruziyetinde kohezyon yetmezliği ve yüksek sıcaklıkta yapışkanlılık yetmezliğinin baskın olduğu gözlemlenmiştir. İkincisi, çift tesirli bindirmeli bağlantıların hasar gelişimini simüle etmek için sonlu elemanlar modeli kullanılmıştır. Bu simülasyona nem difüzyon süreci, şişme stres ve termal stres de dahil edilmiştir. Hasar gelişimini incelemek için higrotermal bağımlı kohezyon kanunu kabul edildi. Başarısızlık modlarının, yapışkan ve yapışkan zayıf kuvvetine oldukça bağımlı olduğunu ortaya çıkardı. Hasar modlarının yapışkan ve kohezyonun dayınımının zayıflığı üzerinde önemli ölçüde etkisi olduğunu ortaya çıkardılar. Nem emilimi, kohezyon mukavemetinde büyük bir bozulmaya neden olduğundan, hasar modları çoğunlukla kohezyon yetmezliğine bağlı olduğunu yorumladılar. Artan sıcaklıla yapıştırma failure baskın olduğundan dolayı yapıştırmanın dayanımı ciddi oranda düşmüştür. Beklenen failure yükleri ile deney sonuçları arasında iyi bir mutabakat

sağlandı ve tahmin edilen başarısızlık modları da deneysel olgu ile tutarlıydı (Liu ve ark., 2016).

Bu çalışmanın amacı, galvanik korozyona olan cevabının ve MWCNT katkılı yapıştırıcıların çevresel bozulmasının perkolasyonuna mı yoksa malzeme sistemine mi bağlı olup olmadığını bulmak için metal plaka üzerine MWCNT katkılı yapıştırıcıların sürüldüğü yapıştırma bağlantılarının çevresel bozulmasına olan cevabının yanısıra yapıştırma kayma mukavemetleri de çalışılmıştır. MWCNT'lerin bir epoksi içerisine dahil edilmesi tabaka/epoksi arasındaki galvanik etkiyi değiştirebilir, aynı zamanda polimer matrisi içine lokalize olmuş MWCNT'lerin bozunma olaylarını da arttırdığı gözlemlenmiştir. Başlangıçta ağırlıkça % 0.1 MWCNT'lerin, yapışkanın hem galvanik hem de çevresel dayanıklılığını olumlu yönde etkilerken, daha yüksek içerikler davranışlarını olumsuz bir şekilde etkilediği gözlemlenmiştir (Gkikas ve ark., 2014).

Yapışkanla yapıştırılmış tur ve t mafsalları, otomotiv yapılarının üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Nokta kaynağı yerine yapısal bir yapıştırıcı kullanmanın etkisini belirlemek için, yük aralıkları kullanılarak sonlu elemanlar analizleri ile desteklenen detaylı bir dizi test gerçekleştirildi. Yapışkan, sertleştirilmiş bir epoksi ve yapışan, otomobil gövdesi kabuklarının imalatında kullanılan tipik bir yumuşak çelik cinsiydi. Bağlantı noktalarındaki gerginlik (bağ çizgisindeki kesme kuvveti oluşturur) ve üç nokta bükülmesiyle test edildi. Oda sıcaklığında yapılan daha önceki çalışmalar, bağlantı hasarlarının, yapışkan madde verimi ve yapışkan gerilime bağlı olarak belirlendiğini göstermiştir. Bu çalışmada, bir otomotiv mafsalının serviste yaşayabileceği sıcaklığın etkisini değerlendirmek için, testler -40 ve +90 °C'de gerçekleştirildi. Oda sıcaklığında önerilen hata kriterinin, düşük ve yüksek sıcaklıklarda hala geçerli olduğu, sırasıyla sıcaklık arttıkça veya azaldığında hasar bölgesi yukarı ve aşağı hareket ettiği gösterilmiştir (Grant ve ark., 2009).

Yapısal yapıştırıcılar havacılık ve otomobil endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ama çoğu durumda, kötü çevre şartları yapıştırma bağlantılarının mekanik performansda göz ardı edilemeyecek derecede bozulmalara neden olur. Bu çalışmada, dögüsel sıcaklığın yapıştırma bağlantıları üzerindeki etkisini karakterize etmek için kombine bir deneysel-sayısal yaklaşım geliştirildi. Çevre bozulma faktörü, döngüsel sıcaklık ortamının neden olduğu yapışkan tabakadaki bozunum sürecini değerlendirmek için kohezyonlu bölge modeli kullanıldı. Sıcaklık maruziyeti öncesi ve sonrası yapışkan tabakadaki stres durumları araştırıldı. Dikkatle tasarlanmış deneysel testler, simülasyon sonuçlarının doğrulanması ve sayısal prosedürün çevreye maruz

kaldıktan sonra bağlantı noktasının mekanik davranışını tahmin etmesine yardımcı olmak için gerçekleştirildi. Seçilen faktörler ile yanıt arasındaki ilişkide daha iyi bir görselleştirme sağlamak için cevap yüzey metodu kullanıldı. Son olarak, yapıştırma bağlantılarının mikro kırılma mekanizmalarını araştırmak için taramalı elektron mikroskopisi ile kırılma bölgeleri incelendi (Hu ve ark., 2013).

Yapışkan yapıştırma tekniği, son yıllarda otomotiv endüstrisinde yaygın bir şekilde araştırılmış ve benimsenmiştir ve bu da tatmin edici bir mekanik özellikler ve hafif etkilere yol açar. Bu çalışmada, farklı sıcaklık maruziyetlerinden sonra yapışkanla birleştirilen bağlantılarının statik mekanik performansı, ortak yarı-statik kesme mukavemeti testi yöntemiyle araştırılmıştır. Maruz kalma sıcaklığı ve yapışkan mekanik özelliklerin noktasal statik mukavemet üzerindeki etkilerini analiz etmek için MATLAB programlamasını kullanan bir cevap yüzey metodu kullanıldı. Kırılma mekanizmalarını açıklamak için daha sonra kırık yüzeyleri üzerinde görsel inceleme ve taramalı elektron mikroskopisi gerçekleştirildi. Test sonuçları, uzun süreli sıcaklık maruziyetinin yapıştırma bağlantılarının mukavemetinde ve şekil değiştirimesinde bozulmaya neden olduğunu gösterdi. Cevap yüzeyi eğrisi yoluyla, daha yüksek sıcaklığa maruz kalma ile karşılaştırıldığında, daha düşük sıcaklık, çevresel bozulmanın daha büyük ve daha hızlı olmasına neden olduğu bulundu. Birleştirme alanındaki kırılma yüzeylerinin farklı türleri, farklı çevresel muameleler altındaki yapıştırma bağlantılarının karşılaştırılması yoluyla da tespit edildi (Hu ve ark., 2013).

Nemli ortamlara maruz bırakılmış yapışkanla bağlanmış alüminyum, kompozit ve benzeri alt katman bağlantılarının uzun süreli dayanıklılığı araştırılmıştır. Yapıştırma bağlantılarının hasarı kohezyonlu bölge modeli (CZM) yaklaşımı ile modellenmiştir ve etkin parametreler nemli ortamlarda doymuş test numunelerinin kırılma mekaniği tarafından saptanmıştır. Deiyonize suya batırılmış alüminyum tek tesirli bindirmeli bağlantılar (SLJ)'ın kalıntı gerilmelerindeki azalma başarıyla öngörülmüştür. Musluk suyuna daldırılmış yapıştırma bağlantılarındaki bozunma öngörülenden daha hızlıydı ve korozyon belirtileri vardı. Hasar yüzeylerinde gerçekleştirilen XPS analizi, daha ciddi bozulmanın katodik delaminasyona bağlı olabileceğini gösterdi. Yaşlandırılmış kompozit SLJ'nin deneysel ve öngörülen sonuçları arasında bir tutarsızlık vardı. Modellemeye dahil edilmeyen kompozit hasarı bu tutarsızlığa sebep olmuş olabilir. Tabakaların genişleme katsayılarının uyumsuzluğundan dolayı farklı tabakaların birleştirme bağlantılarında büyük artık gerilmeler oluştu. Toplam kalıntı gerilmelerin (ısıl ve şişme) değişimi modellenmiştir. Artık streslerin bir yıl maruz kaldıktan sonra bile biraz rahatlasa da halen

önemli olduğu görülmüştür. Çift tesirli bindirmeli bağlantıların (DLJ) artık dayanımınından dolayı öngörülen hasar tahmin edilenden fazla çıktı. Bunun sebebinin kalıcı stresle güçlendirilmiş bozunma mekanizmasına bağlı olabileceği düşünülmektedir (Liljedahl ve ark., 2007).

Elektro-eğirme tekniği, son zamanlarda nano boyutta lif üretiminde en sık kullanılan yöntemdir (Reneker ve ark., 2000, Fong ve ark., 2002, He ve ark., 2004). Elektro-eğirme yöntemi ile 100 nm- 5 μm yarıçapları arasında lifler üretilebilmek. Elektro-eğirme yöntemiyle üretilen lifler klasik yöntemle üretilen liflerden yüz kez daha küçük yarıçapta olabilmektedir (Katz, 1992, Shin ve ark., 2001).

Elektro-eğirme yöntemi yeni bir alandır. Ancak nano elyaf takviyeli kompozit malzemelerin üretimi hızlı bir şekilde artmaktadır. Tek elyafın mekanik özelliklerinin artması, matriste yer alan nano elyafın kontrolü ve elyaf-matris bağının kontrolü gibi özellikler sayesinde yeni kompozit malzemelerinin oluşumuna önemli bir katkı sağlamaktadır. Polimerlerin hem yapısal takviyelendirmeye uygun olması hem de yüksek mekanik özelliklere sahip olması istenmektedir. Bu yüzden polimer malzeme seçimi kompozit malzemeler için oldukça önemli olmaktadır. Ayrıca polimerlere karbon nanotüp ilave edilerek farklı nano elyaflar da elde edilebilmektedir. Karbon nanotüplerin yüksek dayanıma, esnekliğe, yüksek termal ve elektrik iletkenliğine sahip olması polimer solüsyonuna farklı özellikler katarak kompozit malzemelerde kullanılabilirliğini artırmaktadır. Karbon nanotüplerin yanı sıra farklı nano parçacıklar, seramikler, karbon siyahı nano parçacıklar katılarak, yeni nano elyafların mekanik özelliklerinin artırılması için çalışmalar yapılmaktadır (Zucchelli ve ark., 2011).

Elektro-eğirme işlemleri süresince nano elyafların ve onların deformasyon davranışlarını etkileyen faktörlerin moleküler yönlenme ve kristallik yapı gibi özellikleri tamamiyle analiz edilir. Moleküllerin diziliminde amorf yapıya sahip olan elyaflar elastomerik özellikler sağlarken kristalik yapıya sahip olanlar ise boyutsal kararlılık gösterirler. Böylece elyaf içerisindeki kristalik ve amorf fazların rastgele ve düzenli olması malzemenin mekanik deformasyon karakteristiğine tesir eden başlıca etkenlerdendir. Bunun yanı sıra elyaf yapısı, elyafların geometrik dizilimi, bireysel elyaf özellikleri ve elyaflar arasındaki etkileşim elyaf matların mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu özellikleri elektro-eğirme işlemi boyunca kontrol etmek zordur. Bu yüzden tek elyafın gerilme deformasyonun belirlenmesi en önemlisidir (Baji ve ark., 2010).

Elektro-eğirme yöntemiyle üretilen polimer nano elyaflar mükemmel gözenekli özellik gösterirler. Çoğu durumda, polimer nano elyaflar rastgele bir yerde dokunmadan toplanır ki bunlar da gözenekli bir yapıya ve yüksek bir yüzey alanı-hacim oranına sahiptirler. Nano elyafların porozlu bir karakteristik göstermesi, reçine akışını kolaylaştırmak için fevkalade iyi bir geçirgenlik sağlar, böylece takviye edici yapının tamamen emdirilmesi sağlanır. Aynı zamanda bu yapıya sahip nano elyaflar kompozit prepreglerin aşınma kırılma tokluğunu artırmaktadır. Bu nano elyaflar yoğun film şeklinde olan muadilleriyle karşılaştırıldığında kırılma tokluğunun önemli ölçüde daha iyi olduğu görülmektedir. Ancak kompozit prepreglerin yüzeyine yerleştirilen nano elyaflara ön ıslatma yapılması reçinenin tamamen katılaşmamasına neden olmaktadır. Karbon dokuma kumaşların üzerine doğrudan nano elyaflar yerleştirildikten sonra epoksinin ilave edilmesi reçine tabakasının tamamen ıslatılmasını sağlamaktadır (Zhang ve ark., 2010).

Günümüzde, genellikle epoksi matris malzemelere nano parçacıklar takviye edilerek yeni ve farklı özelliklere sahip nano kompozitler oluşturulmaktadır. Ancak nano parçacıklar sınırlı oranda takviye edilebildiği için nano parçacıkların kompozit malzeme içerisinde kullanımını kısıtlamaktadır. Ayrıca nano parçacıkların üretiminin oldukça zor olması başka bir etken olarak görülmektedir. Nano elyafların kolay bir şekilde üretilebilmesi ve kompozit malzemelere uygulandığında mekanik özelliklerin artırması uygulamalarda tercih sebebi olmasını sağlamaktadır (Teo ve Ramakrishna, 2009).

Naebe ve ark. (2007) tarafından elektro-eğirme yöntemiyle üretilen PVA nano elyafların yapıları ve özellikleri üzerine ÇCKNT'lerin etkileri araştırılmıştır. PVA nano elyaflar ile ağırlıkça % 4.5 ÇCKNT içeren PVA nano kompozitler elektro-eğirme yöntemiyle üretilmiş olup, ÇCKNT'lerin etkileri ve çekme özelliklerindeki post-eğirme işlemleri tarafından tetiklenen PVA'nın morfolojisi değişimleri, nano elyafların yüzey hidrofilliği ve termal kararlılığı incelenmiştir. Diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) ve geniş açı X-ışını difraksiyonu ile (WAXD) karakterizasyonları boyunca karbon nanotüplerin varlığı, ÇCKNT/ PVA kompozit elyaflardaki PVA'nın kristalizasyonunu çekirdeklendirebildiği ve bu yüzden önemli ölçüde elyaf çekme dayanımını iyileştirdiği görülmektedir. Ayrıca, PVA içerisindeki karbon nanotüplerin varlığı elyaf çapı ve nano elyaf keçenin yüzeyinin hidrofilik özelliğini azaltır. ÇCKNT/ PVA kompozit nano elyaflar ve saf PVA nano elyaflar, sırasıyla PVA kristalliğini yükseltmeye ve çapraz bağlı bir PVA ağı kurma amacıyla metanol içerisinde ıslatılması ve glutarik dialdehid ile çapraz bağlantı gibi post-eğirme işlemleri farklı cevap verilmiştir. Karbon nanotüplerin varlığı

metanol işlemler sırasında PVA kristalleşme hızı azalır fakat önlenen kristallik hızının azalması çapraz bağlama reaksiyonuna neden olmaktadır. Çapraz bağlama reaksiyonu ile karşılaştırıldığında metanol işlemi, elyafın çekme dayanımında daha iyi iyileşme ve çekmedeki şekil değiştirmede ise daha az azalma ile sonuçlandı. Buna ek olarak karbon nano varlığı kompozit nano elyafların başlangıç ayrışma sıcaklığını düşürür fakat post-eğirmeyle işlenmiş nano elyafların termal bozunması kararlıdır. Hem metanol hem de çapraz bağlama reaksiyonu ile işlenmiş ÇCKNT/ PVA kompozit nano elyaflar elyaf çekme mukavemeti, su temas açısı ve termal kararlılığı en büyük artış sağlamıştır.

Phong ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada nano PVA elyafların karbon fiber/epoksi kompozitlere eklenmesiyle oluşan kompozit malzemenin mekanik performansını araştıkları görülmektedir. Çapı yaklaşık 40-80 nm olan nano polivinil alkol elyafları (nPVA) elektro-eğirme tekniği kullanarak imal edilmiş ve tamamen kuruduktan sonra, nPVA karbon elyaf takviyeli (KET) epoksi matris kompozitlerin arasına dağıtılmıştır. nPVA ağırlıkça % 0.03, 0.05 ve 0.1 içeren KET/ Epoksi matris takviyeli kompozitleri çekme, Mod-I kırılma tokluğu ve gerilme/çevrim sayısı gibi yorulma testleri farklı mekanik testlerle karakterize edilmiş ve. test sonuçlarına bakıldığında nPVA içeriğinin ağırlıkça % 0.1 oranında, Mod I tabakalar arası kırılma tokluğunu önemli ölçüde hem çatlak başlangıcında % 65 hem de çatlak ilerlemesinde % 73 geliştirdiği görülmüştür. Çekme mukavemeti az oranda artarken yorulma ömrü ise önemli ölçüde yüksek çevrimli yorulmada takviyelenmemiş kompozit olanlara göre 10-30 kat daha uzun arttığı görülmüştür.

Elyaf takviyeli polimer kompozitlere uyumlu ara yüzler oluşturmak için elyafları polimer matrisi içine etkin bir şekilde emdirme işlemi yapılması gerekir. Bu çalışmada, optimum mekanik özelliklere sahip nano kompozitlerin üretimi için elektro-eğirme yöntemiyle üretilen elyaf keçeler ile bunların çözelti etkileşimleri incelenmektedir. Dokunmamış polyamid 6 (PA6) nano elyaflar, solüsyon bazlı işlem yöntemini kullanarak dokunmamış keçe içindeki PVA matrisi kullanılarak elde edildi. Kompozit en yüksek kopma gerilmesi, PVA çözeltisinin en uygun ağırlıkça % 16 için belirtildi. Bu oran hem çözücünün buharlaştırılmasından sonra PVA matris ile sözü edilen ağın tüm gözenekleri doldurulur hem de nano elyaf ağlar emdirilerek PVA çözeltisi olarak elde edilen bileşikteki boşlukların kaldırıldığını göstermektedir. Bu işleme yöntemleri optik açıdan saydam elektro-eğirmeli nano elyaf kompozitler için daha fazla işlevsellik gösteren, tutarlı nano elyaf-matris ara yüzeyleri elde etmek için etkili olmuştur (Stachewicz ve ark., 2012).

Elektro-eğirme yöntemi ile üretilen nano boyuttaki liflerin gelişmiş mekanik özelliklerinin yanı sıra, yüzey alanları oldukça yüksek olmaası sebebiyle doku mühendisliği, sensörler, üstün özellikte (yanmayan, su geçirmeyen vb) tekstil kumaşlar, çok amaçlı filtreler, nanokompozit maddeler, kontrollü salınımlı ilaç üretimi gibi değişik alanlarda kullanılmaktadır (Srinivasan ve Reneker, 1995, Deitzel ve ark., 2001, Shin ve ark., 2001, Huang ve ark., 2003).

Bu bölümün devamı olan alt başlıklarda yapıştırma bağlantılarının tanımı, yapıştırıcı çeşitleri, yapıştırma bağlantıları, yapışma bağlantılarında oluşan gerilmeler, yapıştırma teorileri, nanoteknoloji, elektro-eğirme yöntemi ile nano elyaf üretimi ve diğer üretim teknikleri gibi teorik esaslar anlatılmaktadır.

2.1. Yapışma, Yapıştırıcı ve Yapıştırıcı Bağlantıları

2.1.1. Yapışma

Bir yapıştırıcı malzeme yüzeylerine uygulandığında onlarla birleşip, ayrılmaya karşı direnebilen bir malzeme olarak tanımlanabilir. “Yapıştırıcı” kelimesi çimento, tutkal, macun vb. gibi malzemelere verilen genel bir terimdir ve bu terim esas olarak hepsinin yerine kullanılır. Bazı özellikleri tanımlamak için çeşitli tanımlayıcı sıfatlar uygulanır. Örneğin, yapışkanın fiziksel biçimini belirtmek için; sıvı yapıştırıcı, sıvı iki parçalı yapıştırıcı, film yapıştırıcı; kimyasal biçimi; epoksi yapıştırıcı, siyanoakrilat yapıştırıcı, poliklopren yapıştırıcı; bağlanan malzemelerin türünü belirtmek için; metal-metal yapışkan, kağıt yapıştırıcı, ahşap yapıştırıcı; veya kullanım koşullarını göstermek için; solvent bazlı yapıştırıcı, soğuk sertleştirme veya - kürleme, yapışkan, sıcakta eriyen yapıştırıcı gibi terimler kullanılmaktadır (Kinloch, 1987).

Malzemeleri birleştirip önemli yükler taşıyabilen ve bazı durumlarda yapıların sağlamlık ve mukavemetini iyileştiren malzemelere yapıştırıcılar denir (Adams ve ark., 1997).

Yapıştırıcılar, 5 MPa'dan 50 MPa'ya kadar geniş bir yelpazede bulunan kuvvetler ve poliüretan ile epoksi arasındaki çeşitli malzemelerden temin edilebilir. Yapıştırılmadan önce, yüzeylere alt tabakalar denir; Yapıştırmadan sonra yapışkan olarak adlandırılırlar. Hem yapışkanlar hem de yapıştırıcılar yapışma kavramına dayanır. Daha spesifik olarak, birleşim içinde bir molekül içindeki molekül içi kuvvetler açıklanırken, yapışma iki maddenin arayüzleri arasında oluşan moleküller arası kuvvetler içerir. Bu molekül içi ve kohezyon kuvvetleri esas olarak Van der Waals tipi kuvvetlerdir (Possart,

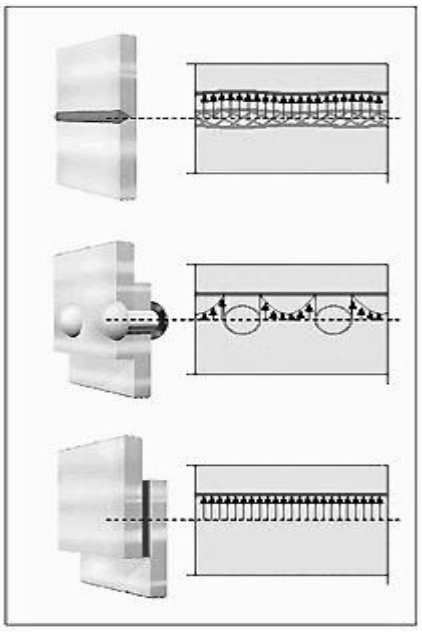
1988). Yapışkanlarla veya sızdırmazlık macunlarıyla bağlanan maddeler, ara yüz ya da kohezyon ya da bunların kombinasyonu yoluyla çalışırlar. Ara faz, yapışkanın ve genel olarak yapışan tarafından kuşatılmış bölgeye karşılık gelirken, arayüz ara faz içindeki yapışkanın temas yüzeyini ve yapışkanı ifade eder. Ara fazın mekanik ve kimyasal özellikleri, yapışkan veya düzgün yapıştırıcıdakilerden farklıdır ve dolayısıyla yapışkan bağ kuvvetinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Yapışkan terimi, maddeler arasındaki çekime atıfta bulunmak için kullanılır. Daha sonra açıkça görüleceği üzere, bir arayüz boyunca çalışan yapışma kuvvetlerinin seviyesi genellikle mekanik testlerle ölçülemez. Örneğin, ara yüzey kırılmasında ölçülen enerji genellikle ara yüzey boyunca çalışabilen moleküler van der Waals kuvvetleri veya kovalent bağlar gibi asıl yapışma kuvvetlerinden kaynaklanan büyüklük sıralamasından daha büyüktür (Kinloch, 1987).

Yapıştırma bağlantılarının avantajları;

- Metallerin, elyaf kompozitler, plastiklerin, lastiklerin, ahşap, kağıt ürünleri vb. farklı materyallere katılarak birleştirme becerisi.
- İnce levha- malzemeleri verimli bir şekilde birleştirebilme becerisi.
- Özellikle metal ve metal olmayan malzemeleri verimli bir şekilde yapıştırabilme becerisi,
- Şekil 2.1. ‘de görüldüğü üzere mekanik (perçin ve cıvata gibi) ve termal (kaynak ve lehim gibi) birleştirmelerde ortaya çıkan gerilme yığılmalarının azaltılması ile tüm yapışma alanı boyunca daha düzenli gerilme dağılımı elde edilmesi (Ekrem, 2015),
- Yük taşıma alanını artırarak daha büyük yük taşıma kapasitesi sağlaması (Petrie, 2007, Ekrem, 2015),
- Örneğin, birleştirilen bileşene çok iyi bir dinamik yorulma direnci kazandıran geliştirilmiş birleştirme bağlantılarda iyi bir stres dağılımı sağlaması,
- Uygun maliyeti açısından gerçekten etkili bir tekniktir. Nitekim yapıştırma işlemi otomasyon sistemleri kurularak otomatikleştirilebilmektedir. Bu sayede de herhangi bir operatörün yapıştırma işleminde tahsis edilmesini ortadan kaldırmaktadır. Yani otomasyon sisteminde yapıştırıcıyı uygun yere uyguladıktan sonra günde yüzlerce kes yapıştırma işlemini doğru bir şekilde yapma imkanı sağlar,

- Tasarım esnekliğindeki artış sayesinde yeni tasarım konseptlerinin uygulanmasını sağlar ve tasarımcıya daha geniş bir malzeme seçimi imkanı verir.
- Daha az pürüzlü aerodinamik yüzeyler elde edilir (Ekrem, 2015)**,**
- Diğer birleştirme bağlantılarında oluşabilecek olan korozyona karşı yüksek dirence sahiptir
- Düşük ağırlık imkanı sunar



Şekil 2.1. Birleştirilme bölgelerinde oluşan gerilme dağılımları a) Kaynaklı bağlantı, b) Perçinli bağlantı, c) Yapıştırma bağlantısı (Corporation, 1995)

Dezavantajları;

- Çok şiddetli, kötü şartlara sahip ortamlarda yapışkan bağlantılarından uzun hizmet ömrü elde etmek için çoğu zaman birleştirilen alt tabakalar için bir yüzey ön işleme yöntemi kullanılmalıdır.
- Kaynak yapma, perçinleme vb. gibi diğer birleştirme teknikleriyle karşılaştırıldığında yapışkanların dayanabileceği üst servis sıcaklıkları sınırlıdır.
- Yapışkanların gerilme ve kesme mukavemeti ve tokluğu birçok metalle karşılaştırıldığında nispeten düşüktür. Bu nedenle, yapışkanlar metal ince tabakalara bağlanmada çok etkili olmasına rağmen bağlanan alan büyük veya yapıştırıcı sıkıştırılmadıkça kalın metalik bileşenlerin birleştirilmesi için tipik olarak kullanılmazlar.

- Yapıştırılmış bağlantılar için tahribatlı olmayan test yöntemleri, diğer birleştirme yöntemleri ile karşılaştırıldığında nispeten sınırlıdır.
- Üst kullanma sıcaklıkları genellikle yaklaşık olarak 177 °C ile sınırlıdır. Ama özel yapıştırıcılar 371 °C'ye kadar sınırlı kullanım için uygundur fakat genellikle bu yapıştırıcılar daha pahalıdır (Ekrem, 2015).

Yapıştırma bağlantılarının oluşumunda çeşitli aşamalar düşünüldüğünde, yapıştırma işlemi sırasında birkaç önemli gereklilik yerine getirilmelidir. Bir yapışkan bağlantısının oluşumundaki ilk aşama, yapışkan ve alt tabakalar arasındaki ara yüz temasına erişilmesidir. Yakın bir ara yüzey teması elde ettikten sonra, yapıştırıcı ile alt tabakalar arasında belirli bir şekil içsel yapışma kuvveti oluşturulması gerekir ve bu gibi içsel yapışma kuvveti, birleştirilmiş malzemeyi hizmet ömrü boyunca birlikte tutacaktır. Kesinlikle, yapışkan ve tabakalar arasında mekanik birbirine geçme olduğunda bu olay istisna olarak kalır. Böyle durumlarda ne ara yüzey bağlantısının gerçekleşmesi ne de iç yapışma kuvvetinin kurulması önerilmemektedir (Kinloch, 1987).

2.1.2. Yapıştırıcı çeşitleri

Yapısal yapışkanlar, epoksi (termal dirençli ve yüksek mukavemetli), akrilikler (hızlı bağlanma kabiliyeti olan çok yönlü yapıştırıcılar, daha az yüzey işlemi gerektirir), siyanoakrilatlar (plastik ve kauçuk hızla iyileşebilir ancak sıcaklık ve neme karşı zayıf direnç), poliüretanlar (düşük sıcaklıklarda esnek ve yorulmaya dayanıklı), anaerobikler (silikon alt tabakaların yapıştırılması için uygun), silikonlar (10 düşük stresli uygulama için mükemmel dolgu macunu, yüksek sıcaklık direnci ve yüksek derecede esneklik sunar) ve yüksek sıcaklık yapıştırıcıları (poliimidler, bismaleimidler ve fenolikler). Kompozit malzemeler için yüksek sıcaklık reçine matris sistemlerinin kullanımının artması sebebiyle onlarla uyumlu ve eşit derecede termal olarak stabil çalışabilecek yapışkan sistemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bileşik matrisler olarak yaygın olarak kullanılan epoksiler, reçine ve yapışkan arasındaki uyumluluk nedeniyle kompozitler birleştirmek için sıklıkla kullanılırlar (da Silva ve ark., 2011).

Mükemmel bir bağ elde etmek için uygun bir yapıştırıcı kullanılmalıdır. Uygun bir yapıştırıcı seçmek, genellikle çok çeşitli seçenekler nedeniyle titiz bir işlemdir. Tüm uygulamalar için uygun olan evrensel bir yapıştırıcı henüz yoktur. Dolayısıyla, bir yapışkanın seçiminde müşterek ömrü, jel-zamanı, sertleşme süreci, yapışkan uygulama yöntemi ve alt tabaka türü ve malzeme özellikleri, çalışma sırasında beklenen stresler ve

çevre koşulları gibi birkaç faktöre bağlıdır. Bir yapıştırıcının maliyeti yapıştırıcı seçiminde özellikle kritik bir faktördür.

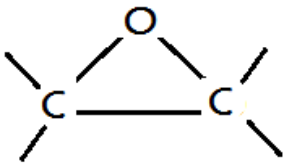
Yapışkan özellikleri önemli ölçüde farklıdır. Bu nedenle, çeşitli konfigürasyonlarda TTBB'lardaki gerilmeleri değerlendirmek için bir yapıştırıcının mekanik özellikleri belirlenmelidir. Bunlar, gerilme-şekil değiştirme eğrisi, elastikiyet modülü ve hasar yükü ve şekil değiştirmeyi içerir (Hyer, 2009).

Hasar yükü ve şekil değiştirme gibi spesifik parametrelerle birlikte yapıştırıcı özelliklerinin geliştirilmesi için yaygın olarak kullanılan testler için özel test numunelerine ihtiyaç vardır. Yapışma yüzeyinde kohesiv hasarının meydana gelmesi için yüzey hazırlığının yeterli şekilde yapılması gerekmektedir ve test numunesi geometrisine gerilmenin saf bir alan oluşturarak yayılması gerekmektedir. Temas noktasına düzenli bir şekilde dağılması ve birleşme çizgisi boyunca stresin yağunlaşmaması gerekmektedir (Reddy, 2006).

Yapıştırıcı karakteristiğini deneysel olarak net bir şekilde belirlemek için birçok ISO ve ASTM standartları geliştirilmiştir. Geliştirilen bu test metodları genel olarak soyulma, kayma, çekme, basma mukavemeti, yorulma ve dinamik özelliklerini elde etmek için kullanılmaktadır. Örneğin, ASTM D3433 standardında belirlenmiş olan çift konsol kiriş (ÇKK) testi kırılma mekaniğini incelemek için kullanılan geleneksel test metodudur (Volkersen, 1938, Goland ve Reissner, 1944, Allman, 1977, Ojalvo ve Eidinoff, 1978, Professor ve William, 1980, Chen ve Cheng, 1983, Adams ve Mallick, 1992, Luo ve Tong, 2004).

2.1.2.1 Epoksi reçine

Epoksi reçineler termoset polimer grubundan olup monomer konfigürasyonlarında iki veya daha fazla oksiran (epoksit grubu) halkası ile karakterize edilmiş malzemelerdir (Ratna, 2009). Bu halkalar, çok yönlü yapısal uygulanabilirliklerine bağlı olarak çapraz bağlanmış bileşikler oluşturan çeşitli reaksiyonlara katılabilir. Bu reçineler kürleştiğinde çok yönlü yapısal uygulanabilirliklerine bağlı olarak çapraz bağlı bileşikleri oluşturan çeşitli reaksiyonlarla birlikte yapısal uygulamalar için uygun malzeme formunu alırlar. Şekil 2.2. ’de epoksit halkasının yapısı görülmektedir.



Şekil 2.2. Epoksit halkası

Epoksit yapıştırıcılar birçok komponentlerin yapıştırılmasında yaygın olarak kullanılırlar. Birbirine benzer olan ya da olmayan parçaların yapıştırılmasında kullanılan çok yönlü bir yapışkandır. Böylece alüminyum ve alaşımları, titanyum ve alaşımları, düşük ve yüksek karbon çelikleri, nikel, bakır, fiber takviyeli plastikler (termoplastik ve termoset matrisli kompozitlerin her ikisi de), cam, beton ve ahşaplar gibi tabakaların hepsinde kullanılmaktadır. Bu da demek oluyor ki havacılık, otomotiv, inşaatlar, elektrik ve elektronik, mobilya, aşındırıcılar (taşlar, zımparalar) gibi geniş bir alanda kullanılabilmektedir.

Dezavantaj olarak, bu reçine sistemleri düşük tokluk değerlerine sahiptir. Kırılganlığın, yüksek çapraz bağlanmalarıyla ilişkili olabileceğine inanılmaktadır ve bu da moleküler hareketi zorlaştırmaktadır. Bu da kırılma sırasında düşük enerji emilimine ve dolayısıyla daha düşük kırılma tokluğuna neden olur (Scherzer, 1994). Bu problemin sertleştirme süresi ve işleme tekniği gibi işlem parametrelerini optimize ederek üstesinden gelinebilir. Bu üstün özelliklerinden dolayı polimerlerin sertleştirilmesi yüksek bir ilgi konusu olmuştur ve dezavantajlarını çözmek için de farklı yaklaşımlar değerlendirilmektedir. İşleme kolaylığı nedeniyle, sekonder faz takviyesi, geleneksel işleme yöntemlerine göre çeşitli avantajlara sahiptir. Ayrıca, ticari uygulamalara ve gelişmelere bakıldığında, polimerlerin sekonder takviyesi, tek tek malzemelerde bulunmayan özelliklerin elde edilmesi için en kolay yollardan biridir.

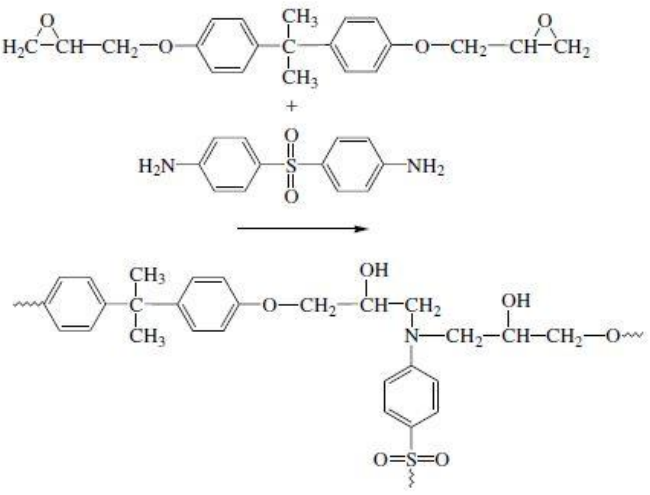
Epoksi sistemleri için yaygın olarak kullanılan ikincil bir takviyeler, karbon nanotüpler (CNT's), fullerenler (Bucky balls) ve grafen nanoparçacıklar (GNP) gibi karbon esaslı nanopartikülerdir (McElvain ve ark., 1997). Karbon ailesinin tüm nano formlarında, istisnai mekanik, termal, elektriksel ve bariyer özelliklerinden dolayı sekonder faz takviye malzemesi olarak grafenin kullanımı konusunda artan bir ilgi vardır.

2.1.2.1.1. Epoksinin sertleşmesi

Epoksi halkası özellikle aktif hidrojen atomu olduğunda açılabilir. Aktif hidrojen grubu alifatik ve aromatik aminler, alkol grupları gibi malzemelerden elde edilir. Birleşme reaksiyonu infüzyon olabilme yapısına sahip iki reaktif türe sahip olması koşuluyla (bunlardan biri en ikiden fazla içermelidir) bir çapraz bağa sebep olur (Packham, 2005).

Üçüncül aminler, imidazoller, BF3 bileşikleri, antimuan fluorür bileşikleri ve iodinyum ce fülfonyum tuzları gibi diğer malzemeler anyonik ve katyonik olarak epoksi reçinenin sertleşmesinin başlatıcısı olabilirler.

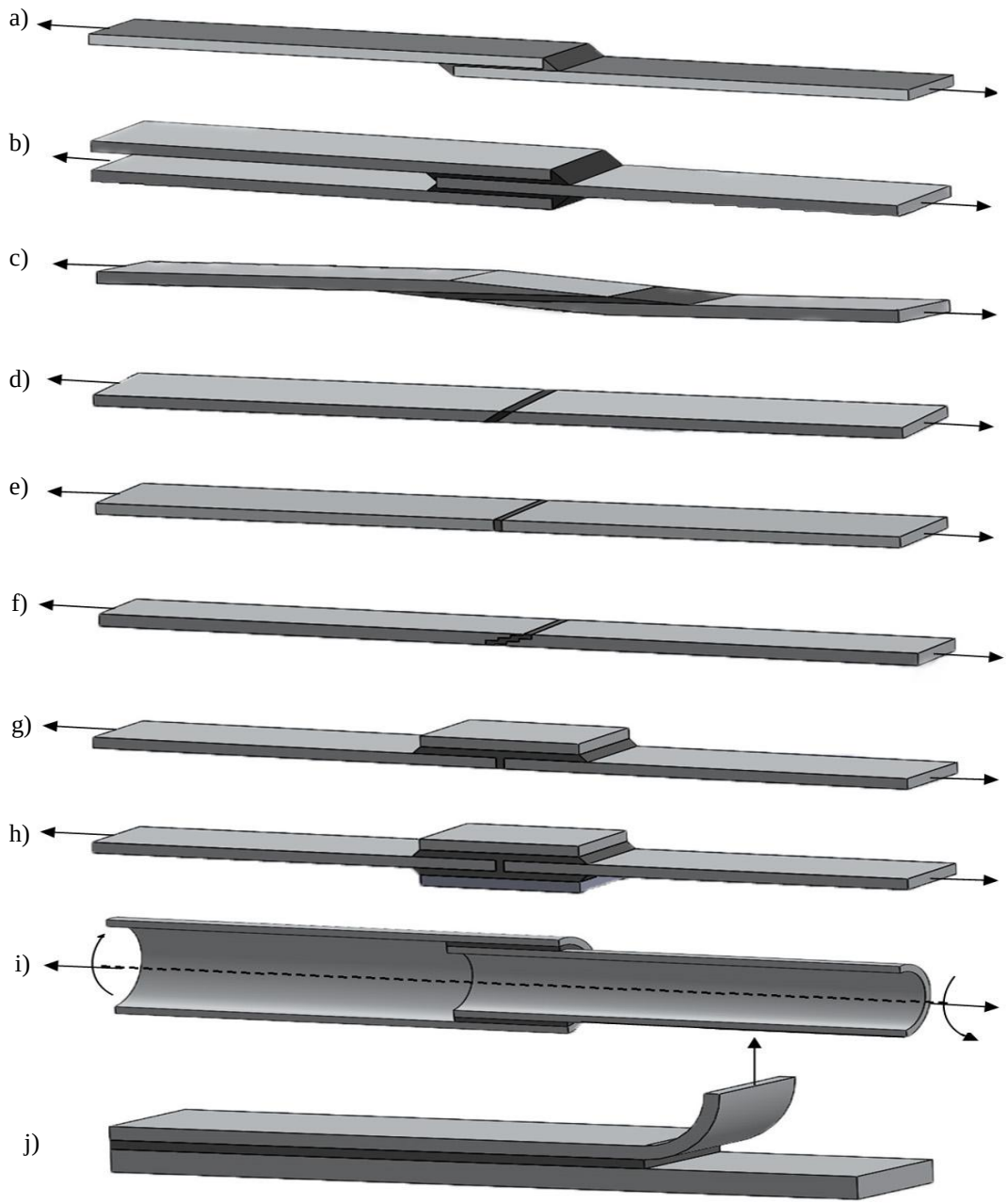
Bisfenol epoksi reçinenin amino gruplarındaki aktif hidrojenlerin her ikisinin de epoksi halkasını reaktif edecek olan bir aromatik amin ile sertleşmesinin tipik şematik gösterimi şekil 2.3. ‘de verilmiştir.



Şekil 2.3. Epoksi yapıştırıcıların kürleşme esnasında çapraz bağlanması (Packham, 2006)

2.1.3. Yapıştırma bağlantıları

Mühendislik tasarımında herhangi bir yük anında oluşacak yükleri belirlemek ve gerilmeleri kolayca hesaplamak gerekmektedir. Bir mühendis yapıştırmayı tasarlarken bazı konuları göz önünde bulundurması gerekmektedir.



Şekil 2.4. Yapıştırma bağlantı çeşitleri

a) Tek taraflı bindirme bağlantısı
b) Çift taraflı bindirme bağlantısı
c) Pahlı bindirme bağlantısı
d) Açılı bindirme bağlantısı
e) Alın bağlantısı
f) Kademeli bağlantı
g) Tek taraflı takviyeli alın bağlantısı
h) Çift taraflı takviyeli alın bağlantısı
i) Silindirik bindirmeli bağlantı
j) Soyulma

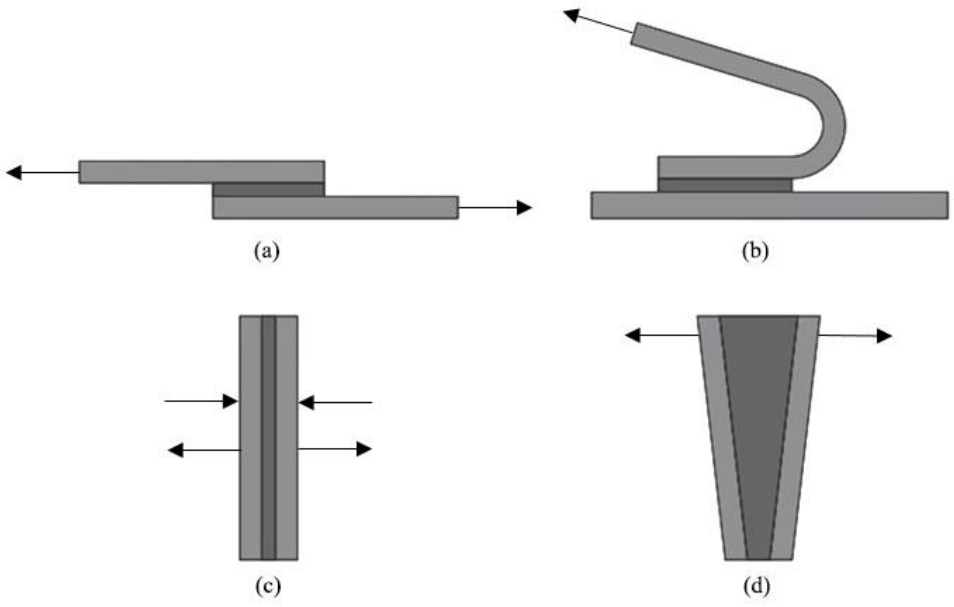
Temelde yükleme sistemleri yapıştırmanın bir fonksiyonu olarak tanımlansa da tasarım aşamasında maliyet, malzeme kalitesi ve tasarım tekniği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu sayede sürekli olarak teknolojide ilerlemenin gerekliliği ortaya çıkmakta ve modern mühendisliğin de önemi artmaktadır (Adams ve ark., 1997).

2.1.3.1 Tek taraflı bindirmeli bağlantılar

Tek taraflı bindirmeli bağlantılar üzerine çalışan Goland ve Reissner (1944), yapıştırma bağlantılarındaki streslerle ilgili literatürdeki en yaygın şekilde alıntılanan makalelerden birini yazmışlardır. Bu makalede dikkat çekilen en önemli konu tek tesirli bindirmeli bağlantılarda yapışma tabakasındaki eğilme şekil değiştirmesinin kayma ve soyulma stresleri üzerindeki etkisini araştırmalarıdır. Çalışmada, bağlantıların yaptıkları sehimleri ve sonrasında bağ katmanlarındaki kayma ve soyulma streslerini öngörmeyi sağlamışlardır. Bu analizlerden birisi, özellikle birbirleriyle kaynatılan yapıştırmaların ideal olarak rijit yapıştırıcılarla birleştirildiği bir Green fonksiyon yaklaşımı üzerine temel oluşturan yaklaşık elastikiyet analizidir.

2.1.4. Yapışma bağlantılarında oluşan gerilmeler

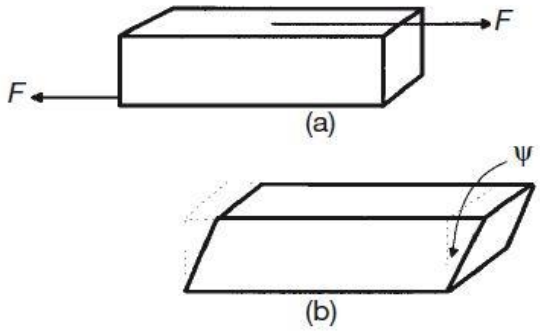
Şekil 2.5. ‘de gösterildiği gibi yapıştırma bağlantılarında en etkili dört temel gerilmeler oluşur. Bunlar kayma (shear), çekme (butt), soyulma (peel) ve çekme-makaslama (cleavage)’dır (Ekrem, 2015). Yapıştırma bağlantılarından istenen mukavemetin optimum düzeyde çıkması için bu temel gerilmelerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.



Şekil 2.5. Yapıştırma bağlantılarındaki gerilme tipleri (a) kesme (b) soyulma (c) çekme (d) çekme-makaslama

2.1.4.1. Kayma gerilmesi

Şekil 2.6. ’da bir çubuğun uçlarından ziyade yüzeylere uygulanan gerilimi göstermektedir. Bu durumu çekme gerilmesinden farklı analiz etmemiz gerekiyor. Gücün uygulandığı alanı bildiğimizi varsayalım. Kayma gerilmesi adı, Şekil 2.6. 'da gösterildiği gibi teğetsel olarak uygulanan birim alan başına kuvvete verilir. τ sembolü kayma gerilmesini belirtir ve çekme gerilmesi ile aynı birimlere sahiptir.



Şekil 2.6. Dikdörtgen şekilli bir malzemeye teğetsel bir kuvvet uygulaması (Pocius, 2012)

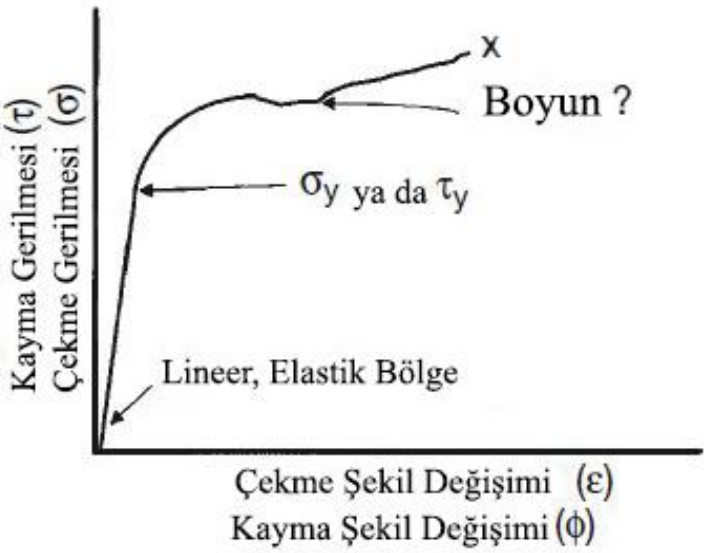
Malzemenin böyle bir kuvvete tepkisi Şekil 2.6. 'da gösterildiği gibi bir deformasyondur. Malzeme, orijinal şekil ve yeni şekil arasındaki Ψ açısı oluşur ve bir paralelkenar oluşturacak şekilde deforme olur. Makaslama gerilmesi, Ψ açısının teğeti olarak tanımlanır ve ϕ simgesi verilir. Çekme testi durumuna benzer şekilde, $tan\,\Psi$ boyutsuzdur. Kayma gerilme-şekil değiştirme deneyi, çekme gerilme-şekil değiştirme deneyine benzer sonuçlar verir. Genelde kayma gerilmesinin kayma gerilmesine doğrusal olarak tepki gösterdiği ve böylece Hooke yasasına uyduğu bir bölge vardır. Aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$\tau = G\phi \tag{2.1}$$

Burada G materyalin kayma modülü olarak bilinir. Ayrıca Pascal (Pa) birimine sahiptir. Malzemeler, kayma kuvvetinde bir akma gerilimi gösterebilir ve Şekil 2.7. 'de gösterildiği gibi çekme gerilme-şekil değiştirme eğrisindeki ile aynı özelliklerin çoğuna sahiptir. Kesilme modülünün ve Young modülünün aşağıdaki formül ile ilişkili olduğu da gösterilebilir:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.2)$$

Burada G kayma modülüdür, E Young modülü ve ν Poisson oranıdır.



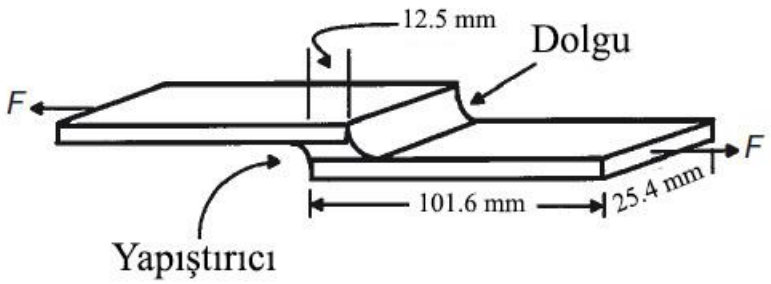
Şekil 2.7. Şematik stres-gerinim eğrisi (Pocius, 2012)

Genel olarak, yapışkanlar kaymaya yüklendiğinde en yüksek mukavemetini sergiler. Şekil 2.6. 'ya bakarsak, blokun her bir yüzüne yapışanların yapıştığını düşünebiliriz ve Şekil 2.6. 'daki bloğun yapıştırıcı olduğunu düşünebiliriz. Yapıştırıcıyı bir kayma durumuna getiren çok sayıda yapışkan bağ test standartları bulunmaktadır. Aslında, gerçek yapılarda kullanılan çoğu yapışkan bağ, esas olarak yapışkanın bir kayma durumunda olduğu şekilde tasarlanmıştır. Bu tasarım seçiminin sebepleri, çeşitli yapışkan tipleri için makaslama veya soyulma mukavemetine kıyasla kayma mukavemetinin değerleri daha belirgin görülmektedir. Bu nedenle kayma yükünün anlaşılması çok önemlidir.

Yapışkan bağların kayma mukavemetinin değerlendirilmesi için standart test yöntemi ASTM D1002'de açıklanmaktadır. Bu test yöntemi yapışkan bağların değerlendirilmesi için en yaygın ve en çok incelenen test yöntemlerinden biridir. ASTM D1002'de kullanılan numune Şekil 2.8. 'de gösterilmektedir. Yapışanlar uygun bir yüzey hazırlama yöntemiyle temizlenir (Sonraki bölümlerde açıklanacaktır). Yapışkan yapıştırılacak bölgeye uygulanır. Yapıştırıcılar (Sonraki bölümlerde açıklanacaktır) genellikle birleştirilmeden önce her iki yüzeye uygulanır. Film yapıştırıcıları (Sonraki bölümlerde açıklanacaktır), yapışanların sadece birine uygulanır. Genelde, yapışkan

sadece yapıştırılacak bölgede uygulanır. Tur uzunluğu 12,52 mm ve bağlantı genişliği 25,4 mm'dir. Uygulanan yapışkanın kalınlığı amaçlanan kullanımı ile belirlenir. Yapıştırılmış bölge bazı şekillerle sabitlenmektedir. Sabitleme işlemi klipslerin bağ kenarlarına uygulanması kadar basit bir şekilde olabilir veya havacılık endüstrisinde kullanılan vakum torbalama prosedürleri gibi şekillerle de olabilir. Tutturucu cihazın amacı, yapışkan bağ çizgisine basınç uygulamak ve yapışkan sertleştikçe yapışanları yerinde tutmaktır. Yapışkanın, yapışkan aralığının ötesine uzanan bir "doldurucu" oluşturması için bağlanan alanın dışına akması beklenmektedir (Şekil 2.8.). Doldurucunun yokluğunda yapışkan bağ performansını değerlendirmek için kasten elimine edildiği bir çalışma yapılmıştır. Adams (Crocombe ve ark., 1981), doldurucunun bir tur kesme örneğinin ölçülen gücü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Doldurucu nominal olarak tur uzunluğunu arttırır ve yapışmanın sonunda özelliklerin kesintiliğini en aza indirir. Yani kademeli olarak mekanik özelliğinin düşmesini sağlar**.**

Yapıştırıcı sertleştirilir veya ayarlanmasına izin verilir. Sertleştikten sonra, olası bir test, numunenin bir çekme test makinesine yerleştirilmesi ve numunenin hasarlı hale getirilmesi şeklindedir. Yükün uygulanma yönü Şekil 2.8. 'de gösterilmektedir.



Şekil 2.8. ASTM 1002 deki tek tesirli bindirme bağlantısı

2.1.4.2. Çekme ve basma gerilmeleri

Çekme gerilmesi, F kuvvetinin numunenin belirli bir kesit alanı boyunca uygulanması bakımından önemli bir mühendislik kavramıdır. Birçok farklı malzeme, numunenin kesit alanı uygun boyutta ise, uygulanan bir kuvvete karşı aynı dirence sahip olabilir. Uzama, çekme kuvvetlerinin sonucu olarak numunenin uzunluğundaki değişimdir. Numunenin uzaması, numunenin orjinal boyutlarına göre tanımlanır. Böylece, numunenin orijinal uzunluğu l_0 ve belirli bir çekme gerilmesi uygulandıktan

sonra numunenin uzunluğu (yer değiştirmesi) l ise, ε terimini aşağıdaki gibi tanımlayabiliriz;

$$\varepsilon = (l - l_0)/l_0 \tag{2.3}$$

Burada ε, mühendislik çekme gerinimi (engineering tensile strain) olarak bilinir. Mühendislik çekme gerinimi boyutsuz bir sayı olduğunu ve bir yüzdeyi elde etmek için çoğunlukla bir kırılma olarak bildirildiğini veya 100 ile çarpıldıklarını belirtmek önemlidir. Bu sayı bazen endüstride uzama olarak da bildirilir.

Bir gerilme-uzama grafiği bir çekme test makinesi kullanılarak elde edilebilir. Bilinen kesit alanından bir numune bir gerilme kuvvetine tabi tutulur ve uzama Şekil 2.7. 'de gösterildiği gibi ölçülür. Çekme gerilmesi y ekseni üzerinde çizilmekte ve mühendislik çekme uzaması x ekseni üzerinde çizilmektedir. Bir test sıcaklığında, birçok malzeme Şekil 2.7. 'de gösterilen gerilme- gerinim grafiklerine benzerdir. Bireysel malzemeler için gerilme- uzama grafiklerinde, grafikteki X doğrultusunda gösterilen dizin pozisyonu, eğimin plato kısmının uzunluğu ve kırılmadaki uzama (kırılma uzaması olarak da bilinir) ile başlangıçtaki eğim farklıdır. Gerilme- gerinim çizgisinin başlangıç kısmının eğimi hem mühendislik hem de malzeme bilimlerinde son derece önemlidir. Çoğu malzeme için gerilme-gerinim çiziminin başlangıç kısmı doğrusaldır, bu nedenle gerilme ve gerinim ilişkisi aşağıdaki gibidir:

$$\sigma = E * \varepsilon \tag{2.4}$$

Burada σ gerilme gerilmesi, ε ise mühendislik çekme uzaması (gerinim) ve E'de sabittir. Bu ilişkiye gözümüz aşina olmalıdır. Sadece Hooke'un Yay Kanunu'nun bir düzeltmesi olup, gerilimin ve uzama oranının orantılı olduğu anlamına gelir. Bir yaya uygulanan kuvvet ve sonuçtaki uzama doğru orantılıdır. Bu orantısal sabit, yay sabiti olarak adlandırılır.

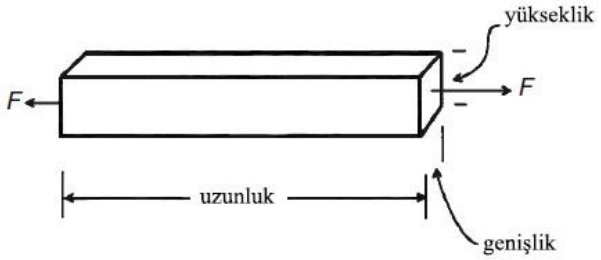
Yay sabiti, bu denkleme göre davranış gösteren malzemeler için genellikle bir model olarak kullanılır. Hooke yasasına uyan malzemeler doğrusal elastik malzemeler olarak bilinirler. Tepki kuvveti artan bir şekilde ve doğrusaldır. Güç kaldırılırsa, malzeme elastik olarak orijinal durumuna geri döner. Esneklik, yük malzemeden çıkarıldığında, ısı olarak mekanik enerjinin kaybı olmaksızın orijinal şekline ve boyutuna döner. E faktörü test materyalinin çekme modülü veya Young modülü olarak bilinir. Mühendislik çekme

uzaması boyutsuz olduğu için, Young modülü SI birimlerinde Paskal (Pa) ve İngiliz birimlerde inç (psi) gerilme birimlerine sahiptir. Yukarıdaki denklem ($\sigma = E * \varepsilon$) kuvvet ve yer değiştirmeden ziyade gerilme ve gerinim arasındaki ilişkiyi ifade eder; Young modülü, bir maddenin belirli bir gerilme kuvvetine nasıl tepki verdiğini gösteren bir malzeme parametresidir. Gerilme-şekil çizgisinin eğimi dik ise, Young modülü yüksektir ve malzemeye ufak bir uzama sağlamak için numuneye büyük bir gerilme yükü uygulanmalıdır. Yüksek bir Young modülüne sahip malzemeler "sert" olarak tanımlanır. Düşük Young modülüne sahip malzemeler "esnek" olarak tanımlanır. Tablo 2.1. iyi bilinen materyallerin kısa bir listesini ve Young modüllerinin karşılaştırmasını sunmaktadır.

Tablo 2.1 Bazı Bilinen Malzemelerin Young Modül ve Poisson Oranı (Pocius, 2012)

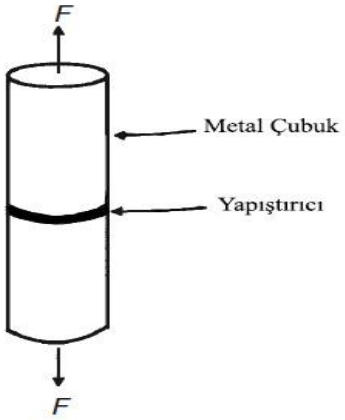
Material	*Young Modülü (Paskal=N/mm²)*	*Poison oranı*
Alüminyum	$7x10^{10}$	0.33
Yumuşak Çelik	2.2x1011	0.28
Silikon	6.9x1010	
Cam	6x1010	0.23
Poli (metil metakrilat)	2.4x109	0.33
Polikarbonat	1.4x109	
Düşük yoğunluklu polietilen	2.4x108	0.38
Doğal Kauçuk	2x106	0.49

Yapıştırma bağlantısının çekme testi Şekil 2.9. ’a benzer bir grafik oluşur. Bir yapışkanın gerilme özelliklerini değerlendirmek için tipik bir numune Şekil 2.10. 'da gösterilmiştir. Bu numune, ASTM D2095'deki kullanılana benzer. Metal çubuk uçları, yüzeylerin yapışkan boşluğu geçebilecek çapaklar içermemesi için parlatılmış olmalı ve montaj sırasında yüzeylerin paralel olabilmesi için işlenmelidir. Yüzeylerin birbirine göre herhangi bir şekilde kıvrılması, testi gerginlikten ziyade yarılmalara zorlayabilir.



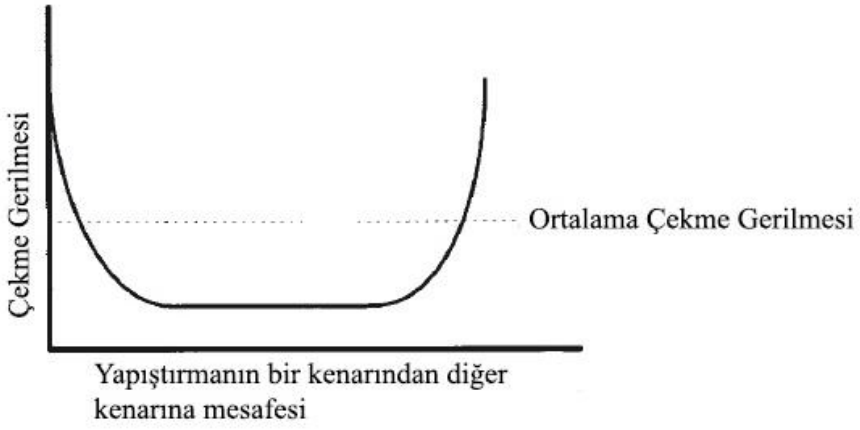
Şekil 2.9. Çekme kuvveti F'nin uygulandığı bir malzeme çubuğu (Pocius, 2012)

Metal çubuklar, kendilerini birleştiren bir yapışkana "bükülür", dolayısıyla "butt gerginliği" terimi denir.



Şekil 2.10. Bir "butt çekme" örneğinin diyagramı. Yapışanlar için metal çubuklar kullanılır. Bağlantı yapıldığında metal çubukların yüzeyleri pürüzsüz ve paralel olmalıdır (Pocius, 2012)

Yapıştırıcı sertleştirdikten veya koyduktan sonra, numune Şekil 2.10. 'da gösterildiği gibi gerilimle yüklenir. Numune hasara uğradı. Bir kopma geriliminin yanı sıra hasar modunu da bildiren bir rapor oluşturulur. Bu tür testlerin hatalı olması, hasar durumunda ortalama bir gerilme rapor edilmesine rağmen, yapışkan bağındaki gerçek gerilme dağılımı yapıştırıcı boyunca aynı değildir. Stres dağılımı Şekil 2.11. 'de gösterilene benzer olabilir. Butt çekme örneğinin kenarlarındaki yapışkan numunenin merkezinde yer alan yapışkandan daha yüksek gerilme stresindedir. Hasar bölgesindeki ortalama gerilme, yapışkanın gerçek çekme mukavemetinden ziyade bu kenar etkilerinden ötürü olması muhtemeldir. Butt çekme testleri genellikle yapışkanların değerlendirilmesi için kullanılmaz, çünkü bu yükleme tarzı bu şekilde yapışkanla birleştirilmiş yapılarda normalde kullanılmaz.



Şekil 2.11. Bir butt çekme örneğinde gerilme durumu (Pocius, 2012)

2.1.4.3. Soyulma

Soyulma gerilmelerinin yapıştırma bağlantılarında oluşması için yapıştırılan tabakalardan en az birinin esnek olması gerekmektedir (Şekil 2.5. b). Bu çeşit yüklemelerde yapıştırma bağlantı ara yüzeylerinde oluşan gerilme oldukça yüksektir. Yapıştırma bağlantısının yapışma yüzeyi çok geniş veya uygulanan kuvvet düşük olmadıkça yapıştırma bağlantısı kolayca deforme olacaktır. Bu sebeple bu çeşit yüklemelerden kaçınılmalıdır (Ekrem, 2015).

2.1.4.4. Çekme-makaslama

Doğrusal elastik kırılma mekaniğini kullanarak, gerinim enerjisi salınım oranı olarak bilinen bir malzeme parametresi tanımlayabiliriz. Gerinim enerjisi salınım oranı, mevcut gerinim enerjisiyle bir çatlak yaymak için gerekli olan enerji dengesinin sonucudur. Bu başlık altında, bu parametrenin ölçülmesine izin veren çekme-makaslama (cleavage) numuneleri denilen örnekler tartışılacaktır. Bu yöntemler, ölçüm sırasında önemli ölçüde deforme olmamış yapışkanlara dayanmaktadır. Yapıştırma boyunca yayılan ama plastik deformasyonun ölçülebildiği çatlağın soyulma numuneleri adı verilen bir diğer yapıştırma değerlendirme numuneleri de vardır. Soyulma numuneleri, bölünme numunelerinden daha yaygın olarak kullanılır.

Şekil 2.5. d'de gösterilen yükleme tipi, çoğunlukla eksenleri kaçık olan çekme kuvvetinin veya momentinin sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Önceki bölümlerde anlatılan gerilmelerin tersine bu gerilmeler, yapışma alanını dengesiz bir şekilde etkilemekte ve yapıştırma bağlantısının belli bir bölgesine birikmektedir. Bu tip gerilmeleri karşılamak için yeterli derecede yapışma alanı gerekmektedir. Çekme veya kesme gerilmelerine nazaran ihtiyaç olan yapıştırma alanı daha fazla olduğu için bu tip bağlantılar tavsiye edilmemektedir. Çünkü yüzey alanının fazla olması maliyeti artıracaktır (Adin, 2007, Ekrem, 2015).

2.1.5. Yapışma teorileri

Yapıştırma bağlantılarını tanımlamak için bazı teoriler mevcuttur. Ne yazık ki, malzemelerin temel fiziko-kimyasal özellikleri ile yapışkan bağın gerçek fiziksel gücü

arasındaki tanımlamayı yapabilecek birleşik teori yoktur. Yapışmanın mükemmel olduğunu varsayıp bir yapışkan bağının kuvvetini tahmin etmeye çalışan teoriler vardır. Ara yüzlerdeki etkileşimlerin kuvvetini öngören teoriler de vardır. Bununla birlikte, yapışma, yapışkan ve yapışan maddenin fiziksel özellikleri ve yapışkan bağın pratik gücü arasında tam bağlantıyı kuran herhangi bir teori yoktur. Aksine, yapışma literatürü, yapışma olaylarının spesifik alanlarına değinen birçok makaleden oluşmaktadır. Bunlar mekanik, elektrostatik, difüzyon ve fiziksel adsorbsiyon teorileri ortaya konulmuştur. Aslında, bu rasyonalizasyonların fiziksel temelleri bir dereceye kadar bir yapışkan bağının gücüne katkıda bulunur.

Yapışma biliminin amacı, ilk prensiplerden yapışma bağ kuvvetini tahmin etmektir. Amacın, yapışma maddesinin rasyonalizasyonlarının doğru kombinasyonu ile, gerinim enerjisinin yapışkan ve yapışana dağılımı hakkında uygun açıklamalara ulaşılması muhtemeldir.

Genel olarak kullanılan yapıştırma mekanizmalarını tanımlama teorileri Çizelge 2.2. ‘de gösterilmiştir. Bu bölümde bu tip teorilerin en genel olanı altı teoriden bahsedilecektir. Mevcut bilgiler ışığında, yapışkanın alt tabakalara yapışması olgusunu açıklamaya çalışan birkaç teori vardır ve şu anda bütün yapışma olayını tanımlayacak birleşik teori mevcut değildir. Tüm olayları açıklayabilmek için farklı teorilerin kullanılması ve bu teorilerin kombinasyonu gereklidir.

Çizelge 2.2. Yapışma teorileri (Ekrem, 2015)

Geleneksel	*Yeni*	*İnceleme Boyutu*
Mekanik Kilitleme	Mekanik Kilitleme	Mikroskopik
Elektrostatik	Elektrostatik	Makroskopik
Difüzyon	Difüzyon	Moleküler
Fiziksel Adsorbsiyon	Islanabilirlik	Moleküler/Atomik
	Zayıf Sınır Tabaka	Moleküler
	Kimyasal Bağlanma	Atomik

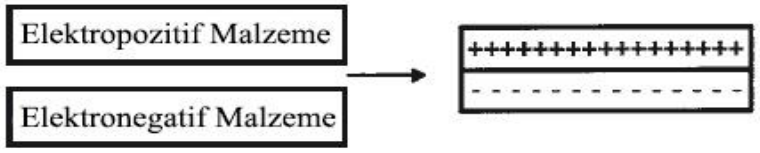
2.1.5.1. Elektrostatik teori

Temel fiziko kimyadan biliyoruz ki, tüm atomların belirli bir atom ile bir elektron arasındaki çekim gücünün bir ölçüsü olan elektronegatiflik olarak bilinen bir özelliği vardır. Elemanların periyodik tablosu yaklaşık olarak elektronegatiflik sırasına göre düzenlenir; elektronegatif atomlar sağda bulunurken elektropozitif atomlar sola doğru olur. Böylece flor çok elektronegatifken, sodyum daha elektropozitiftir. Atomların ve

moleküllerin birleşimleri elektronegatif karakter de gösterebilir. Katı yüzeyler ayrıca elektropozitif veya elektronegatif olarak karakterize edilebilir. Bilinen bir deney de kehribar bir çubuk kürke sürtülür ve çubuk kolayca belirlenebilen yüzey şarjı biriktirir.

Yapışma elektrostatik teorisinin temel bir savunucusu olan Derjaguin, esas olarak tüm yapışma olaylarının elektrostatik ile açıklanabileceğini ileri sürdü. Elektrostatik kuvvetler nedeniyle yapışkan bağlarının kuvvetini öngören bir teori üretti ve teoriyi deneysel olarak kanıtlamaya çalıştı. Şematik olarak, Şekil 2.12. teorinin temelini göstermektedir. Bir elektropozitif malzeme, elektronegatif bir malzemeye yük oluşturur, böylece arayüzde bir elektrostatik iki katman yaratılır. Derjaguin teorisine göre, yapışkan bağın gücü, yüklü yüzeyleri birbirinden uzaklaştıracak Coulombic kuvvetlerin üstesinden gelmek için gereken kuvvetten gelir. Derjaguin teorisinin sonucu şöyledir:

$$W_B = 2\pi\sigma_0^2 h_B \tag{2.5}$$



Şekil 2.12. Bir elektropozitif malzemeden elektronegatif bir malzemeye yük transferinden dolayı yapışkan bir bağ oluşumunun şeması (Pocius, 2012)

Bu denklemde, W_B yapışkan bağını kırmak için yapılan iştir; S_0 yüzey yük yoğunluğudur; ve h_B, iki malzeme ayrıldığında oluşan hava boşluğundaki elektrik kesilmesindeki ayrılma mesafesidir. Derjaguin ve arkadaşları, bir elektrik potansiyeli altında bir gazın parçalanması için Paschen kanununu ekleyerek, bu denklem tarafından gerekli olan yüzey yükünü ve ayırma mesafesini belirlemek için dahice bir yöntem kullandılar. Paschen Yasası bir gazın arıza potansiyelini ortam basıncına ve iki elektrot arasındaki ayrılma mesafesine ilişkindir. Derjaguin ve arkadaşları, temas halindeki malzemelerin bir kapasitör görevi gördüğünü ve kapasitör üzerindeki voltajın aşağıdaki ifadeyle verildiğini varsaydı:

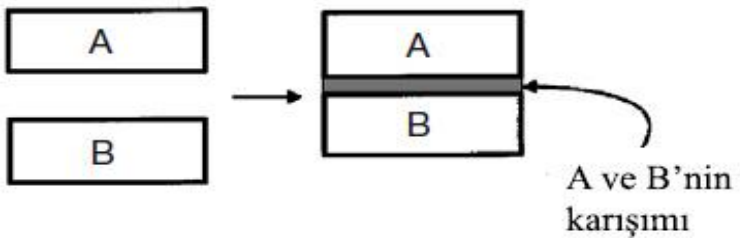
$$V^2 = \frac{8\pi E_C p h}{p} \tag{2.6}$$

Burada V gerilimdir; P çevre gaz basıncıdır; E_C, içinde depolanan enerjidir. Kondansatör; ve h iki şarj düzleminin ayrılması mesafesidir. Huntsberger tarafından açıklandığı gibi, bu çalışmacıların yaptığı birincil hatalı varsayım, $E_C = W_B$ idi. Bu hatalı varsayımı kullanarak, yapışkan bağları camdan sıyırmak için yapılan çalışmaları ölçmüşlerdir. Ölçülen W_B, E_C ile eşlendi ve daha sonra, bir Paschen grafiği $log\ V$ ve $log\ ph$ grafiğini çizmek için kullanıldı. Bu çizimden bir kondansatördeki yük yoğunluğunun denklemi kullanılarak yukarıda tarif edilen yük yoğunluğunu ve ayırma mesafesini hesaplayabilirler. Ne yazık ki, varsayımları hatalıydı, çünkü soyma enerjisinde ara yüzey enerjisi olmayan enerjiyi hesaba katmadılar. Yapışkanın ve yapışanın plastik deformasyonu göz ardı edildi. Ara yüzey enerjisinin bir yapışkan bağını kırmak için toplam enerjinin olduğu tek durum, yapışkanların ve yapıştırıcıların tamamen esnek olmasıdır. Bu hatalı varsayımın bir sonucu olarak, Derjaguin deneyleri ve yapışma elektrostatik kuramı itibara girdi.

Bununla birlikte, Derjaguin çalışmasının eksikliklerine rağmen, yapışmaya yönelik elektrostatik bileşenin tamamen göz ardı edilemeyeceğini gösteren bazı örnekler bulunmaktadır. Washington Eyalet Üniversitesi'ndeki Dickinson ve arkadaşları (1994) kırık yayılımı üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmalarda, yapışkan bağlar, ışık, yüklü ve nötr parçacıkların yanı sıra diğer elektromanyetik yayılımların algılanabileceği koşullar altında yüksek vakum altına yerleştirilir. Yapışkan bağ açılır ve çeşitli emisyonlar ölçülür. Örneğin bir epoksi / alüminyum yapışkan bağ kırılmasında, yüklü parçacıklar ve ışık yayılır. Bir basınca duyarlı yapışkan bant bir fotografik emülsiyona uygulanır ve daha sonra bu emülsiyondan sıyrılırsa, geliştirme, bağlanma işleminde yayılan ışığın fotografik delili sağlanır. Bu deneyde, bir bant AM transistör telsizine uygulanır. Bant soyulduğunda, ses, bağlanma işlemi sırasında radyo frekansı radyasyonunun emisyonunu belirten radyo yoluyla yükseltilebilir. Bu deneyler deşarj bulunması nedeniyle yapışma için bir elektrostatik bileşen bulunduğunu göstermektedir. Dickinson, çalışmasının elektrostatik teoriyi desteklediğini veya eleştirdiğini iddia etmemektedir. Ancak bulgularının kovalent bağların kopmasıyla açıklanabileceğini belirtmektedir.

2.1.5.2. Difüzyon teorisi

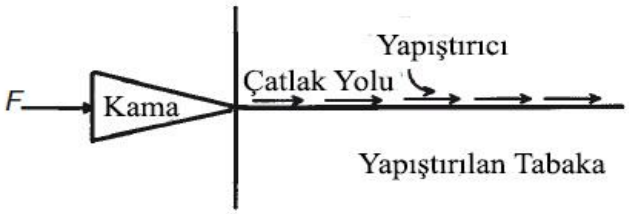
Yapışmanın difüzyon teorisi Şekil 2.13. 'de şematik olarak gösterilmiştir. İki malzeme, A ve B, yakın temasa getirilmiştir. İki malzeme birbiri içinde çözünürse, bir çözelti oluştururlar. Dağıtıcı bağın bir sonucu olarak, artık gerçek bir arayüz yoktur, daha ziyade A maddesinin özelliklerinin aşamalı olarak B maddesinin özelliklerine dönüştüğü bir ara faz vardır. Diffüzif bağlanma, yapışkan bağlamanın nihai halidir. "Normal" bir yapışkan bağında, yapıştırıcı ve yapışan malzeme birbirlerine karışmaz ve en iyi durumda ara fazı "yayarak" mikroskopik bir morfolojiye sahiptir. Bu "normal" durumda, yapışkanın ve yapışanın özellikleri arasında genellikle önemli bir uyuşmazlık vardır. Bu nedenle, yapışkan ile yapışan malzeme arasındaki temas gerilme konsantrasyonu sağlayan bir süreksizlik olarak işlev görür. Diffüzif bir yapışkan bağı oluşturan fazlar, stres konsantrasyonuna yol açmaz, çünkü fiziksel özelliklerde kesinti olmaz. Difüzyon teorisi, ara yüzey boyunca polimer zincirlerinin karşılıklı difüzyonu neticesinde oluşan adhezyonu ifade etmektedir. Yani yapışkanlardan en az biri polimer olmalıdır.



Şekil 2.13. Şematik olarak difüzyonla bağlanma (Pocius, 2012)

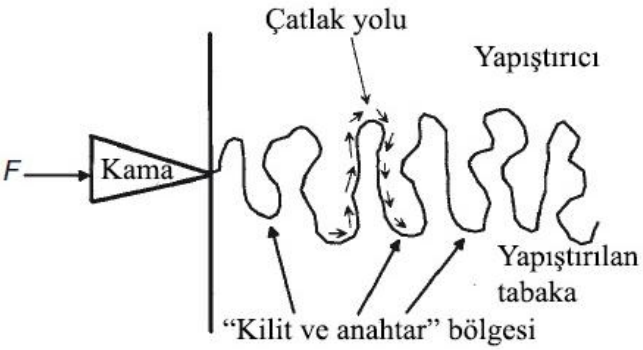
2.1.5.3. Mekanik kilitleme teorisi

Bir önceki bölümdeki kavramlar, yapışkanların en azından birinin bir polimer olduğu yapıştırma koşullarına yönelikti. Bu sayede yapışkan ile yapışan arasındaki sınırda dağınık bir ara yüz elde edildi. Şimdi ise yapışkanların birinin veya her ikisinin yapıştırıcı madde için geçirimsiz olduğu bir durum incelenmektedir. Yapışkan ile yapışan arasındaki birleşmenin Şekil 2.14. 'de gösterildiği gibi bir düzlemde olduğunu varsayalım. Bağ kenarındaki üçgen, numunenin kenarında başlangıç çatlak kuvveti uygulandığını belirtmek içindir. Başlangıç çatlak kuvvetinin yapışkana veya yapışana doğru hareket etmesi, ara yüzün gerilim konsantratörü görevi görmesi ve o bölgede çatlağın yayılması sebebiyle mecburi değildir.



Şekil 2.14. Yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme arasında keskin bir ara yüz kenarına bir kama ile kuvvet uygulanması (Pocius, 2012)

Bunun yerine bunun Şekil 2.15. 'de gösterilen ara yüze sahip olduğumuzu varsayalım, bu yüzeyde yapışanın düzgün olmadığı, ancak yapışkanın içinden akabileceği bir pürüzlülüğe sahip olduğu varsayılsın. Eğer yapışkan yüzeydeki hava boşluklarının yerlerini alabilirse, iki malzeme yapıştırma yüzeyi boyunca sıkı bir temas halinde olur. Bu bağın kenarı bir kama ile yönlendirilse, ani bir gerilme düzlemi göremeyiz. Daha ziyade, çatlak bağ boyunca yayılmak için, kuvvet çizgileri sapar. Bazı sapmalar yapışkana girer. Çoğu durumda, yapışkan yapışandan daha fazla deforme olabilir. Yapışkan (ya da yapışan) bağlanma sırasında plastik deformeye uğrarsa, enerji tüketilir ve yapışkan bağın gücü daha yüksek gibi görünür.



Şekil 2.15. Mikrotopografik yüzey pürüzlülüğüne sahip mekanik kilitleme (Pocius, 2012)

Yüzey pürüzlülüğünün yapıştırıcının bağlamasına yardımcı olmasının bir başka nedeni birbirine kenetlenme etkisidir. Şekil 2.15. 'de, oklar yüzeyin bir bölümünü göstermektedir. Burada, yapıştırıcı yüzeydeki gözenekleri tamamen doldurmuştur. Bu gözenekte, yapışkan çıkışı, yapıştırıcı yüzeyinin bir kısmı tarafından kısmen tıkanmıştır. Aralarındaki bu yer, "kilit ve anahtar" etkisi olarak adlandırılan durumu sergilemektedir. Çukurların içerisinde kilitlenen yapıştırıcı, tümseklerin oluşturduğu fiziksel engeller nedeniyle çıkamaz ve kilitlenir. Aynı şekilde, Şekil 2.15. 'de gösterilen gibi gözenekli katı

bir yapıştırıcı, gözenekli yapı deformasyona uğramadan gözenekteki "çıkıntı" yı geçemez.

Plastik deformasyon, bir enerji yutma mekanizması gibi davranır ve yapışkan bağın gücü artar gibi görünür.

Yüzey pürüzlülüğünün yapışmayı arttırmasının bir başka nedeni tamamen fiziksel temas alanı meselesidir. Şekil 2.14., iki malzeme arasındaki temasın bir düzlemde, iki dikdörtgen gövde arasındaki olası minimum temas alanının bir durumunu gösterir. Şekil 2.15. 'i üç boyutta hayal edersek, yüzey alanının büyük oranda arttığını görürüz. Eğer ara yüzey etkileşimlerinin yapışmanın temeli olduğuna inanıyorsak, bu etkileşimlerin toplamının temas alanı olarak ölçekleneceğini biliyoruz. Gerçek temas alanı büyük miktarda artarsa, yüzey etkileşiminin toplam enerjisi, yüzey alanı ile orantılı bir miktarda artar.

Belki de yüzey pürüzlülüğünün yapışma üzerindeki etkisinin en iyi gösterimi Arrowsmith (1970) tarafından sağlanmaktadır. Her biri aynı kalınlığa sahip olan bakır parçalarını elektro-şekillendirme yöntemi ile farklı pürüzlük yüzeyleri oluşturdu. Şekil 2.16., yapışkan bağ gücü verileri ile birlikte yüzey üzerine yerleştirdiği bazı şekillerin bir diyagramıdır.

Bakır Levhanın Yüzey Topografisi		Ortalama soyulma yükü (lb/in)
Topografi	Temsili Şematik Gösterim	
Düz		3.75
Düz + 0.3 μ dentritler		3.8
Düz+ 0.3 μ dentritler + oksit		4.4
3 μ piramid (yüksek açılı)		5.9
2 μ düşük açılı piramid + 0.3 μ dentritler		7.3
2 μ düşük açılı piramid + 0.2 μ dentritler + oksit		8.8
3 μ yüksek açılı piramid + 0.2 dentritler + oksit		13.5

Şekil 2.16. Epoksi yapıştırıcı söküldüğünde elektrolitik bakırın yüzey pürüzlülüğünü pratik yapışma seviyesi ile ilişkilendiren deney sonuçları (Arrowsmith, 1970)

Aynı epoksi yapıştırıcıyı tüm yüzeylere uyguladı ve epoksinin bakırdan soyma mukavemetini ölçtü. Şekil 2.16. 'da gösterildiği gibi, soyma mukavemeti her durumda

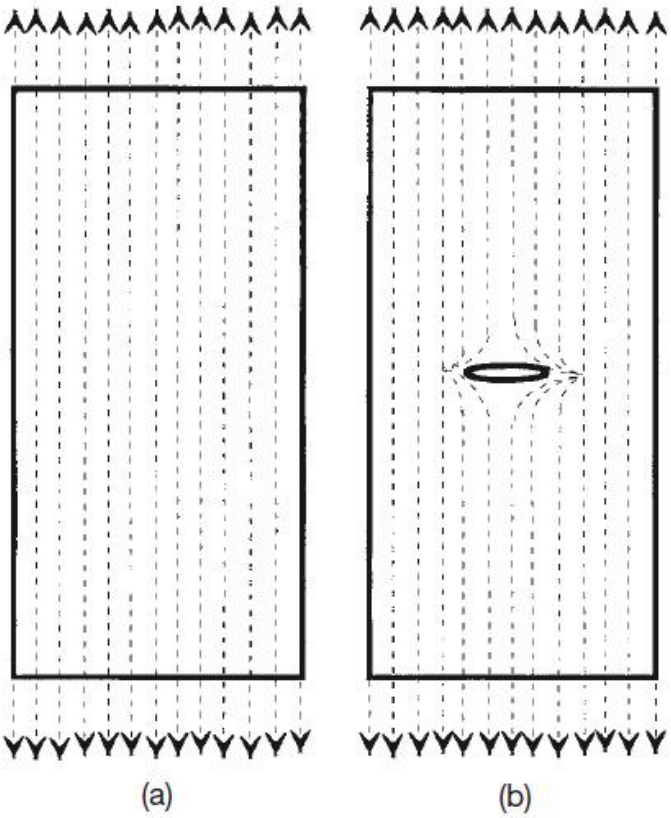
adeziv ve yapışkan nominal olarak aynı olmasına rağmen artmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün etkisinin, ara fazdaki yapışkanın plastik deformasyonunu arttırdığından ve soyulma mukavemetinin arttığından emin olmalıyız.

Yapılan güncel çalışmalarda ise mekanik kilitlemenin yüzey pürüzlülüğü ile doğrudan ilişkili olduğu görülmüştür. Kumlama (mekanik) veya anotlama (kimyasal) yüzey pürüzlendirme işlemleri farklı pürüzlülük değerleri ve farklı yüzey özellikleri meydana gelir (Ekrem, 2015).

Literatürde, metal yapıştırma bağlantıları için en uygun yüzey pürüzlülüğü Ra= 1.5-2.5 μm olarak alınması önerilmektedir. Yüzey pürüzlendirme işlemi yapılmamış yüzeylerde yapıştırcının tutunma yüzey alanı düşerek bir de mekanik kilitleme olayının gerçekleşmemesinden dolayı yapıştırma mukavemeti zayıflamaktadır. Yüzey pürüzlülüğü kaba olan yüzeylerde ise (Ra>5 μm) tam ıslanma ve yapıştırma bağlantısında boşluklar meydana geleceğinden mukavemet düşer (Şekercioğlu ve Özenç, 2012).

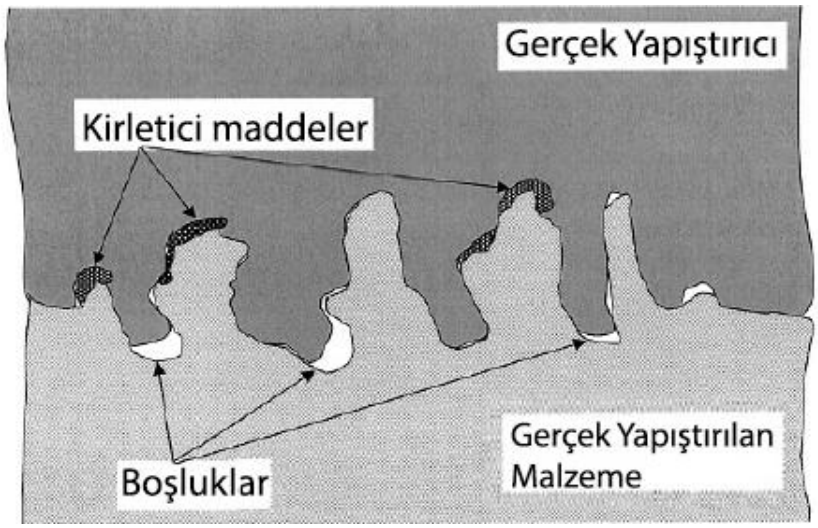
2.1.5.4. Islanabilirlik

Şekil 2.18. 'de gösterilen gerçek bir yapıştırıcı ve gerçek bir yapıştırma tabakası yüzeyinin bulunduğu bir durumu göz önüne alalım. Yapışmaya karşı ıslanmanın önemi açıktır. Şekil 2.15. 'deki gibi yüzeyi pürüzlendirilmiş bir yüzey mutlaka tamamen temiz değildir. Kirleticilerin yüzeyde olması muhtemel olup, "zayıf sınır tabakası" oluşturmaktadır. Buna ek olarak, gerçek bir yapışkan gerçek bir viskoziteye sahiptir. Birçok durumda, yapışkanın iyileştirilmesi gerekecek ve bu malzemelerin viskozitesi uygulama sonrası zamanın bir fonksiyonu olarak hızla artmaktadır. Gözeneklerin alt kısmında boşluk bırakarak doldurulamayacağını düşünebiliriz. Yapışkan bağ bu nedenle her biri bir gerilme konsantrasyon noktası olarak işlev gören ara yüzeyde boşluklara sahip olabilir. Bu sorunu anlamak için Şekil 2.17. 'i incelersek. İki durum gösteriyoruz, biri, çatlak veya boşluk olmayan ve diğeri de çatlak içeren aynı malzemeden mükemmel bir monolitik malzeme.



Şekil 2.17. (a) Tek kutuplu bir gövde ve (b) eliptik delik içeren bir gövde boyunca kuvvet çizgilerini gösteren diyagram (Pocius, 2012)

Her iki numuneye de bir yük yerleştirildiğini düşünebiliriz. Yük, bozulmamış malzeme boyunca kesintisiz güç hatları olarak yayılmış olarak gösterilir. Kusurlu malzemede, kusur nedeniyle güç çizgileri sürekli olamaz. Kuvvet çizgileri, kesintisiz olması gerektiği için kusurun kenarına toplanır ve yoğunluğu arttırır. Yoğunluğun artışı bu eliptik çatlak için basit bir şekilde hesaplanabilir. Çatlak boyutları uzun eksenin kısa eksenden 100 kat fazla olduğu şekildeyse, stres yoğunluğundaki artış 201'dir. Bu nedenle, malzemenin uçlarında 1 Newton olan bir kuvvet, böyle bir çatlağın kenarlarında 201 Newton'a benzer. Bu tartışmadaki faktör, kırılma mekaniğinde kullanılan "gerilme yoğunluğu faktörünün" kaba bir versiyonudur (Inglis, 1913). Hasarlı bir arayüze sahip yapışkan bir bağ da bu durumun bir başka örneğidir. Boşluklar veya zayıf sınır malzemeleri, kusurun çevresindeki uzaktan uygulanan kuvveti büyütür. Çoğu zaman, bu kusurun yayılmasına neden olur.



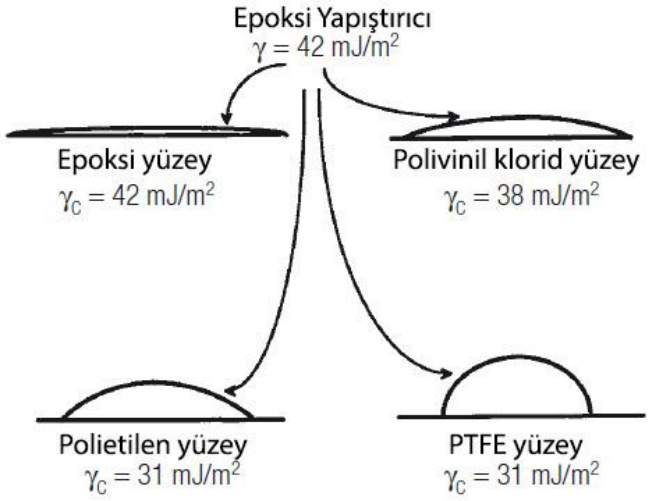
Şekil 2.18. Yapışan maddenin yüzeyinin kirletici maddelere sahip olduğu ve yapışkanın sonlu bir viskoziteye sahip olduğu "gerçek" bir bağlanma durumunun şeması (Pocius, 2012)

Malzeme, enerjiyi emme mekanizmaları yoksa, malzeme, o malzemenin teorik gücünden daha az (bazen çok daha az) yüklerde başarısız olur. Dolayısıyla, yüzeyin iyi ıslanmasını sağlamak, ara yüzdeki kusurları ortadan kaldırmak ve böylece bağ kuvvetinin teorik olarak olabildiğince yakın olmasını sağlamaktır.

Yapışma çalışması, ıslanabilirlik ve temas açısı olaylarından ayrılamaz. Yapışmanın iyi olması için yapışkan ile yapışan madde birbirine tam temas ettirilmelidir. Yapışkanın yüzeyle yakın temasını sağlamak, ara yüzey kusurlarının en aza indirgenmesi veya ortadan kaldırılması anlamına gelmektedir. Yüzey temasını en üst düzeye çıkarmak ve diğer fazlarla teması en aza indirgemek için yapışkan kendiliğinden yüzey üzerine yayılırsa, yakın temas oluşur. Yayılma (rastgele veya olmamış) temas açısı ölçümleri ile incelenebilir. Bu bölümde ıslatma ve yapışma arasındaki ilişkiyi araştıracağız.

Islatma ve yapışma ilişkisinin basit bir görünümü Şekil 2.19. 'da verilmiştir. Burada, çeşitli yüzeylerde bir damla bir epoksi yapıştırıcının temas açısı gösterilmektedir. Tipik bir epoksi reçinesinin yüzey enerjisi yaklaşık 42 mJ/ m^2'dir. Damla sertleştirilmiş epoksi kompozit veya polivinil klorür (PVC) gibi malzemeler üzerinde düşük bir profile sahiptir, ancak ıslatma PVC'de rastgele olmaz. Yaklaşık 31 din/ cm kritik ıslanma gerilimi olan polietilen için damla daha da yüksek bir profile sahiptir. Yapışkan, politetrafloroetilen (PTFE) üzerinde 18 dynes/ cm kritik ıslanma gerilimi ile çok yüksek bir temas açısına sahiptir. Bu nedenle, bir epoksi yapıştırıcının PTFE'ye zayıf yapıştıracağını ve doğru olacağını tahmin edebiliriz. PTFE gibi düşük yüzeyli enerji malzemeleri zayıf yapışkanlığa sahiptir ve yapışkan veya serbest bırakılmış yüzeyler

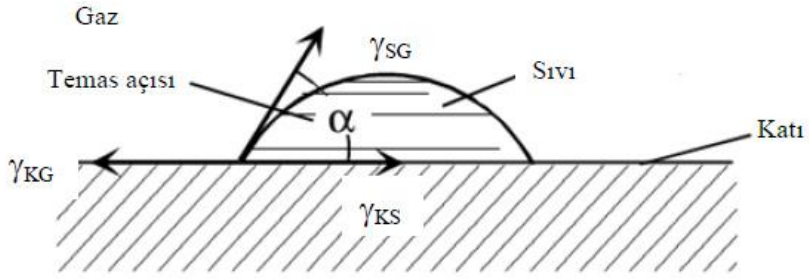
olarak kabul edilir. Yapışmaz tencere için PTFE benzeri malzemeler temel oluşturur. Yumurtaların sopa olmadığını gösterdiğinde ıslanabilirlik, Zisman kritik ıslanma gerilimi ve yapışma arasındaki ilişkinin açık bir gösterimini yapmış bulunmaktayız. Yumurta beyazı çoğunlukla proteinli maddelerdir. Bununla birlikte, proteinler sulu çözeltidir ve yumurtanın 60-70 dynes/ cm'lik bir yüzey gerilimine sahip olması beklenir. Yumurta ve PTFE arasındaki temas açısı yüksektir. Islatma zayıf ve kendiliğinden değil ve yumurtalar uymuyor.



Şekil 2.19. Değişik kritik ıslanma gerilmelerinin dört yüzünde bir epoksi yapıştırıcının (sertleştirilmiş) temas açısının gözleminin şeması (Pocius, 2012)

Islatma ölçütleri, yüzey ve ara yüzey serbest enerjileri nicel olarak tanımlanır. Bir sıvı yüzeye damlatıldığı zaman yüzeyle sıvı arasında bir temas açısı oluşur. Statik bir sistemde temas açısı ölçülebilir. Şekil 2.20. 'de katı yüzey homojen, pürüzsüz, düzlemsel ve sert ideal bir sistemde temas açısını göstermektedir. Ara yüzey gerilimleri γ olarak tanımlanan üç faz kesiştiği noktada denge değerleri temsil eder. K, S ve G indisleri sırasıyla katı, sıvı ve gaz fazları belirtmektedir. Young eşitliği (Young, 1805; Gibbs, 1961) yüzey serbest enerji (γKG) ve temas açısı (α), üç fazlı ıslatma noktası arasındaki ilişkiyi açıklar.

$$\gamma_{KG} = \gamma_{KS} + \gamma_{SG}.cos \propto \qquad (2.8)$$



Şekil 2.20. Bir sıvı yüzeyi ıslattığı zaman meydana gelen etkileşimin şematik resmi (Ekrem, 2015)

2.1.6. Tek taraflı bindirmeli bağlantılar

Bu çalışmanın amacı, literatürde mevcut tek taraflı bindirmeli bağlantılarında analitik modelleri incelemek ve bunların uygulanmasını kolaylaştırmak amacıyla elde edilen deneysel sonuçları ile her biri için uygulanabilirlik koşullarının doğruluğunu tespit etmek amacıyla karşılaştırmaktır. Tek taraflı bindirmeli bağlantılarında analitik modellemelerin uygulanması genellikle çok zahmetli ve bu yüzden modellerden sadece lineer elastik yapıştırıcılar seçilmiştir.

i. Basit lineer elastik analizler,

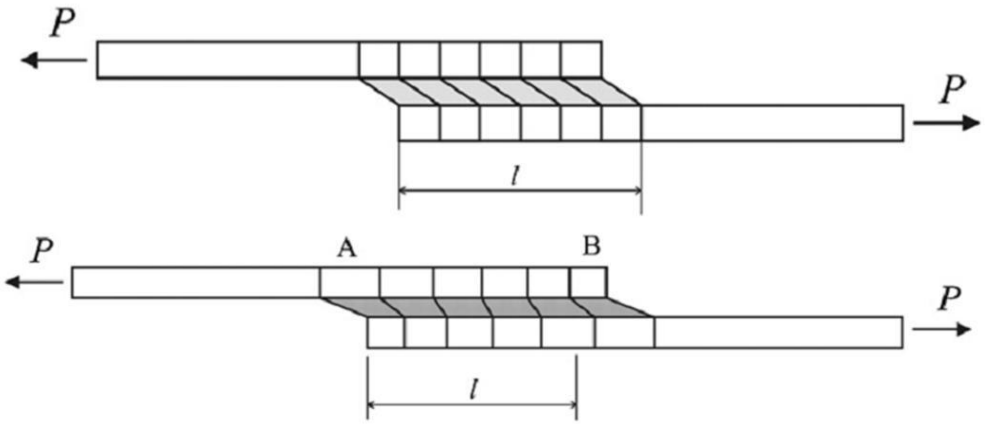
ii. Adams and Peppiat analizi.

2.1.6.1. Basit lineer elastik analizler

En basit analiz pratikte en yaygın bağlantılardan biri olan tek taraflı bindirmeli bağlantılarında düşünmektedir. Bu analizde yapıştırıcı, sadece kayma yönünde deforme ve yapıştırılan malzemeler ise rijit olarak kabul edilir. Soyulma ve eğilme gerilmeleri ihmal edilir. Şekil 2.21. 'de gösterildiği gibi, yapıştırıcının kayma gerilmesi (τ), üst üste binme uzunluğu boyunca sabittir ve aşağıdaki formül ile hesaplanır (Owens ve Lee-Sullivan, 2000).

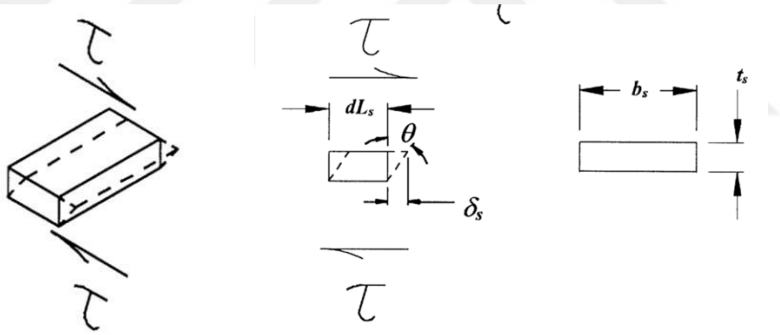
$$\tau = \frac{P}{bl} \tag{2.9}$$

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



Şekil 2.21. Tek taraflı bindirmeli bağlantılarında yüklü deformasyon a) rijit ve b) elastik yapıştırılan malzemeler (Ekrem, 2015)

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



Şekil 2.22. Yapıştırıcının kayma yer değiştirmesi (Ekrem, 2015)

Şekil 2.22. 'de görüldüğü üzere yapıştırıcının kayma yer değiştirmesi δ_s olarak elde edilebilir.

$$\gamma = tan_\theta = \frac{\delta_s}{t_s} \tag{2.10}$$

burada γ, kayma birim şekil değiştirmesi; θ ,kayma düzlemi nedeniyle oluşan kayma açısı; δ_s, kayma düzlemine göre yapıştırıcının eksenel yer değiştirmesi ve t_s ise yapıştırıcının kalınlığıdır. Elastik şekil değişimi, kayma gerilmesi ve kayma modülü için,

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \tag{2.11}$$

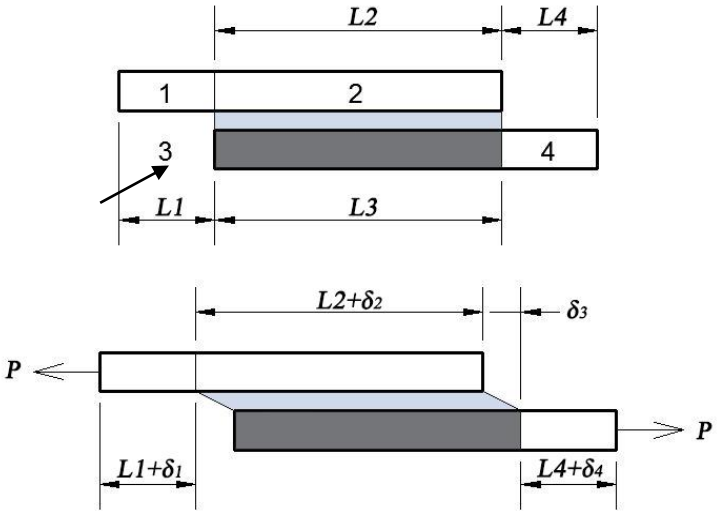
$$\tau = \frac{P}{A_{kayma}} \tag{2.12}$$

$$\delta_s = \frac{t_s}{G}\tau \tag{2.13}$$

burada τ, yapıştırıcının kayma gerilmesi; G, yapıştırıcının kayma modülü; A_{kayma} yapıştırıcının kayma alanı ($dL_s x B_s$ Şekil 2.22.) ve yapıştırılan malzemeye uygulanan çekme kuvvetidir.

2.1.6.2. Adams ve Peppiat analizi

Şekil 2.23. 'te gösterildiği gibi tek taraflı bindirmeli bağlantılarında gerilme dağılımlarını dört ayrı bileşenler olarak modellemiştirler (Adams ve Peppiatt, 1974). Burada (a) 1 bileşen üst yapıştırılan malzemenin bağlanmamış uç bölgesidir; (b) 2 bileşen üst yapıştırıcı malzemenin bağlanmış kısmı; (c) 3 bileşen yapıştırıcı bağı ve (iv) 4 bileşeni alt yapıştırılan malzemenin bağlanmamış uç bölgesidir. 1 ve 4 bileşenler karşılaştırıldığında sabit çekme gerilmesi sahipken 2 bileşen düzgün olmayan bir çekme gerilmesi sahip olacaktır. 3 bileşen olan yapıştırıcı bağ tabakası, homojen olmayan bir çekme ve kayma gerilmelerine sahiptir.



Şekil 2.23. Bağlantı modelinin ayrı ayrı bileşenlerine ayrılması (a) yüklenmemiş bileşenleri (b) gerilme yükünden dolayı yer değiştirme miktarı

Bağlantının toplam yer değiştirme miktarı, tek tek bileşenlerin yer değiştirme miktarlarının bileşkesi olarak hesaplanabilir,

$$\delta_{toplam} = \sum_{i=1}^{4} \delta_i \tag{2.16}$$

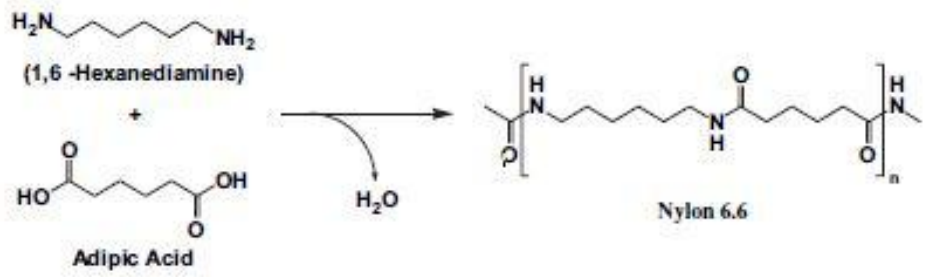
burada δ_{toplam} 4 bağlantı bileşenlerin toplam eksenel yer değiştirme miktarı; L1 orijinal uzunluğuyla 1 bileşenin yer değiştirme miktarı δ_1; L2 orijinal uzunluğuyla 2 bileşenin yer değiştirme miktarı δ_2; L3 orijinal uzunluğuyla 3 bileşenin yer değiştirme miktarı δ_3 ve L4 orijinal uzunluğuyla 4 bileşenin yer değiştirme miktarı δ_4'dır.

2.2. Termoplastik Malzemeler

2.2.1. Naylon 6.6

Termoplastik olup kristal yapıya sahiptir. Katkı maddesi ve yumuşatıcı ilavesiyle çok çeşitli yapıda plastik elde etmek mümkündür. Naylonların en yüksek erime sıcaklığına sahip olanı Naylon 6.6'dır. Yüksek kuvvete ve sertliğe (stiffness) ve sıcaklık artışıyla sertliğini koruma özelliğine sahiptir. Naylonlar yüksek mol kütleli, doğrusal yapılı bir polimer sınıfıdır. Katı, opak, bazen de saydam görünümlü, bağıl yoğunluğu 1.07-1.18 arasında değişebilen termoplast bir malzemedir. Saydam türleri ışığı % 85-90 oranında geçirirler. Mekanik özelliklerini 150°C 'de bile korur.

Naylon 6.6 (N6.6), kıyafetler, otomotiv parçaları, sıcak hava balonları olmak üzere sayısız şey için kullanılan yaygın bir polimerik malzemedir. Bunlardan N6.6, hekzametilen diamin [H2N-(CH2)6-NH2] ile adipik asidin [HOOC-(CH2)4-COOH] polimerizasyonu sonucunda elde edilmekte olup genel yapısı aşağıdaki formülde görülmektedir. Kullanılan asit ve amin 6 karbonlu olduğu için naylon 6.6 olarak adlandırılmaktadır (Bernstein ve ark., 2005)



Şekil 2.24. Naylon 6.6 sentez şeması (Bernstein ve ark., 2005)

Şekil 2.24. 'de görüldüğü gibi sentez sırasında H_2O açığa çıktığı için formasyon reaksiyonunun tersi, amid bağı basit hidrolizi gerektirir. Birçok naylon bozunma çalışması termal veya fotokimyasal yaşlanmaya odaklansa da, bozulma sırasında nemin

(suyun) rolünü tartışan çok azdır. Nem emdirme oranının artışına paralel olarak naylon 6.6'nın da çekme mukavemeti düşmektedir. Çünkü hidrolizin naylon 6.6'da nem bozulmasına yol açtığı bilinmektedir (Bernstein ve ark., 2005).

Naylon 6.6;

- Sertlik (GFR)
- Tokluk
- Yorgunluğa karşı mukavemet
- Sünme mukavemeti
- Alev geciktiricilik
- Elektriksel yalıtım
- Kimyasal mukavemet
- Aşınma mukavemeti
- Düşük sürtünme katsayısı
- Dış koşullara dayanıklılık
- Geniş renk yelpazesi
- İşleme kolaylığı

gibi avantajları bulunmaktadır.

2.3. Nanoteknoloji

Günümüzde fen ve mühendislik teknolojisi, insanoğlunun ihtiyaçlarını karşılamak ve konforlarını sağlamak için devamlı olarak gelişmektedir. Bu gelişmelerden biri de boyutların küçültülmesiyle başlayan ve malzemelerin özelliklerini iyileştirmeye yönelik ve bunların ticari olarak kullanılmasını hedefleyen "nanoteknoloji" dir.

Nano kelimesi Yunancada "cüce" anlamında kullanılan "nanos" kelimesinden türemiştir ve herhangi bir fiziksel büyüklüğün bir milyarda biri anlamına gelmektedir. Nanomalzemeler büyüklük olarak bakıldığında yaklaşık 10- 100 atomluk yapılara (10^{-9} metre) karşılık gelmektedir. Bir insanın saç telinin çağını ele alındığında yaklaşık 10^5 nanometre olduğu görülmektedir ve nanometre ölçeğinin ne kadar küçük olduğu bu sayede daha kolay anlaşılmaktadır. Farklı bir söylemde, bir nanometre içine yanyana sığacak atom sayısı ancak 2- 3 tanedir. Yani yaklaşık 100- 1000 atom bir araya gelerek nano boyutlarda bir nesneyi oluşturmaktadır (Bhushan, 2010).

Nanoteknoloji genel manada, nano ölçeklerde boyutlara sahip olan ve bu boyutları sayesinde fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri ciddi ölçüde geliştirilmiş ve bu

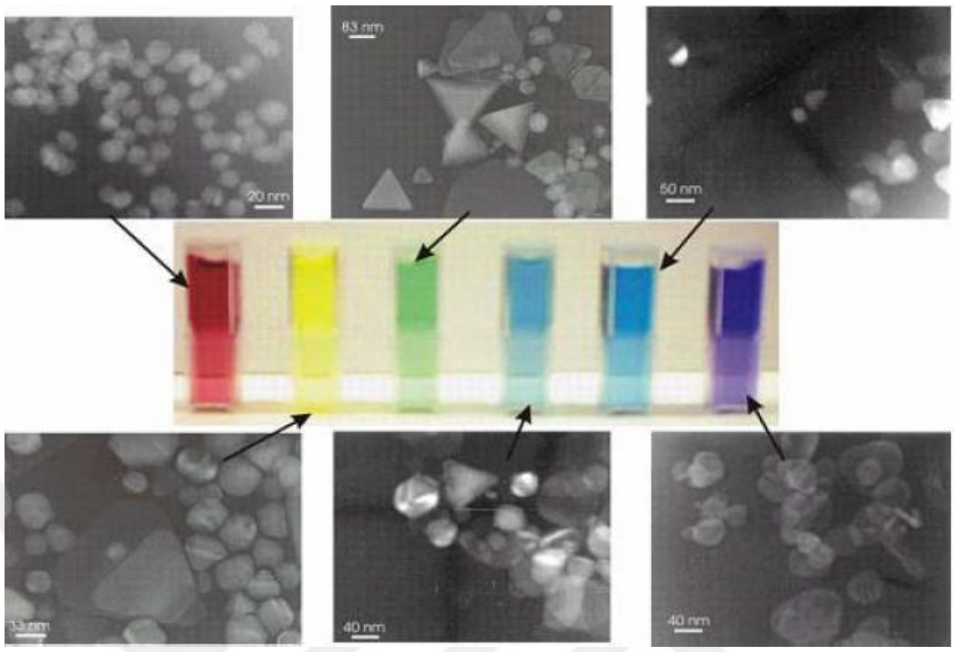
özellikler sayesinde çeşitli işlevleri olguları yerine getiren boyutları 0.1- 100 nm arasında değişiklik gösteren malzemelerdir. Nanoteknolojinin kapsadığı birçok alan mevcuttur, bunlardan bazıları nano-biyoteknoloji, nano-elektronik ve nanokompozittir (Thostenson ve ark., 2001, Thostenson ve ark., 2005).

Nano teknoloji, maddelerin atomik ve moleküler boyutlarda mühendisliğinin yapılmasıyla yeni özelliklerinin ortaya çıktığı ve böylece maddelerde gerçekleşen nano ölçülerdeki fiziksel, kimyasal ve biyolojik olayların anlaşılması, kontrollü bir şekilde üretimi amacıyla fonksiyonel malzemelerin, makinelerin ve sistemlerin geliştirilmesidir. Nano teknoloji, maddenin yapıtaşı olan atomların kontrollü şekilde düzenlenmesi imkanına sahip olmayı ve her türlü kullanım alanlarında daha dayanıklı, daha hafif ve doğaya daha az zarar verecek şekilde üretim yapılmasını sağlayan teknolojidir.

Nanoteknoloji; klasik mekanik ve kuantum mekaniği arasında açıkça anlaşılamayan bu hususta uygulama yapan bir teknoloji olarak da tanımlanabilmektedir. Nanoteknolojide, kısmen doğa taklit edilmeye ve eşyalar atomlardan başlayarak inşa edilmeye çalışılır. Bu nedenle şimdi, savurgan ve büyük miktarda kirliliğin eşlik ettiği geleneksel seri endüstriden nanoteknoloji olarak adlandırılan atomik ölçek endüstriye hareket edilmiştir. Nanoteknoloji; oldukça ucuz, oldukça güvenilir, oldukça temiz ve finansal olarak karşılığı oldukça yüksek olduğu için önemli olmaktadır (El Naschie, 2006).

Çok küçük boyutlara sahip nano yapılar için, çevremizdeki nesnelerde geçerli olan fiziksel ve kimyasal yasalar geçerliliğini yitirmektedir. Yani belli bir hacim kaplayan bir madde bir veya birden fazla boyutta (uzunluk, genişlik veya kalınlık) nanometre ebatlarında veya bundan daha küçük parçacıklara bölündüğünde, taneciklerin her biri kendi başına en başta belli bir hacmi olan bu maddenin özelliklerinden çok farklı ve beklenmedik özelliklere sahip olmaktadır. Örneğin, nano ölçekteki malzemelerin iletim özellikleri (momentum, enerji ve kütle) artık sürekli olarak değil ancak kesikli olarak tarif edilmektedir. Benzer olarak, optik, elektronik, manyetik ve kimyasal davranışlar klasik olarak değil kuantum olarak tanımlanmaktadır (Qian ve Hinestroza, 2004, Özdoğan ve ark., 2006). Normalde kırılgan bir malzeme olan seramik, tanecik büyüklüğü nanometre değerine indirildiğinde kolaylıkla deforme olup şekil verilebilme özelliğine sahip olmaktadır. 1 nm büyüklüğündeki altın tanesi kırmızı renk göstermektedir. Nano büyüklükteki tozlarla takviyelendirilen kompozit malzemeler çok daha yüksek performans değerlerine ulaşmaktadırlar (Kut ve Güneşoğlu, 2005). Şekil 2.25. ’de süspansiyon içerisindeki nanokristaller gösterilmiştir. Her kavanoz altın veya gümüş

içermektedir, tanecik boyutları ve şekilleri renk farklılığına sebep olmaktadır (Celep ve Koç, 2007).

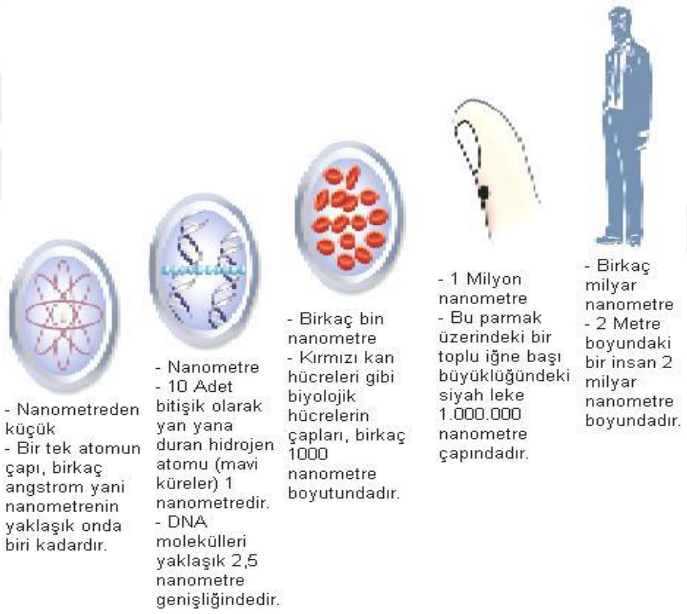


Şekil 2.25. Süspansiyon içerisindeki nanokristaller (Celep ve Koç, 2007)

Malzemenin büyüklüğü nanometre boyutlarına inince bilinen klasik davranşların yerini kuantum davranışları almakta, fiziksel özellikleri değişim göstermeye başlamaktadır. Şöyle ki, mevcut nanoyapıya yabancı bir atomun yapışması, elektronik özellikleri, örneğin elektrik iletkenliği farkedilebilir şekilde değiştirmekte. Bu yabancı bir atom geçiş elemeti olduğunda yapıştığı bir nanoyapıya manyetik özellikler kazandırabilmektedir. Kısaca, bir nanoyapının fiziksel özellikleri, bağ yapısı ve buna bağlı olarak mukavemeti onun büyükluğüne ve boyutuna bağlı şekilde önemli değişimler göstermektedir (Çıracı ve ark., 2005). Boyutlar nanometre ölçeklere doğru küçülürken malzemenin fiziksel özellikleri kuantum mekaniğinin kontrolüne girerek, elektron durumlarının fazı ve enerji spektrumunun kesikli yapısı daha belirgin hale gelmektedir. Daha önemli husus ise, malzemeyi oluşturan atom sayıları 100'ler düzeyine inince, atomsal yapının geometrisi, hatta atom sayısı bile fiziksel özelliklerin belirlenmesinde önemli etken haline gelmektedir (Çıracı ve ark., 2005). Günümüzde maddeyi nanometre seviyesinde işleyerek ve ortaya çıkan üstün özellikleri kullanarak yeni ürünler yapmak mümkün olmaktadır. Örneğin, tarama ve atomik kuvvet mikroskoplarını kullanarak yüzey üzerinde atomları iterek birbirlerinden ayırmak ve istenilen şekilde dizilişini sağlamak mümkün hale gelmektedir (Wang ve ark., 2010).

Nanopartiküllerin polimer matriksler içerisinde dolgu malzemesi olarak kullanılması düşüncesi matrikslerin mekanik özelliklerini artırmak açısından son zamanlarda bilim insanları tarafından sıkça araştırılmaktadır (Gojny ve ark., 2005). Çok küçük boyutlara sahip olan yani nanometre boyutlarındaki bu partiküllerin yüzey alanı/ kütle oranları 1000 m^2/ g'a kadar ulaşabilmektedir. Bu kadar fazla yüzey alanları sayesinde gelen yükün matriksten parçacıklara iletimi kolaylaşarak matriksin mekanik oalrak özelliklerinin artırılması sağlanmış olmaktadır (Njuguna ve ark., 2007).

ABD Ulusal Bilim Vakfı, "yaklaşık 1-100 nanometre uzunluk ölçeğinde yapılan araştırmalar ve kaydedilen teknolojik gelişmeler; bazı durumlarda kritik uzunluk ölçeği 1 nm'nin altında ya da 100 nm'nin üstünde olabilir" şeklinde bir tanımda bulunmuştur (Kut ve Güneşoğlu, 2005). Şekil 2.26. 'da nanometre boyutunu anlatan örnekler verilmiştir.



Şekil 2.26. Nanometre boyutunu anlatan örnekler (Cirel ve ark., 2006)

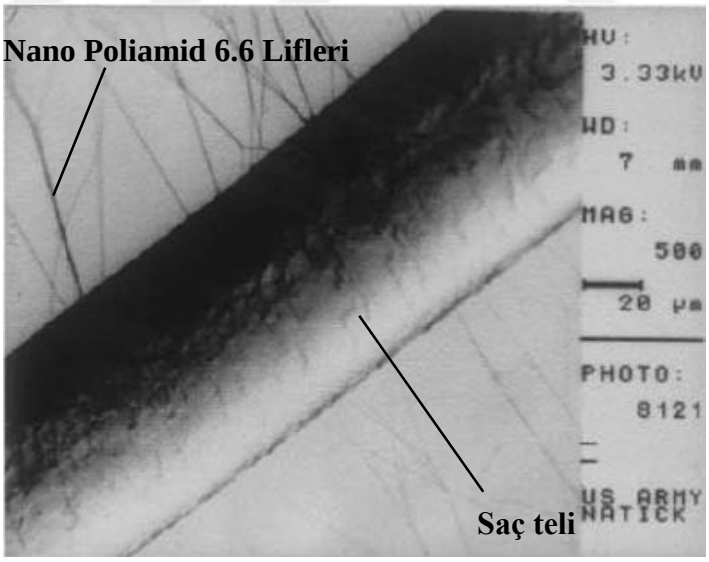
Nanoteknolojinin amaçları aşağıda verilmiştir (Bhushan, 2010)

- Nanometre ölçekli yapıların analizi,
- Nanometre boyutunda yapıların fiziksel özelliklerinin anlaşılması,
- Nanometre ölçekli yapıların imalatı,
- Nano hassasiyetli cihazların geliştirilmesi,
- Nano ölçekli cihazların geliştirilmesi,
- Uygun yöntemler bulunarak nanoskopik ve makroskopik dünya arasındaki bağın kurulması,

- Alışılandan farklı ve üstün malzeme özellikleri /üretim süreçlerinin elde edilmesi,
- Daha dayanıklı, daha hafif, daha hızlı yapılar,
- Daha az malzeme ve enerji kullanımı.

2.3.1. Nano elyaf

Nano elyaflar, çapı bir mikron ve altındaki fiberler olarak tanımlanabilmektedir. Günümüzde çeşitli üretim yöntemleri kullanılarak birçok seramik ve polimer malzemelerden nanofiber üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Çeşitli yöntemler kullanılarak polimer solüsyonundan ve polimer eriyiğinden mikro metre altındaki boyutlarda üretilen fiberlere nanofiber denilmektedir (Ramakrishna ve ark., 2005).
Genel anlamda fiberler söz konusu olduğunda, fiber çapının büyüklüğü hakkında bilgi verir. Burada fiber çapı için farklı görüşler vardır; bazıları çapı bir mikronun altındaki liflere nanofiber derken, bazıları ise nanofiber için çapı 0.3 mikron veya daha az olan lifler tanımını uygun görmüşlerdir (Hagewood, 2004)' ya göre nano lif tanımı, çapı 100 nm^2 ye eşit ya da daha küçük lifler için kullanılmalıdır. Şekil 2.27. 'de, saç teli yüzeyine serpiştirilmiş nano poliamid 6.6 elyafların SEM fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 2.27. Poliamid 6.6 nano elyaflar ve saç teli (Gibson ve ark., 2001)

Nano elyaflar yüksek moleküler oryantasyona sahiptir, kristalit büyüklükleri konvansiyonel fiberlere göre daha küçüktür, küçük boyutları sayesinde daha az yapısal kusur taşırlar, bu sayede oldukça iyi mekanik özellikleri vardır. Lif çapı nanometre düzeyine indirildiğinde, atom başına düşen gerinim enerjisi üssel olarak artmakta ve

karbon nano tüplerde 30 GPa seviyelerine çıkmaktadır. Küçük çaplarından ötürü yüzey/ hacim oranları veya yüzey/ kütle oranları yüksektir, dolayısıyla yüksek yüzey alanlarına sahiptirler. Bu özellik nano elyaflara fonksiyonel gruplar, moleküler, iyonlar, katalitik parçalar ve diğer birçok nano boyutta parçacıklarla bağlanma yeteneği kazandırır (Buer ve ark., 2001).

Nano elyaflar için geniş olarak öngörülen potansiyel pazarlar arasında filtrasyon, koruyucu giysi, ince dokular, güç hücreleri, nano elektrik cihazlar vardır (Hagewood, 2004). Nano elyaflar, bu gelişme süreci içerisinde dokusuz yüzey üretimi anlamında özellikle önemli bir alana sahip olmuştur. Hava direnci, nefes alabilirlik gibi diğer özellikler de dokusuz kumaşların yüzeylerinde nano elyaflar kullanıldığında büyük oranda iyileştirme gözlemlenmiştir (Yıldırım ve ark., 2004).

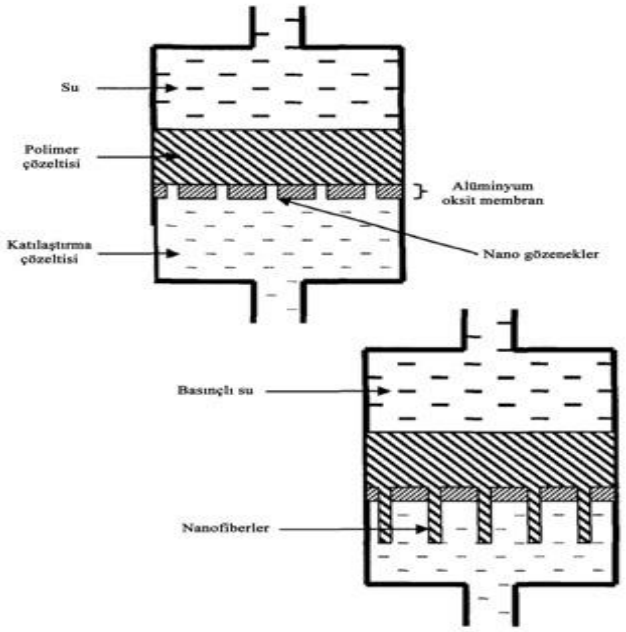
2.3.2. Nano elyaf üretim yöntemleri

Nanofiber üretim yöntemlerinden bazıları aşağıda sıralandırılmıştır.

i) Kalıp Sentezi (Template Synthesis)
ii) Faz Ayrımı (Phase Separation)
iii) Kendiliğinden-düzenlenme (Self-Assembly)
iv) Eriyik Püskürtme Yöntemi

2.3.2.1 Kalıp sentezi (Template synthesis)

Kalıp sentezi, bir kalıp ya da mold yardımıyla malzemeden istenilen nanofiberin elde edilmesini sağlar (Şekil 2.28.). Ferg ve ark. (1994) tarafından oluşturulan nanofiberlerin üretilmesi için nano ölçekli gözeneklere sahip metal oksit bir membran kalıp olarak kullanılmıştır.



Şekil 2.28. Kalıp sentezi yöntemiyle nanofiber üretimi.

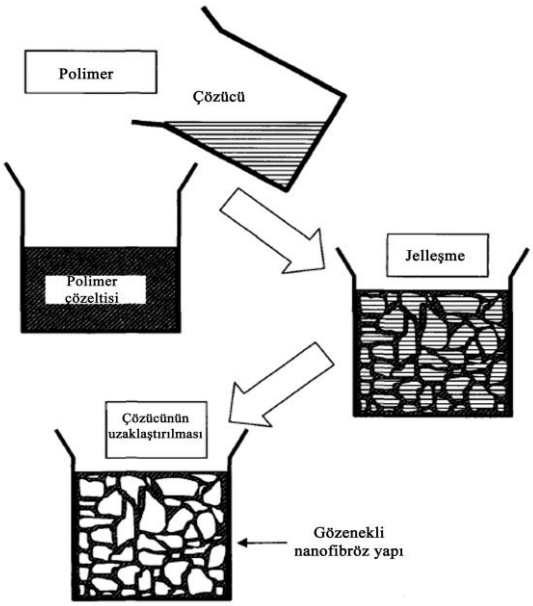
Şekil 2.28. ’de görüldüğü gibi polimer çözeltisi bir kalıp içerisine yerleştirilir. Sonra üzerinde bulunan su basınçlandırılarak bu çözeltinin kalıbın içerisindeki nano-gözeneklere sahip membrandan akması sağlanır.

2.3.2.2 Faz ayrımı (Phase separation)

Faz ayrımında temel esas fiziksel anlamda birbirlerinden farklı iki ayrı fazın aralarındaki bu farklılığın oluşturduğu uyumsuzluk sayesinde birbirinden ayrılması esasına dayanır. Bu işlemde öncelikle polimer uygun bir çözücü ile karıştırılarak çözülür. Daha sonra çözücünün bu yapıdan uzaklaştırılmasıyla nanofiberlerden oluşan bir yapı elde edilir.

(Ma ve Zhang, 1999) tarafından tanımlanan Poli (L-laktik) asit (PLLA) maddeleri nanofiberlerin üretilmesi için detaylar aşağıda verilmiştir.

1) Polimerin çözünmesi
2) Jelleşme
3) Çözücünün çıkarılması
4) Dondurma
5) Dondurma-Kurutma süreçleri (Freze-drying)



Şekil 2.29. Nanofiber yapı elde etmek için kullanılan faz ayrımı yönteminin şemasal gösterimi (Ma ve Zhang, 1999)

Ma ve Zhang (Ma ve Zhang, 1999) tarafından yapılan çalışmada bu yöntem 5 ana basamaktan oluşur (Şekil 2.29.). Şekil 2.30. 'da üretilen nano fiberlerin SEM görüntüleri görülmektedir.

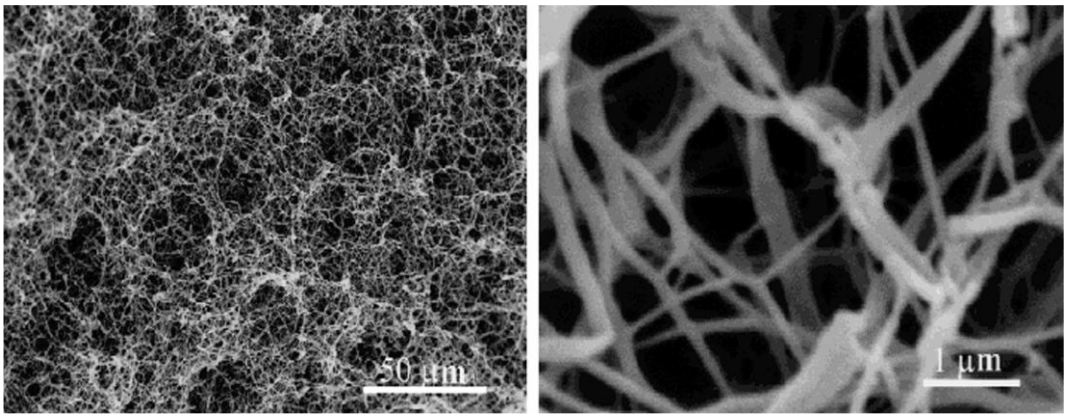
1) Polimerin çözünmesi: Poli-L-laktik asit (PLLA) % 1 ile %15 ağırlık/hacim değişen oranlarda tetrahidrofuran içerisine eklenir. Çözelti 60ºC'de 2 saat boyunca karıştırılarak homojen bir çözelti elde edilir.

2) Jelleşme: 2 mL çözelti 50 ºC'de teflon bir şişe içerisine aktarılır ve daha sonra çözeltinin derişimine bağlı olarak -18ºC ile 45ºC arasında değişen bir buzdolabına konarak jelleşme sağlanır ve jelleşme sıcaklığında 2 saat bekletilir.

3) Çözücünün çıkarılması: Jel içeren şişe distile bir su içerisine daldırılır ve iki gün boyunca gunde 3 kez değistirilir.

4) Dondurma: Jel daha sonra sudan alınır, filtre kağıdı üzerinde bir süre bekletilir ve -18ºC'deki bir buzdolabında 2 saat bekletilir.

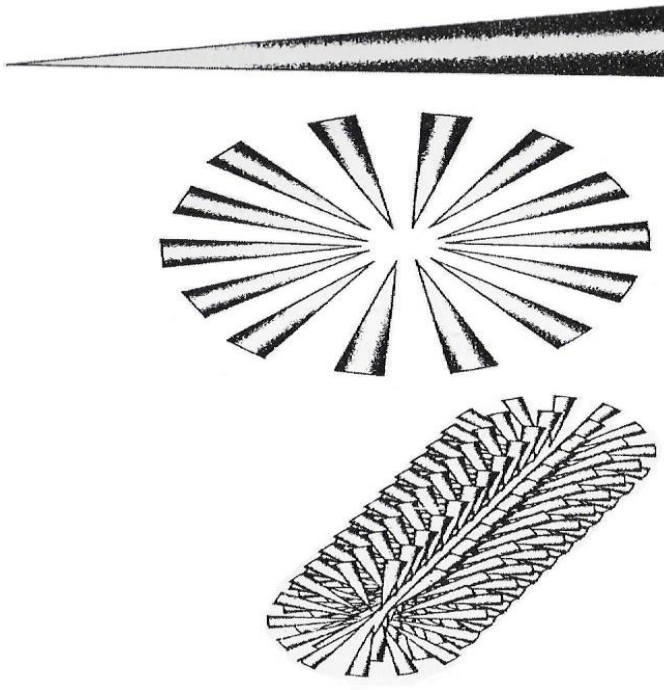
5) Dondurma-Kurutma (Freze-drying): Son olarak donmus jel dondurma kurutma aletine alınır ve 1 hafta boyunca 0,5 mm Hg vakum altında − 55°C'de dondurulup kurutulur.



Şekil 2.30. Faz ayrımı yöntemiyle hazırlanan PLLA nanofiberlerin SEM görüntüleri (Ma ve Zhang, 1999)

2.3.2.3 Kendiliğinden-düzenlenme (Self-assembly)

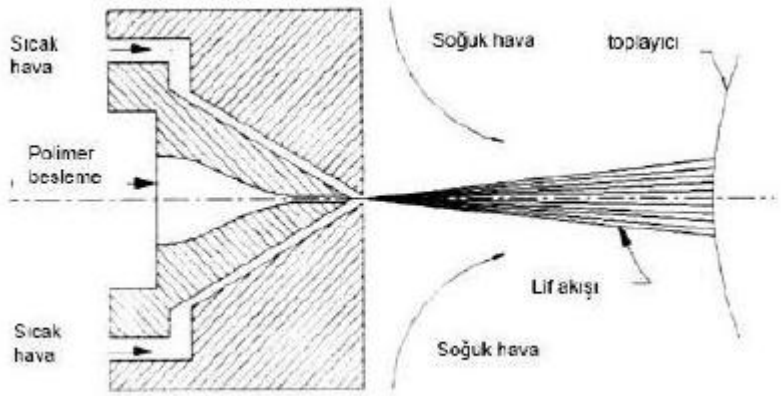
Küçük moleküller ile basit bloklar inşa edilerek nano elyaf üretilir. Küçük moleküller eşmerkezli olarak aralarında bağ oluşturur, sonra bu moleküllerin birleşmesi ile nano elyaflar oluşur (Şekil 2.31.). Oluşan en küçük birim elyafların şeklini belirlemektedir (Süslü, 2009).



Şekil 2.31. Self-Assembly yöntemi ile nanofiber üretimi (Ramakrishna ve ark., 2005)

2.3.2.4. Eriyik püskürtme yöntemi (Meltblown yöntemi)

Eriyik püskürtme yöntemi ile nano elyaf elde etmek için polimerler bir kalıptan geçerken lüle çıkışında yüksek hızla üflenen sıcak hava tarafından eritilip kalıptan çıkarken de dışarıdan üflenen soğuk hava sayesinde nano ölçekte inceltilirek nanofiberler üretilir (Şekil 2.32.) (Süslü, 2009).

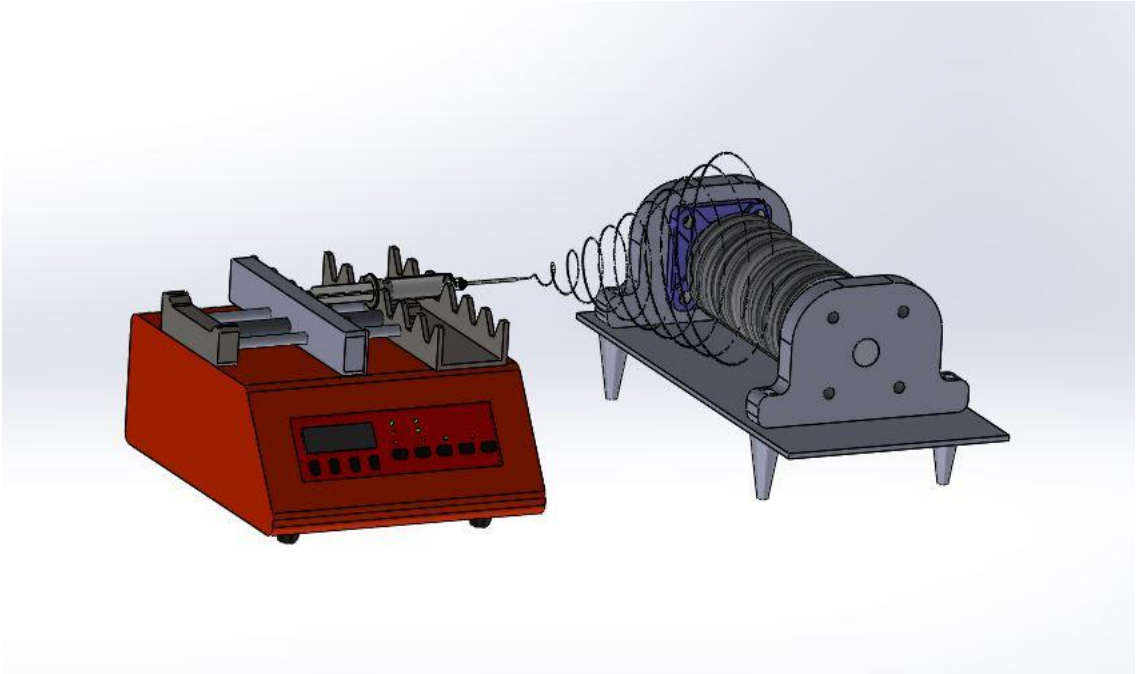


Şekil 2.32. Meltblown yöntemiyle nanofiber üretimi (Hagewood, 2004)

2.3.2.5. Elektro-eğirme yöntemiyle nano elyaf üretimi

Elektro-eğirme polimerler, kompozitler ve seramikler gibi çok çeşitli materyallerden çok küçük elyaflar oluşturmak için kullanılan basit ve etkili bir üretim tekniği olmakla birlikte bu teknik, elektriksel olarak yüklenmiş sıvı polimerin topraklanmış bir yüzey üzerinde sürekli elyaf formunda konumlanması esasına dayanmaktadır (Andrady, 2008). Polimer esaslı nano elyaf üretimi için en etkin yöntem elektro-eğirme yöntemidir. Bu yöntemle pek çok polimerden çapları 3 nm ’den 1 μm ve üzerine kadar değişen kalınlıklarda sürekli nano elyaflar elde edilebilmektedir (Huang ve ark., 2003).

Elektro-eğirme yöntemi ile polimer çözeltisi ya da eriyiğinden fiber çekiminde, yüksek gerilim kullanılarak polimer elektriksel olarak yüklenmekte, ince jet düzesinden çıkan polimer jeti, düzenin karşısına yerleştirilmiş olan topraklanmış hedefe doğru akmaktadır. Bu akım sırasında polimer jeti çok ince lifçikler halinde saçılmakta ve bu sayede nano seviyede çapa sahip fiberler elde edilebilmektedir. Şekil 2.33. ’de elektro-eğirme sistemi görülmektedir.



Şekil 2.33. Elektrospinning Yöntemi Basit Gösterimi

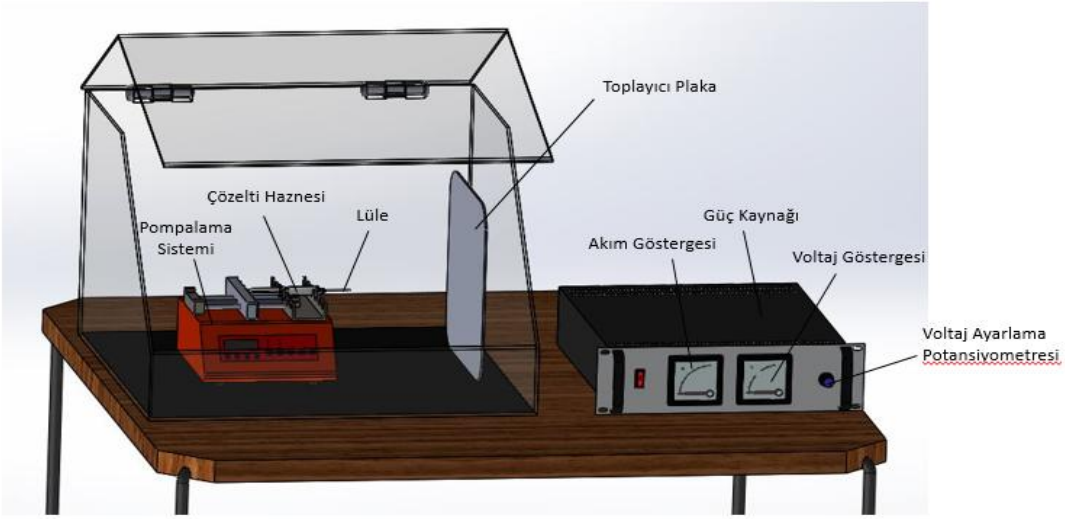
Taylor tarafından geliştirilen teoride bir elektrik alan içindeki viskoz damladan ince elyafların oluşması, elektriksel kuvvetler tarafından yüklenen sıvı yüzeyindeki maksimum kararsızlıktan dolayı gerçekleştiği beyan edilmiştir. Yüksek voltajlarda küresel bir damla oluşarak kritik gerilmede viskoz damlanın yarı küresel şekli bozulur ve jet oluşumundan önce koni şeklini alır. Elektriksel kuvvetlerin etkisi altında, viskoz akışkanın yüzey kıvrımlığı değişir. Bu sırada yüzey gerilimi elektriksel kuvvetlere karşı koyan tek kuvvettir. Taylor'un çalışması, elektrik alan içerisindeki damlacığın davranışının nasıl olduğunun anlaşılmasını sağlamış ve daha sonra geliştirilen teknikler için faydalı olmuştur (Kozanoğlu, 2006).

1966 yılında Simons, metal ızgaralar kullanarak poliüretan, polikarbonat gibi termoplastiklerden farklı şekillerde düzensiz elyaf yoğunluklarında nano elyaflı fiberlerin üretimini gerçekleştirmiştir (Üstündağ, 2009).

2.3.2.5.1 Elektro-eğirme üretim yöntemi

Elektro-eğirme, elektrik potansiyel farkı vasıtasıyla bir nevi eğirme işleminin yapılması şeklinde tanımlanabilir. Nano elyaf üretirken fiberlerin kopmadan sürekli olarak üretilmesi çok önemlidir. Elektro-eğirme tekniğinde bu proses mümkün olduğu için üzerinde en çok çalışılan ve geliştirilen nano elyaf üretim yöntemidir (Selbes, 2013).

Şekil 2.34. 'de görüldüğü gibi elektro-eğirme sisteminin temelde; yüksek voltaj güç kaynağı, çözelti haznesi ve metal malzeme olan toplayıcı plaka olmak üzere 3 adet bileşeni vardır.

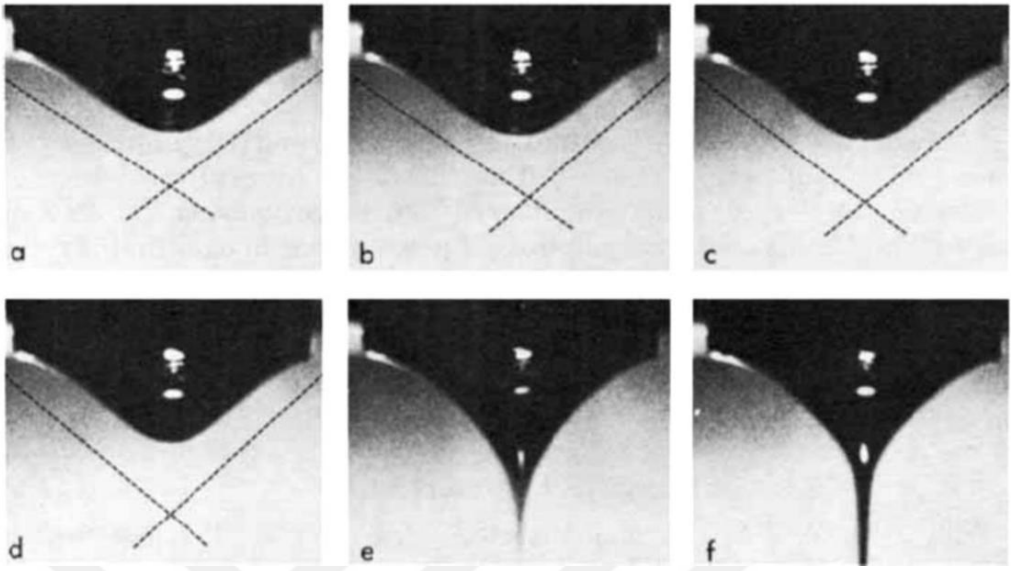


Şekil 2.34. Elektro-eğirme sistemi

Yüksek voltajın temini için, 1-100 kV ve 0.1-100 mA arasında AC/DC akım güç kaynağı kullanılmaktadır. Elektro-eğirme işlemini gerçekleştirmek için fiberlerin uzamasını sağlayan kuvvetin teminini yüksek voltaj güç kaynağı sağlamaktadır. Hazırlanan polimer çözeltisinin belirli bir debide lüleye gönderilmesini besleme ünitesi gerçekleştirir. Çözelti haznesi ise hazırlanan polimer çözeltinin muhafaza edilmesini ve uç kısmında bulunan lüleye aktarılmasını sağlayan şırıngadan oluşmaktadır. Lüle, elektronların toplayıcı plakaya doğru hareket etmesi için güç kaynağının pozitif kutbuna bağlanmalıdır. Toplayıcı da güç ünitesinin negatif kutbuna bağlanmalıdır.

Bu yöntemde, polimer çözeltisinin hazırlanması için polimer malzeme uygun bir çözücüde çözülmekte ve ucunda delik ve lüle bulunan bir çözelti haznesine (şırınga) yerleştirilmektedir. Daha sonra polimer çözelti haznesi bir besleme ünitesine bağlanarak belirli debide çözelti lülenin ucuna doğru beslenir. Bu arada lülenin karşısında bulunan toplayıcı plaka/tambur arasına gerilim uygulanmaya başlanmaktadır. Bu gerilim 50 kV'ye kadar ulaşabilmektedir. Lüle ucuna gelen polimer çözelti damlası voltajın kritik değere ulaşması ile damla üzerindeki yüzey gerilimden dolayı uygulanan kuvvetlerle eşitlenmekte ve voltaj artırıldıkça elektrostatik kuvvetlerden dolayı damlacık konik biçimini almaktadır. Damlacığın aldığı bu konik biçim, Taylor konisi olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.35. 'de polimer damlasının artan voltaj ile birlikte yarı küresel

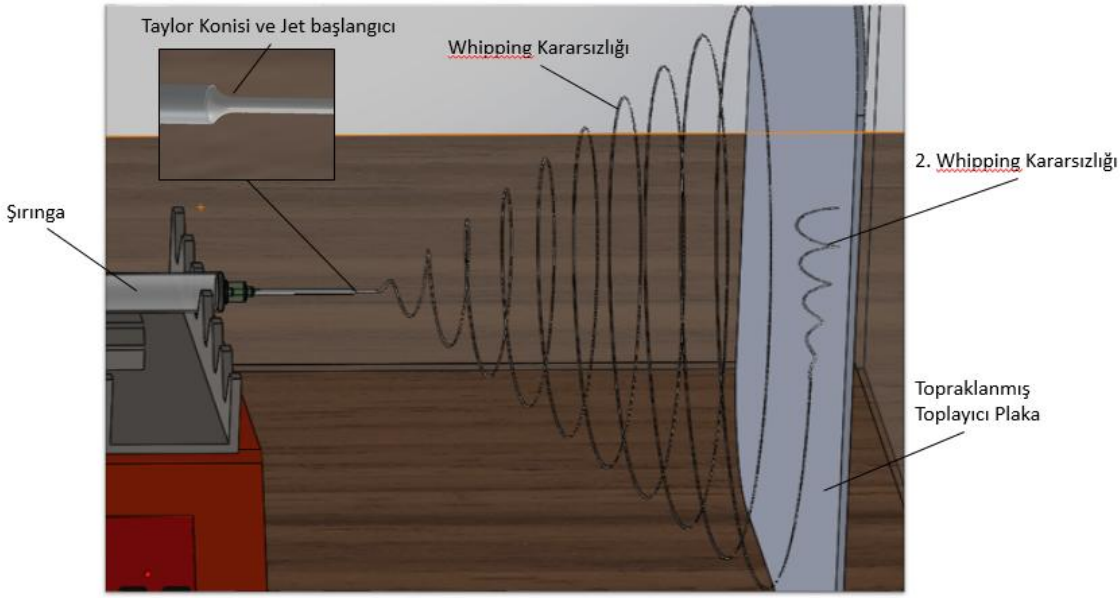
damladan Taylor konisine ve Taylor konisinden de polimerin jet halinde çıkışına kadar aşamaların görüntüleri gösterilmektedir.



Şekil 2.35. Voltajın artırılması safhasında meydana gelen taylor konisi ve jet oluşumu, Taylor Konisi açılarına göre (a) 110°, (b) 107°, (c)104°, (d)100°, (e) kritik voltaj seviyesinde iken polimer jetinin fışkırması, (f) kritik voltaj değerinden sonraki polimer jeti (Larrondo ve St John Manley, 1981)

Polimer damlası taylor konisi halini aldığı anda elektrostatik kuvvetler ile damlacık yüzey geriliminden dolayı oluşan kuvvetler eşit olduğundan voltajdaki küçük bir artışa sayesinde koni ucu birden damlacığın jet halinde toplayıcı plakaya doğru harekete geçmesini sağlar. Polimer lüle ile toplayıcı arasında giderken düz bir yörünge izlemez, belirli bir miktarda kararlı bir şekilde ilerledikten sonra farklı farklı yollardan ilerlemeye devam eder. Yani polimerin toplayıcı plakaya ulaşıncaya kadar izlediği yolda bir kararsızlık hali mevcuttur. Kullan polimer çözeltinin özelliği ve sistem değişken parametrelerine bağlu olarak oluşan üç adet kararsızlık hali mevcuttur. Bunlar; klasik rayleigh kararsızlığı, eksenel simetrik elektrik alan akımlanması ve whipping kararsızlığı'dır.

Elektro-eğirme üretim yönteminde en sık rastlanan, whipping kararsızlığıdır. Whipping kararsızlığının oluşmasının sebebi, jet yüzeyindeki elektron yüklerin karşılıklı olarak birbirlerini itmeleri ile meydana gelen ve yüklerin yüzeye homojen dağılmamalarından dolayı jette merkezden radyal olarak bi torkun meydana gelmesidir. Jet toplayıcı plakaya yaklaştıkça ana jetten ayrılan küçük jetler meydana gelmektedir. Polimer jeti yeterince inceldiğinde ise yeni whipping kararsızlıkları meydana gelir. Bu kararsızlığa da ikinci whipping kararsızlığı denmektedir. Şekil 2.36. 'da bu olaylar gösterilmektedir.



Şekil 2.36. Elektro-eğirme sürecinde Whipping Kararsızlığı ve Taylor Konisi

Elektro-eğirme işlemini gerçekleştirirken polimer damlası üzerinde iki kuvvet dengesi mevcuttur. Birincisi işlemin sürdürülebilmesi için gerekli olan kuvvet sistemi, ikincisi de işlemin gerçekleşmesine engel olan kuvvet sistemidir. İlk kuvvet damlacığın kararlı halini bozarak jet oluşumunu ve toplayıcı plakaya incelerek gitmesini sağlarken ikincil kuvvet ise polimerin uzayıp akmasına engel olarak damlayı sabitleme eğilimi göstermektedir (Erdal, 2013).

2.3.2.5.2 Elektro-eğirme işlemlerinin modellemesi

Elektro-eğirme işlemlerindeki aşamalar şu şekilde ifade edilebilir (Şekil 2.37.):

1. Damlacık oluşumu,
2. Taylor konisi oluşumu,
3. Elektro-eğirme jetinin oluşumu,
4. Kararlı bölgede jetin uzaması,
5. Kararsız bölgenin oluşması (whipping instability),
6. Fiber formunda katılaşması.

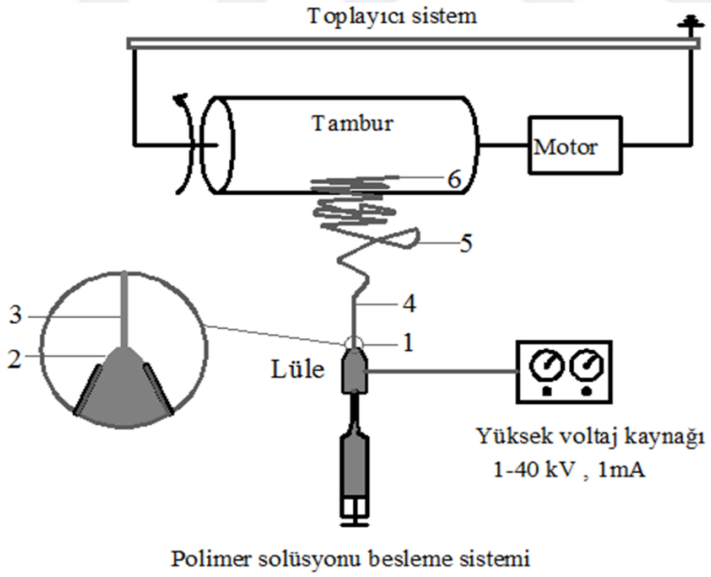
2.3.2.5.2.1 Damlacık oluşumu

Elektro-eğirme metodunun ilk aşamasında eriyik ya da çözelti durumundaki sıvı polimer bir lüle ucundan çok düşük hızlarda beslenir. Herhangi bir elektrik alan

uygulanmadığı durumda kılcal boru ucunda bir damlacık oluşur ve yer çekiminin etkisi ile damlacık düşer. Bu durumda damlacığa etki eden sadece iki kuvvet vardır. Bunlardan biri sıvının yüzey gerilimi diğeri ise yer çekimi kuvvetidir (Andrady, 2008). Polimer beslemek için genellikle perküzyon pompası kullanılmaktadır. Perküzyon pompasında polimer çözeltisi besleme hızı mL/dak. ve ya mL/h şeklinde ayarlanmaktadır.

2.3.2.5.2.2. Taylor konisi oluşumu

Kılcal boru ucunda asılı duran çözelti damlacığı, yüzey gerilimi kuvvetlerinin etkisi ile kritik bir voltaj değerine kadar küresel formda bulunur (Şekil 2.35. a, b, c). Uygulanan voltaj kritik bir değere ulaştığı anda, elektrostatik kuvvetler yüzey gerilimi ve yerçekimi kuvvetlerine eşitlenir. Bu noktada polimer, damla şeklini değiştirerek koni biçimini alır, koni açısı 100°'dir (Şekil 2.35. d). Taylor, elektrik alan içindeki viskoz sıvının bu açıda konik formdayken yüzey gerilimi ile elektrostatik kuvvetlerin denge halinde olduğunu belirtmiştir (Huang ve ark., 2003). Farklı çözelti ve eriyikler için farklı değerler alabilirler (Andrady, 2008).



Şekil 2.37. Elektro-eğirme işleminin aşamalarının şematik şekli

2.3.2.5.2.3. Elektro-eğirme jetinin oluşumu

Polimer damlası Taylor konisi halini aldıktan sonra gerilimdeki çok küçük bir artışla birlikte koni ucundan bir jet fışkırır (Şekil 2.35. e ve Şekil 2.36.).

2.3.2.5.2.4. Kararlı bölgede jetin uzaması

Polimer çözeltisine uygulanan voltaj, kritik değeri geçtiği anda jet başlangıcı birden gerçekleşir (Şekil 2.35. f). Oluşan polimer jetinin yüzeyindeki yüklerin coloumb itme kuvvetleri, jeti toplayıcıya doğru uzatan eksenel bir bileşene sahip olduğundan yapılan akışkan hızı ölçümleri göstermiştir ki, Taylor konisinden uzaklaştıkça jet hızının yanı sıra jet hızının değişimi de artış göstermektedir. Yani Taylor konisinden baş gösteren jet, gittikçe hızlanarak bir müddet lineer bir yolda seyreder. Bunun sonucu olarak jet çapı, jetteki uzama ve çözücünün buharlaşmaya başlamasına bağlı olarak hızla düşer. Jetin incelmesi ile jetin birim alandaki yüzey yükü azalırken birim kütledeki yüzey alanı da artar (Andrady, 2008).

2.3.2.5.2.5. Kararsız bölgenin oluşması

Whipping kararsızlığı da denen kararsız bölgenin oluşumu sırasında polimer jeti, izlediği lineer yolun ardından kararsız bir bölgeye girer ve bu lineer ilerleme yerini spiral bir yörüngeye bırakır. Kararsız bölge, Şekil 2.36. ‘da ve Şekil 2.37. ‘de (5) numarayla gösterilmiştir.

2.3.2.5.2.6. Fiber formunda katılaşması

Polimer jeti kararsız bölgede ilerlerken jet alanının artışının yüksek seviyelere ulaşmasıyla kütle hızları da aşırı miktarda artmakta ve bu sırada çözelti içerisindeki çözücü solüsyon da buharlaşmaktadır. Jetin kararsızlık bölgesinden geçtiği süreç aynı zamanda çözücünün buharlaşma hızı ile kontrol edilmektedir. Buharlaşma hızı yüksek olan bir çözücü kullanıldığında deformasyonun sağlanması için jetin uzama viskozitesi fazla yüksek kalacak ve bunun sonucunda whipping kararsızlığı kısa sürecektir. Bu şekilde daha kalın nano elyaflar elde edilecektir. Kullanılan çözücünün uçucu özelliği, fiber çapını kontrol etmek için önemli rol oynamaktadır. Uygun bir çözücü seçilirse ve

uygun işlem parametreleri de uygulanırsa çok küçük nano elyafların elde edilmesi sağlanır (Andrady, 2008).

2.3.3. Elektro-eğirme yöntemi parametreleri

Elektro-eğirme işleminde üretilen nanofiberlerin çapı, morfolojisi, dağılımı gibi özelliklerin istenilen şekilde ayarlanabilmesi için işlem parametrelerine hakim olunması gerekir. Ama bu işlemlere etki eden parametrelerin çok sayıda olması bu işlemin kontrolünü zorlaştırmaktadır.

Elektro-eğirme işlemine etki eden parametreler başlıca üç bölümde incelenebilir (Çizelge 2.3.). Bunlar çözelti parametreleri, işlem parametreleri ve ortam parametreleridir.

Çizelge 2.3. Elektro-eğirme işlemine etki eden parametreler

Çözelti Parametreleri	İşlem Parametreleri	Ortam Parametreleri
Molekül ağırlığı ve viskozite	Uygulanan voltaj	Rutubet
Yüzey gerilimi	Çözelti besleme hızı	Atmosfer tipi
Elektrik iletkenliği	Çözelti sıcaklığı	
	Toplayıcı tipi	
	Lüle çapı	
	Toplayıcı-lüle mesafesi	

2.3.4. Grafen nanopartiküller

Grafen, her atomun komşu atomlardan üçüne bağlı olduğu, altıgen karbon atomu dizisine sahip iki boyutta tek bir grafit tabakasıdır (Li ve Chou, 2003). Zayıf Vander Walls kuvvetleri tarafından bir arada bulunan birkaç grafen levhanın yığını olan grafit formu doğada doğal olarak bulunmaktadır. Ancak bu katmanların tek bir tabakaya düşmesi çok üstün özellikleri de beraberinde getirmektedir. Bu katmanlar çok büyük yüzey alanlarına ve yüzey enerjilerine sahiptir. En güçlü bağlanma türü olan grafenli (sp2 karbon-karbon) yapıştırma tipi teorik olarak grafene olağanüstü yapısal özellikler verir.

Grafen iki boyutlu tek atom kalınlığında bal peteği (honeycomb) malzemesidir (Novoselov ve ark., 2005, Geim ve Novoselov, 2007). Grafen son derece yüksek elektrik iletkenliği, benzersiz mekanik ve termal özellikleri nedeniyle yoğun madde fiziği ve malzeme fiziğinde oldukça umut verici bir aday olarak düşünülmektedir (Lee ve ark., 2008). Enerji, sensörler, elektronik ve fotonik cihazlar gibi birçok alanda potansiyel

uygulamaları vardır (Stoller ve ark., 2008). 2004 yılında ilk kez, katmanlı materyali güçlü bir şekilde atomik kalınlıktaki tabakalara bölen yapışkan bant tarafından mikromekanik bölünme sayesinde üretilmiştir (Novoselov ve ark., 2005).

Metal substratlar üzerinde hidrokarbonların kimyasal buhar birikimi (CVD), silikon karbid üzerinde epitaksiyal büyüme, fiziksel ve kimyasal eksfoliyasyon ile kombine edilmiş kimyasal fonksiyonelleştirme, grafitin sıvı fazda pul pul dökülmesi, ark deşarj yöntemi, karbon nanotüplerinin açılması, CVD substratsız sentez, elektrokimyasal eksfolasyon, solvotermal sentez, genleştirilmiş grafitin yeniden ekstrüzyonu, katodik vakum filtrasyon yay tekniği vb. olan mikromekanik bölünme dışında grafen sentezinin çeşitli yöntemleri de vardır. Fakat her sentez prosesinde toplu miktarda grafen üretmek sınırlıdır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

İnsanlığın başlangıcından bu yana süre gelen yaşam döngüsüne bakıldığında hem yaşam konforunu artırmayı hem de azalan kaynaklardan dolayı daha az enerji harcamaya yönelik sürekli olarak bilimsel ve mühendislik çalışmaları yapmaktadır. Havacılık ve uzay sektörü, savunma sanayi, otomotiv sanayi, ulaşım ve lojistik gibi birçok alanlar yapılan bu çalışmalar sayesinde önemli oranda gelişmeler kaydetmektedir. Tüm bunlar yapılırken üretim ve servis ömründe harcadığı enerji maliyeti göz ardı edilemeyecek derecede önemli bir konudur. Bu sebeple çalışmalarda maliyeti düşürmeye yönelik çalışmalar yapılırken mekanik ve fiziksel özelliklerini de iyileştirmek en önemli etkenlerden biridir.

Aslında bir malzemeden genel anlamda istenilen yüksek mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olması, hafiflik sağlayarak (uçak, uzay aracı, uydular v.b.) yakıt tüketimini düşürmesi, çalıştığı ortama göre (korozif, yüksek veya düşük sıcaklık, yüksek gerilim v.b.) dayanıklı olması ve tüm bu özelliklere sahipken bir de kolay ve ucuz üretim maliyetine sahip olması gibi özellikler istenmektedir. İşte tüm bu isteklerin karşılanması için yapılan çalışmalar sonucunda belli bir özelliği üstün olan birden çok malzemelerin birbirleri ile kombin halinde kullanılabilen sistemleri geliştirilmektedir. Özellikle havacılık sektöründe sık kullanılan malzemeler olan alüminyum ve kompozit malzemelerin hem üstün mekanik özelliklere sahip olması hem de hafiflik sağlaması sayesinde yakıt tüketimini ciddi oranda düşürmektedir. Literatür çalışmalarına da bakıldığında bazı tabakaların yapıştırılmasına yönelik birçok çalışmaların yapıldığı görülmektedir. Bunların bazıları alüminyum/ alüminyum, kompozit/ kompozit ve alüminyum/ kompozit şeklinde yapıştırma bağlantılarıdır.

Bu çalışmada alüminyum alaşımlı levhalar ve karbon elyaf takviyeli kompozit levhaların epoksi reçine ile tek taraflı bindirmeli yapıştırma bağlantılarının kayma gerilmesi incelenmiştir. Öncelikle bağlantısı yapılacak olan karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin vakum infüzyon yöntemi ile üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu birleştirmelerin arasına Çizelge 3.1.'de gösterildiği gibi elektro-eğirme yöntemiyle naylon 6.6 (N6.6) nano elyaflar ve N6.6'nın ağırlıkça % 1, 3 ve 5 oranlarında takviye edilmiş grafen nano parçacıklar (GNP) ilave edilerek elde edilen nano elyaflar üretilmiştir. Ayrıca Çizelge 3.2.'de gösterildiği gibi saf epoksi reçine, saf N6.6 nano elyaf, N6.6/GNP nano elyaflarla takviyelendirilmiş yapıştırıcılarla Al levha ve karbon elyaf takviyeli kompozitler yapıştırılmıştır. Çizelge 3.3. 'de gösterildiği gibi -20 °C, 0 °C, 23

°C, 50 °C, 80 °C olmak üzere farklı sıcaklıkların tek taraflı bindirmeli bağlantılardaki etkisini incelemek için farklı sıcaklıklarda testleri yapılmak üzere numuneler hazırlanmıştır. Daha sonra bu bağlantı levhaları ASTM D3433 standartlarına tabi tutarak hasar mekanizması incelenmiştir.

Çizelge 3.1. Elektro-eğirme yöntemi ile üretilmiş nano elyaflar

Numuneler	*Nano Elyaf*
N	Naylon 6.6 Nano elyaf
NGNP1	Ağırlıkça % 1 GNP/N6.6 nano elyaf
NGNP3	Ağırlıkça % 3 GNP/N6.6 nano elyaf
NGNP5	Ağırlıkça % 5 GNP/N6.6 nano elyaf

Çizelge 3.2. Hazırlanan Yapıştırma Numuneleri

Numuneler	*Yapıştırıcılar*
E	Saf Epoksi Reçine
EN	Naylon 6.6 nano elyaf/ Epoksi reçine
ENGNP1	Ağırlıkça % 1 GNP+N6.6 nano elyaf/Epoksi reçine
ENGNP3	Ağırlıkça % 3 GNP+N6.6 nano elyaf/Epoksi reçine
ENGNP5	Ağırlıkça % 5 GNP+N6.6 nano elyaf/Epoksi reçine

Çizelge 3.3. Farklı Sıcaklık Etkisi İçin Hazırlanan Yapıştırma Numuneleri

Numuneler	*Sıcaklık*	*Yapıştırıcılar*
E-20, E0, E23, E50, E80	-20, 0, 23, 50, 80	Saf Epoksi Reçine
EN-20, EN0, EN23, EN50, EN80	-20, 0, 23, 50, 80	Naylon 6.6 nano elyaf/ Epoksi reçine
ENGNP1-20, ENGNP10, ENGNP123, ENGNP150, ENGNP180	-20, 0, 23, 50, 80	Ağırlıkça % 1 GNP+N6.6 nano elyaf/Epoksi reçine
ENGNP3-20, ENGNP30, ENGNP323, ENGNP350, ENGNP380	-20, 0, 23, 50, 80	Ağırlıkça % 3 GNP+N6.6 nano elyaf/Epoksi reçine
ENGNP5-20, ENGNP50, ENGNP523, ENGNP550, ENGNP580	-20, 0, 23, 50, 80	Ağırlıkça % 5 GNP+N6.6 nano elyaf/Epoksi reçine

3.1. Elektro-eğirme Yöntemiyle Nano Elyaf Üretimi

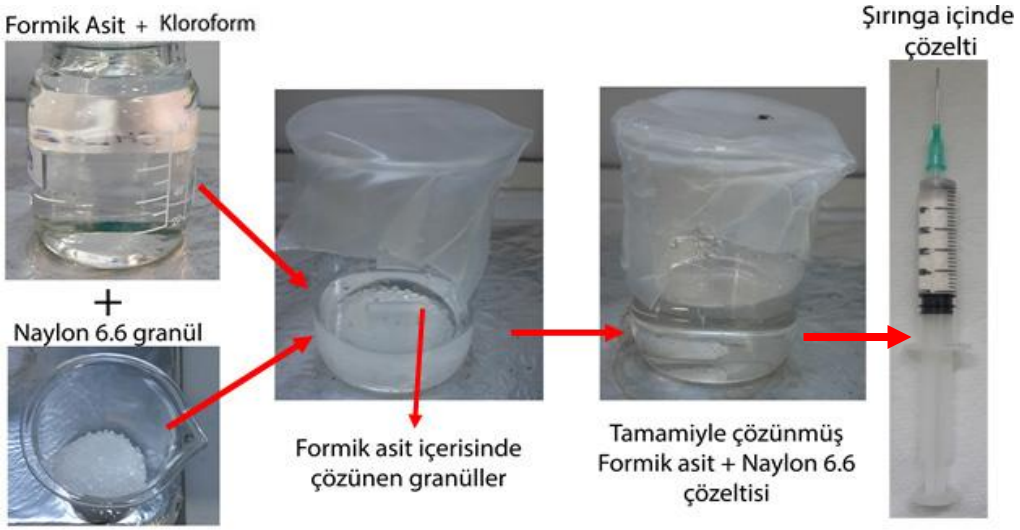
Nanofiber üretimi alanında da birçok çalışma yapılmakta ve bu çalışmalar sırasında bazı zorluklar, problemler ortaya çıkmaktadır. Nanofiber üretimi alanındaki zorlukları kolaylaştırmak ve problemlerden kurtulmak amacıyla farklı teknikler üzerinde birçok araştırma- geliştirme çalışmaları yürütülmektedir. Bu çalışmalardan bir tanesi de elektro-eğirme (electrospinning) yöntemidir. Elektro-eğirme, ilk olarak yüksek gerilim altındaki akışkanların davranışlarındaki değişikliklerin gözlemlenmesi sonucunda ortaya

çıkmıştır. Yapılan ilk çalışmada su damlacıklarına yeterince yakın bir bölgede elektrostatik bir alan oluşturulduğunda, damlacıkların konik bir yapı oluşturarak, spiral bir yörünge üzerinden saçıldığı görülmüştür (Zeleny, 1914).

Elektro-eğirme (elektrospin) yöntemi nanolif elde etmek için kullanılan kolay ve ucuz bir teknik olmakla birlikte çapları nano boyutta (10 nm- 500 nm) olan fiber yapılar üretmeyi mümkün kılmaktadır. Elektro-eğirme tekniği ile birçok değişik polimer, polimer karışımları, sol-jeller, seramik, inorganik malzeme ve kompozitlerden boyutsal olarak nanometrik çaplara sahip fiberlerden oluşan nanoağ yapılı malzemeler elde edilebilmektedir (Chronakis, 2005, Greiner ve Wendorff, 2007). Elektro-eğirme tekniği ile üretilen nanofiber yapılar nano boyutta olmayan fiberlere göre daha üstün özellikler göstermektedirler. Nanofiberler yüksek yüzey alanına ve nano boyutta boşluklu bir yapıya sahip olmaları sayesinde farklı fiziksel özellikler gösterirler ve yüzeyleri fiziksel/kimyasal yollarla modifiye edilerek çok işlevli hale getirilebilirler. Üstün özelliğe ve çok işleve sahip olan bu nanofiber/nanoağ malzemeler filtrasyon, fonksiyonel tekstil, enerji, sensör, katalizör, biyomühendislik sistemleri gibi birçok uygulama alanlarında kullanılabilir (Barhate ve Ramakrishna, 2007, Greiner ve Wendorff, 2007).

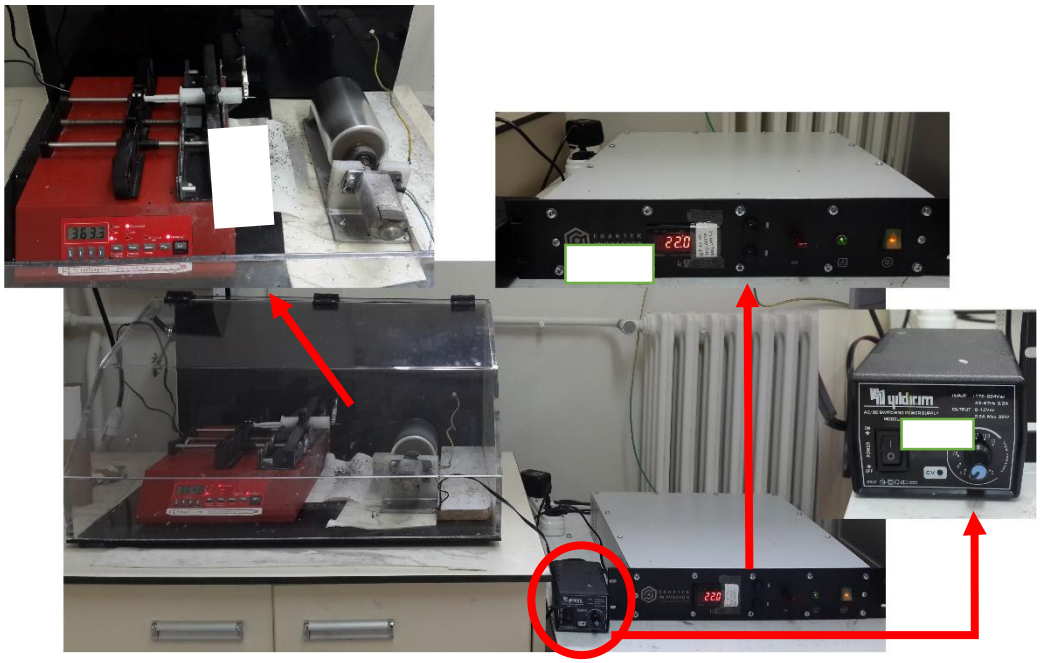
3.1.1. Elektro-eğirme yöntemiyle naylon 6.6 nano elyaf üretimi

Bu tez çalışmasında çözelti hazırlama işlemine öncelikle N6.6 nın çözülmesi ile başlanmıştır. N6.6 çözeltisi elde etmek için granül halindeki 3 g N6.6'yı 21 ml formik asit ile 9 ml kloroform içerisine koyarak N6.6'nın asit içerisinde manyetik karıştırıcı ile tamamen çözülünceye kadar karıştırılmıştır (Şekil 3.1.). N6.6 formik asit içerisinde tamamen çözüldükten sonra meydana gelen çözelti saf N6.6 nano elyaf üretmek için hazır hale gelmiştir. Elektro-eğirme işlemine tabi tutulacak olan N6.6 soluyonu 5 ml'lik şırıngaya 5 ml olarak çekilmiştir. Aslında N6.6 formik asit içerisinde tamamiyle çözülmektedir. Ancak grafen katkılı N6.6 solusyonlarında grafen nanoparçacıkların solüsyon içerisinde daha homojen yayılmasını sağlamak amacıyla kloroform eklendiğinden dolayı şartların ve kloroformun bir etksinin olma ihtimaline karşı deney numunelerinin aynı etkiye sahip olması için içerisine aynı oranda kloroform eklenmiştir.



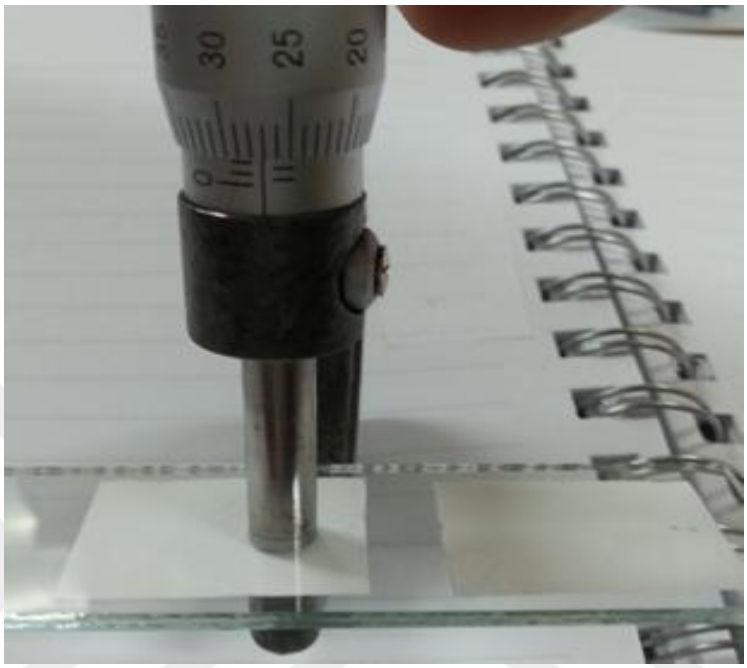
Şekil 3.1. Naylon 6.6 (N6.6) + Formik asit çözeltisi hazırlama işlemi

Naylon 6.6. çözeltisi elektro-eğirme işlemine tabi tutulmak üzere zemine göre yatay doğrultuda pompaya yerleştirilmiştir (Şekil 3.2.). Besleme pompası 1 ml/s hıza ve şırınga ucu- tambur mesafesi 10 cm olacak şekilde ayarlanmıştır. Yüksek gerilimi sağlayacak olan güç kaynağından voltaj değeri 22 kV değerine ayarlanarak üretime başlanmıştır. Tambur devri spinleri yönlendirmek için motor sürücüsünden 7.5 hz ye ayarlanmıştır. Üretim sırasında laboratuvar ortam sıcaklığı ortalama 25 °C'dir. Şırınga içerisindeki çözelti bitinceye kadar üretime devam edilmiştir. Üretim sonrasında üretilen N6.6 nano elyaf 1 saat 60 °C sıcaklığındaki etüv fırınında kurutulmuştur.



Şekil 3.2. Elektro-eğirme nano elyaf üretim sistemi

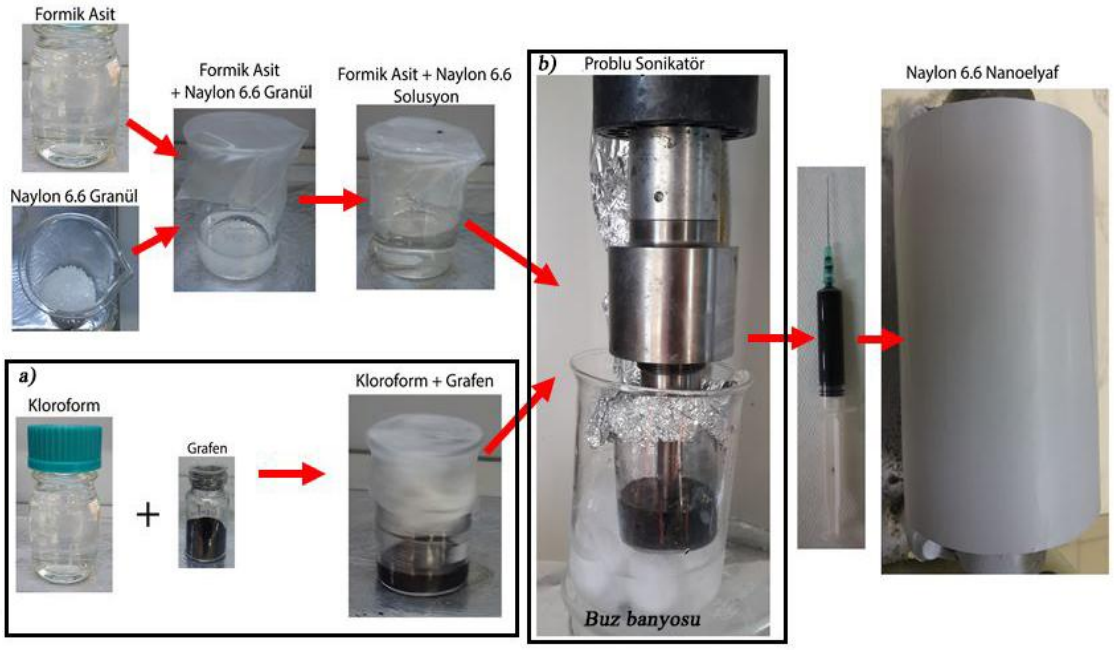
Elektro-eğirme yöntemi ile üretilen N6.6 nano elyafların kalınlıkları taramalı elektron mikroskopu (SEM) cihazında ve nano elyaf iki lamel arasına koyularak ölçülmüş şekil 3.3. ‘de gösterilmiştir. Lamellerin kalınlığı 1.07 mm olarak ölçülmüştür. Daha sonra iki lamelin arasıa nano elyaf koyularak kalınlığı 0.13 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 3.3.)



Şekil 3.3. Üretilen nano elyafın kalınlık ölçümü

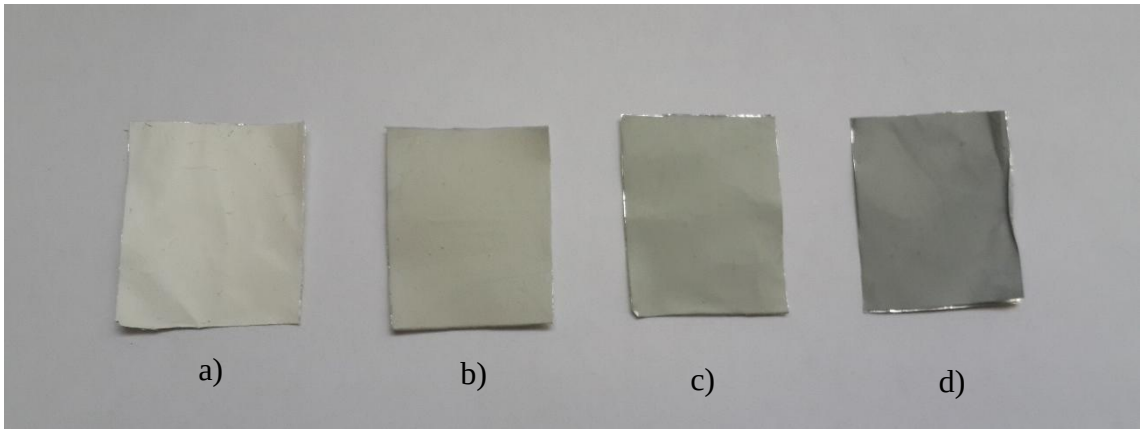
3.1.2. Elektro-eğirme yöntemiyle GNP + N6.6 nano elyaf üretimi

Grafen nano parçacıklar (GNP) ilk N6.6 ağırlığınca %1, 3 ve 5 oranlarında GNP ler tartılarak 30 ml formik asitin hacimce % 30’u olacak şekilde (9 ml) kloroformun içerisine eklenmiştir (Şekil 3.4). Kloroforma eklememizin sebebi GNP’lerin partiküllerini formik asitli N6.6 çözeltisine eklenmeden önce partikülleri dağıtma işlemi yaparak bir nevi ön homojenleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kloroforma eklenen GNP çözeltisi ultrasonik karıştırıcıda 10 dk karıştırıldıktan sonra N6.6. çözeltisine eklenerek karışım problu sonikatörde 50 kHz frekansta 1 saat boyunca karıştırılmıştır. Problu sonikatörün ses dalgalarıyla çalışmasından ötürü ısı açığa çıkmaktadır. Çıkan bu ısı ile çözeltinin sıcaklığı artmaktadır. Sıcaklığı dengelemek için şekil 3.4. b’de gösterildiği gibi çözeltini altına buz banyosu yerleştirilmiştir. Hazırlanan çözelti şırıngaya çekilerek nano elyaf üretim işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.4. a) Kloroform içerindeki GNP'lerin karıştırılması b) GNP+ N6.6 çözeltisinin karıştırılması(spin fotosu ekle)

Elektro-eğirme yöntemi ile üretilen nano elyaflar, içerisine katılan grafen sebebiyle elyafın rengi koyulaşmaya başlamıştır. Yani saf N6.6 nano elyafın rengi beyaz iken ağırlıkça % 1, % 3 ve % 5 oranında grafen katılmış nano elyafların renkleri, içerisine katılan grafenin yüzdesi oranında koyulaşmıştır. Burada makro düzeyde elyaflara bakıldığında bile nano elyafların renk dağılımlarından spinlerin içerisindeki grafenlerin düzgün bir şekilde dağılıp dağılmadığı da açıkça görülebilir. Şekil 3.5. 'de üretilen nano elyafların sırasıyla renk dağılımları açıkça görülmektedir.



Şekil 3.5. a) Saf N6.6 nano elyaf, b) % 1 GNP katkılı N6.6 nano elyaf, c) % 3 GNP katkılı N6.6 nano elyaf, d) % 5 GNP katkılı N6.6 nano elyaf

3.2. Vakum İnfüzyon Yöntemi İle Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Malzeme Üretimi

Karbon fiberleri hava araçları, motorlar ve diğer uzay uygulamaları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Çizelge 3.4. 'te gösterilen ticari olarak mevcut olan üç geniş karbon fiber kategorisini oluşturan yüksek modül (HM, Tip I), yüksek mukavemetli (HS, Tip II) ve ara modül (IM, Tip III). Bu lifler için grafit adlandırması bazen karbon ile birbirlerinin yerine kullanılır, ancak bu aslında yanlış bir kullanımdır. Grafit, güçlü kovalent bağlı altıgen baz düzlemlerinin üç boyutlu bir kafeste hizalandığı bir karbon formudur. Tabakalar arasındaki zayıf atomik Van der Waals birleşimi, grafitin düzlemleri arasındaki kaymayı kolaylaştırır. Karbon elyaflarının atomik yapısı, temel düzlemlerin sadece kaymayı önleyen iki boyutlu bir düzene sahip olması bakımından farklılık göstermektedir.

Çizelge 3.4. Ticari Karbonlu Elyafların Başlıca Tipleri için Tipik Özellikleri

Özellik	*HM Tip I*	*HS Tip II*	*IM Tip III*
Özgül Ağırlık	1.9	1.8	1.8
Çekme Modülü	276- 380	228- 241	296
Çekme Mukavemeti	2415- 2555	3105- 4555	4800
Maksimum Uzama (%)	0.6- 0.7	1.3- 1.8	2.0
Termal Genleşme Katsayısı ($\times 10^{-6}$ mm^{-1} K^{-1})	- 0.7	- 0.5	N/A
Termal İletkenlik	64- 70	8.1- 8.3	N/A
Elektrik Özdirenci	94- 10	15- 18	N/A

Karbon elyafları, bir karbonizasyon işlemi vasıtasıyla organik ön madde malzemelerinden yapılır. Havacılık ve diğer yapısal uygulamalarda kullanılan karbon elyafının hacmi, poliakrilonitril (PAN) liflerinden yapılır. Karbon elyafları ayrıca çeşitli zift şekillerinden yapılır. Başlarda karbon elyafları rayondan imal edilmiştir, ancak bu fiberler, düşük karbon verimi (% 20- 25) ve genellikle PAN ve zift bazlı karbon elyaflarına kıyasla daha düşük mekanik özelliklerinden dolayı aşamalı olarak bırakılmıştır.

3.2.1. Karbon fiberlerin özellikleri

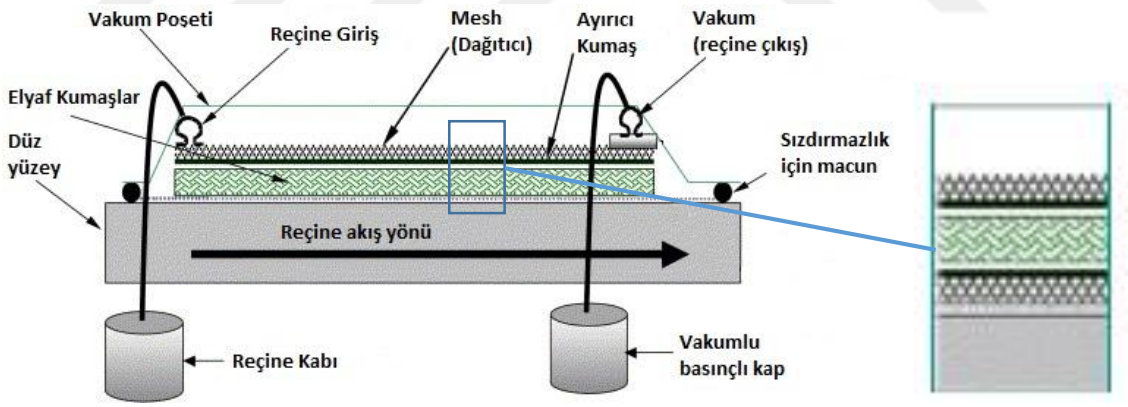
Karbon fiberler (KF) hava araçları, motorlar ve diğer uzay uygulamaları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan karbon elyafın özellikleri Çizelge 3.5. ‘de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Kullanılan karbon fiberin özellikleri

Gramaj (gr/m^2)	*Tür*	*Atkı Sıklığı*	*Çözgü Sıklığı*	*Atkı*	*Çözgü*
200 ± %3	Bezayağı	2.75 ± %3	3.75 ± %3	KF 12K	KF 12K

3.2.2. Kompozit malzeme üretimi

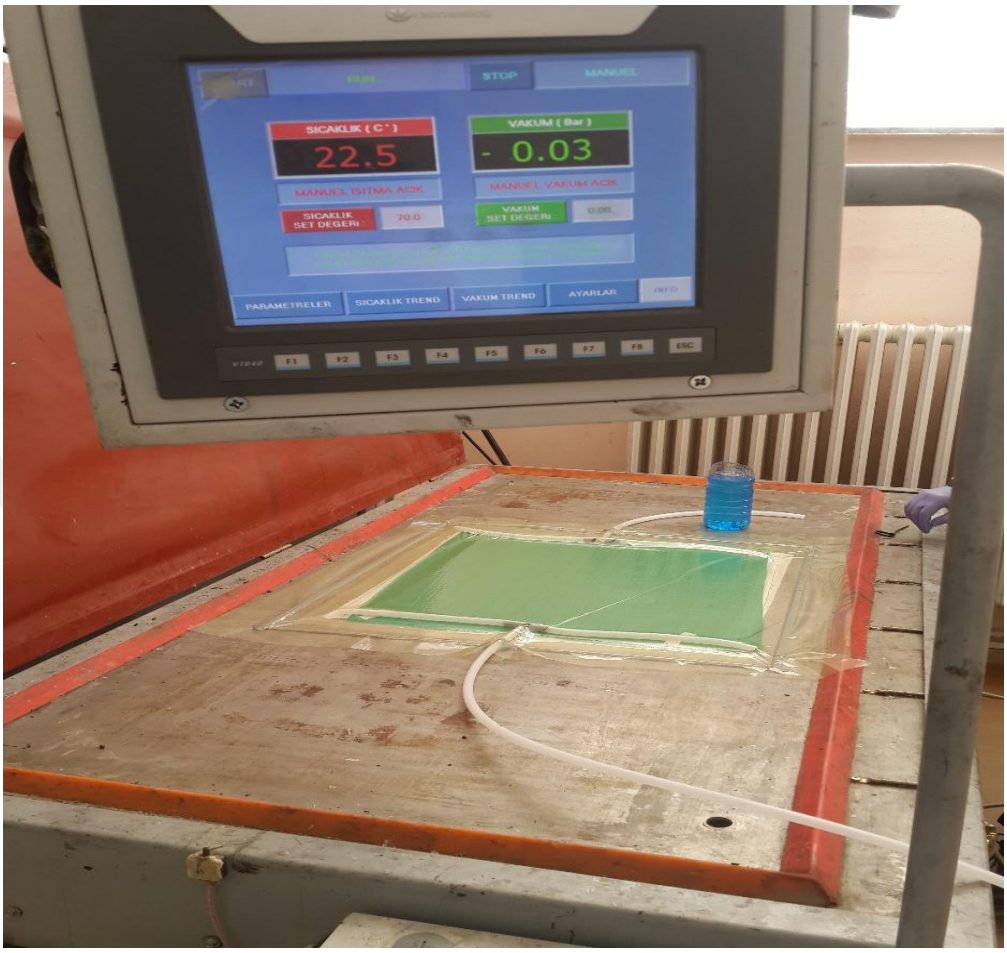
Bu tez çalışmasında tek taraflı bindirmeli bağlantıların testlerinde kullanılmak üzere üretilmesi hedeflenen kompozit malzemenin ölçüleri ve miktarı testler göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler vakum infüzyon infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Şekil 3.6. ‘da vakum infüzyon yönteminin şematik gösterimi görülmektedir.



Şekil 3.6. Vakum infüzyon yöntemiyle kompozit malzeme üretim şeması (Bender ve ark., 2006)

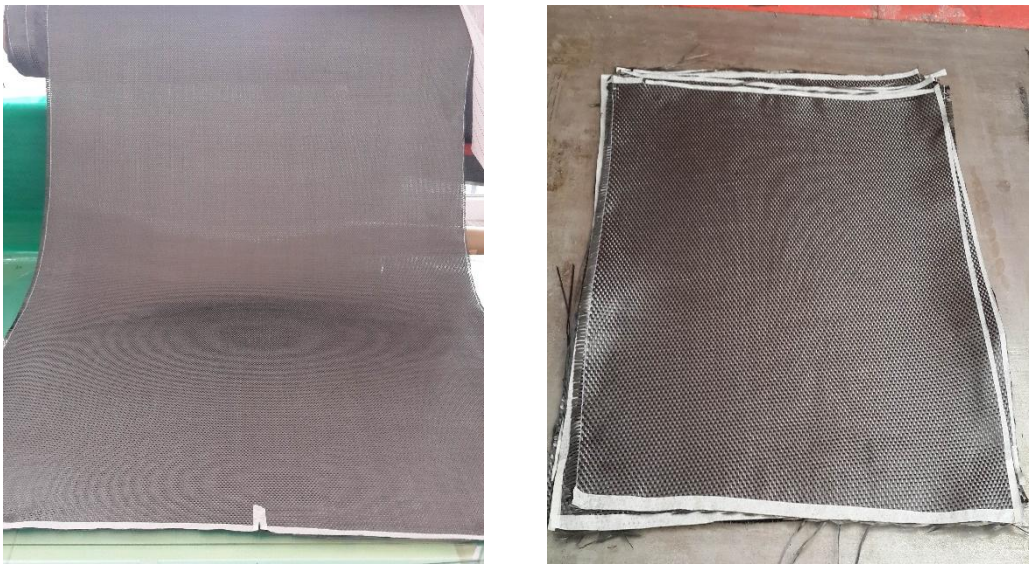
Kompozit malzeme üretiminde kullanılan makas, infüzyon filesi extrude (mesh), ayırma kumaşı, vakum infüzyon poşeti, sızdırmazlık macunu, vakum infüzyon hortumu ve spiral hortum, infüzyon T ve L bağlantıları Labkon firmasından temin edilmiştir. Takviye elemanı olarak kullanılacak olan karbon elyaf kumaşlar da Techel Advanced Composite Reinforcements firmasından temin edilmiştir. Üretimde kompozit malzemelerinin üretildiği ve kürleştirme işleminin gerçekleştiği Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Kompozit Malzeme Üretim

Labaratuvarında bulunan LCD kontrol panelli vakum infüzyon tezgahı kullanılmıştır (Şekil 3.7.).



Şekil 3.7. LCD Panel Kontrollü Vakum İnfüzyon Tezgahı

İlk olarak temin edilen karbon elyaf kumaştan, 2.0 mm kalınlığında tabakalı kompozit üretmek için 4 kat kumaş 50 cm x 50 cm boyutlarında şekil 3.8. ’de gösterildiği gibi kesilmiştir.



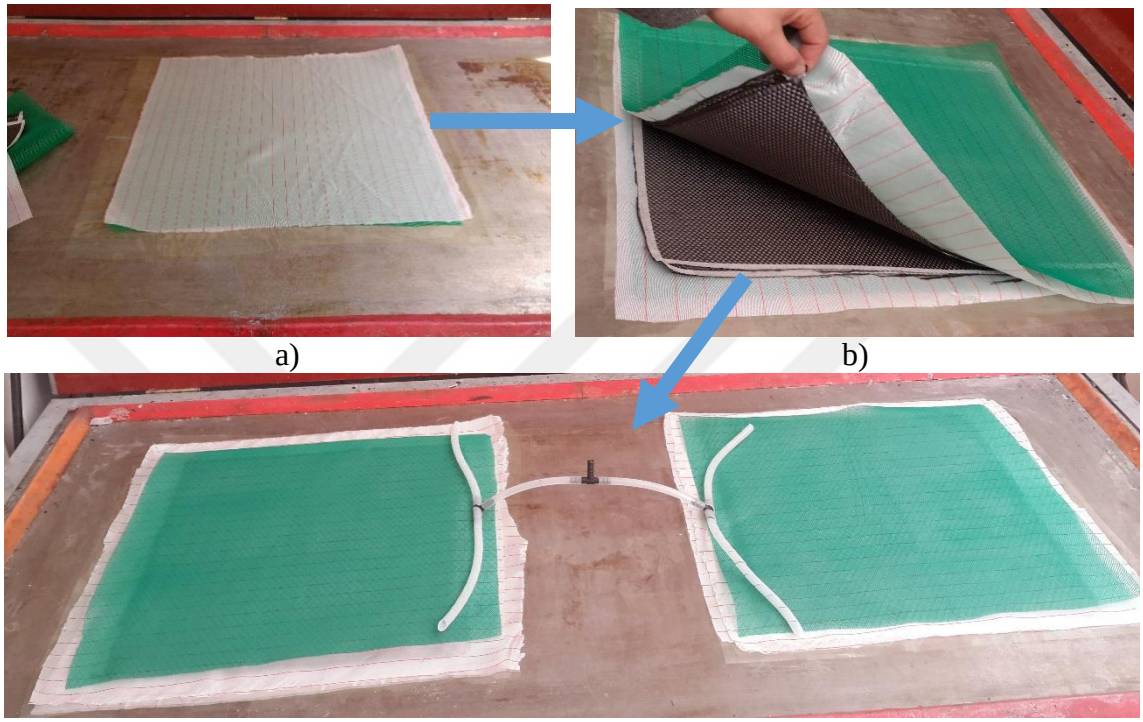
a) b)

Şekil 3.8. Karbon elyafların kesilme işlemi

Daha sonra kompozit üretimi işleminde kullanılacak olan bir adet 70 cm x 70 cm boyutlarında vakum infüzyon poşeti, iki adet 65 cm x 65 cm boyutlarında infüzyon filesi, iki adet 70 cm x 70 cm ayırma kumaşı ve bir adet 80 cm x 80 cm boyutlarında vakum infüzyon poşeti kesilmiştir. Kumaşa epoksi reçineyi aktaracak olan iki adet 50 cm uzunluğunda infüzyon spiral hortumu kesilmiştir. Spiral hortumlarının orta kısımlarına infüzyon T bağlantıları yerleştirilmiştir. Son olarak epoksi reçinenin vakum hattına giriş ve çıkışında iletimi sağlayacak olan gerekli uzunluklarda vakum hortumları kesilmiştir.

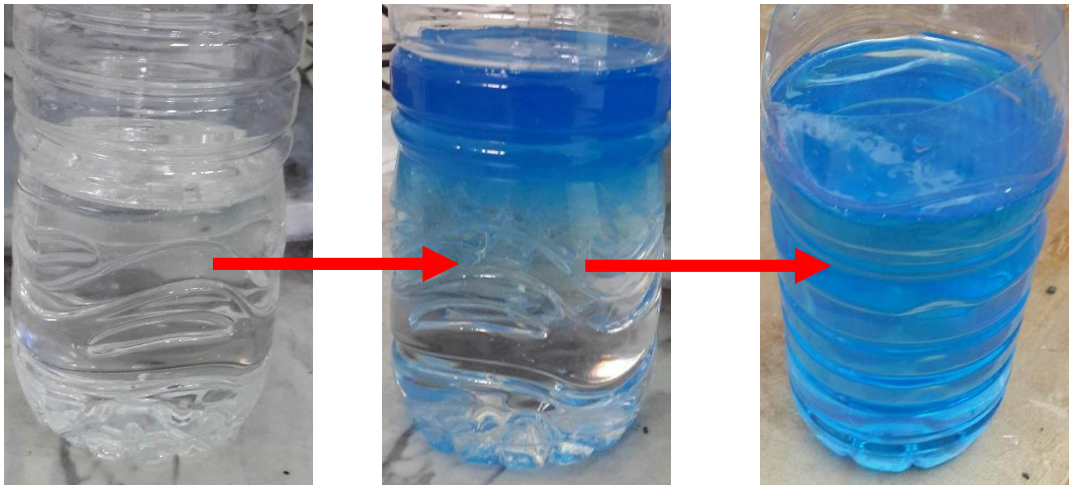
Kesme işlemlerinden sonra vakum tezgahı yüzeyi iyice temizlenmiştir. Tezgah üzerine ilk olarak epoksinin tezgah yüzeyine yapışmaması için 70 cm x 70 cm boyutlarında kesilen vakum infüzyon poşeti serilmiştir. Şekil 3.9. a'da gösterildiği gibi poşet üstüne epoksinin vakum sırasında karbon elyaf katmanlarının tüm yüzeyine homojen bir şekilde yayılmasını sağlamak için 65 cm x 65 cm boyutlarında infüzyon filesi serilerek onun üstüne de kompozitin üretim sonrasında konulan diğer katmanlardan ayrılmasını sağlamak için 60 cm x 60 cm boyutlarında kesilen ayırma kumaşı serilmiştir. Şekil 3.9. b'de gösterildiği üzere 50 cm x 50 cm boyutlarında kesilen karbon elyaf kumaşlar 4 katman olarak üst üste koyulduktan sonra üstüne tekrardan sırasıyla ayırma kumaşı, infüzyon filesi konulmuştur. Epoksi reçineyi kumaşa aktarmak için kullanılacak olan infüzyon spiral hortumu kumaşın her iki ucuna da koyulmuştur. Spiral hortumların ortasına yerleştirilen T bağlantılarının açık uçlarına dışarıdan epoksi teminini ve içeriden vakum sırasında tahliyesini sağlayabilmek için yeterli ölçülerde kesilmiş hortumlar bağlanarak uçları dışarıya doğru çıkarılmıştır. Son olarak da vakum işleminin

yapılabilmesi için 80 cm x 80 cm boyutlarında kesilen infüzyon poşeti kenarlara yapıştırılan sızdırmazlık macununa gerdirilerek yapıştırılmıştır. Kenarlardan hava sızdırmasının engellenmesi için yapıştırılan sırdırmazlık macunun üstüne kuvvet uygulayarak sızdırmazlık sağlama alınmıştır. Sızdırmazlık kontrolü yapıldıktan sonra kompozit üretim sistemi hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.9. c).



Şekil 3.9. Karbon elyaf ve diğer malzemelerin ısıtıcı infüzyon tezgahı üzerine serilmesi.

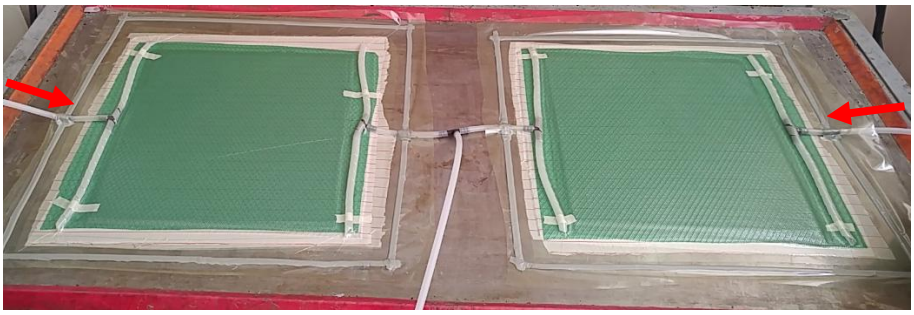
Kompozit üretim sistemi hazır hale getirildikten sonra Şekil 3.10. ‘da gösterildiği gibi matrisi oluşturacak olan epoksi ve kürleştirici çözeltisi hazırlanmıştır. Epoksi ve kürleştirici karıştırıldıktan sonra çözelti hemen kullanılmalıdır. Aksi takdirde epoksi kürleştirici ile hemen kimyasal tepkimeye girerek sertleşmeye başlamaktadır. Bu sebeple epoksi ile sertleştiricisi karıştırıldığında çok beklenmemeli kullanılacak zamana yakın bir süre zarfında karıştırılarak hemen kullanılmalıdır. Epoksi katmanların tamamını ıslatmalı ve elyafların her yerine nüfus etmelidir. Bunun için de yeterli miktarda ayarlanmalıdır. Burada katmanların tamamının ıslanması için yeterli miktar olarak 600 gr tartılarak epoksinin ağırlıkça % 25’i kadar da kürleştirici katılmıştır. Daha sonra bu karışım 5 dk boyunca mekanik karıştırıcıda karıştırıldıktan sonra içerisinde oluşan hava kabarcıklarının giderilmesi için de 5 dk. boyunca vakumlu fırında – 0.7 bar basınçta bekletilmiştir.



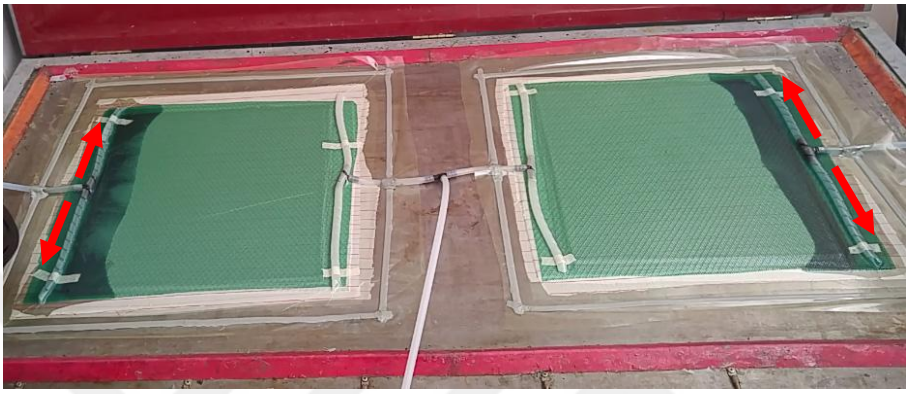
Şekil 3.10. Epoksi ve Kürleştirici Çözeltisinin Hazırlanması

Epoksi hazırlaması da gerçekleştirildikten sonra kurulmuş olan düzenekteki vakum pompası çalıştırılarak epoksi çözeltisi emiş kısmından verilerek epoksinin tabakaların üzerine geçmesi sağlanmıştır. Şekil 3.11. 'de görüldüğü gibi emiş kısmından giren epoksi vakum altında (- 0.7 - 0.8 bar arası) karşı tarafa doğru hareket etmektedir. Karşı tarafa doğru hareket ederken yayılan epoksi karbon elyafların bütün tabakalarına nüfus etmektedir. Aslında kompozit malzeme üretiminde elyaflara epoksi sürüldükten sonra tabakalar üst üste serilir ve kürleşme esnasında üzerine yük konulur. Burada yük yerine vakum sırasında oluşan basınçtan yararlanılarak kürleşme esnasında sistem vakum altında tutulup tabakalar üzerinde sürekli bir kuvvet oluşması sağlanmıştır.

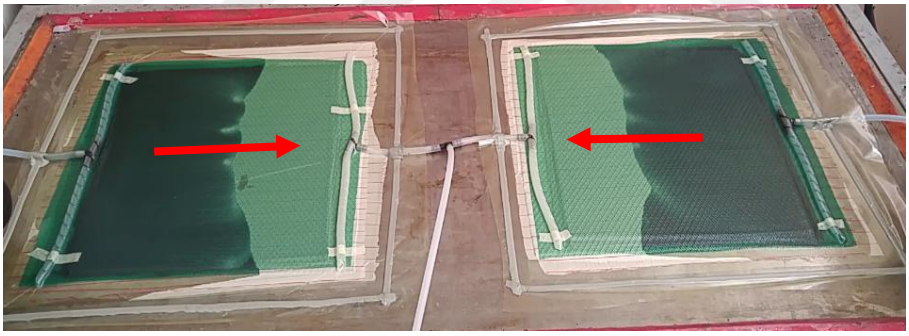
Vakum işleminin bir diğer görevi de epoksi tabakalara nüfus ederken sistem içerisindeki hava kabarcıklarının tamamını vakumlayarak bölgeden uzaklaştırmasıdır. Yani vakum işlemi hem epoksinin tabakalar üzerinde yayılmasını sağlamakta hem sistem içerisindeki havayı tamamiyle uzaklaştırmakta hem de tabakalar üzerinde sürekli bir yük oluşturmaktadır. Vakum durumundayken sistem öncelikle 70 °C de 1 saat bekletilerek kürleştirme işlemi yapılmış daha sonra 110 °C de 3 saat bekletilerek post-kür işlemi yapılarak üretim gerçekleştirilmiştir.



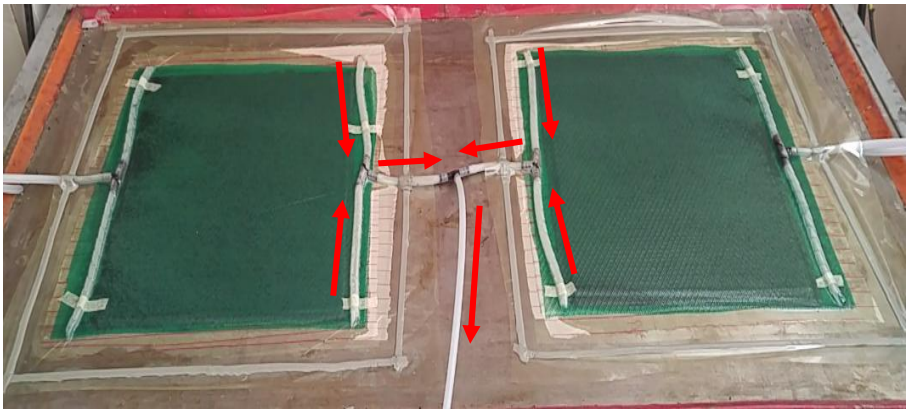
a)



b)



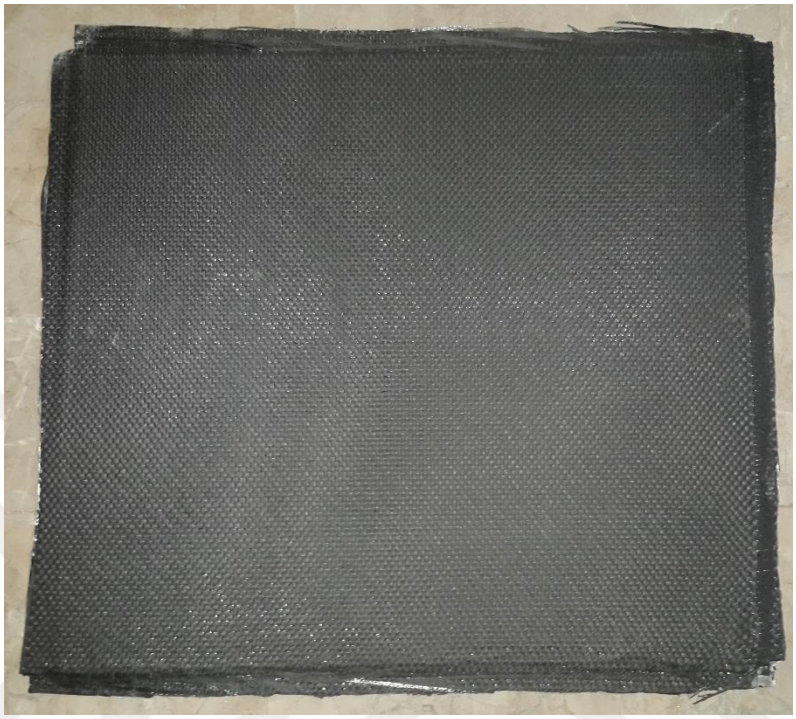
c)



d)

Şekil 3.11. Vakum infüzyon yöntemi ile kompozit üretimi

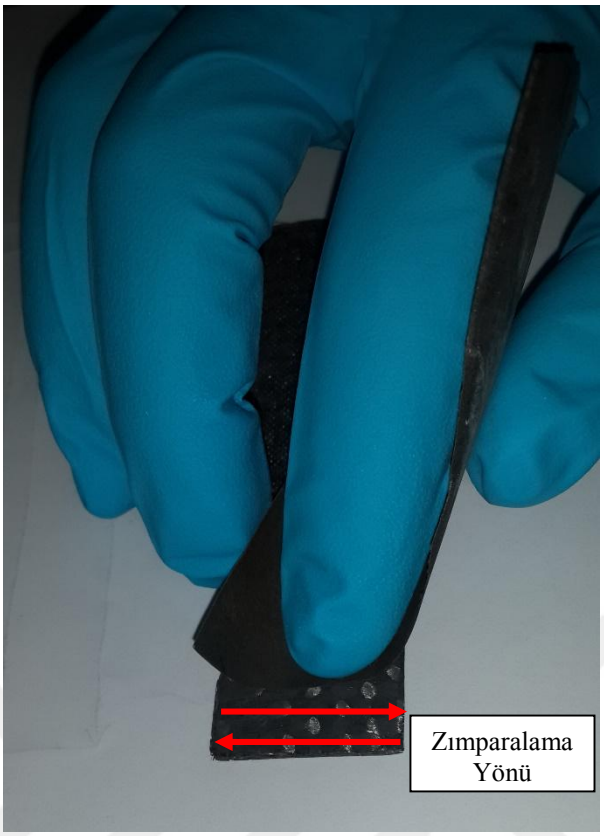
Kürleştirme işlemi bittikten sonra oda sıcaklığına soğutulmuş önce poşet ve sızdırmazlık macunu sökülerek daha sonra ayırma kumaşından ayrılarak Şekil 3.12. ‘de gösterilen kompozit levha elde edilmiştir.



Şekil 3.12. Üretilen karbon elyaf katkılı kompozit plaka

3.2.3. Kompozit levha kesme ve yüzey hazırlama işlemi

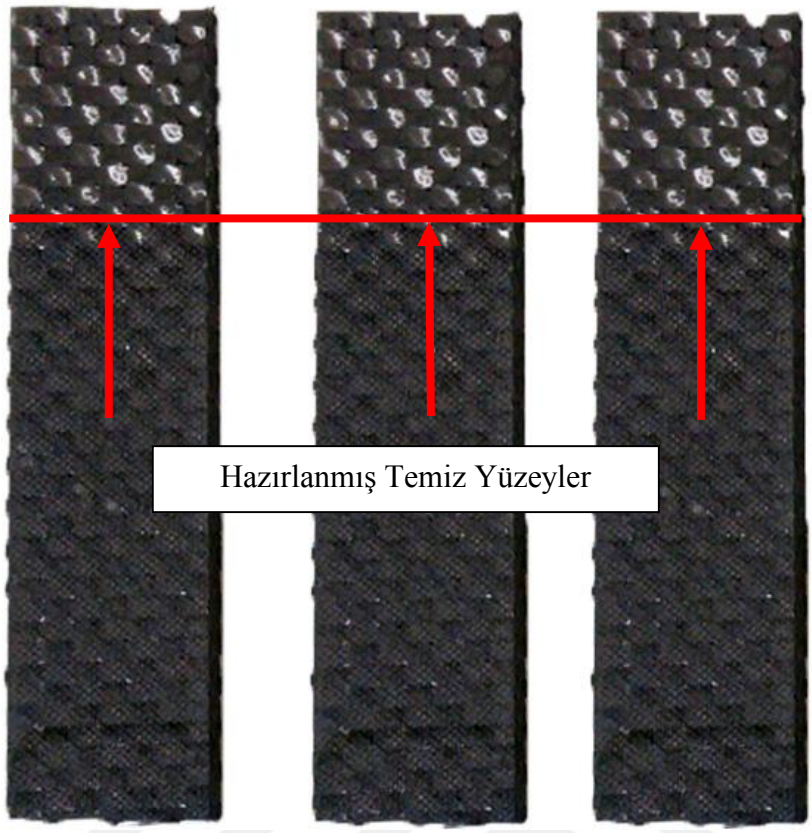
Karbon elyaf katkılı kompozit plakalar üretildikten sonra yapıştırma için hazırlanmıştır. ASTM D1001 standartlarında belirtildiği üzere boyutları 101.6 mm x 25.4 mm olacak şekilde Discaton 100 cihazı ile kesilmiştir. Kesilen bu levhaların yapıştırma öncesi yüzeyinin hazırlanması gerekmektedir. Çünkü yüzeyde bulunan epoksi, kirlilik v.b. gibi olumsuzlukların ortadan giderilmesi gerekmekte ve yapıştırma yüzeyinin bölüm 2.1.5.3. ‘te belirtildiği gibi mekanik kilitleme ve adhesyon yüzeyinin artırılması bu sayede de yapıştırma işleminin düzgün bir şekilde gerçekleşmesi için P 220 grid zımpara kağıdı kullanılarak levha Şekil 3.13. ‘de gösterilen yönde zımparalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Yani kompozit malzeme, yapıştırma bağlantısı çekme eksenine 90 °’lik bir açı ile zımparalama yapılmıştır. Zımparalama işleminden sonra malzemeler asetonla temizlenerek üzerindeki toz grafit parçaları giderilmiştir.



Şekil 3.13. Kompozit levha zımparalama ve temizleme işlemi

Şekil 3.14. ‘de kompozit levhaların yüzey zımparalama işlemi ve temizleme işlemi bitmiş hali gösterilmektedir. Yüzey temizleme işlemi bittikten sonra kompozit levhaların üzerine dokunmadan yapıştırma işleminin diğer proseslerini hazırlamaya geçilmiştir. Bu safhada kompozit levhalar temiz kapalı bir kap içerisinde yapıştırma işlemine hazır bir şekilde beklemeye alınmıştır.

Zımparalanan kompozitlerin yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümüne göre kompozit levha yüzeylerinin yüzey pürüzlülüğü; Ra= 1.92 µm, Rz= 7.11 µm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.14. Yüzeyi hazırlanmış kompozit levha

3.3. Alüminyum Levhalar ve Yüzey Hazırlama İşlemi

3.3.1. Alüminyum levhalar

Bu çalışmamızda yapıştırmanın bir tarafı kompozit diğer tarafında ise Labkon firmasından satın alınan alüminyum alaşım (AISI AA2024-T3) levhalar kullanılmıştır. Al 2024- T3 malzemesi yüksek dayanıma, işlenebilme özelliğine ve yüzey kalitesine sahiptir. Bu alaşım uçak sanayi, otomotiv, askeri ve makine sektörleri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. AA2024-T3 alüminyum alaşımının kimyasal bileşenleri ve mekanik özellikleri ve fiziksel özellikleri sırasıyla Çizelge 3.6., Çizelge 3.7. ve Çizelge 3.8. de verilmiştir.

Çizelge 3.6. Al 2024-T3 kimyasal bileşenleri

Bileşenler	*Al*	*Cr*	*Cu*	*Fe*	*Mg*	*Mn*	*Si*	*Ti*	*Zn*	*Diğer*
% Ağırlık	90.7-94.7	Maks. 0.1	3.8-4.9	Maks. 0.50	1.2-1.8	0.3-0.9	Maks. 0.5	Maks. 0.15	Maks. 0.25	Maks. 0.15

Çizelge 3.7. Al 2024-T3 mekanik özellikleri

Mekanik Özellikleri	*Akma Dayanımı (MPa)*	*Çekme Dayanımı (MPa)*	*Kopma Uzaması (%)*	*Elastiklik Modülü (GPa)*	*Poison Oranı*	*Kayma Modülü (GPa)*
	330	480	11	73 GPa	0.33	28

Çizelge 3.8. Al 2024-T3 fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikleri	*Yoğunluk (g/cm^3)*	*Termal İletkenliği (W/m-K)*	*Isı Yayılımı (m^2/s)*	*Termal Genleşme (µm/m-K)*	*Elektrik İletkenliği (% IACS)*
	3.0	120	46	23	30

3.3.2. Alüminyum levhaların yüzey hazırlama işlemi

Metalden metale, metalden kompozitlere olan dayanıklı yapışkan bağları, yalnızca uygun seçim ve kullanılan materyallerin dikkatli kontrolü ve yapıştırma adımlarındaki adımlar vasıtasıyla elde edilebilir. Uygun özelliklere sahip yüzeyleri elde etmek için metalik yüzeylerin hazırlanması kritik bir adımdır. Uygun olmayan yüzey hazırlığı zamanla hızla bozunan bağlar üretebilir. Bu bölümde, ASTM D3933 standardına göre alüminyum yüzeylerin nasıl düzgün bir şekilde hazırlanacağı ile ilgili bir yöntem açıklamaktadır.

Tek taraflı bindirmeli bağlantılarda kullanılacak olan alüminyum levhaların yüzey hazırlanması işleminin amacı numunelerin yüzeylerinde bulunan yağ, gliserin, kir v.b. gibi tabakaların yapıştırma yüzeyinden uzaklaştırılması ve yüzeyde kontrollü bir yüzey pürüzlülüğü oluşturmaktır. Eğer yüzey hazılama işlemi yapılmazsa yapıştırıcı, yüzeydeki yabancı maddelerin oluşturduğu tabakaya tutunacak dolayısıyla alüminyum yüzeyine gerçek tutunma gerçekleşmeyecektir. Bu da yapışma dayanımını düşürecek ve verimi düşürecektir. Buna ek olarak yüzeyde oluşturulan kontrollü pürüzlülük hem hazırlanan bütün numunelerin bir standartta olmasını sağlayacak hem yapıştırma yüzey alanının artırılmasını sağlayacak hem de mekanik kilitleme olayı ile yapışma mukavemetine katkıda bulunmaktadır. Hem numunelerin yapıştırma işlemi hem de yapıştırma işlemi öncesi ve sonra hazırlık ve test aşamalarındaki prosesler dünyaca kabul göre ASTM standartlarına uygun şekilde hazırlanmıştır.

Tek taraflı bindirmeli bağlantılarının yapıştırılma işlemleri yapılacak olan çekme testi ASTM D1002 standartlarına uygun şekilde hazırlanmıştır. Bu standartlara göre 2.5 mm kalınlığındaki alüminyum levhalar CNC lazer kesim tezgahı'nda 101.6 mm x 25.4

mm ölçülerinde kestirilmiştir. Kesilen levhaların kenarlarında bulunan çapaklar eğe yardımı ile çapak giderme işlemi gerçekleştirilmiştir. Çapak giderilme işlemi gerçekleştirildikten sonra havacılık sektöründe sıkca kullanılan ASTM D2651 (dağlama için sülfürik asit/sodyum dikromat solusyonu) standardı ile ASTM D3933 (fosforik asit ile anotlama) standardı kullanılarak yüzey hazırlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

Bütün bu işlemler gerçekleştirilirken ve yüzey hazırlama işlemi bittikten sonra levhaların yapıştırma yapılacak yüzeylerine herhangi bir temasta bulunulmamalıdır. Ayrıca yüzey hazırlama işleminin bütün safhalarının geçişsürelerinde alüminyum levhalar kuru kalmamalıdır. Bu sebeple bütün prosesler ard arda gerçekleştirilerek yüzeyin kuru kalması engellenmelidir. Aksi halde yüzey hazırlama işlemi baştan başlatılmalıdır. Şekil 3.15. de yüzey hazırlama işleminin prosesleri gösterilmektedir.

Yüzey hazırlam işlemi için gerekli olan kimyasal maddeler (sülfürik asit, sodyum dikromat, sodyum hidroksit, fosforik asit) Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Mekanik Ana Bilim Dalı Laboratuvarından temin edilmiştir.

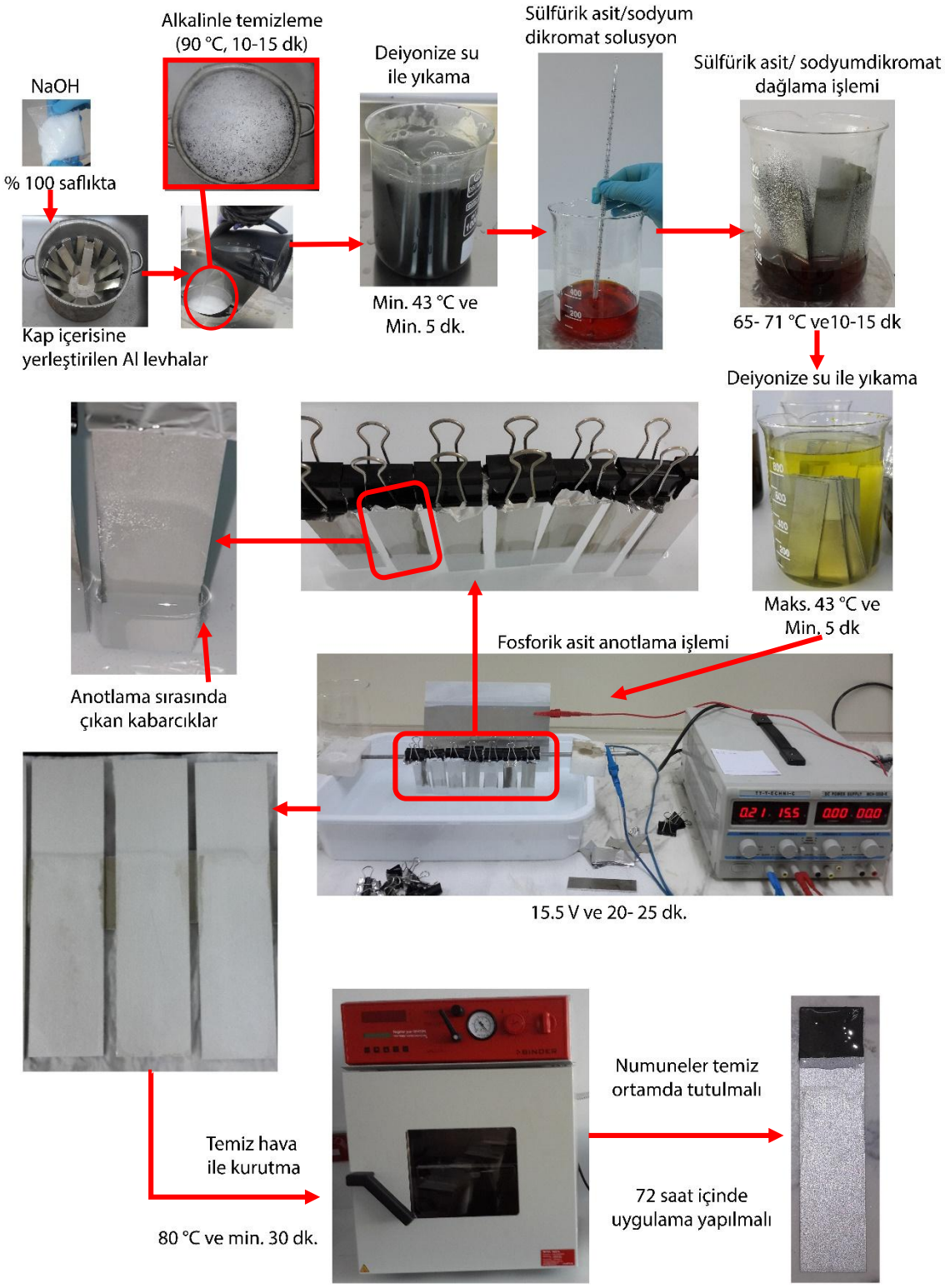
Yapısal montajlarda tekrarlanabilir, dayanıklı ve yapışkan bağların oluşumu, malzemelerin seçiminde, bağlanacak bileşenlerin yüzeylerinin hazırlanmasında, bileşenlerin oturmasında ve basamakların yapıştırma işleminde performansda büyük özen gerektirir.

Yüzey hazırlığına başlamadan önce yüzey hazırlama işlemi ve kurutma işleminin yapılacağı sistemlerle alüminyum yüzeylerinin zararlı maddelerle kirlenmemesi için diğer laboratuvar ekipmanlarını ayırmak gerekmektedir. Bütün yüzey hazırlama tesisi, yüzey hazırlığının başından dokunulmadan priming işlemine kadar bölümler akabilecek şekilde düzenlenmelidir. Çözeltide bekletme ve parçaların kurutulması için kullanılan hava hatlarından veya kanallardan havadaki toz, nem ve yağın temizlenmesi için filtreler, korumalar veya her ikisi de kurulmalıdır. Düzgün çalışmasını sağlamak için düzenli aralıklarla filtreleri kontrol etmek, temizlemek ve gerekiyorsa değiştirmek gerekmektedir. Yüzey hazırlama tesisleri, yapışkan bağlama ve daha sonra bitirme için parçaların hazırlanması dışındaki amaçlar için kullanılmamalıdır. Bu prosesin ekipman gereksinimleri, alüminyum alaşımlarının kimyasal işlemesinde normalde kullanılan ekipmanı ve aşağıdaki özel hükümleri içerir:

- Elektrikli anodik olan raflar ve çerçeveler, tüm işlem sırasında askı telleri veya klipsleri veya parçaları ile aşındırıcı reaksiyona neden olmayacak malzemeden yapılmalıdır. "Resim çerçevesi" tipi raflar tatmin edici biçimde gerçekleştirildi.

- Parçalar, teller, kancalar, yaylar, klipsler vb. Şeklinde alüminyum veya titanyumdan anodize edilmiş iletken malzemelerle raflara veya çerçevelere bağlanacaktır.
- Fosforik asit eloksal kabı astarı, çözeltiler, parçalar, çerçeveler, raflar veya klipsler ile askılar arasındaki etkileşimin anodik işleme müdahale etmediği ve bir katot olarak kullanılmaya uygun olduğu şekilde olmalıdır. Kaplar, yüzey kirliliğini gidermek için bir yüzey kaydırma cihazı, bir filtreleme sistemi ve tank muhteviyatını karıştırmak için bir çalkalama sistemi ile donatılmalıdır.
- Elektrik akımı için kablolar, parçalar "yakılamayacak" şekilde tasarlanacak ve konumlandırılmalıdır.
- Tek raflı bir anot prosesi sırasında kullanılan elektrik sistemi, 10 V dc üretmek ve 61 V DC'de herhangi bir ayarlanmış voltajı korumak için yeterli olmalıdır.
- Çok raflı bir işlem sırasında kullanılan elektrik sistemi, 15 V dc üretmek ve 61 V DC'de herhangi bir ayarlanmış voltajı korumak için yeterli olacaktır.
- Durulama kapları, prosesin ardışık basamakları boyunca parçaların kuru kalmaması için parçaların bir çözeltiden diğerine kolayca ve hızlı bir şekilde taşınacağı şekilde işleme kaplarına bitişik yerleştirilmelidir.
- Gelen solüsyon durulama suyu, flor için "önerilen üst limit" ten ve deiyonize edilmiş veya damıtılmış su için American Chemical Society standartlarına dayanan çözülmüş kimyasalların "en fazla istenen seviyesinden" veya her ikisinde de fazla olmamalıdır (1.7 ppm Florür, 500 ppm toplam çözünmüş katılar, vb.). Klorür 25 ppm'yi geçmemelidir. PH 5.5 ila 8.0 arasında olmalıdır.
- Yukarıdaki şartlar yerine getirilemiyorsa, gelen su deiyonize edilmeli ve aşağıdaki sınırlar dahilinde muhafaza edilmelidir: Toplam çözünmüş katılar 150 ppm'yi aşmamalıdır. PH 5.5 ila 8.0 arasında olmalıdır.

  Yukarıdaki uyarılar dikkate alınarak alüminyum yüzey hazırlama işlemleri yapılmıştır. Deiyonuze su Selçuk Üniversitesi İleri Araştırma ve Teknoloji Laboratuvarlarından temin edilmiştir.



Şekil 3.15. Alüminyum bağlantı numunelerin yüzey hazırlama işlemlerinin şematik görünümü(başlarına numara ekle)

Yüzeylerin ve fosforik asit anodik kaplamaya hassas olduğu için komşu parçalara, raf veya destek çerçevesine veya başka herhangi bir öğeye dokunulması gibi tüm işlem sırasında parçaların herhangi bir anda temas ettirilmemesine özen gösterilmelidir.

Parçaları tutmak veya dokunmak gerekiyorsa temiz beyaz eldiven kullanılmalı ve temas yapışkan bağlanmayan yüzeylerle sınırlandırılmalıdır. Parçalar anotlama öncesi veya sonrasında kontamine olursa, alkalin temizleme ile başlanarak yeniden işleme tabi tutularak düzeltici önlemler alınmalıdır. Çözelti homojenliğini sağlamak için, işlemin hemen öncesinde ve su veya kimyasalların her ilavesinden sonra çalkalama işlemi yapılmalıdır. İşlem solüsyonlarından çıkarma ile durulama arasındaki zaman aralığını kontrol ederek numunelerin ara geçişlerde kurumamasını sağlamak gerekmektedir. Alkali temizlemesi, deoksidan işleminden sonra ve anodize edildikten sonra parçalar sudan arındırılmış olmalıdır.

Şekil 3.15. ‘de gösterildiği gibi yüzey hazırlama işlemi ara vermeden yapılmalıdır. Parçalar, alkali temizleme için rafa konulduktan ve anotlama (primer) uygulamasından sonra kuruyana kadar, geçerli işleme çözeltisi ve durulama suları hariç herhangi bir şeyle temas ettirilmemelidir. Alkali temizlikten fosforik asit anodlamadan sonra kurutma esnasındaki "ıslak" işleme adımları, fosforik asit anodlamanın ardından durulamadan sonra fırın kuruyana kadar herhangi bir zamanda parçalar kurutulmadan kesintisiz bir süreç dizisi altında gerçekleştirilmelidir. Bu ıslak işlem sırasında parçalar anotlamadan önce gecikirse, parçaları durulama kabında muhafaza edilmelidir. Anodlamadan sonra proses sıralamasında parçaların tutulması olmaz.

Fosforik anotlama işlemi sırasında elektrik akımı arıza yapması ya da başka sebeple akım kesilirse gerilim eğer 2 dakika içinde yeniden sisteme verilirse anotlamaya ek olarak 20- 25 dakika daha devam edilebilir. Ancak akım kesilir de gerilim 2 dakika içinde yeniden sisteme verilemezse o zaman alüminyum levhaları durulayarak ve oksit giderici işlemi ile tekrardan yüzey hazırlamaya başlanmalıdır.

Aşağıda alüminyum levhalarına yüzey hazırlık işlemleri sırasıyla verilmiştir.

- Numunelerin kenarlarında oluşan çapakları ince eğe (diş 2=22 diş) ile eğelendi,
- Saf su içinde ultrasonik banyoda 30 dk karıştırıldı,
- NaOH ile yaklaşık 90 °C’de 10-15 dakika alkalin temizleme yapıldı,
- Minimum 43 °C’de minimum 5 dakika saf suyla yıkama yapıldı,

- Sülfürik asit, sodyum dikromat ve saf su sırasıyla ağırlıkça % 26.7, % 5 ve % 68.3 oranlarında karıştırılarak (sülfürik asit/ sodyum dikromat dağlama işlemi) oluşan solüsyona 12 dk. 65-71 °C'de daldırıldı,
- Maksimum 43 °C'de minimum 5 dakika saf suyla yıkama yapıldı,
- Fosforik asit anodizasyon işlemi (PAA), fosforik asit ve saf su sırasıyla ağırlıkça % 9- 12 ve % 88- 91 oranlarında solüsyona 14- 16 voltaj ve 20- 25 dakika süre ile oda sıcaklığında daldırılır,
- Saf su ile yıkandı,
- Numuneleri vakum fırınında 80 °C'de 45 dakika kurutuldu,
- Numuneler son olarak temiz bir ortamda önceden hazırlanan yapıştırıcı TTBB bağlantılarında 0.1 MPa'lık bir basınç uygulanarak yapıştırma bağlantıları yapıldı.

Fosforik asit anotlama işleminin ardından Al levhalar kurutulduktan sonra 72 saat içerisinde yapıştırma uygulamasının yapılması gerekmektedir. Ayrıca temiz kirliliğin olmayacağı bir yerde muhafaza edilmeli ve asla yüzeye elle temas edilmemelidir.

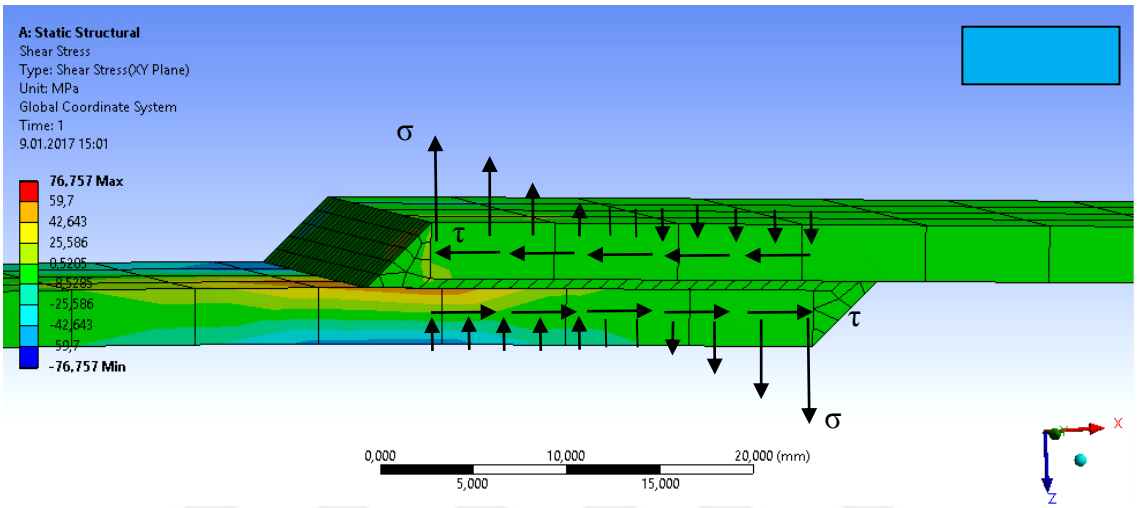
PAA anodizasyonu işlemi sayesinde yüzey pürüzlülüğün artışı (hücreler yaklaşık 50- 65 μm) sağlanmaktadır. PAA anodizasyonu Al yüzeyinde fosfatlı bariyer tabakalı Al_2O_3 meydana gelmiştir. PAA ostit tabakasının sağladığı özellik sayesinde mekanik kilitleme olayı daha iyi olmaktadır (Ahearn ve ark., 1980). Sağladığı bir başka özellik ise yapışma dayanımını ve atmosfer, tuzlu su v.b. durumlara karşı korozyon direncini artırmaktadır. Hazırlanan alüminyumların yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş olup Ra= 1.92 μm, Rz= 9.41 μm olarak bulunmuştur.

3.4. Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantıların Yapıştırma İşleminin Yapılması

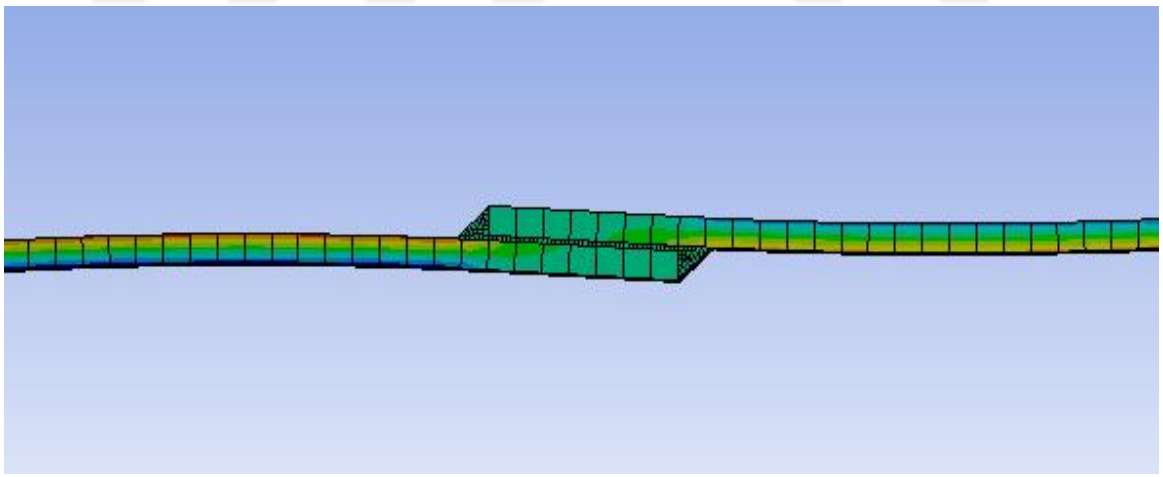
3.4.1. Tek taraflı bindirmeli bağlantının çekme testine göre boyutlarının belirlenmesi

Bölüm 2.1.4. 'de bahsedildiği üzere yapıştırma bağlantısı üzerinde soyulma, makaslama, basma ve kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Yapıştırma bağlantısı tasarlanırken bu gerilme dağılımlarının iyi tasarlanması gerekir ki soyulma ve makaslama gibi gerilmeler düşürülür, kayma ve basma gibi gerilmeler ise artar. Şekil 3.16'de görüldüğü üzere tek taraflı bindirmeli yapıştırma bağlantılarının uç kısımlarındaki gerilme dağılımında (kayma ve soyulma) bir artış olduğu bilinmektedir. Yükleme durumunda yapıştırılan malzeme ile yapıştırma ara yüzeyinde yapıştırma uzunluğu

boyunca kayma gerilmesi (τ) oluşurken, yapıştırma bağlantısının bir ucunda numunenin eksenel olarak kendini dengelemeye çalışmasından (Şekil 3.17) dolayı soyulma gerilmesi oluşmakta ve bu sebeple maksimum çekme gerilmesi meydana gelmektedir. Yapıştırma bağlantısının diğer ucunda ise bu çekme bağlantısına karşılık basma gerilmesi oluşmaktadır. Soyulma (çekme- basma) gerilmesi tek taraflı bindirmeli yapıştırma bağlantısının merkezinde sıfırlanmaktadır.



Şekil 3.16. Yapıştırma yüzeyinde oluşan gerilmeler

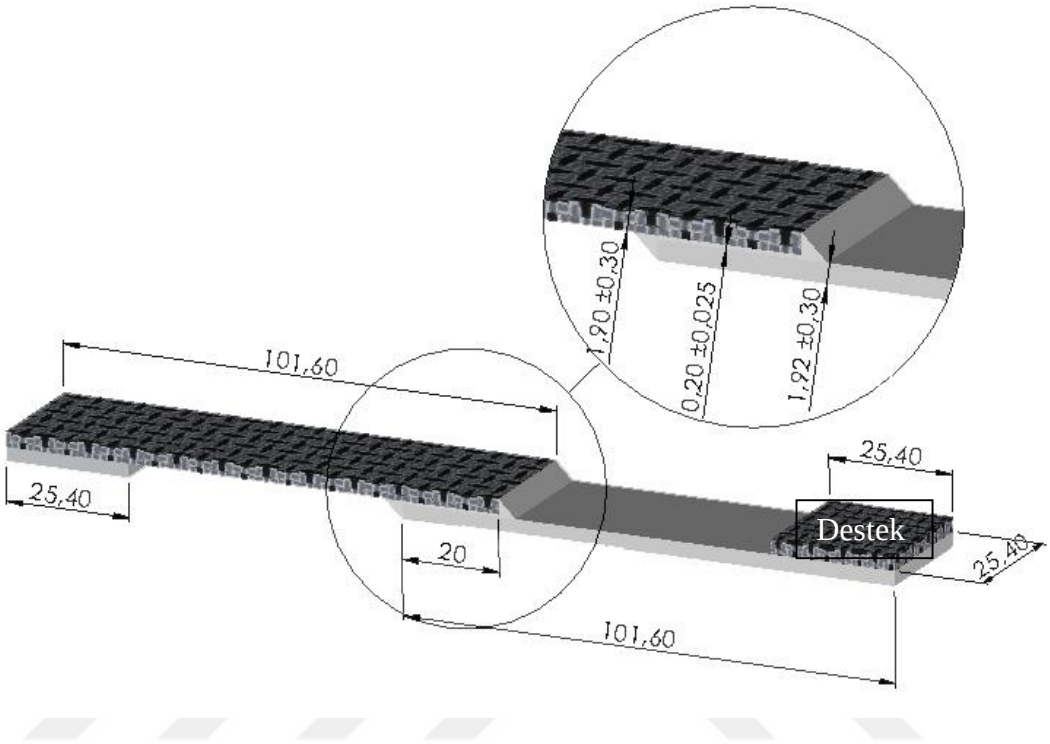


Şekil 3.17. Yapıştırma bağlantısında çekmeden dolayı oluşan geometrik zorlama

Tek taraflı bindirmeli bağlantılar işlem kolaylığı ve verimliliği sebebiyle en yaygın kullanılan bağlantı türleridir (Şekil 3.18.).

Yapışkan bağların mukavemet test sonuçlarının doğruluğu, bağlanma işleminin hangi şartlar altında yürütüleceğine bağlı olacaktır. ASTM D1002-10 test metodu standart bir tek taraflı bindirmeli bağlatıları test edildiğinde ve belirli hazırlık ve test koşulları

altında metallerin yapıştırılmasında kullanılan yapıştırıcıların görünür kesme mukavemetlerinin belirlenmesini kapsar. Ancak bu çalışmada bir taraf kompozit diğer taraf alüminyum olduğu için standart içerisinde belirlenen bazı şartlar modifiye edilmiştir.



Şekil 3.18. Tek taraflı bindirmeli yapıştırma bağlantısının şematik gösterimi

ASTM D1002- 10 standardı ile yapıştırılan tek taraflı bindirmeli bağlantıları yapıştırıcının kesme yükü altındaki özellikleri, yapıştırıcı kalitesinin belirlenmesi, yapısal ve geometriksel tasarımları için kayma mukavemeti gibi bilgilerin elde edilmesi için kullanılır. Bu şekilde yapıştırılmış bağlantıların mekanik davranışlarını etkileyen bazı faktörler; yapıştırıcının kalınlığı, üretim prosesi, yapıştırma sonrasında kürleşme anındaki uygulanan basınç, numunenin şartlandırılması, deney anındaki ortam koşulları (kriyojenik şartlar v.b.), numunenin test cihazına kontrollü bir şekilde bağlanması ve kıyaslanacak numunelerin hep aynı şekilde bağlanması, deney anındaki çekme hızı ve yüzey hazırlama işlemidir.

Bu çalışmada ASTM D1002- 10 standardına uygun numuneler hazırlanmıştır. Yapıştırma bağlantılarının uzunluğu 101.6 mm, genişlikleri 25.4 mm ve kalınlıkları ise 2 mm'dir. Fakat yüzey hazırlama işlemlerinden sonra kalınlıklar kompozitte 1.90±0.3 mm, alüminyum ise 1.92±0.3 mm olarak değişkenlik göstermektedir. Yapıştırma bağlantısının toplam kalınlığı ise 4.05±0.3 mm'dir. Yapıştırıcı kalınlığı 0.20 mm'dir. Yapıştırıcı

kalınlığını saf epokside 0.15±0.025 mm'lik metal tel ile N6.6 nano elyaf katkılılarda ise standart kalınlıklarda üretilen nano elyafların kendi kalınlıklarına bağlı kalınarak üretilmiştir. Yapıştırmada bağlantılar birleştirildikten sonra kürleşme süresince bağlantı üzerine klipsler yardımıyla 0.1 MPa'lık basınç uygulanmıştır. Klipslerin uyguladığı kuvvet çekme cihazında 25 N olarak ölçülmüştür. Standartta gösterilen yapıştırma bindirme uzunluğu 12.5 mm'dir. Ancak bu metal/metal numuneleri kapsamaktadır. Kompozit/kompozit numunelerde ise bu ölçü 25 mm'dir. Bu çalışmada alüminyum/kompozit bağlantıları yapıştırıldığı için iki standardın arasında bir değer olarak 20±0.2 mm seçilmiştir. Çekme deneyinde kullanılan tek taraflı bindirmeli bağlantıların ölçüleri Şekil 3.18. 'de verilmiştir. Çekme esnasında eksantriklikten dolayı meydana gelecek eğilme momentini minimize etmek için yani çekme eksenini yapıştırma bağlantısının merkezine alıp çekme cihazının ekseni ile aynı duruma getirmek için parçaların uç kısımlarına parçalar ile aynı kalınlıkta olan destekler yapıştırılmıştır (Şekil 3.18.).

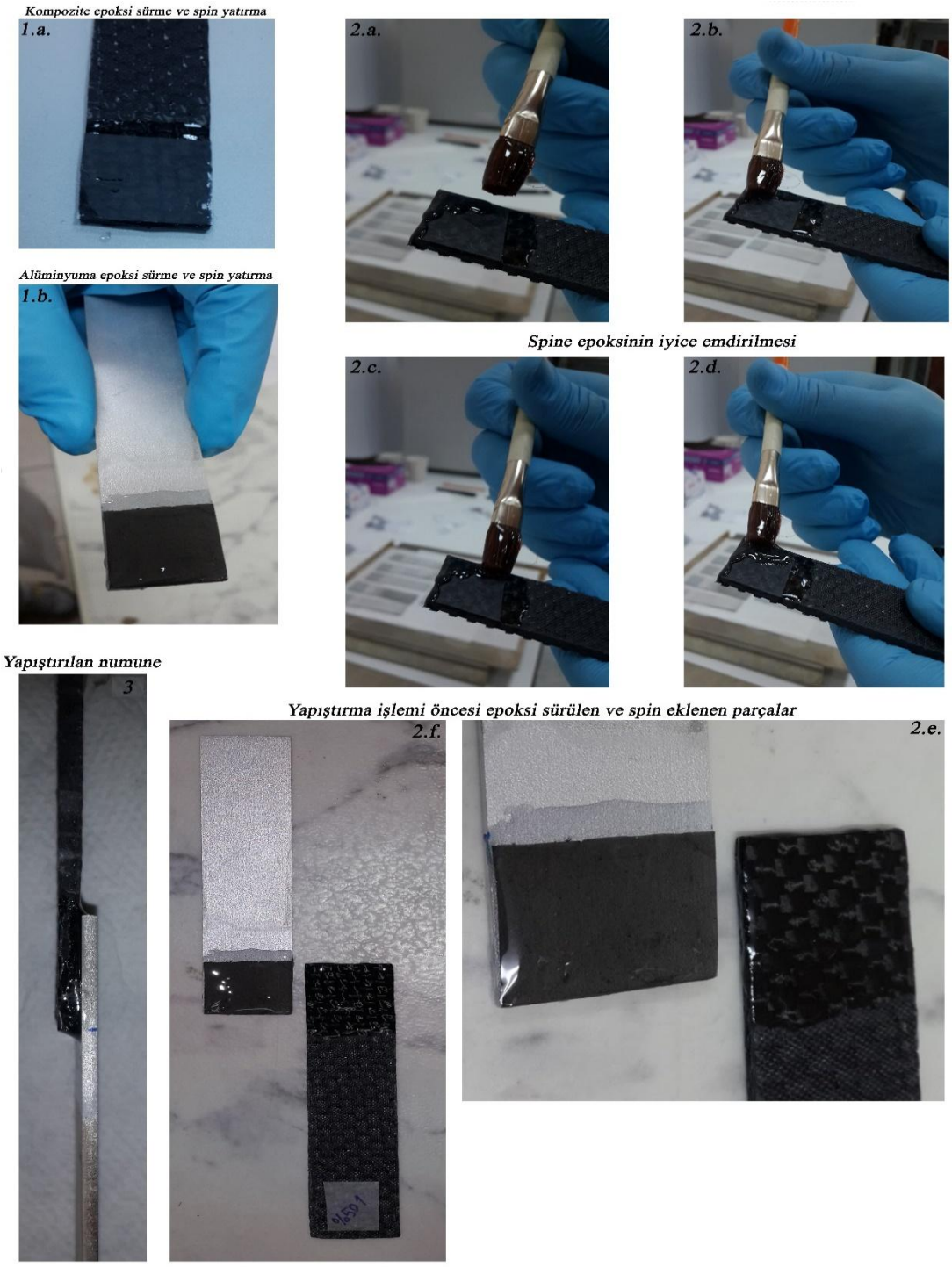
3.4.2. Tek taraflı bindirmeli bağlantıların hazırlanışı

Tek taraflı bindirmeli bağlantıların hazırlanışı oldukça basit proseslere dayanmaktadır. Şekil 3.18. 'de gösterilen ölçülerde kesilen alüminyum ve kompozit malzemelerin yüzey hazırlama işlemleri daha önceki bölümlerde (Bölüm 3.1.3, bölüm 3.3.2) anlatılmıştır. Bu bölümde ise yüzeyleri hazırlanan bu numunelerin yüzeylerinin yapıştırma işlemi saf epoksi, saf N6.6 nano elyaf ilaveli, ağırlıkça % 1, % 3 ve % 5 GNP katkılı N6.6 nano elyaf ilaveli numunelerin üretimi anlatılacaktır.

Tek taraflı bindirmeli bağlantıların yapıştırılmasında yapıştırıcı olarak epoksi L285 reçine kullanılmıştır. L285 için sertleştirici olarak da H285 epoksi sertleştirici kullanılmıştır. Epoksi reçinenin ağırlıkça % 40'ı kadar sertleştirici (kürleştirici) eklenip karışım mekanik karıştırıcıda 10 dk. kadar karıştırılmıştır. Mekanik karıştırıcıda karıştırılmasından dolayı yapıştırıcı içerisinde oluşan hava kabarcıklarının giderilmesi için oda sıcaklığında, – 0.75 bar basınçta 5- 10 dk arası vakum altında tutularak gaz giderme işlemi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.19. 'da gösterildiği gibi yüzeyleri önceden hazırlanan kompozit ve alüminyum tek taraflı bindirmeli bağlantı yapıştırma numunelerinin yüzeylerine öncelikle epoksi sürülmüştür. Epoksi sürülen yüzeylerin herhangi birine (alüminyum veya kompozit) nano elyaf yatırılmıştır (Şekil 3.19. 1.a. ve 1.b). Nano elyaf herhangi bir

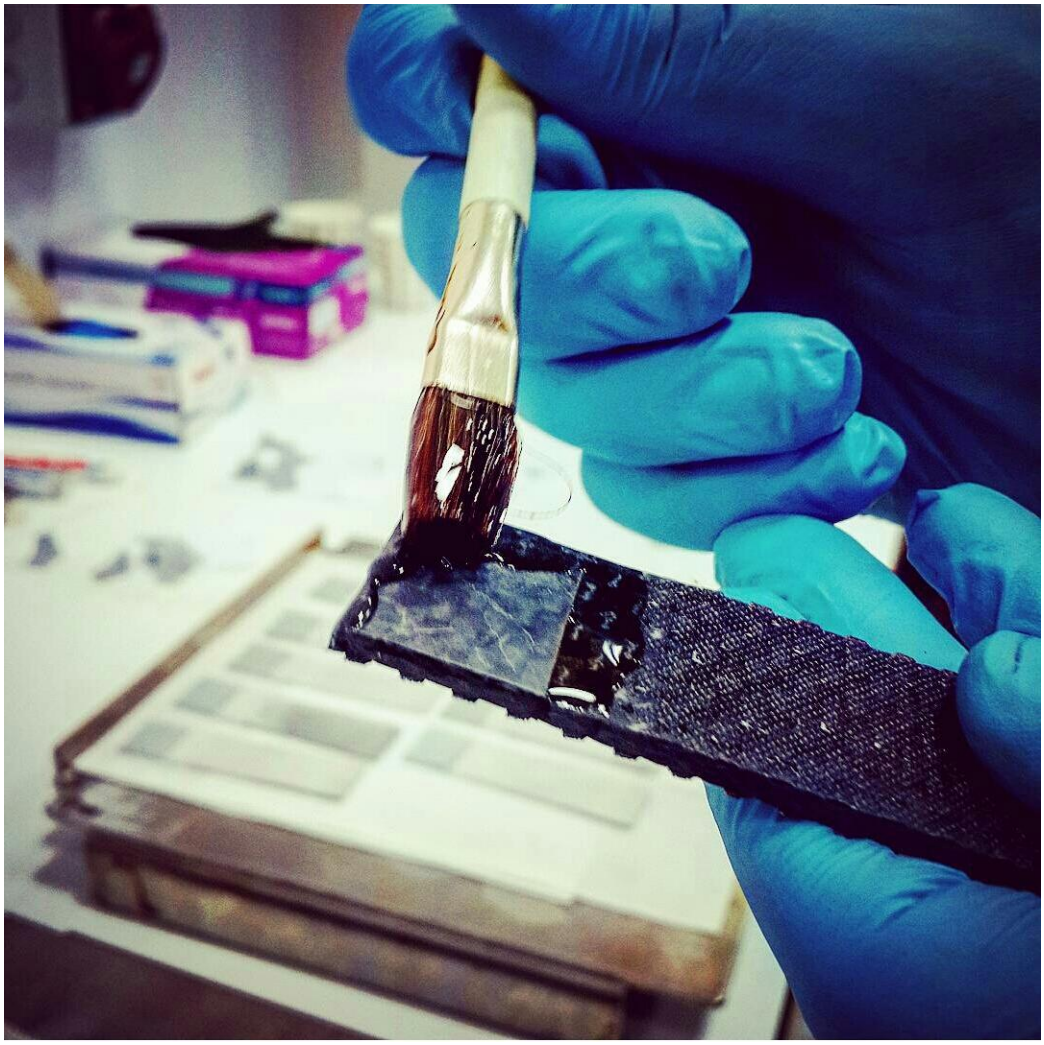
tarafa konulabilir, fakat bütün numunelerdeki proseslerin aynı olması için numunelerin her birinde aynı tarafa elyaf konulması daha sağlıklı sonuç vereceğinden hep aynı tarafa nano elyaf konulmuştur. Bu çalışmada kompozit malzeme üzerine nano elyaf yatırılma işlemi tercih edilmiştir. Konulan nano elyafın epoksi emdirme işlemi yumuşak uçlu fırça ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.20.). Her iki tarafa da yapıştırıcı sürüldükten sonra epoksi içerisindeki hava kabarcıklarının giderilmesi (degassing) için oda sıcaklığında 10 dk. vakum fırınında -0.75 bar basınç altında bekletilmiştir. Hava kabarcıklarının giderilmesi işlemi bittikten sonra numuneler karşılıklı birleştirilerek yapışma yüzeyleri üzerine 0.1 MPa'lık bir basınç ile 24 saat oda sıcaklığında doğal kürleştirmeye bırakılmıştır. Doğal kürleştirme işleminden sonra 80 °C'de 15 saat boyunca son sertleştirme (post kür) işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.19. 'da 3 nolu fotoğrafta tek taraflı bindirmeli bağlantının yapıştırılmış hali görülmektedir.



Şekil 3.19. Tek taraflı bindirmeli bağlatıların yapıştırılmasında yapıştırıcının sürülmesi

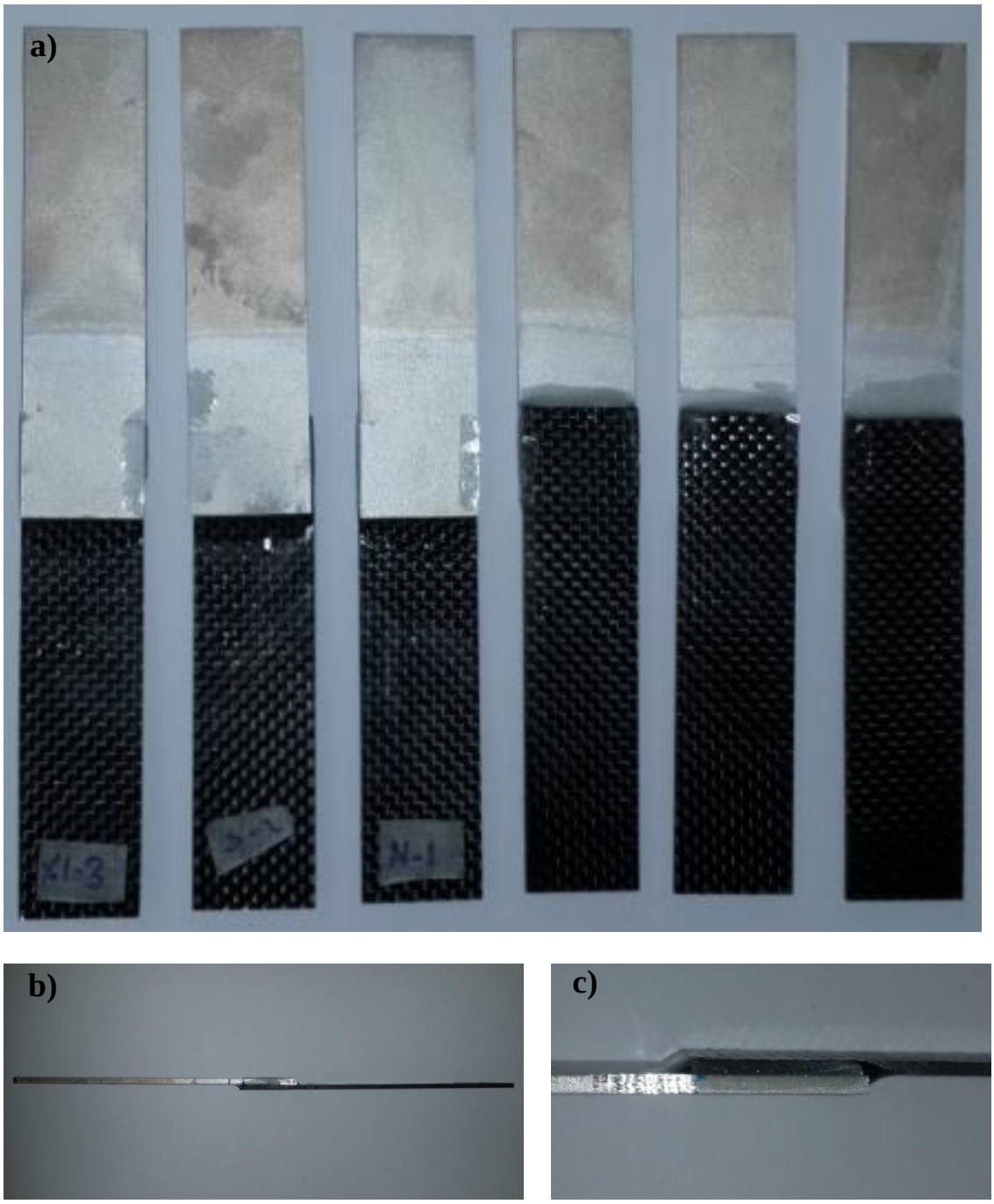
Yapıştırma işlemi gerçekleştirilirken dikkat edilecek bir husus da, epoksi reçine kürleştirici ile karıştırıldıktan sonra kimyasal etkileşime girerek kürleşmeye başladığından dolayı, bütün numunelerin bir anda yapılmaya çalışılırsa yapıştırıcı giderek jelleşecek ve bağlanma özelliğini kaybetmeye başlayacaktır. Bu sebeple yapıştırıcı firmasının belirlediği süre koşulları göz önünde bulundurularak numuneler belirli

sayılarda gruplara bölünerek gruplar halinde yapıştırılmıştır ki bu sayede jelleşme gerçekleşmeden yapıştırmanın yapılması ve sağlıklı bağlantıların üretilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.20. Kompozit üzerine yatırılan elyafın epoksi emdirme işlemi

Şekil 3.21. ‘de bir tarafı alümiyum bir tarafı kompozit olan içerisinde saf epoksi, saf N6.6 nano elyaf katkılı, ağırlıkça % 1, % 3 ve % 5 GNP katkılı N6.6 nano elyaf katkılı tek taraflı bindirmeli bağlantıların yapıştırıldıktan sonraki çekme deneyine hazır görüntüleri gösterilmektedir.



Şekil 3.21. Tek taraflı bindirmeli bağlantı numuneleri

3.5. Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantıların Çekme Deneyinin Belirlenmesi

Bu çalışmada, çekme deneyinde her bir parametre için en az beş tekerrür yapılmıştır. Çekme deneyi, ilgili standarda bağlı kalınarak 1 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir.

Çekme test cihazının aldığı veriler deney esnasında uygulanan kuvvet P ve yer değiştirme δ değerleridir ve bu değerleri belirli aralıklarda anlık olarak kayıt etmektedir.

Numunerlerin kayma gerilmesi ve kayma modülü ise 2.9 ve 2.10 denklemleri ile hesaplanmıştır. Çekme testi esnasında dinamik ekstansometre ile birim şekil değiştirme miktarları ölçülmüştür ve her bir parametrenin birim şekil değiştirme miktarları karşılaştırılmıştır.

Tek taraflı bindirmeli bağlantılarda kayma gerilmesini ve kayma modülünü hesaplayabilmek için ASTM D1002-10 standardına uyularak çekme testi numuneleri hazırlanmıştır. Standart normalde alüminyum/ alüminyum bağlantıları kapsadığı için bu çalışmada ise alüminyum/ kompozit levhaların yapıştırılma işlemi gerçekleştirildiği için standarttaki bazı hususlar modifiye edilmiştir.

Alüminyum/ kompozit tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma gerilmesi ve kayma mödülü bulunurken ASTM D1002- 10 standardına uygun olarak çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyleri Instron Universal Test Makinesi 8801 çekme cihazında gerçekleştirilmiştir ve numunelerin uzamaları Instron 2630- 602 dinamik ekstansometre ile ölçülmüştür.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Yapılan deneysel çalışma birkaç safhadan oluşmaktadır. Bunlardan ilki N6.6 nano elyaf üretimidir. Saf N6.6 nano elyafın üretimine ek olarak solusyona N6.6'nın ağırlıkça % 1, % 3 ve % 5 oranlarında grafen nano partikül (GNP) eklenerek grafen katkılı N6.6 nano elyaflarda üretilmiştir. Elektro-eğirme cihazında toplayıcı plaka olarak döner tambur kullanılmıştır. Üretilen nano elyaflardan saf N6.6 ile ağırlıkça % 5 GNP katkılı N6.6 nano elyafların fiber kalınlıkları Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)'de incelenmiştir. Ayrıca N6.6 ile GNP katkılı nano elyaflarda meydana gelen kimyasal değişimler ve etkileşimler Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) analizleri ile incelenmiş ve yorumlanmıştır. Buna ek olarak N6.6 ve GNP katkılı N6.6 nano elyaflar yapıştırıcı içerisinde kullanılacağından, saf epoksi, N6.6 eklenmiş epoksi ve sırasıyla %1, % 3 ve % 5 GNP katkılı N6.6 eklenmiş epoksilerin kimyasal değişimleri ve etkileşimlerini incelemek için DSC analizleri yapılmıştır. Aynı zamanda N6.6 eklenmiş epoksi ve % 5 GNP katkılı epoksi yapıştırıcıların da FT-IR analizleri incelenmiştir.

İkinci aşamada ise, elektro-eğirme ile üretilen nano elyaflarla güçlendirilmiş epoksi yapıştırıcılar ile bir taraf alüminyum diğer taraf karbon elyaf kompozit levha olarak tek taraflı bindirmeli bağlantıların yapıştırma işlemi gerçekleştirilmiş ve eksenel çekme testlerine tabi tutulmuştur. Aynı zamanda -20, 0, 23, 50, 80 °C ortam sıcaklıklarında numunelerin eksenel çekme testleri yapılarak yapıştırmanın farklı sıcaklık etkileri altındaki davranışları da incelenmiştir. Eksenel çekme testleri sonucunda elde edilen kayma mukavemetlerinin sonuçları grafikler halinde verilmiş olup grafiklerde hem N6.6 ve GNP katkısının etkisi incelenmiş hem de yapıştırma bağlantısının farklı sıcaklıklar altındaki mekanik davranışları incelenmiş ve yorumlanmıştır. Çekme testleri sonucunda kırılan yüzeylerin karşılıklı (bir taraf kompozit diğer taraf alüminyum olacak şekilde) olarak SEM görüntülerine bakılarak kırılma yüzey davranışları ile çekme deneyi sonuçları ilişkilendirilmiştir.

4.1. N6.6 Nano Elyaf Özellikleri

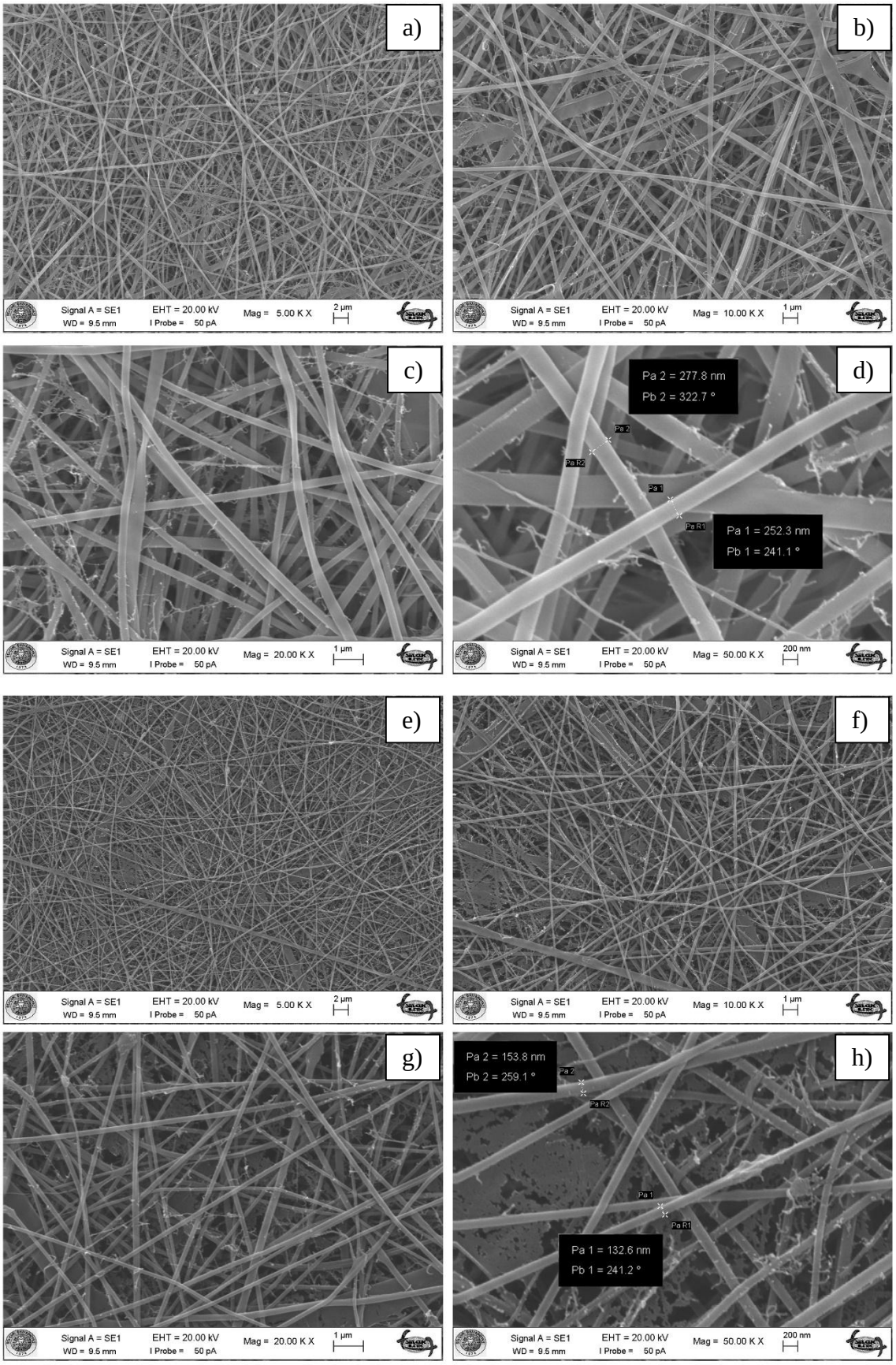
N6.6 ve N6.6+GNP nano elyafların SEM görüntüleri, FT-IR ve DSC spektrumu analizleri incelenmiştir.

4.1.1. N6.6 nano elyafların SEM görüntüleri

Üretilen N6.6 nano elyafların SEM görüntüleri Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (İLTEK) bulunan ZEISS Evo LS 10 cihazı ile 20 kV gerilimde -6 bar vakum altında elde edilmiştir.

Şekil 4.1.'de görüldüğü üzere nano elyafların 5 000 X, 10 000 X, 20 000 X ve 50 000 X büyütmeli SEM görüntüleri verilmektedir. Görüntülerdeki fiberlerin en az on tanesi ölçülerek ortalama çapları verilmiştir. N6.6 nanelyafların çap ölçüleri 252.3- 277.8 nm aralığında ve % 5 GNP+N6.6 nano elyafların çapları ise 132.6- 153.8 olarak ölçülmüştür. Burada görüldüğü üzere grafen oranına bağlı olarak nano elyaf çaplarında yaklaşık % 50 düşüş meydana gelmiştir. Bunun sebebi ise solüsyona katılan GNP'lerin sayesinde solüsyonun elektrik iletkenliği artarak (Baby ve Ramaprabhu, 2010, Kole ve Dey, 2013) bu sayede çözeltinin taşıdığı yükler artmakta ve elektrostatik alanın da etkisi artarak daha küçük çaplı fiberlerin oluşması sağlanmaktadır.

Ayrıca EK-1'de nano elyafların 1 000 X büyütmeli SEM görüntüleri de verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde N6.6 solusyonu içerisine katılan GNP sayesinde fiber çapları küçülerek ince ve kopmamış sürekli elyaflar elde edilmektedir. Ama GNP sayesinde sürekli fiberin oluşması toplayıcı plaka ile lüle arasındaki iletkenliği artırdığından topraklanmanın da artmasına sebep olmuş dolayısıyla boncuklanma oluşmaktadır. Yapılan literatür çalışmalarındaki oluşan boncuklanmaya nazaran GNP katkılı nano elyaflarda boncuklanmanın çok fazla oluşmadığı da gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise GNP'nin verilen voltaj, elektrik iletkenliği ve solüsyonun akışkanlığı arasındaki orantının doğru bir şekilde gerçekleştirilmesidir. Yani polimer çözeltisi çok akışkan olursa, voltaj yüksek ve elektrik iletkenliği de yüksek olursa daha ince fiberler elde ederken akışkanlığın fazla olmasından dolayı boncuklanma gerçekleşecektir. Bunun engellenmesi ise polimer çözeltisinin akışkanlığı, verilen voltaj ile elektrik iletkenliği arasındaki bağıntıyı kurarak parametreleri belirlemek gerekmektedir. Burada GNP oranının artması polimer çözeltisinin iletkenliğini artırmış dolayısıyla daha ince fiberler elde edilmesini sağlamıştır. Bunun yanında boncuklanma olmaması için de polimer çözeltisinin akışkan yoğunluğu optimum seviyede hazırlanmıştır.

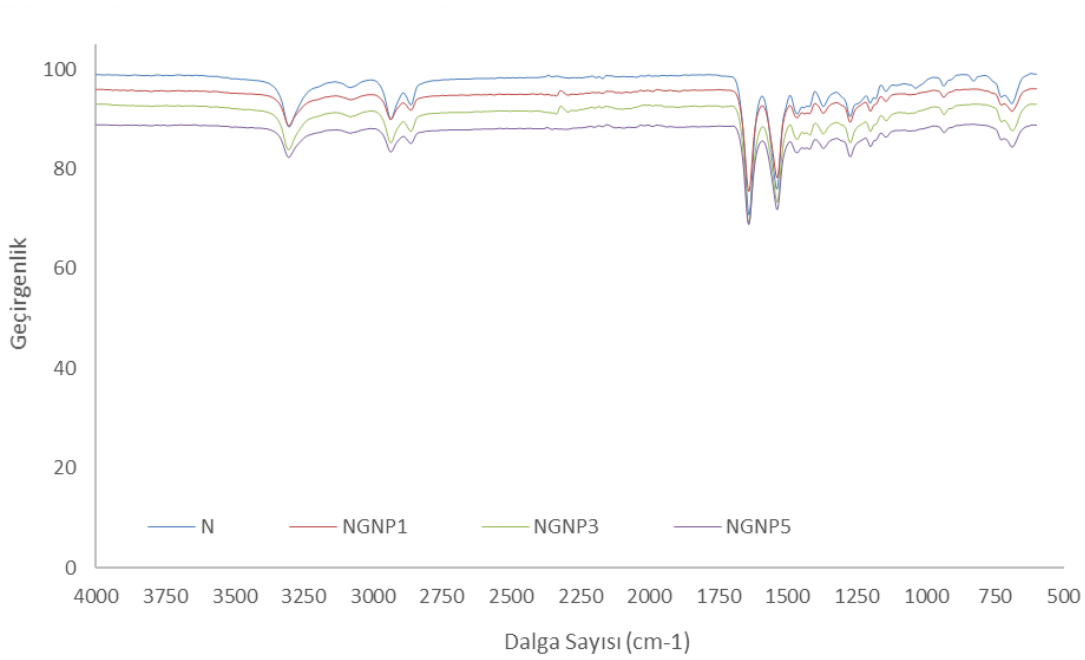


Şekil 4.1. N6.6 nano elyafların SEM görüntüleri; a) 5 KX, b) 10 KX, c) 20 KX, d) 50 KX N6.6 nano elyaf, e) 5 KX, f) 10 KX, g) 20 KX ve h) 50 KX N6.6+ % 5 GNP nano elyaf

4.1.2. Grafen katkılı N6.6 nano elyafların FT-IR analizleri

Diferansiyel tarama kalorimetre (FT-IR) analizi Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (İLTEK)'nde bulunan FT-IR cihazında ypaılmıştır. 20 ml/dakika azot akışı koşullarında 20 °C/dakika ısıtma hızı ile 25 °C'den 500 °C'ye kadar ısıtılarak test edilmiştir.

N6.6 ve ağırlıkça % 3 GNP katkılı N6.6 nano elyafların FT-IR spektrumları şekil 4.2. 'de görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi N6.6 içerisine GNP eklenmiş N6.6'ların kimyasal bağlarında bir bozulma olmamıştır. Yalnızca içerisine eklenen GNP'den dolayı şiddetinde bir değişiklik olmuştur.

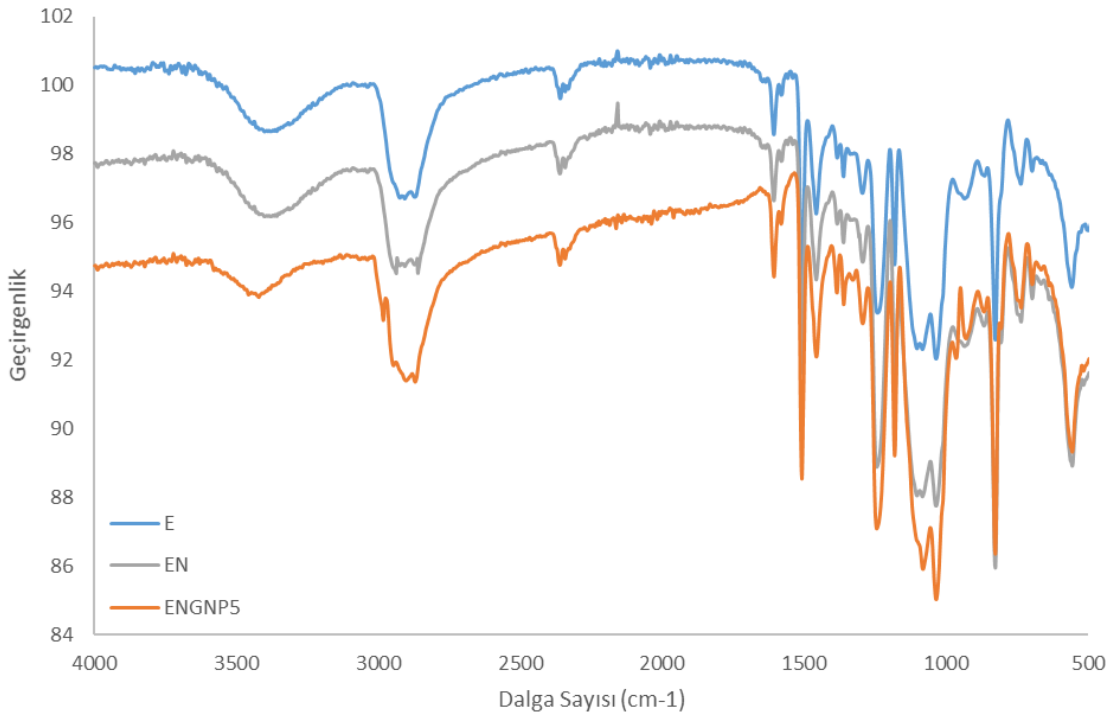


Şekil 4.2. N6.6 ve ağırlıkça % 3 GNP katkılı N6.6 nano elyaf FT-IR spektrumu

N6.6 polimeri, yapısında hidrojen bağı ve van der Waals etkileşimleri gibi moleküller arası güçlerden dolayı yarı kristalin yapıdadır. Polimerin kristal yapısı XRD ve DSC/DTA gibi cihazlarla belirlenebildiği gibi aynı zamanda FTIR cihazıyla da belirlenebilmektedir. Bu tez çalışmasında elektrospin ile üretilen grafen katkılı N6.6 nano elyafların IR pikleri incelendiğinde; 933 cm^{-1} piki kristalin fazdaki (C-C=O) yapısının eksenel amid deformasyonunu göstermektedir. 1041 piki, düz karbonil gruplarının açılı deformasyonunu gösteren kısmi amorf yapıdaki piktir. 1101 cm^{-1} piki, amid-III grubunun kristalin yapıdaki pikidir. (C-N) yapısının eksenel deformasyonu ise 1375 cm^{-}

^{1} pikinde görülmektedir. (C-N) yapısının eksenel deformasyonu ve (CO-N-H) yapısının açı sal deformasyonuna ait amid-II piki 1540 $cm^{-1'}$da görülmüştür. 1642 $cm^{-1'}$de görülen pik ise amid-I (C=O) grubuna aittir. 2865 $cm^{-1'}$da görülen pik ise (CH2 β-NH) ve (γ-NH) yapısının eksenel deformasyonunu göstermektedir. (CH2 α-NH) yapısının piki ise 2936 $cm^{-1'}$de görülmektedir. 3082 $cm^{-1'}$de görülen pik ise (N-H) yapısının açı sal deformasyonunu göstermektedir (Guerrini ve ark., 2009). Elde ettiğimiz bu sonuca göre N6.6 nano lif içerisine eklenen grafenin liflerle kimyasal bir etkileşime girmediğini fakat pik şiddetini değiştirdiğini anlamaktayız. Aynı zamanda N6.6 nano lifinin içerisinde α, β ve γ fazlarının olduğunu doğrulamaktadır (Li ve ark., 2006).

Şekil 4.3. 'de görüldüğü gibi N6.6 ve ağırlıkça % 1, % 3 ve % 5 oranlarında GNP katkılı N6.6 nano elyaf yatırılmış epoksi yapıştırıcıların FT-IR spektrumları verilmiştir. GNP katkısından dolayı geçirgenlik şiddetinde değişiklik olsa da GNP katkısı ve N6.katkısı epoksi yapıştırıcıların kimyasal bağlarında bir bozulmaya sebep olmadığı görülmektedir.



Şekil 4.3. N6.6 ve ağırlıkça % 1, % 3 ve % 5 oranında GNP katkılı N6.6 nano elyaf yatırılmış epoksilerin FT-IR sprektrumu

832 cm^{-1}'de görülen pik, epoksi reçine içerisindeki oksiran gruplarının (C-O-C) gerilmesinden kaynaklıdır. 1040 cm^{-1}'da görülen pik de eter grubunun (C-O-C)

gerilmesini göstermektedir. 2925 cm^{-1}'de görülen pik ise CH2'nin aromatik ve alifatik (C-H) gerilmelerini göstermektedir. Aynı zamanda 1378 ve 1455 cm^{-1}'deki pikler de (C-H) grubunun asimetrik deformasyonunu göstermektedir. Piklerin şiddetindeki artış ve azalışın dışında takviye eleman olarak eklenen N6.6 ve grafen katkılı N6.6'nın epoksi reçine ile kimyasal olarak etkileşime girmediğini anlamaktayız.

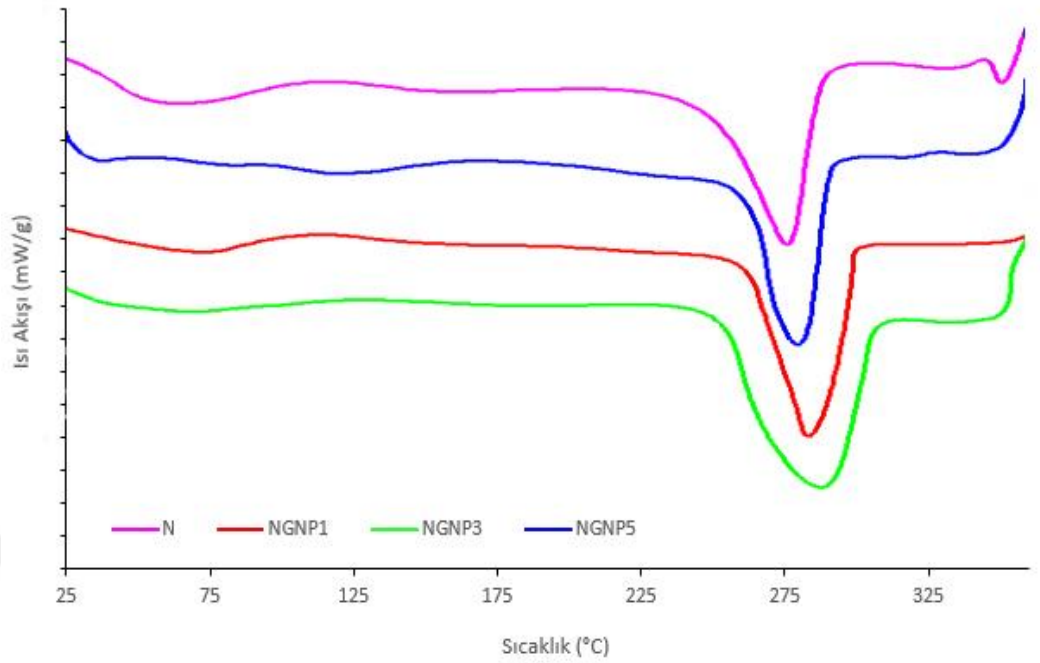
4.1.3. Grafen katkılı N6.6 nano elyafların DSC analizleri

DSC analizi ile malzemeler belirli hızlarda ısıtılarak verilen bu ısıya karşı gösterdikleri termal davranışları incelenmektedir. Bu termal davranışların başında ısı kapasitesi, kristalizasyon, erime ve camsı geçiş sıcaklığı gelmektedir. Yapılan bu çalışmada elektro-eğirme yöntemi ile N6.6 nano elyaf ve içerisine ağırlıkça % 1, % 3 ve % 5 oranlarında grafen eklenmiş nano elyaflar elde edilmiştir. Çizelge 4.1. 'de görüldüğü üzere üretilen nano elyafların DSC değerleri tablo halinde verilmiştir.

Çizelge 4.1. Saf ve grafen katkılı nano elyafların termal özellikleri

Malzemeler	Tg (°C)	ΔCp (J/g °C)	Termal Kararlılık (°C)	Bozunma Sıcaklığı (°C)	Entalpi (ΔH), (J/g)	Kristalin Yüzdesi (χc)
N6.6	72,45	0.09	255.25	274,9	79.2	52.99
NGNP1	77,37	0.920	265.7	276,1	87.2	57.48
NGNP3	80,05	0.975	270.42	278,2	99	46.42
NGNP5	75,42	0.900	260.42	275,3	79.5	46.16

Grafenler geniş yüzey alanına sahip olması ve polimer içerisindeki kristalin yapıların arasına girmesinden dolayı fiziksel bir bariyer olarak davranmıştır ve bu da saf polimerdeki kristal fazın erime sıcaklığını arttırmıştır ve grafen oranı arttıkça kristalin yüzdesi düşmüştür. Bu sonuç önceki yapılan çalışmalarla da tutarlıdır (Baji ve ark., 2010, Cheng ve ark., 2011). Fakat % 3 ve % 5 grafen ilavesiyle nanoparçacıklar fiberlerin yüzeylerine daha fazla oranda tutunmaya başlamış ve bu da polimer içerisinde bulunan kristal fazın bozulmasına sebep olmuştur. Kristal fazın bozulmaya başlaması ile daha düşük sıcaklıklarda erimeler gözlenmiştir. SEM sonuçlarına göre eklenen grafen miktarı arttıkça nanoparçacıkların birbirini çekmesinden dolayı fiberlerin arasında topaklanmalar görülmektedir ve bu da aynı zamanda erime entalpisinde azalmaya sebep olmuştur. Elde edilen bu sonuçlar çizelge 4.1. 'de ve şekil 4.5. 'de verilmiştir.



Şekil 4.5. Saf ve grafen katkılı nanofiberlerin DSC eğrileri

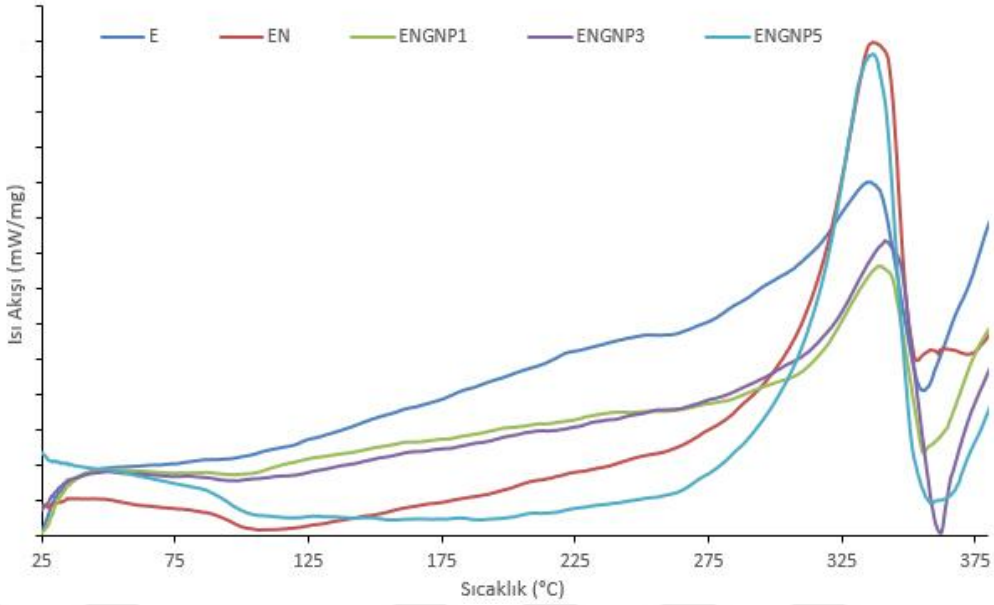
Saf ve grafen katkılı nano elyafların epoksi içerisine ilave edilmesiyle elde edilen yapıştırıcıların termal davranışlarını incelemek açısından DSC analizleri nanofiberlerde olduğu gibi aynı yöntem ve cihazla gerçekleştirilmiştir. Ana maddesi bisfenol-A ve alifatik aminlerden oluşan iki fazlı saf epoksi reçine ve katkı maddeleriyle güçlendirilmiş yapıştırıcı reçineler 25-500 °C arasında 20 °C/dk. hız ile ısıtılmıştır. Elde edilen sonuçlar şekil 4.6. 'da verilmiştir. Epoksi içerisine katılan N6.6 ve GNP oranlarına bağlı olarak değişen DSC değerleri çizelge 4.2. 'de verilmiştir.

Epoksinin termoset olması ve içerisine katılan N6.6'nın ise termoplastik olmasından dolayı DSC eğrilerine bakıldığında termal özelliklerinde değişiklikler meydana gelmektedir. Bunlardan en önemli olanı ise Tg sıcaklığıdır. Çünkü Tg sıcaklığı farklı sıcaklıklar altında mekanik özelliklerini etkileyen malzemenin bir fiziksel özelliğidir. Bu sebeple N6.6 katkısı ile epoksinin Tg sıcaklığı artarak daha yüksek sıcaklıklara kadar mekanik özelliğini koruyabilmesi için önemli bir etken olmuştur.

Çizelge 4.2. Saf ve grafen katkılı nano elyafların termal özellikleri

Malzemeler	Tg (°C)	ΔCp (J/g °C)	Termal Kararlılık (°C)	Bozunma Sıcaklığı (°C)
E	75.22	0.295	255.25	338.37
EN	76.34	0.29	262.12	341.68
ENGNP1	80.02	1.112	270.42	342.54
ENGNP3	83.52	1.726	275.22	344.2
ENGNP5	79.77	0.972	268.3	342.12

Bu sonuçlara göre saf epoksi reçinenin erime sıcaklığı (T_m) 338.37 °C'de gerçekleşmiştir. İçerisine eklenen saf N6.6 nanofiberin ilavesiyle reçinenin erime sıcaklığı 341.68 °C olup aynı zamanda erime entalpisi de buna bağlı olarak artış göstermiştir. Eklenen nanofiberler yapısında bulunan kristal fazdan dolayı erime entalpisini arttırmıştır. Yapıştırıcı olarak kullanılan reçinenin dayanımını arttırmak amacıyla fiberlere % 1, % 3 ve % 5 oranlarında grafen takviyesi de yapılmıştır. Bu ilave ile erime sıcaklıkları % 1'de 342.54 °C, % 3'de 344.2 ve % 5'te 342.12 bulunmuştur. Elde edilen bu sonuçlara göre eklenen fiberler epoksi reçinenin termal ısı kapasitesini erime sıcaklığını arttırdığını, bu artışın fiberlerin içerisine grafen eklenmesiyle daha da fazlalaştığını görmekteyiz. Ancak GNP'nin belirli bir bölgede toplanması (aglomera) olayı gerçekleşebileceğinden dolayı GNP'lerin toplandığı bölgede ısı yoğunlaşarak 2. bir ısı kaynağı gibi davranarak malzemeyi olumsuz etkileyebiliyor. Bu da % 5 GNP katkılı numunedeki düşüşü açıklamaktadır. DSC sonucunda karşılaştığımız bu artışın ise polimer zincirleri arasına hapsolmuş fakat kimyasal bağ yapmamış bu takviye malzemelerin polimerin zincir düzenlenmesinde değişikliklere sebep olduğunu düşünülmektedir. Hem zincir yapısındaki değişikliklerden dolayı hem de zincirler arasına hapsolmuş fakat herhangi bir kimyasal bağ yapmamış olan grafen ve N6.6 polimeri gibi malzemelerin erime sıcaklıklarındaki farktan dolayı bu değişiklerin gözlenmiş olabileceğini söylemek mümkündür.

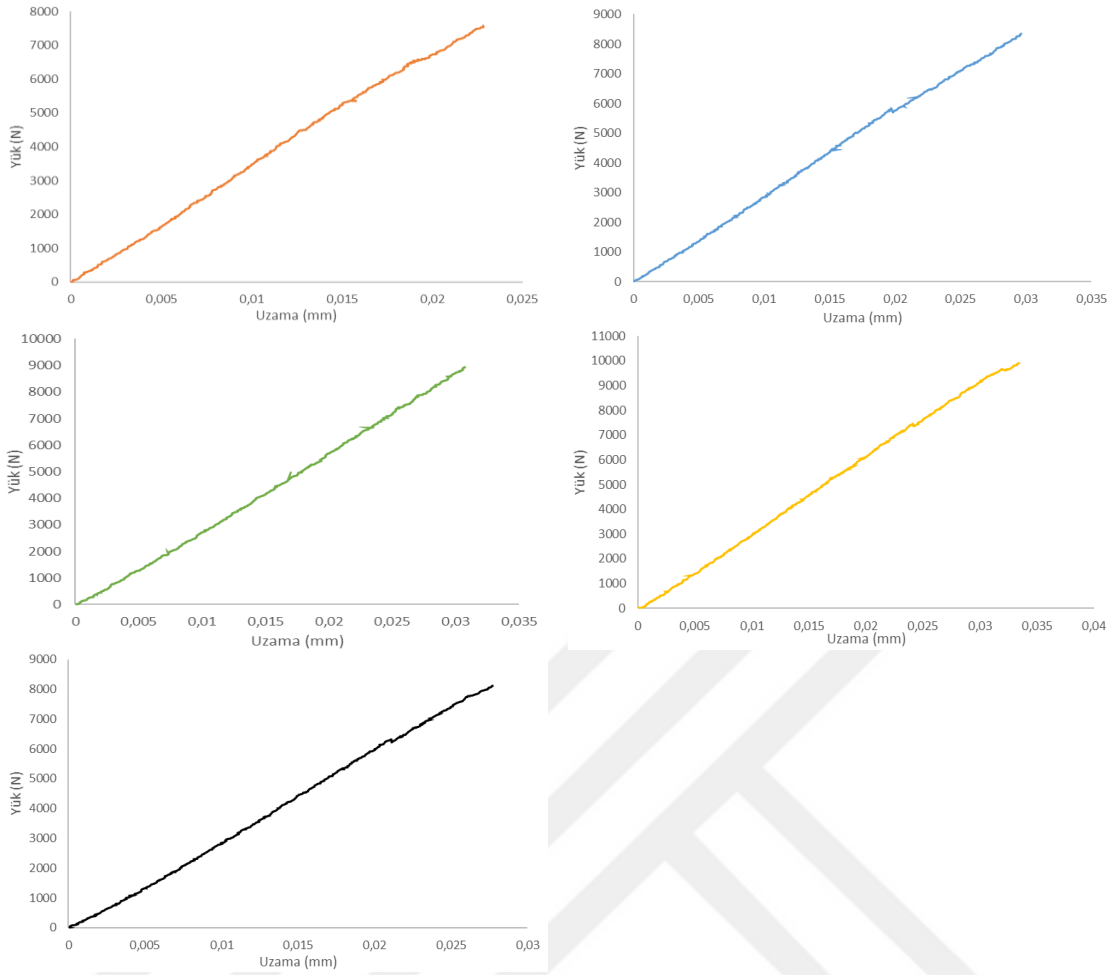


Şekil 4.6. Saf epoksi, N6.6 nano elyaf ve GNP katkılı N6.6 nano elyafların katıldığı epoksi yapıştırıcıların DSC eğrileri

4.2. Tek Taraflı Bindirmeli Bağlantıların Mekanik Özellikleri

4.2.1. 23 °C (oda sıcaklığı)'de kayma dayanımı

Tek taraflı bindirmeli bağlantıların çekme testleri sonucunda elde edilen yük-uzama grafikleri Şekil 4.7. 'de verilmiştir. Yük-uzama grafiğinde görüldüğü üzere saf epoksi yapıştırıcı, N6.6 nano elyaf, N6.6 + % 1 GNP nano elyaf/epoksi, N6.6 + % 3 GNP nano elyaf/epoksi ve N6.6 + % 5 GNP nano elyaf/epoksi yapıştırıcılarla birlikte kullanılarak yapılan yapıştırma bağlantılarının karakteristik yükleme davranışları farklılık göstermektedir. Katkısız saf epoksi yapıştırıcının maksimum yük taşıma kapasitesi 7567 N'dur. Epoksi yapıştırıcıyla birlikte N6.6 nano elyaf, N6.6 + % 1 GNP, N6.6 + % 3 GNP ve N6.6 + % 5 GNP nano elyaf takviyesiyle yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 8358, 8961, 9924 ve 8120 N'a çıkarak % 10.45, % 18.42, % 31.15 ve % 7.30 artış sağlanmıştır. Yapıştırma bağlantılarındaki maksimum taşıma yük kapasitesinin en iyi olduğu sonuç % 31.15'lik artış ile N6.6 + % 3 GNP nano elyafla birlikte yapıştırılan yapıştırma bağlantılarında elde edilmiştir.

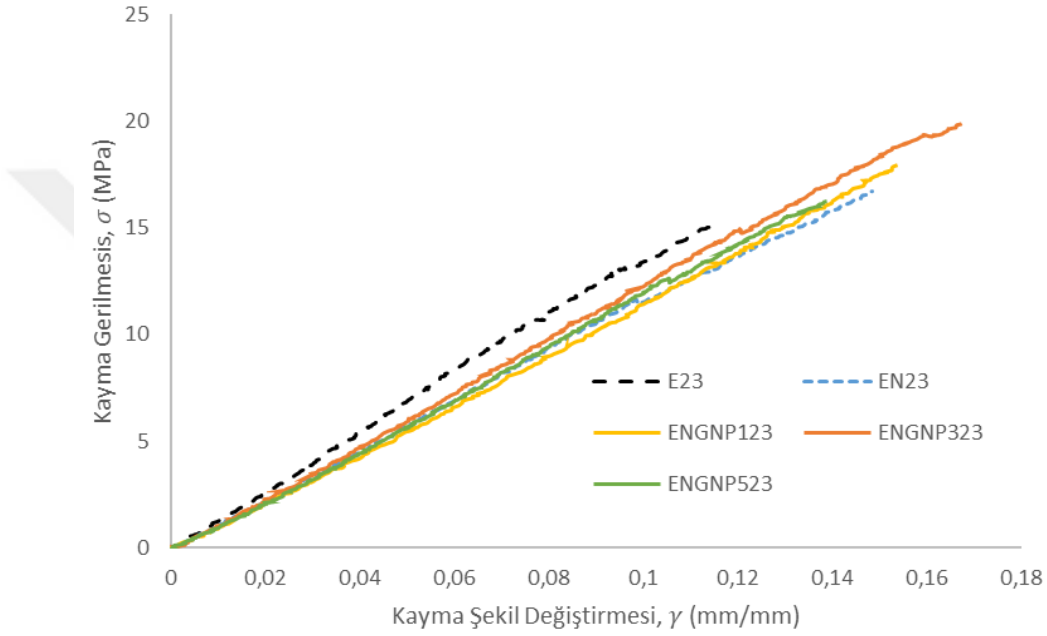


Şekil 4.7. Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların 23 °C'deki kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirme grafiği; a) E23: Epoksi reçine, b) EN23: N6.6/Epoksi, c) ENGNP123: N6.6+% 1 GNP nano elyaf/Epoksi, d) ENGNP323: N6.6+% 3 GNP nano elyaf/Epoksi ve e) ENGNP523: N6.6+% 5 GNP nano elyaf/Epoksi

Bölüm 2.1.6.1. ve 2.1.6.2. 'de bahsedilen basit lineer analiz metoduna göre çekme cihazından elde edilen uzama miktarlarında alüminyum ve kompozit malzemelerinin de uzamaları olduğu için, sadece yapıştırma bölgesinin uzamasını hesaplamak gerekmektedir. Bu sebeple uzama miktarları yapıştırma bölgesine bağlanan ekstansometre ile ölçülerek grafikler oluşturulmuştur. Bunun yanında denklem 2.9 kullanılarak kayma gerilmesi (τ) hesaplanmış, denklem 2.10 kullanılarak kayma şekil değiştirmesi (γ) hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerlerle şekil 4.8. 'deki grafik oluşturulmuştur.

Saf epoksi, N6.6 nano elyaf/epoksi, N6.6+% 1 GNP nano elyaf/epoksi, N6.6+% 3 GNP nano elyaf/epoksi, N6.6+% 5 GNP nano elyaf/epoksi yapıştırıcıların kayma dayanımı (τ) ve kayma şekil değiştirmesi (γ) grafikleri Şekil 4.8'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi saf epoksi yapıştırıcının kayma dayanımı 15.13 MPa'dır. N6.6 nano

elyaf/epoksi yapıştırıcının kayma dayanımı ise 16.72 MPa olarak % 10.51 kadar artış gözlenmiştir. Kayma gerilmesindeki en büyük artış 19.85 ile ve % 31.20'lik artış ile N6.6 + % 3 GNP nano elyaf/epoksi yapıştırıcıda meydana gelmiştir. N6.6'nın ağırlıkça % 3 oranında GNP katılması ile elde edilen nano elyafların yapıştırıcı bağlantılarına takviye edilmesi ile yapıştırıcının kayma dayanımında 19.85 MPa ile maksimum değere ulaşmıştır. Kayma dayanımının ve şekil değiştirme miktarının değişmesine neden olan mekanizmalar daha sonra kırılma yüzeylerinin SEM analizleri ile birlikte açıklanacaktır.

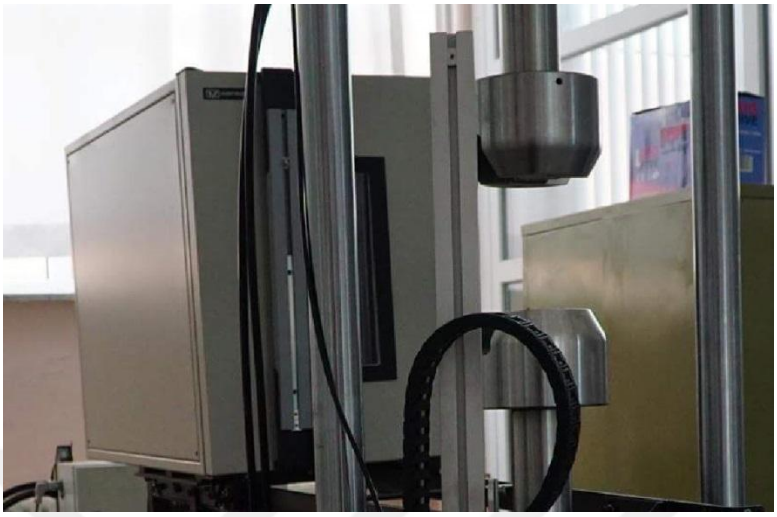


Şekil 4.8. Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların 23 °C'deki kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirme grafiği; a) E23: Epoksi reçine, b) EN23: N6.6 nano elyaf/Epoksi, c) ENGNP123: N6.6+% 1 GNP nano elyaf/Epoksi, d) ENGNP323: N6.6+% 3 GNP nano elyaf/Epoksi ve e) ENGNP523: N6.6+% 5 GNP nano elyaf/Epoksi

4.2.2. 50 °C sıcaklığında kayma dayanımı

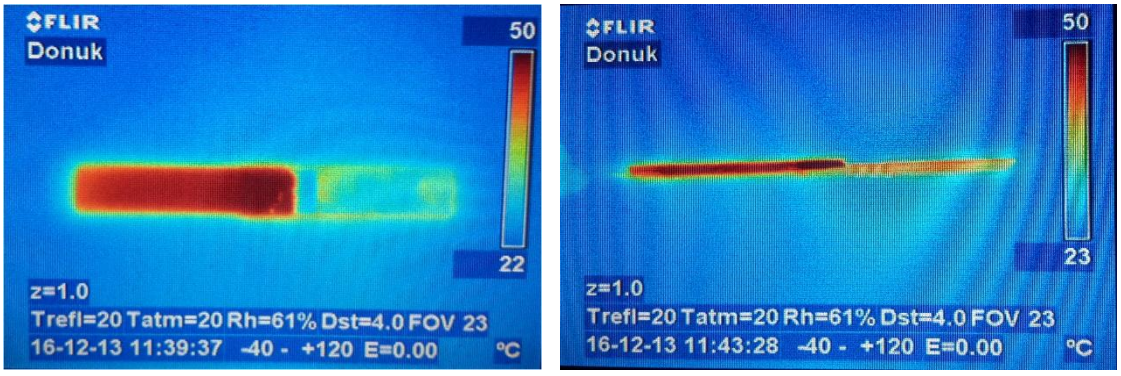
Tek taraflı bindirmeli bağlantıların oda sıcaklığındaki kayma dayanımları bir önceki bölümde gösterilmişti. Bu bölümde ise 50 °C ortam sıcaklığında tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma dayanımlarındaki değişim gözlenmiştir. Testlerin Instron Universal Test Cihazında yapılmasının yanında ortam sıcaklığı kontrolü yine Instron cihazında set halinde bulunan test haznesi ve test haznesi ısıtma kontrol fanları sayesinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.9.). Burada ortam sıcaklığı 50 °C'ye ayarlandıktan sonra tek taraflı bindirmeli bağlantılar ortamda belirli bir süre bekletilerek yapıştırma bağlantısının

da sıcaklığının 50 °C sıcaklığa ulaşması sağlanmıştır. Şekil 4.8. ’de 50 °C sıcaklığa ulaşmış yapıştırma bağlantısının termal kamera görüntüsü görülmektedir.



Şekil 4.9. Isıtma/soğutma haznesi

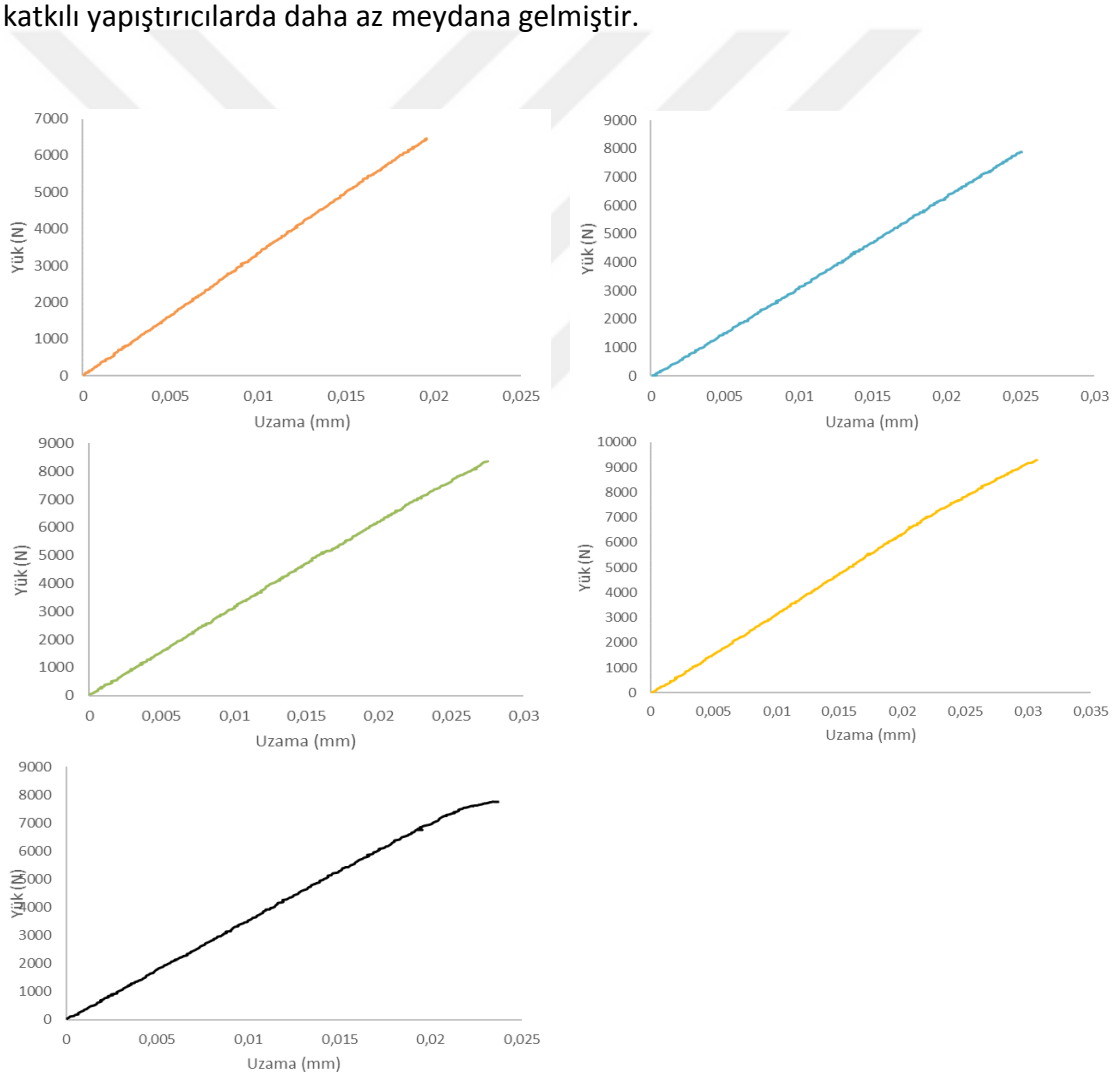
Şekil 4.10. ‘de görüldüğü üzere tek taraflı bindirmeli bağlantıların 50 °C’deki sıcaklığı gösterilmektedir. Kırmızı olarak görünen kısım kompozit tarafı olmaktadır, fotoğrafa bakıldığında sadece bir taraf 50 °C olarak görülüyor gibi olsa da bunun sebebi alüminyumun ısı transfer hızının fazla olmasından dolayı fotoğraf çekmek için numuneler ısıtma odasından çıkarıldığı için alüminyum yüzeyinde çok hızlı bir şekilde ısı transferi gerçekleşmeye başladığından mavi olarak görülmektedir.



Şekil 4.10. 50 °C sıcaklığındaki yapıştırma bağlantısının termal kamera görüntüsü

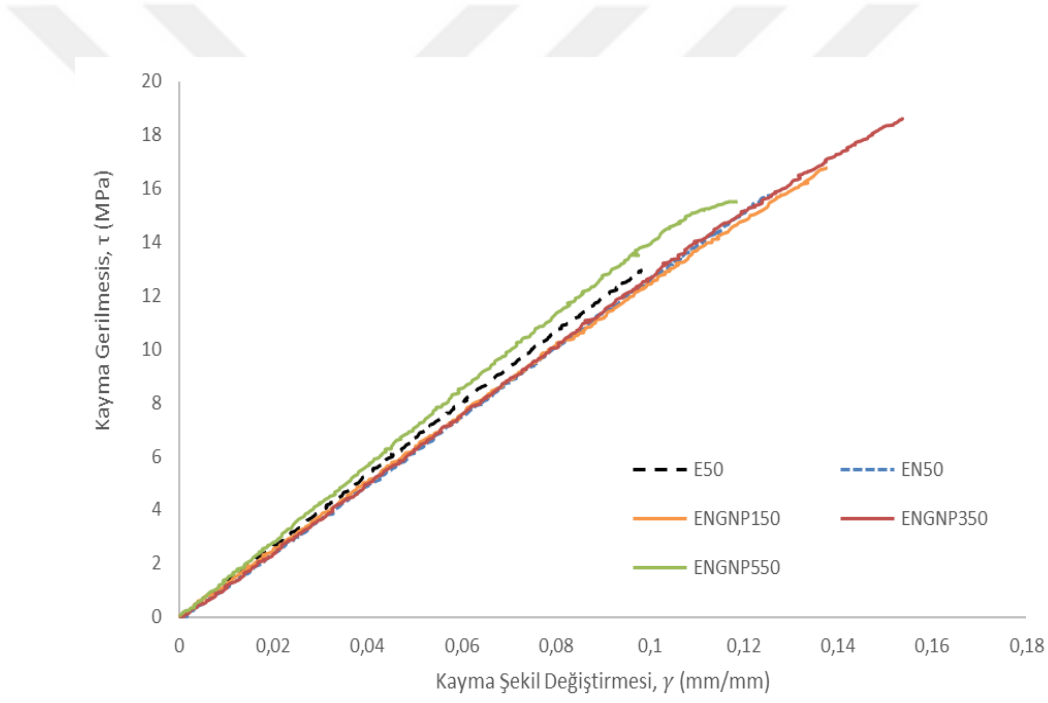
Tek taraflı bindirmeli bağlantıların 50 °C’deki çekme testleri sonucunda elde edilen yük-uzama grafikleri Şekil 4.11. ‘de verilmiştir. Yük-uzama grafiğinde görüldüğü üzere saf epoksi yapıştırıcı, N6.6 nano elyaf, N6.6 + % 1 GNP nano elyaf/epoksi, N6.6 + % 3 GNP

nano elyaf/epoksi ve N6.6 + % 5 GNP nano elyaf/epoksi yapıştırıcılarla birlikte kullanılarak yapılan yapıştırma bağlantılarının karakteristik yükleme davranışları farklılık göstermektedir. Katkısız saf epoksi yapıştırıcının maksimum yük taşıma kapasitesi 6473 N'dur. Epoksi yapıştırıcıyla birlikte N6.6 nano elyaf, N6.6 + % 1 GNP, N6.6 + % 3 GNP ve N6.6 + % 5 GNP nano elyaf takviyesiyle yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 7876, 8388, 9337 ve 7759 N'a çıkarak % 21.67, % 29.56, % 44.25 ve % 19.86 artış sağlanmıştır. Yapıştırma bağlantılarındaki maksimum taşıma yük kapasitesinin en iyi olduğu sonuç % 44.25'lik artış ile N6.6 + % 3 GNP nano elyafla birlikte yapıştırılan yapıştırma bağlantılarında elde edilmiştir. N6.6'nın yüksek sıcaklıklara kadar mekanik özelliğini korumasından dolayı 50 °C'de meydana gelen yük düşüşü N6.6 nano elyaf katkılı yapıştırıcılarda daha az meydana gelmiştir.



Şekil 4.11. Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların 50 °C' deki kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirme grafiği; a) E50: Epoksi reçine, b) EN50: N6.6/Epoksi, c) ENGNP150: N6.6+% 1 GNP nano elyaf/Epoksi, d) ENGNP350: N6.6+% 3 GNP nano elyaf/Epoksi ve e) ENGNP550: N6.6+% 5 GNP nano elyaf/Epoksi

Saf epoksi, N6.6 nano elyaf/epoksi, N6.6+% 1 GNP nano elyaf/epoksi, N6.6+% 3 GNP nano elyaf/epoksi, N6.6+% 5 GNP nano elyaf/epoksi yapıştırıcıların kayma dayanımı (τ) ve kayma şekil değiştirmesi (γ) grafikleri Şekil 4.12. 'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 50 °C'de saf epoksi yapıştırıcının kayma dayanımı 12.94 MPa'dır. N6.6 nano elyaf/epoksi yapıştırıcının kayma dayanımı ise 15.75 MPa olarak % 21.72 kadar artış gözlenmiştir. Kayma gerilmesindeki en büyük artış 18.67 MPa İle ve % 44.28'lik artış ile N6.6 + % 3 GNP nano elyaf/epoksi yapıştırıcıda meydana gelmiştir. N6.6'nın ağırlıkça % 3 oranında GNP katılması ile elde edilen nano elyafların yapıştırıcı bağlantılarına takviye edilmesi ile yapıştırıcının kayma dayanımında 18.67 MPa ile maksimum değere ulaşmıştır. Kayma dayanımının ve şekil değiştirme miktarının değişmesine neden olan mekanizmalar daha sonra kırılma yüzeylerinin SEM analizleri ile birlikte açıklanacaktır.

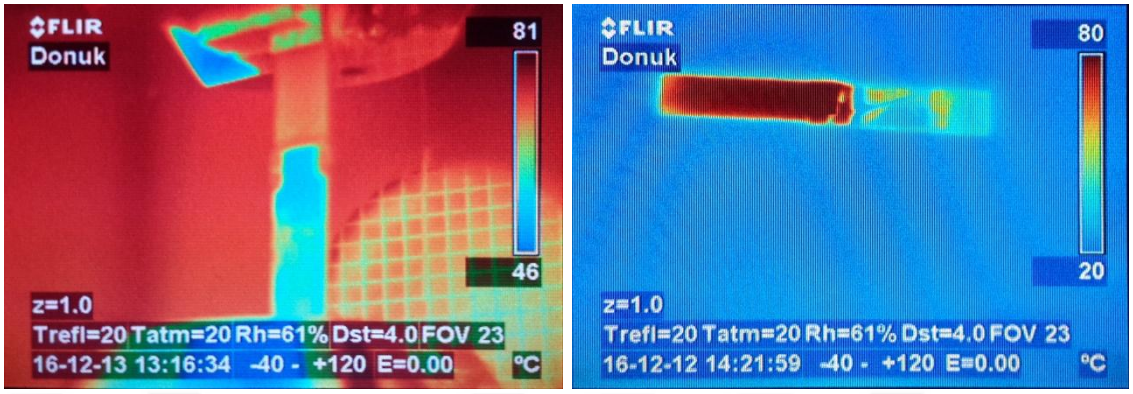


Şekil 4.12. Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların 50 °C'deki kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirme grafiği; a) E50: Epoksi reçine, b) EN50: N6.6 nano elyaf/Epoksi, c) ENGNP150: N6.6+% 1 GNP nano elyaf/Epoksi, d) ENGNP350: N6.6+% 3 GNP nano elyaf/Epoksi ve e) ENGNP550: N6.6+% 5 GNP nano elyaf/Epoksi

4.2.3. 80 °C sıcaklığında kayma dayanımı

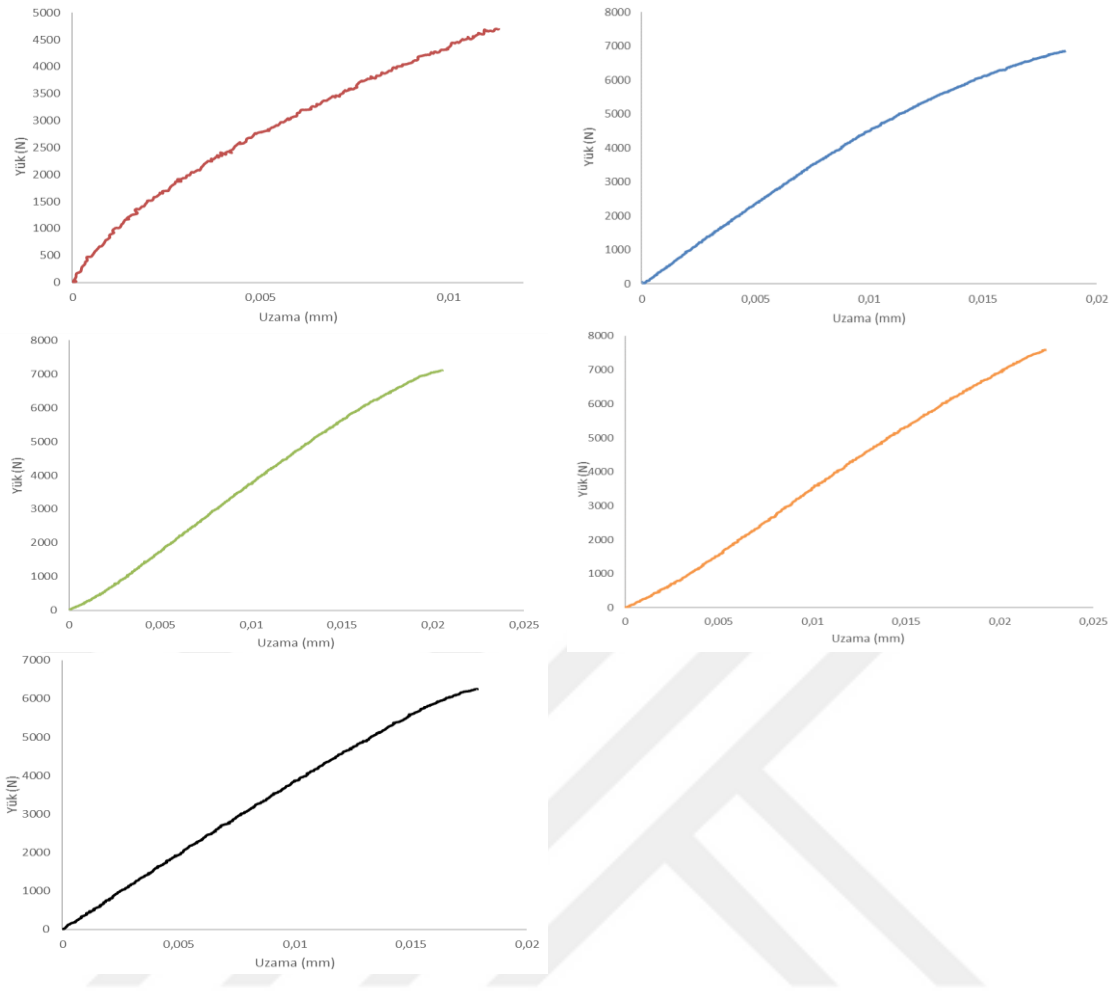
Tek taraflı bindirmeli bağlantıların 50 °C'deki kayma dayanımları bir önceki bölümde gösterilmişti. Bu bölümde ise 80 °C ortam sıcaklığında tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma dayanımlarındaki değişim gözlenmiştir. Burada ortam sıcaklığı 80 °C'ye ayarlandıktan sonra tek taraflı bindirmeli bağlantılar ortamda belirli bir süre

bekletilerek yapıştırma bağlantısının da sıcaklığının 80 °C sıcaklığa ulaşması sağlanmıştır. Şekil 4.13. ’de 80 °C sıcaklığa ulaşmış yapıştırma bağlantısının termal kamera görüntüsü görülmektedir.



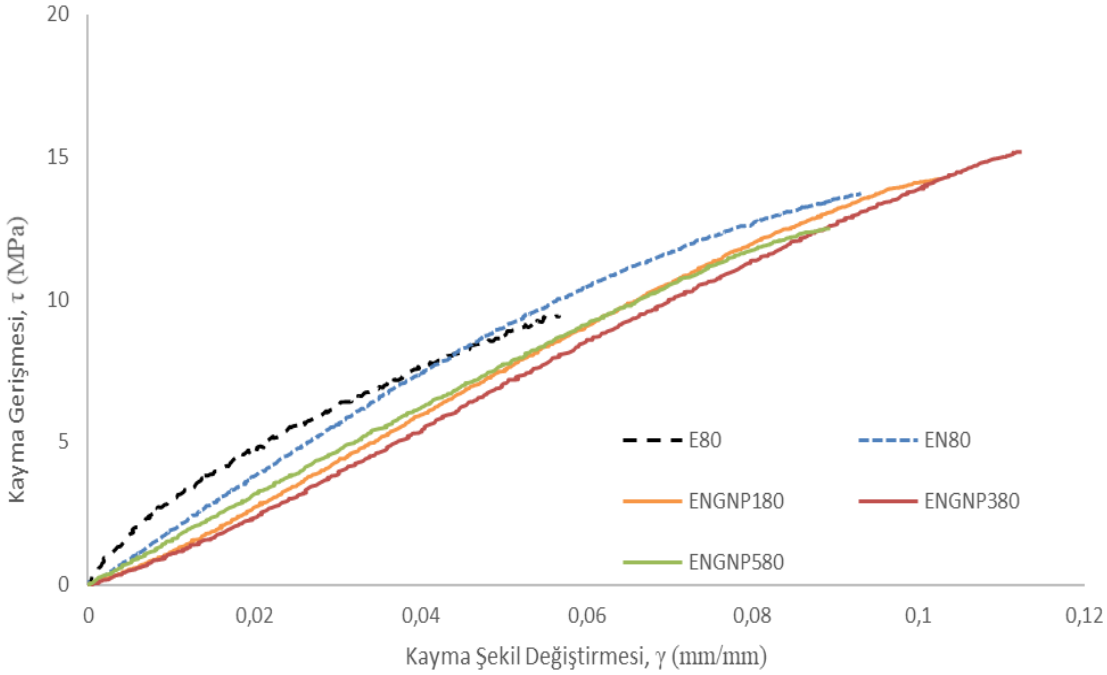
Şekil 4.13. 80 °C sıcaklığındaki yapıştırma bağlantısının termal kamera görüntüsü

Tek taraflı bindirmeli bağlantıların 80 °C’deki çekme testleri sonucunda elde edilen yük-uzama grafikleri Şekil 4.14. ‘de verilmiştir. Yük-uzama grafiğinde görüldüğü üzere saf epoksi yapıştırıcı, N6.6 nano elyaf, N6.6 + % 1 GNP nano elyaf/epoksi, N6.6 + % 3 GNP nano elyaf/epoksi ve N6.6 + % 5 GNP nano elyaf/epoksi yapıştırıcılarla birlikte kullanılarak yapılan yapıştırma bağlantılarının karakteristik yükleme davranışları farklılık göstermektedir. Katkısız saf epoksi yapıştırıcının maksimum yük taşıma kapasitesi 4711 N’dur. Epoksi yapıştırıcıyla birlikte N6.6 nano elyaf, N6.6 + % 1 GNP, N6.6 + % 3 GNP ve N6.6 + % 5 GNP nano elyaf takviyesiyle yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 6860, 7105, 7586 ve 6254 N’a çıkarak % 47.61, % 50.81, % 61.02 ve % 32.75 artış sağlanmıştır. Yapıştırma bağlantılarındaki maksimum taşıma yük kapasitesinin en iyi olduğu sonuç % 61.02’lik artış ile N6.6 + % 3 GNP nano elyafla birlikte yapıştırılan yapıştırma bağlantılarında elde edilmiştir. N6.6’nın yüksek sıcaklıklara kadar mekanik özelliğini korumasından dolayı 50 °C’de meydana gelen yük düşüşü N6.6 nano elyaf katkılı yapıştırıcılarda daha az meydana gelmiştir.



Şekil 4.14. Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların 80 °C'deki kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirme grafiği; a) E80: Epoksi reçine, b) EN80: N6.6/Epoksi, c) ENGNP180: N6.6+% 1 GNP nano elyaf/Epoksi, d) ENGNP380: N6.6+% 3 GNP nano elyaf/Epoksi ve e) ENGNP580: N6.6+% 5 GNP nano elyaf/Epoksi

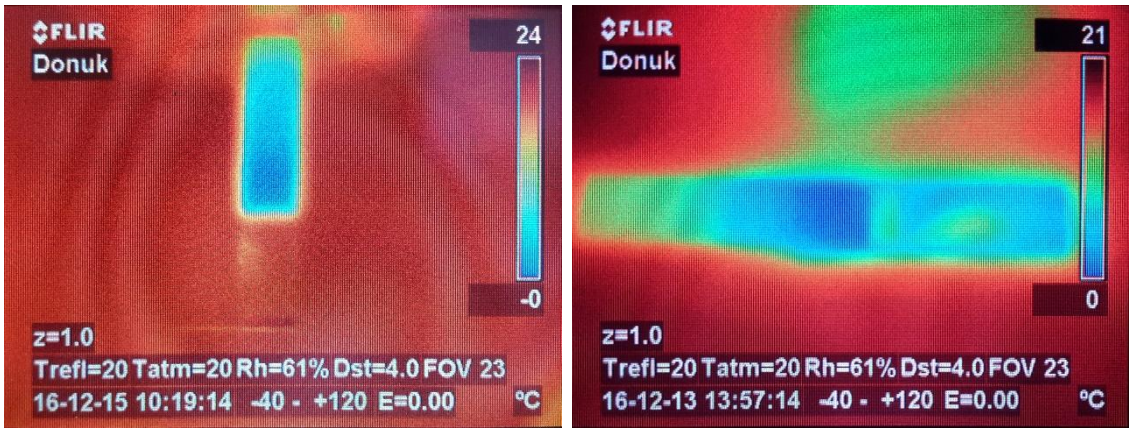
Saf epoksi, N6.6 nano elyaf/epoksi, N6.6+% 1 GNP nano elyaf/epoksi, N6.6+% 3 GNP nano elyaf/epoksi, N6.6+% 5 GNP nano elyaf/epoksi yapıştırıcıların kayma dayanımı (τ) ve kayma şekil değiştirmesi (γ) grafikleri Şekil 4.15. 'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 80 °C'de saf epoksi yapıştırıcının kayma dayanımı 9.42 MPa'dır. N6.6 nano elyaf/epoksi yapıştırıcının kayma dayanımı ise 13.72 MPa olarak % 45.65 kadar artış gözlenmiştir. Kayma gerilmesindeki en büyük artış 15.17 ile ve % 61.04'lık artış ile N6.6 + % 3 GNP nano elyaf/epoksi yapıştırıcıda meydana gelmiştir. N6.6'nın ağırlıkça % 3 oranında GNP katılması ile elde edilen nano elyafların yapıştırıcı bağlantılarına takviye edilmesi ile yapıştırıcının kayma dayanımında 15.17 MPa ile maksimum değere ulaşmıştır. Kayma dayanımının ve şekil değiştirme miktarının değişmesine neden olan mekanizmalar daha sonra kırılma yüzeylerinin SEM analizleri ile birlikte açıklanacaktır.



Şekil 4.15. Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların 80 °C'deki kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirme grafiği; a) E80: Epoksi reçine, b) EN80: N6.6 nano elyaf/Epoksi, c) ENGNP180: N6.6+% 1 GNP nano elyaf/Epoksi, d) ENGNP380: N6.6+% 3 GNP nano elyaf/Epoksi ve e) ENGNP580: N6.6+% 5 GNP nano elyaf/Epoksi

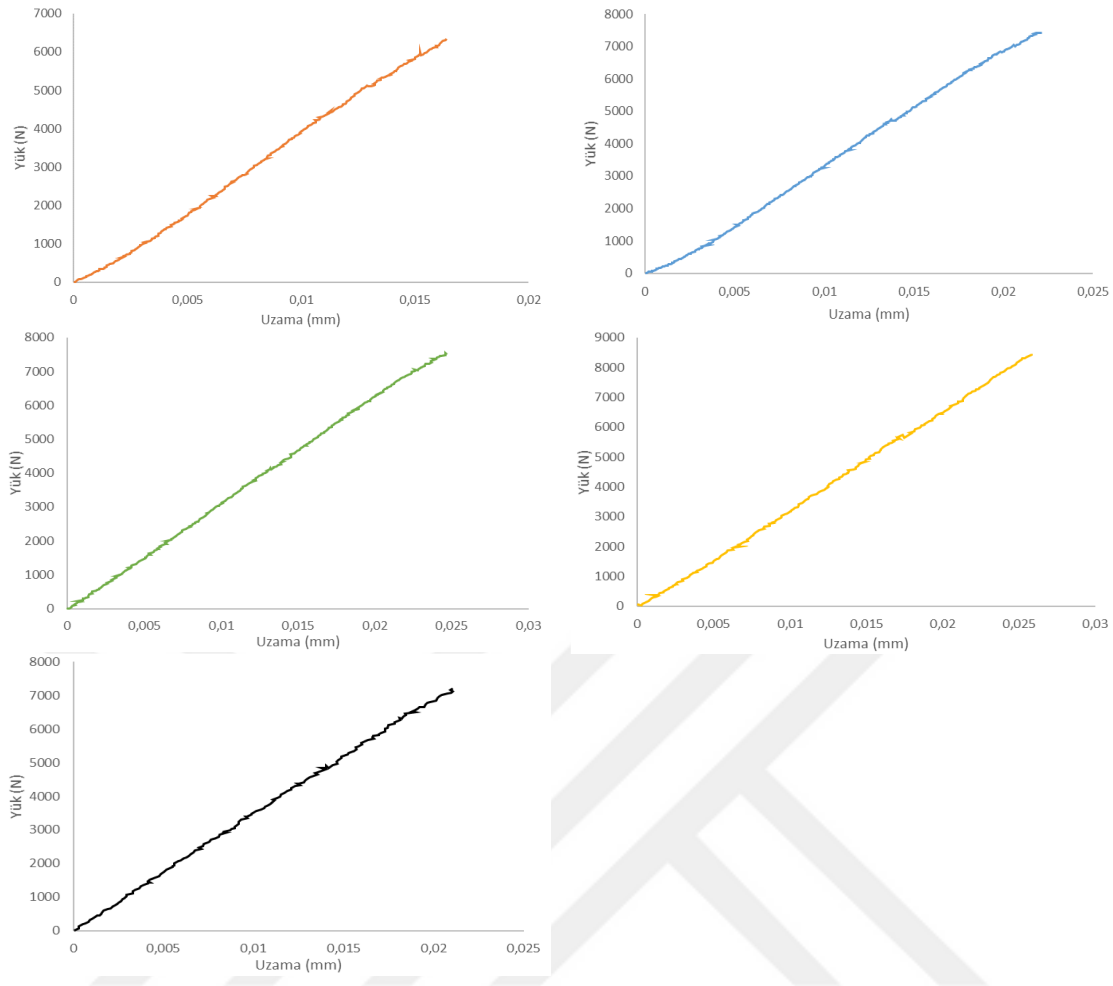
4.2.4. 0 °C sıcaklığında kayma dayanımı

Tek taraflı bindirmeli bağlantıların 0 °C'deki kayma dayanımları bir önceki bölümde gösterilmişti. Bu bölümde ise 0 °C ortam sıcaklığında tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma dayanımlarındaki değişim gözlenmiştir. Burada ortam sıcaklığı 0 °C'ye ayarlandıktan sonra tek taraflı bindirmeli bağlantılar ortamda belirli bir süre bekletilerek yapıştırma bağlantısının da sıcaklığının 0 °C sıcaklığa ulaşması sağlanmıştır. Şekil 4.16. 'da 0 °C sıcaklığa ulaşmış yapıştırma bağlantısının termal kamera görüntüsü görülmektedir.



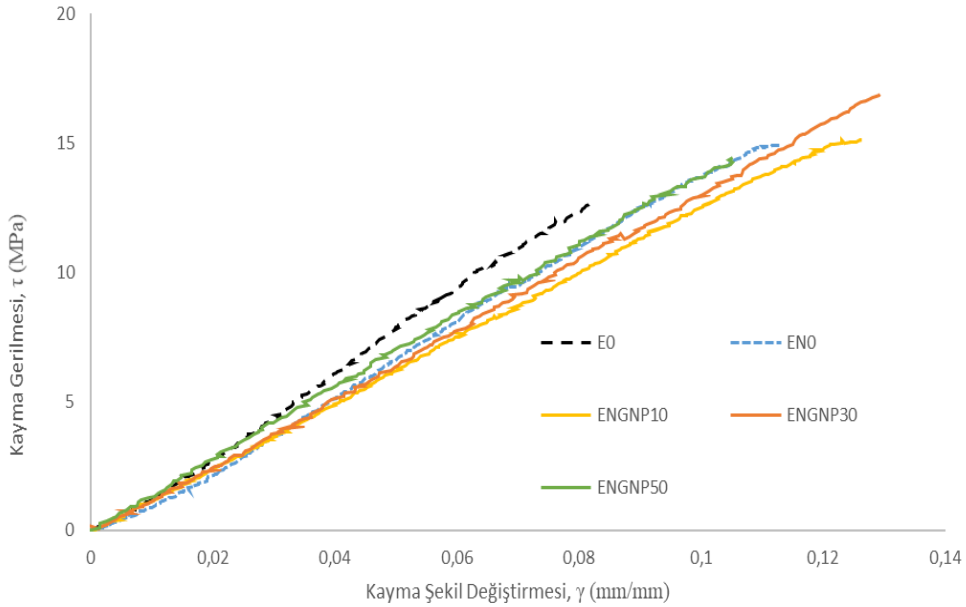
Şekil 4.16. 0 °C sıcaklığındaki yapıştırma bağlantısının termal kamera görüntüsü

Tek taraflı bindirmeli bağlantıların 0 °C'deki çekme testleri sonucunda elde edilen yük-uzama grafikleri Şekil 4.17. 'de verilmiştir. Yük-uzama grafiğinde görüldüğü üzere saf epoksi yapıştırıcı, N6.6 nano elyaf, N6.6 + % 1 GNP nano elyaf/epoksi, N6.6 + % 3 GNP nano elyaf/epoksi ve N6.6 + % 5 GNP nano elyaf/epoksi yapıştırıcılarla birlikte kullanılarak yapılan yapıştırma bağlantılarının karakteristik yükleme davranışları farklılık göstermektedir. Katkısız saf epoksi yapıştırıcının maksimum yük taşıma kapasitesi 6345 N'dur. Epoksi yapıştırıcıyla birlikte N6.6 nano elyaf, N6.6 + % 1 GNP, N6.6 + % 3 GNP ve N6.6 + % 5 GNP nano elyaf takviyesiyle yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 7459, 7546, 8996 ve 7212 N'a çıkarak % 17.56, % 18.35, % 41.78 ve % 13.66 artış sağlanmıştır. Yapıştırma bağlantılarındaki maksimum taşıma yük kapasitesinin en iyi olduğu sonuç % 41.78'luk artış ile N6.6 + % 3 GNP nano elyafla birlikte yapıştırılan yapıştırma bağlantılarında elde edilmiştir. N6.6'nın yüksek sıcaklıklara kadar mekanik özelliğini korumasından dolayı 0 °C'de meydana gelen yük düşüşü N6.6 nano elyaf katkılı yapıştırıcılarda daha az meydana gelmiştir.



Şekil 4.17. Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların 0 °C'deki kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirme grafiği; a) E0: Epoksi reçine, b) EN0: N6.6/Epoksi, c) ENGNP10: N6.6+% 1 GNP nano elyaf/Epoksi, d) ENGNP30: N6.6+% 3 GNP nano elyaf/Epoksi ve e) ENGNP50: N6.6+% 5 GNP nano elyaf/Epoksi

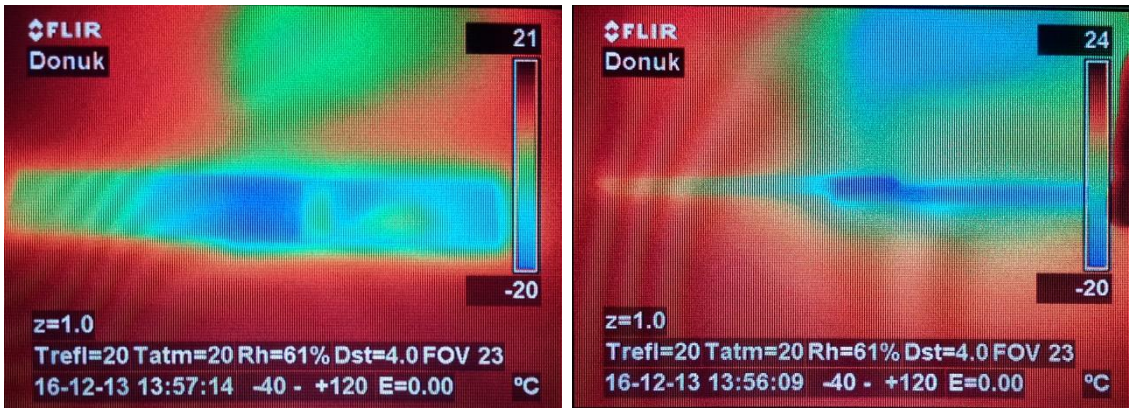
Saf epoksi, N6.6 nano elyaf/epoksi, N6.6+% 1 GNP nano elyaf/epoksi, N6.6+% 3 GNP nano elyaf/epoksi, N6.6+% 5 GNP nano elyaf/epoksi yapıştırıcıların kayma dayanımı (τ) ve kayma şekil değiştirmesi (γ) grafikleri Şekil 4.18. 'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi 0 °C'de saf epoksi yapıştırıcının kayma dayanımı 12.69 MPa'dır. N6.6 nano elyaf/epoksi yapıştırıcının kayma dayanımı ise 14.91 MPa olarak % 17.49 kadar artış gözlenmiştir. Kayma gerilmesindeki en büyük artış 17.99 ile ve % 41.77'lik artış ile N6.6 + % 3 GNP nano elyaf/epoksi yapıştırıcıda meydana gelmiştir. N6.6'nın ağırlıkça % 3 oranında GNP katılması ile elde edilen nano elyafların yapıştırıcı bağlantılarına takviye edilmesi ile yapıştırıcının kayma dayanımında 17.99 MPa ile maksimum değere ulaşmıştır. Kayma dayanımının ve şekil değiştirme miktarının değişmesine neden olan mekanizmalar daha sonra kırılma yüzeylerinin SEM analizleri ile birlikte açıklanacaktır.



Şekil 4.18. Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların 0 °C'deki kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirme grafiği; a) E0: Epoksi reçine, b) EN0: N6.6 nano elyaf/Epoksi, c) ENGNP10: N6.6+% 1 GNP nano elyaf/Epoksi, d) ENGNP30: N6.6+% 3 GNP nano elyaf/Epoksi ve e) ENGNP50: N6.6+% 5 GNP nano elyaf/Epoksi

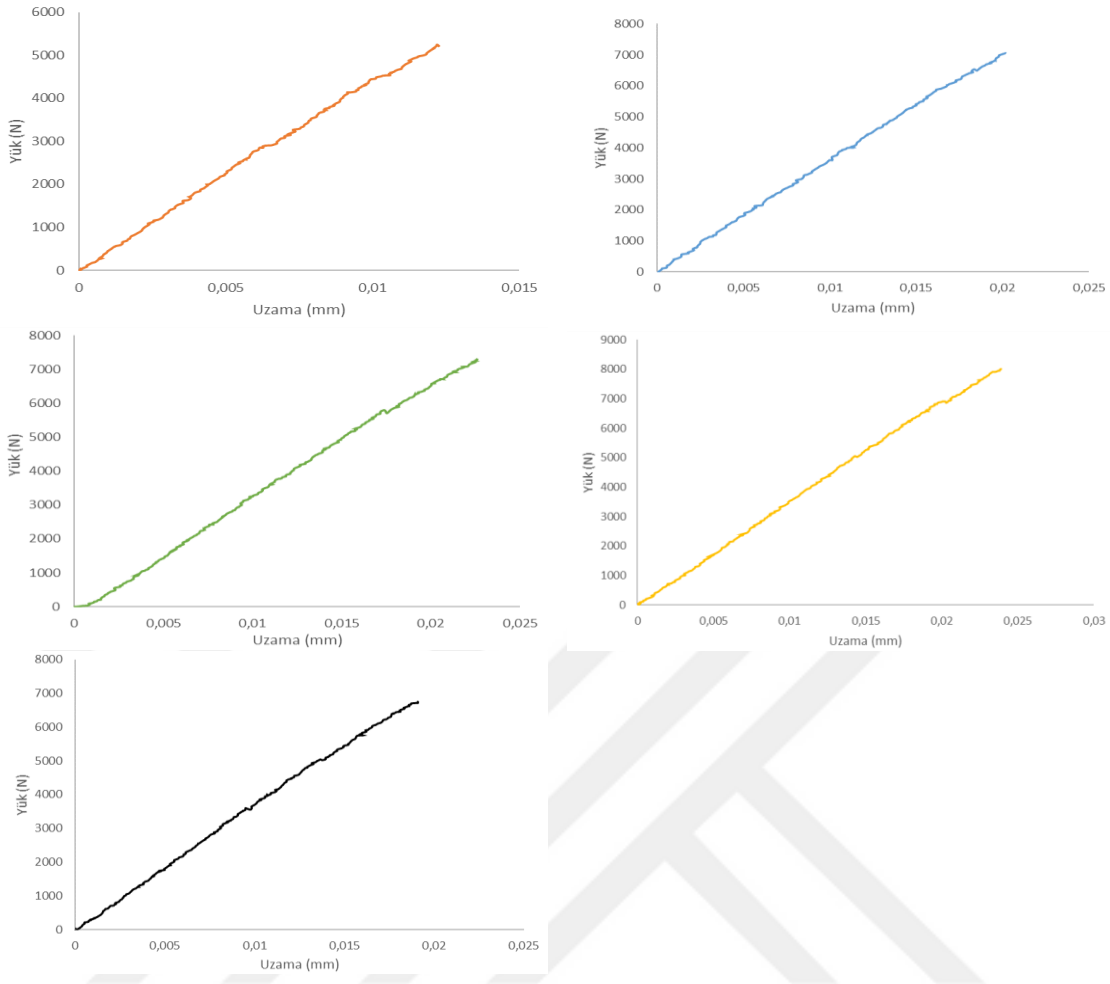
4.2.5. -20 °C sıcaklığında kayma dayanımı

Tek taraflı bindirmeli bağlantıların -20 °C'deki kayma dayanımları bir önceki bölümde gösterilmişti. Bu bölümde ise -20 °C ortam sıcaklığında tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma dayanımlarındaki değişim gözlenmiştir. Burada ortam sıcaklığı -20 °C'ye ayarlandıktan sonra tek taraflı bindirmeli bağlantılar ortamda belirli bir süre bekletilerek yapıştırma bağlantısının da sıcaklığının 0 °C sıcaklığa ulaşması sağlanmıştır. Şekil 4.19. 'da -20 °C sıcaklığa ulaşmış yapıştırma bağlantısının termal kamera görüntüsü görülmektedir.



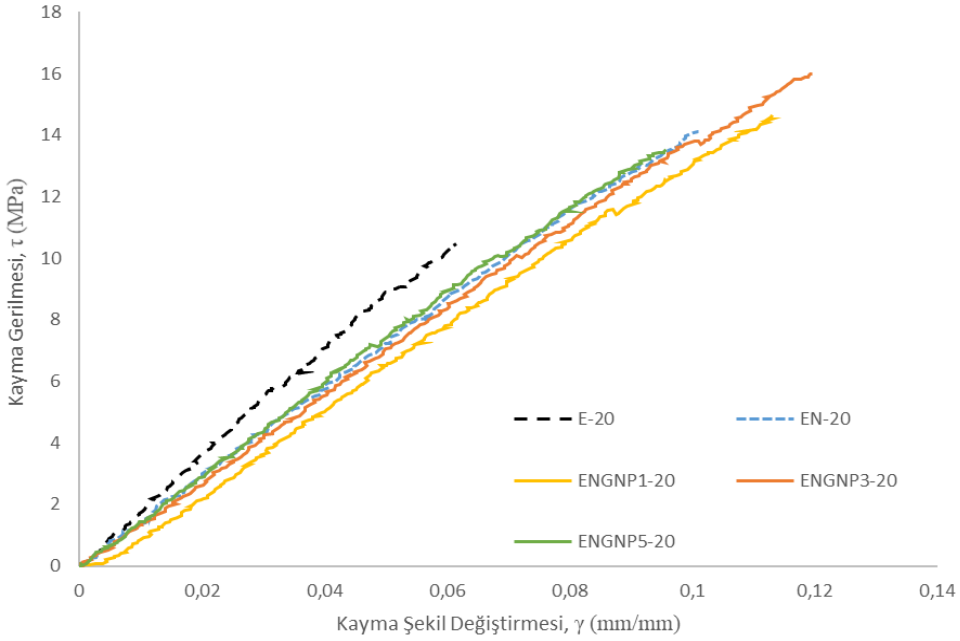
Şekil 4.19. -20 °C sıcaklığındaki yapıştırma bağlantısının termal kamera görüntüsü

Tek taraflı bindirmeli bağlantıların -20 °C'deki çekme testleri sonucunda elde edilen yük-uzama grafikleri Şekil 4.20. 'de verilmiştir. Yük-uzama grafiğinde görüldüğü üzere saf epoksi yapıştırıcı, N6.6 nano elyaf, N6.6 + % 1 GNP nano elyaf/epoksi, N6.6 + % 3 GNP nano elyaf/epoksi ve N6.6 + % 5 GNP nano elyaf/epoksi yapıştırıcılarla birlikte kullanılarak yapılan yapıştırma bağlantılarının karakteristik yükleme davranışları farklılık göstermektedir. Katkısız saf epoksi yapıştırıcının maksimum yük taşıma kapasitesi 5239 N'dur. Epoksi yapıştırıcıyla birlikte N6.6 nano elyaf, N6.6 + % 1 GNP, N6.6 + % 3 GNP ve N6.6 + % 5 GNP nano elyaf takviyesiyle yük taşıma kapasiteleri sırasıyla 7060, 7323, 7994 ve 6765 N'a çıkarak % 34.75, % 39.78, % 52.58 ve % 29.13 artış sağlanmıştır. Yapıştırma bağlantılarındaki maksimum taşıma yük kapasitesinin en iyi olduğu sonuç % 52.58'lik artış ile N6.6 + % 3 GNP nano elyafla birlikte yapıştırılan yapıştırma bağlantılarında elde edilmiştir. N6.6'nın yüksek sıcaklıklara kadar mekanik özelliğini korumasından dolayı -20 °C'de meydana gelen yük düşüşü N6.6 nano elyaf katkılı yapıştırıcılarda daha az meydana gelmiştir.



Şekil 4.20. Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların -20 °C'deki kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirme grafiği; a) E-20: Epoksi reçine, b) EN-20: N6.6/Epoksi, c) ENGNP1-20: N6.6+% 1 GNP nano elyaf/Epoksi, d) ENGNP3-20: N6.6+% 3 GNP nano elyaf/Epoksi ve e) ENGNP5-20: N6.6+% 5 GNP nano elyaf/Epoksi

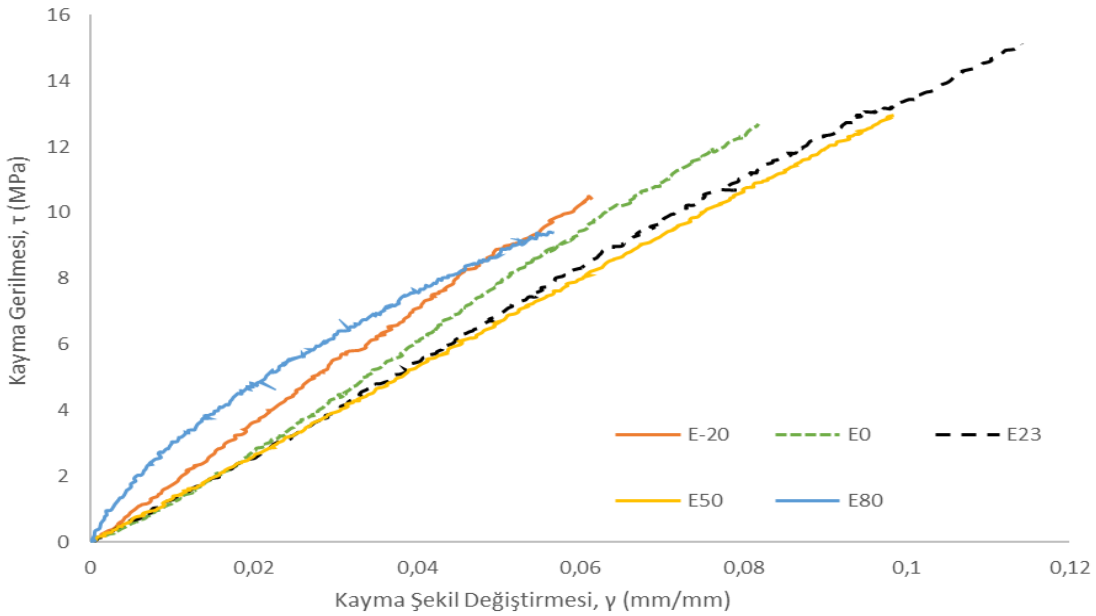
Saf epoksi, N6.6 nano elyaf/epoksi, N6.6+% 1 GNP nano elyaf/epoksi, N6.6+% 3 GNP nano elyaf/epoksi, N6.6+% 5 GNP nano elyaf/epoksi yapıştırıcıların kayma dayanımı (τ) ve kayma şekil değiştirmesi (γ) grafikleri Şekil 4.21. 'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi -20 °C'de saf epoksi yapıştırıcının kayma dayanımı 10.48 MPa' dır. N6.6 nano elyaf/epoksi yapıştırıcının kayma dayanımı ise 14.12 MPa olarak % 34.73 kadar artış gözlenmiştir. Kayma gerilmesindeki en büyük artış 15.99 İle ve % 52.58 lik artış ile N6.6 + % 3 GNP nano elyaf/epoksi yapıştırıcıda meydana gelmiştir. N6.6'nın ağırlıkça % 3 oranında GNP katılması ile elde edilen nano elyafların yapıştırıcı bağlantılarına takviye edilmesi ile yapıştırıcının kayma dayanımında 15.99 MPa ile maksimum değere ulaşmıştır. Kayma dayanımının ve şekil değiştirme miktarının değişmesine neden olan mekanizmalar daha sonra kırılma yüzeylerinin SEM analizleri ile birlikte açıklanacaktır.



Şekil 4.21. Yapıştırıcıyla bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların -20 °C'deki kayma gerilmesi-kayma şekil değiştirme grafiği; a) E-20: Epoksi reçine, b) EN-20: N6.6 nano elyaf/Epoksi, c) ENGNP1-20: N6.6+% 1 GNP nano elyaf/Epoksi, d) ENGNP3-20: N6.6+% 3 GNP nano elyaf/Epoksi ve e) ENGNP5-20: N6.6+% 5 GNP nano elyaf/Epoksi

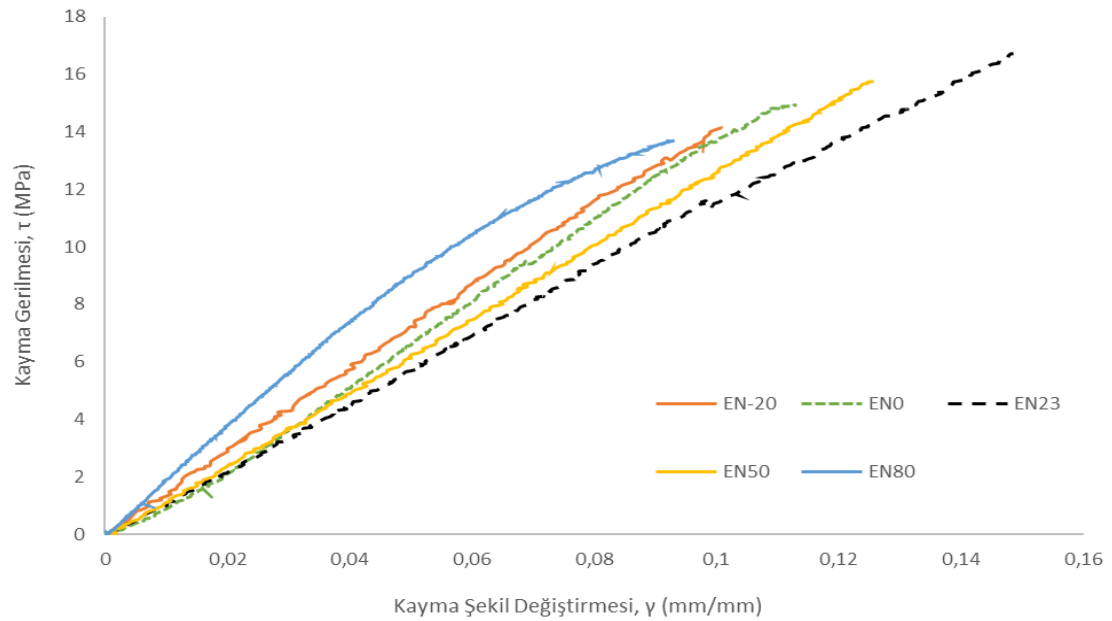
4.2.6. Farklı sıcaklığın etkisi

Tek taraflı bindirmeli bağlantıların çekme tesleri farklı ortam sıcaklıklarda yapılmış ve kayma gerilmesi- kayma şekil değiştirmesi grafikleri önceki bölümlerde verilmiştir. Bu bölümde ise saf epoksi, N6.6 nano elyaf katkılı epoksi ve ağırlıkça % 3 GNP katkılı N6.6 nano elyaf eklenmiş epoksi yapıştırıcılar ile yapıştırılmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların farklı sıcaklıklardaki mukavemetlerinin değişimi gözlemlenmiştir. Şekil 4.22. 'de saf epoksinin farklı ortam sıcaklıklardaki kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi en yüksek gerilme değeri 15.13 MPa ile 23 °C (Oda sıcaklığı)'de olmaktadır. Sıcaklık arttıkça mukavemet düşmüş, 80 °C'de % 37.76 azalmıştır. Sıcaklık azaldıkça aynı şekilde mukavemet düşerek devam etmiş ve – 20 °C'de % 30.82 azalmıştır.



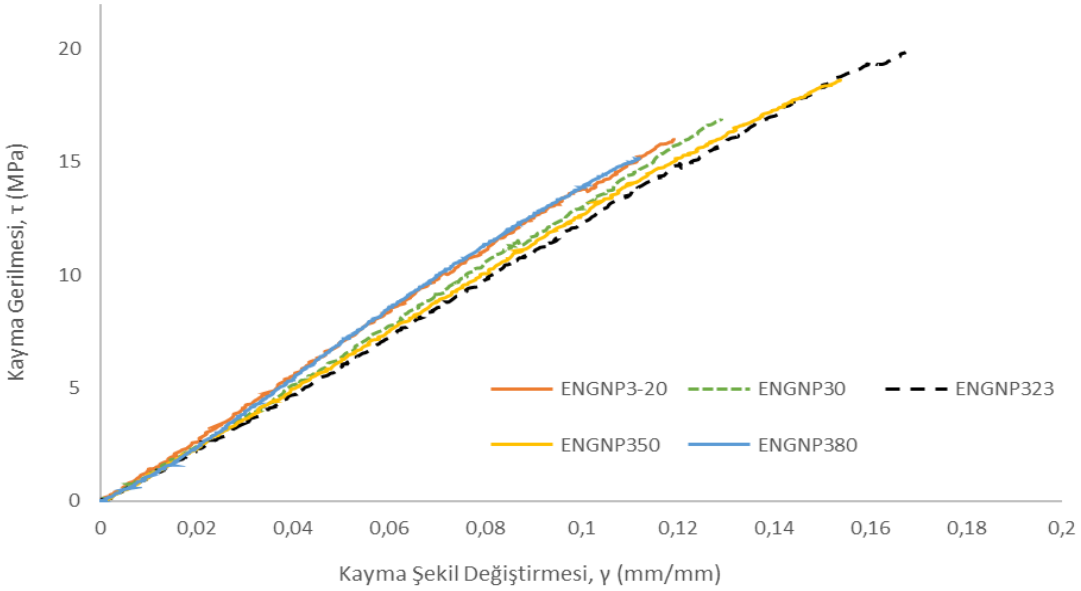
Şekil 4.22. Saf epoksi ile bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların farklı sıcaklıklardaki değişimi

Şekil 4.23. 'de N6.6 katkılı epoksinin farklı ortam sıcaklıklardaki kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi en yüksek gerilme değeri 16.72 MPa ile 23 °C (Oda sıcaklığı)'de olmaktadır. Sıcaklık arttıkça mukavemet düşmüş, 80 °C'de % 17.94 azalmıştır. Sıcaklık azaldıkça aynı şekilde mukavemet düşerek devam etmiş ve – 20 °C'de % 15.55 azalmıştır.



Şekil 4.23. N6.6 nenoelyafla güçlendirilmiş epoksi ile bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların farklı sıcaklıklardaki değişimi

Şekil 4.24. ‘de ağırlıkça % 3 GNP katkılı N6.6 eklenmiş epoksinin farklı ortam sıcaklıklarındaki kayma gerilmesi ve kayma şekil değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi en yüksek gerilme değeri 19.84 MPa ile 23 °C (Oda sıcaklığı)’de olmaktadır. Sıcaklık arttıkça mukavemet düşmüş, 80 °C’de % 23.52 azalmıştır. Sıcaklık azaldıkça aynı şekilde mukavemet düşerek devam etmiş ve – 20 °C’de % 24.15 azalmıştır.



Şekil 4.24. Ağırlıkça % 3 GNP katkılı N6.6 nenoelyafla güçlendirilmiş epoksi ile bağlanmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların farklı sıcaklıklardaki değişimi

Burada önemli olan husus, saf epokside sıcaklık değiştikçe mukavemet düşüşü daha fazla olurken N6.6 ve ağırlıkça % 3 GNP katkılı N6.6 eklenmiş yapıştırma bağlantılarında ise mukavemet düşüşü daha az gerçekleşmiştir. Bunun sebebi N6.6’nın termal özelliğinin daha iyi olması ve daha yüksek/daha düşük sıcaklıklara kadar mekanik özelliklerini koruyabilmektedir.

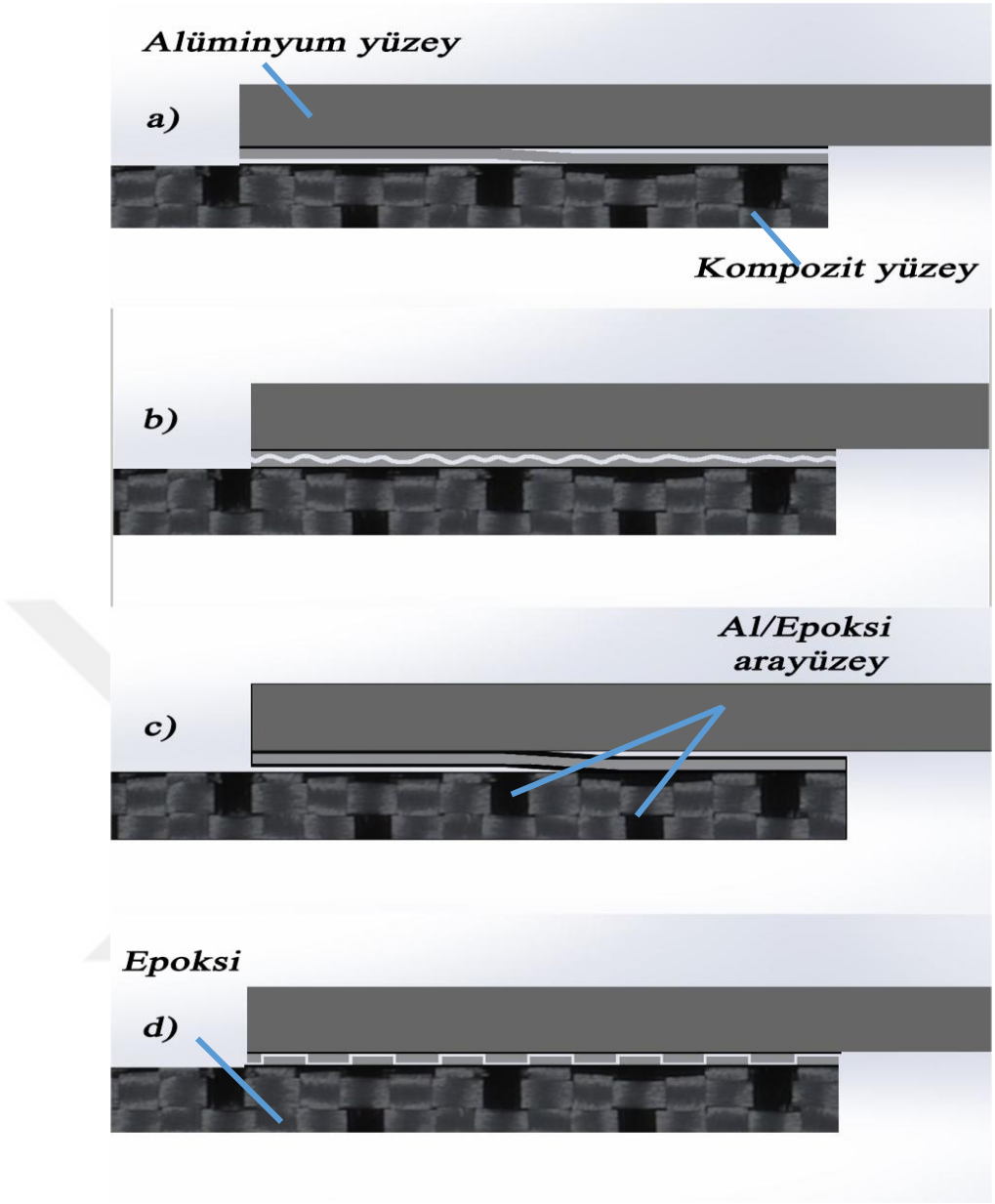
4.3. Kırılma Yüzeylerinin Analizleri

Kırılma yüzeyleri makroskobik görüntü ile ve SEM kullanılarak incelenmiştir. Makroskobik görüntü ile kırılan yüzey karakteristikleri irdelenmiştir. SEM analizinde ise çatlakların ilerlemeleri ve katkı maddelerinin etkileri incelenmiştir. SEM analizi için numuneler kırılma yüzeyleri karşılıklı olacak şekilde 10x10 mm boyutlarında kesildikten

sonra yüzeyleri aseton ile yıkanmıştır. Sonrasında temiz hava ile kurutularak SEM görüntüleri alınmıştır.

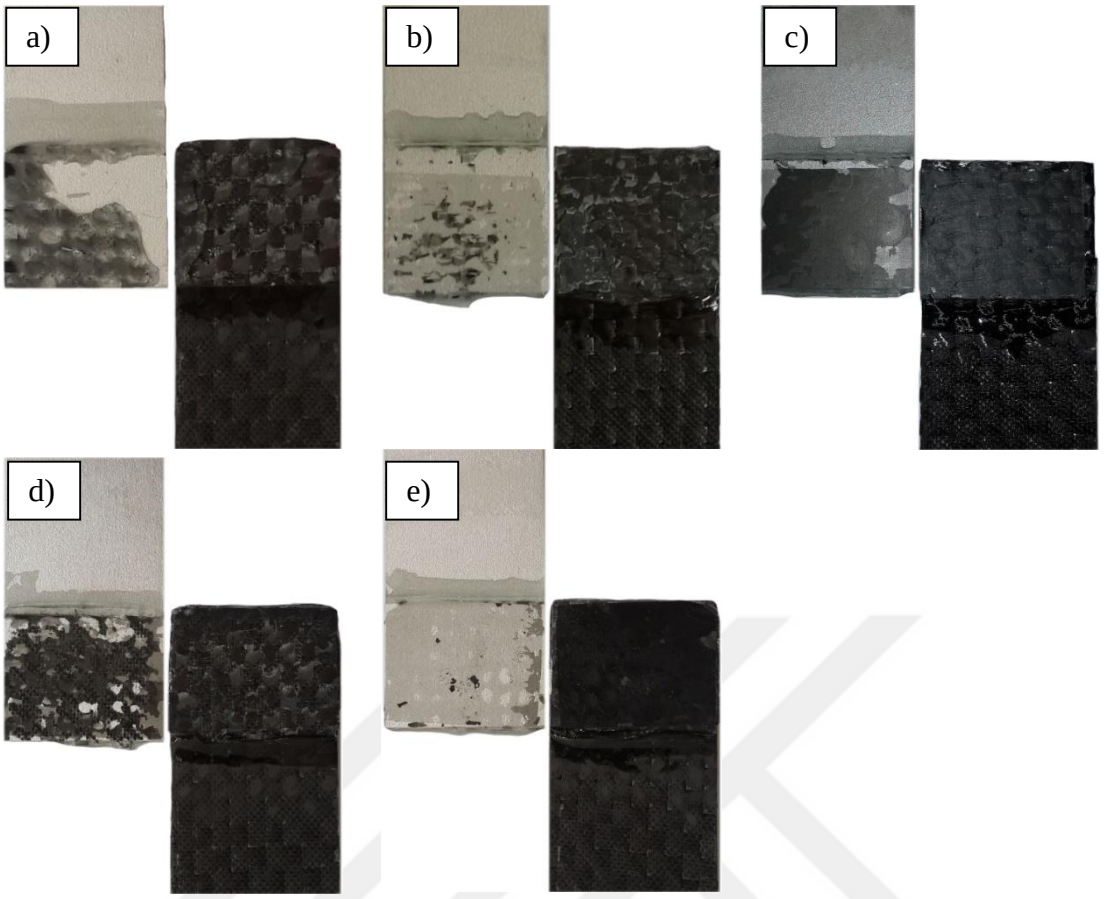
Şekil 4.25. ‘de görüldüğü üzere tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma dayanımlarını ölçmek için çekme testi sonucunda çatlağın başlangıcı ve ilerlemesi çeşitli şekillerde olabilmektedir. Temelde dört tip kırılma mekanizması vardır. Yüzeyi düzgün hazırlanmış iyi bir yapışma sağlanmış ve arayüzeyin hemen üzerinden epoksiden kopma gerçekleşerek devam eden kırılma davranışına kohezyon kırılma denmektedir ve iyi bir yapıştırmanın sonucunda oluşan kırılma karakteristiğidir (Şekil 4.17.a.). Kohezyon kırılma yapıştırıcı içerisinde zigzaglar çizerek çatlak yolunu uzatabilir ve bu sayede kırılma enerjisi artarak kırılma tokluğunu artırabilmektedir (Şeklil 4.17.b.). Kırılma başlangıcı arayüzeyden olan yapışmalar genellikle kötü yapıştırılmış yüzeylerde ya da iyi hazırlanmamış düşük yüzey enerjili malzemelerde meydana gelmektedir (Şekil 4.17.c.). Bu tip kırılmalarda genellikle yapıştırıcı tek bir arayüzeyden tamamiyle ayrılarak diğer numune yüzeyinde kalır. Son olarak da çatlakların arayüzeyler arasında yön değiştirerek ilerlemesiyle ortaya çıkan bir kırılma karakteristiği mevcuttur ve zıt ara yüzeyler incelendiğinde buralarda oluşan mikro-çatlaklar sayesinde tespit edilir (Şekil 4.17.d.).

Şekil 4.26. ‘da tek taraflı bindimeli bağlantıların 23 °C’de çekme testi sonucunda oluşan kırılma yüzeylerinin makroskobik fotoğrafları görülmektedir. Epoksi reçine gibi yüksek mukavemetli yapıştırıcılarda dört tip çatlak ilerleme mekanizması vardır. En iyi temsil eden biri yapıştırıcının kohezyon özelliklerinden yapıştırılan malzemeyle güçlü bir arayüze yol açan uygun yüzey hazırlığıyla karakterize edilen kohezyon bozulmadır (Ekrem, 2015).



Şekil 4.25. Tek taraflı bindirmeli bağlantılardaki tipik kırılma modları

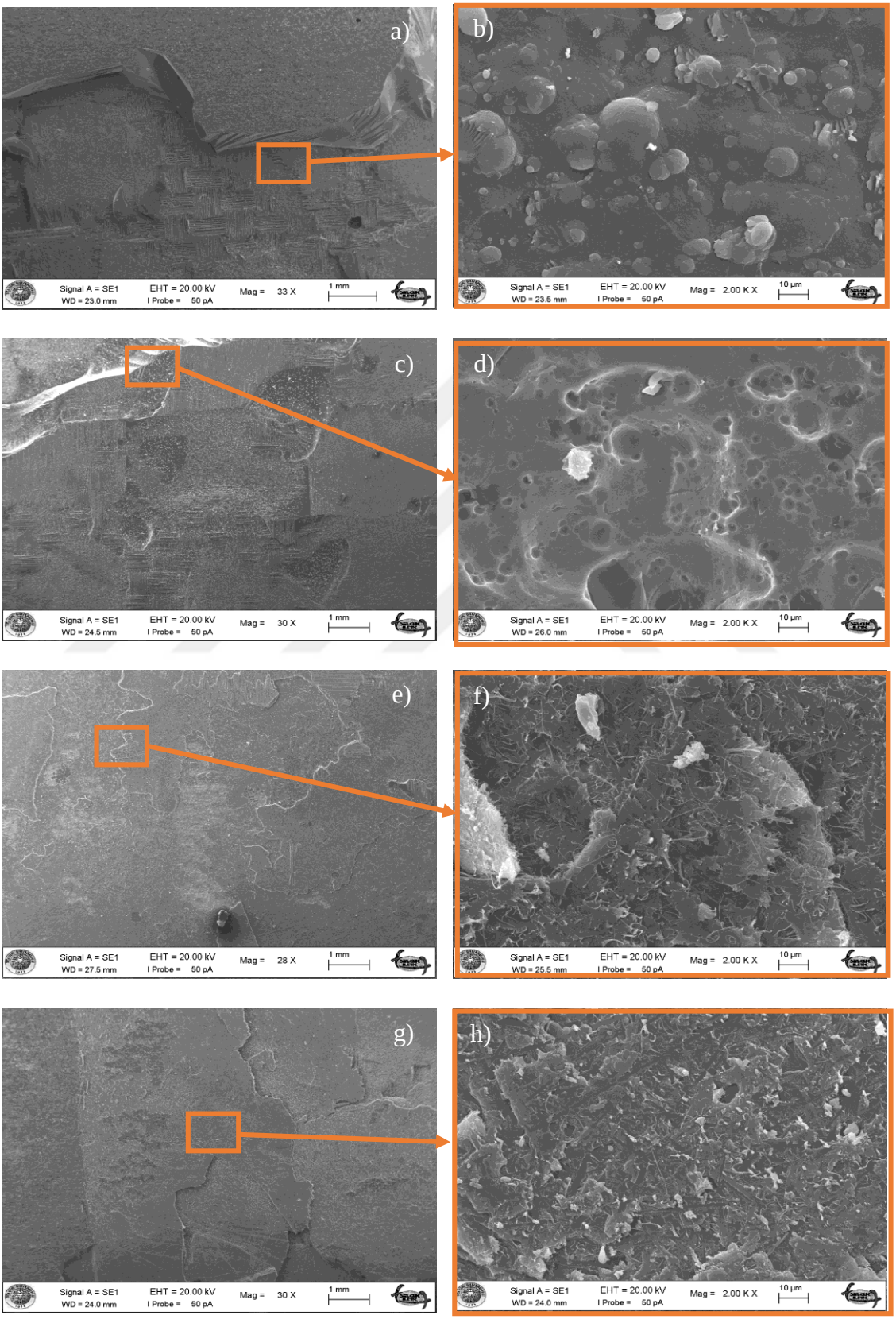
Şekil 4.26. 'da görüldüğü üzere ENGNP123, ENGNP323 ve ENGNP523 numunelerde kırılma yapıştırıcı boyunca zigzaglar çizerek ilerlemiştir. Dolayısıyla daha çok kırılma enerjisi harcayarak kırılma tokluğunu artırmıştır. Ayrıyeten kırılmanın kohezyon kırılması olması hasebiyle yani arayüzeyden kırılmadığı için iyi bir yapışma gerçekleşmiş dolayısıyla kayma mukavemeti de en iyi bu üç tek taraflı bindirmeli bağlantılarda gerçekleşmiştir.

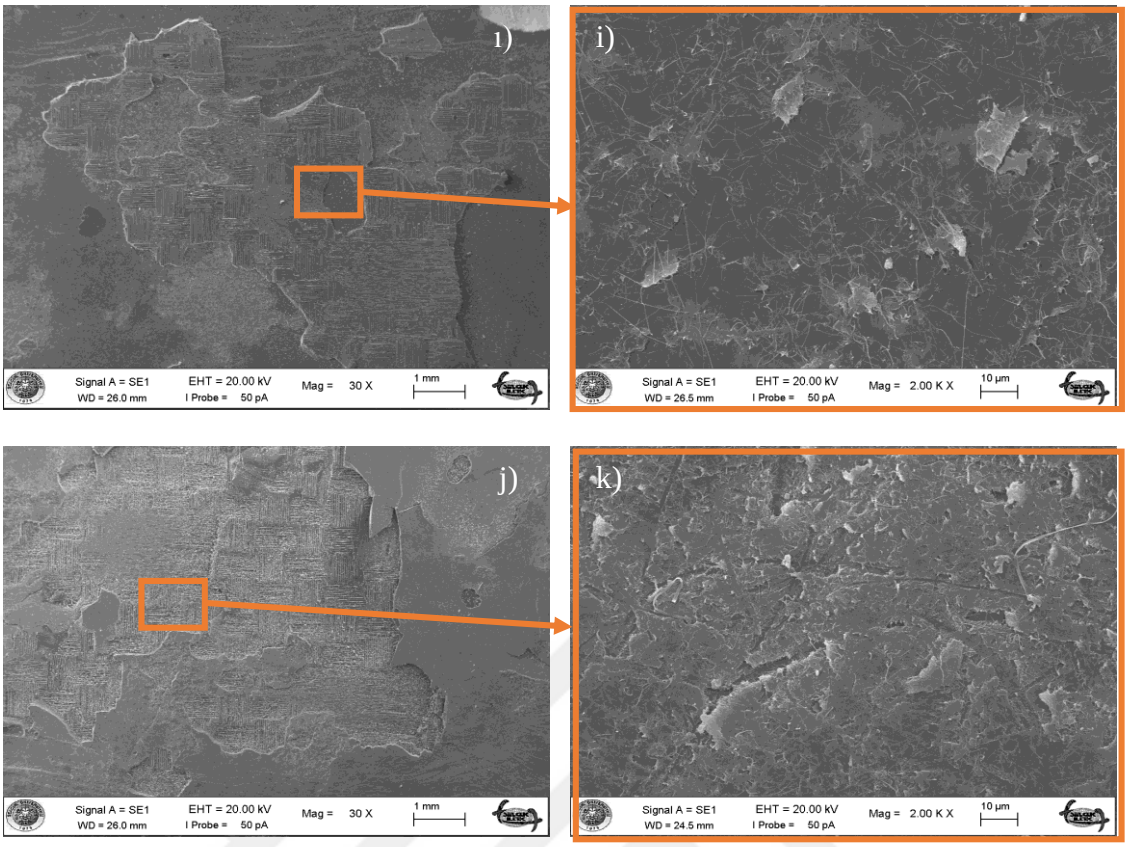


Şekil 4.26. Tek taraflı bindirmeli bağlantıların 23 °C'deki kırılma yüzeylerin makroskobik fotoğrafları; E: Epoksi reçine, EN: N6.6 nano elyaf/Epoksi, ENGNP1: N6.6+% 1 GNP nano elyaf/Epoksi, ENGNP3: N6.6+% 3 GNP nano elyaf/Epoksi, ENGNP5: N6.6+% 5 GNP nano elyaf/Epoksi

Arayüzey bozulmaları da yapıştırılan numune yüzeylerinin iyi hazırlanmaması ve yapıştırıcının yüzeye bağlanmasının iyi gerçekleşmemesi sebeyle meydana gelmektedir. Şekil 4.26. 'da ENGNP123, ENGNP523, EN23 ve E23'de görüldüğü üzere ara yüzey bozulmaları meydana gelerek numune bir yüzeyden ayrılarak diğer yüzeyde kalmıştır (ENGNP123). Çatlak arayüzeyden başlayıp ilerlerken nano elyafın etkisi ile bazı bölgelerde yön değiştirip diğer arayüzeyden ilerleyerek devam etmiştir (ENGNP523). Çatlak arayüzeyden başlayıp takviye malzemesi olan N6.6'nın epoksi ile olan arayüzeyinden ayrılmıştır (EN23). Bunun sebebi ise takviye edilen N6.6'nın iyi bir şekilde ıslatılamamış olmasından kaynaklanmaktadır. N6.6 iyi ıslatılamadığında N6.6 ile epoksi arasında bir hava boşlukları ve kuru fiber N6.6 kalacaktır. Bu da bağlanma enerjisini düşürerek o bölgeden çatlağın kolayca ilerlemesine sebep olacaktır. Nitekim N6.6'da gerçekleşen olay bu şekilde olmaktadır. Çatlak nano elyaf ile epoksi arayüzeyinden başlayarak devam etmiş daha sonrasında kompozit malzemeye geçerek kompozit malzemeden ilerleyerek alüminyum yüzeyinde karbon elyaf kompozit

malzeme parçaları gözlenmiştir. Bu da yapıştırmanın oldukça iyi gerçekleştirildiğini göstermektedir.





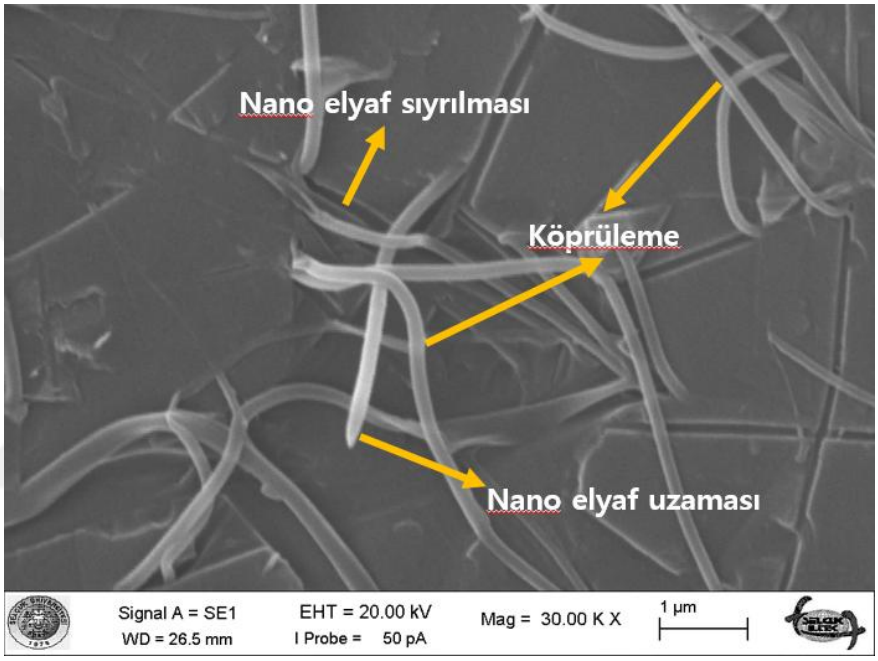
Şekil 4.27. Kırılma yüzeyleri SEM görüntüleri; a) E23 Al tarafı 30X, b) E23 Al tarafı 2 000X, c) E23 kompozit tarafı 30X, d) E23 kompozit tarafı 2 000X, e) EN23 Al tarafı 30X, f) EN23 Al tarafı 2 000X, g) EN23 kompozit tarafı 30X, h) EN23 kompozit tarafı 2 000X, ı) ENGNP3 Al tarafı 30X, i) ENGNP3 Al tarafı 2 000X, j) ENGNP3 kompozit tarafı 30X ve k) ENGNP3 kompozit tarafı 2 000X

Şekil 4.27. ‘de 23 °C’deki kırılma yüzeylerinin SEM fotoğrafları gösterilmektedir. SEM görüntüleri karşılıklı levhalardan alınmıştır. Al kısmında bulunan epoksi tümseklerin karşılıkları olan kompozit tarafındaki çukurlardır (Şekil 4.27. a,b). Bunun sebebi epoksi içerisinde kalan hava kabarcıkları olabilir. Aynı zamanda alüminyum yüzeyinde bazı bölgelerde oluşacak bir kirliliğin epoksinin yapışmasını engellediği dolayısı ile epoksi o bölgeden ayrılarak diğer taraf yani kompozit levha yüzeyinde kaldığı düşünülmektedir.

N6.6 nano elyaf katkılı yapıştırma bağlantısı kırılma yüzeyinde görüldüğü üzere (Şekil 4.27. e, f, g, h) yapıştırma arayüzeyinde oluşan çatlaklar nano elyaf sayesinde dağılmış ve daha çok enerji absorbe edebilmiştir. Çünkü yapıştırıcı olan epoksiye katılan N6.6 sayesinde yapıştırıcı aslında bir katmanlı nano elyaf katkılı nano kompozit olmaktadır ve oluşan hasarlara bakıldığında elyaf takviyeli nanokompozitlerde meydana gelen hasarlar (fiber sıyrılması, fiber uzaması, köprüleme v.s.) meydana gelmektedir. Oluşan bu hasarların her biri enerji absorbe etmektedir. Dolayısı ile hasar anında daha

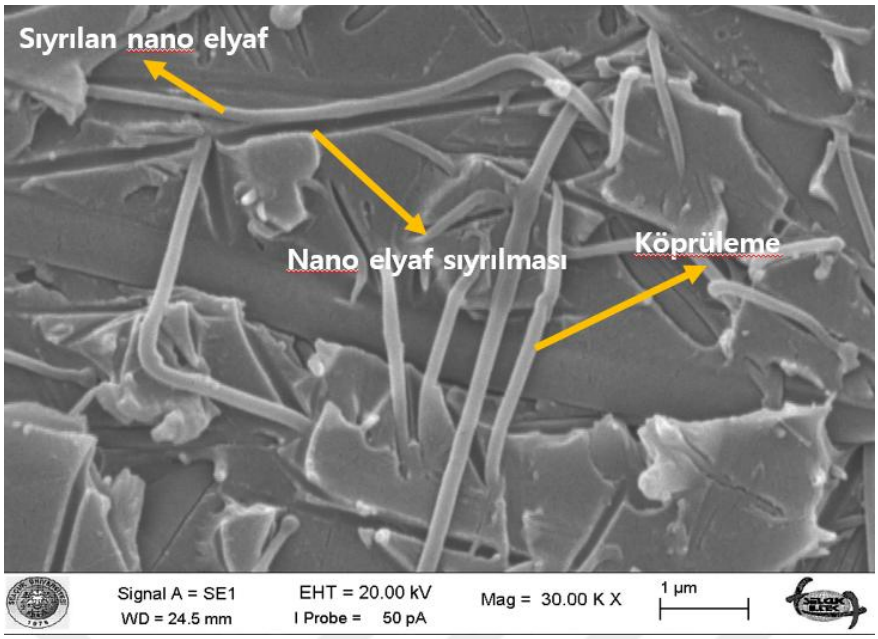
çok enerji absorbe ederek malzemenin mukavemeti ve tokluğunda artış meydana getirmiştir.

% 3 GNP katkılı N6.6 nano elyaf ile güçlendirilmiş yapıştırma bağlantılarının kırılma yüzeylerine bakıldığında (Şekil 4.27. ı, i, j, k) nano elyafın katkısı ile kırılma yüzeyinde çatlak parçalara ayrılara daha çok enerji absorbe etmektedirler. GNP sayesinde ilerleyen çatlaklar GNP arayüzeyine rastladıklarında GNP etrafında ilerleyerek çatlağın ilerleme yolu uzayarak daha çok enerji absorbe etmesini bu sayede de hem daha mukavemetli hem de daha tok bir malzeme elde edilmesini sağlamıştır.



Şekil 4.28. EN23 SEM görüntüsü

Aslında yapıştırıcı içerisine N6.6 nano elyaf eklendiğinde tek tabakalı nano kompozit malzeme elde edilmiş oluyor. Bu sebeple yapıştırma bölgesinde nano elyafın aldığı birçok hasar kompozit malzemelerin aldığı hasarlara benzemektedir. Şekil 4.28. 'deki gibi içerisine N6.6 nano elyaf katılan epoksi yapıştırıcıdaki gerçekleşen hasar görülmektedir. Hasarlara bakıldığında nano elyaf sıyrılması, nano elyaf uzaması ve köprüleme gibi tabakalı kompozit malzemelerde meydana gelen hasarlar burada da meydana gelmiştir ve bu hasarların her biri enerji absorbe ederek malzeme tokluğunu artırmıştır. Şekil 4.29. 'da N6.6 ağırlığınca % 3 GNP katılan N6.6 nano elyaf ile güçlendirilmiş epoksi yapıştırıcının SEM görüntüsü görülmektedir ve yine aynı hasar mekanizmaları görülmektedir.



Şekil 4.29. ENGNP323 SEM görüntüsü

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, N6.6 nano elyaf ve N6.6 nano elyaf içerisine N6.6'nın ağırlıkça % 1, % 3 ve % 5 oranlarında GNP eklenerek nano elyaf üretilmiştir. Üretilen bu nano elyaflar bir tarafı Al 2024-T3 levha diğer tarafı karbon fiber/ epoksi kompozit levha olan tek taraflı bindirmeli bağlantıların yapıştırılması sırasında epoksi reçinenin içerisine yatırılarak takviye elemanı olarak kullanılmışlardır. Aynı zamanda karşılaştırma yapabilmek için herhangi bir takviye olmadan saf epoksi L285 reçine ile tek taraflı bindirmeli bağlantılar da hazırlanmıştır. Hazırlanan bu yapıştırma bağlantılarına aynı zamanda farklı sıcaklıkların etkisini de gözlemlemek için sırasıyla 23 °C, 50 °C, 80 °C, 0 °C ve -20 °C ortam sıcaklıklarında çekme testleri yapılmıştır. Çekme testleri sonucunda bağlantıların kayma dayanımları ve kayma şekil değiştirmeleri incelenerek her bir sıcaklıktaki değişimler ayrı ayrı kendi içerisinde gözlemlenmiştir. Ayrıyeten farklı sıcaklıkların etkisini gözlemlemek amacıyla saf epoksideki faklı sıcaklıkların etkisi incelenerek yorumlanmıştır. Aynı zamanda takviyeli yapıştırma bağlantılarının da farklı sıcaklık etkileri incelenerek yorumlanmıştır.

N6.6 nano elyaf ve ağırlıkça % 1, % 3 ve % 5 oranlarındaki GNP takviyeli nano elyafların üretim işlem adımları detaylı bir şekilde irdelenerek açıklanmıştır. Nano elyafların FT-IR DSC ve SEM analizeleri alınarak ayrı ayrı incelenmiş ve yorumlanmıştır.

Hazırlanan nano elyafların katkısı ile üretilmiş olan tek taraflı bindirmeli bağlantıların kayma dayanımları ve birim şekil değiştirme miktarları belirlenmiş ve bulunan sonuçlar makroskobik ve SEM görüntüleriyle ilişkilendirilmiştir. Aynı işlemler farklı sıcaklıklarda çekme testi yapılan yapıştırma bağlantılarında da incelenerek yorumlanmıştır.

Bu tez çalışmasında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- N6.6 nano elyaf ve ağırlıkça % 5 oranında GNP takviyeli nano elyafların çaplarındaki değişim SEM analizi ile incelenmiştir. Sonuç olarak GNP takviyesinin solüsyonun iletkenliğini artırdığı dolayısıyla daha ince çaplarda nano elyaf fiberleri oluşmasını sağladığı gözlemlenmiştir. Yani nano elyaf fiber çapı ile solüsyon iletkenliği arasında bir ters orantı olduğu gözlemlenmiştir.

- N6.6 nano elyaf ve ağırlıkça % 1, % 3 ve % 5 oranında GNP takviyeli nano elyafların termal özellikleri ve bağ yapıları sırasıyla DSC ve FT-IR analizleriyle

incelenmiş ve ortaya çıkarılmıştır. Sonuç olarak DSC eğrilerine bakıldığında Tg sıcaklığı 72.42 °C olan N6.6. nano elyafa ağırlıkça % 3 GNP katıldığında Tg sıcaklığı 80.05 °C'ye yükselerek % 10.53'lük bir artış gözlemlenmiştir. FT-IR analizinde ise mevcut bağlardaki pik noktalar incelenerek herhangi bir kimyasal bağ oluşmadığı ancak nanopartikül katkı oranından dolayı şiddetlerde değişim olduğu gözlemlenmiştir.

- Epoksi reçine içerisine yatırılmış N6.6 ve ağırlıkça % 1, % 3 ve % 5 oranında GNP takviyeli N6.6 nano elyafların termal özellikleri ve bağ yapıları DSC veFT-IR analizleriyle incelenmiş ve sonuçlar ortaya koyulmuştur. DSC eğrilerine bakıldığında saf epoksinin Tg sıcaklığı 75.22 °C olarak gözlemlenmiştir. N6.6 nano elyaf katkılı epokside ise Tg sıcaklığı 77.37 °C'ye yükselerek % 2.85'lik bir artış gözlemlenmiştir. N6.6 ağırlığının % 3 oranında GNP katkılı N6.6 nano elyaf ile güçlendirilmiş epoksinin Tg sıcaklığı ise 83.52 °C'ye yükselerek saf epoksiye göre % 11.03'lük bir artış gözlenmiştir.

- Tek taraflı bindirmeli bağlantıların çekme deneyleri sonucunda, N6.6 nano elyaf ve ağırlıkça % 1, % 3 ve % 5 oranlarında GNP takviyeli nano elyafların kayma dayanımlarını artırdığı gözlemlenmiştir. Ağırlıkça % 3 GNP takviyeli N6.6 nano elyaf ile güçlendirilmiş epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılmış bağlantının kayma dayanımı saf epoksi reçine ile yapıştırılmış bağlantının kayma dayanımına göre % 31.15 oranında artmıştır.

- Tek taraflı bindirmeli bağlantılara takviye edilen N6.6 nano elyaf ve GNP katkılı N6.6 nano elyafların yapıştırma yüzey enerjisini artırarak hem epoksi reçinenin bağlanma açısını artırmış hem de yapıştırma mekanizması içerisinde mekanik kilitleme özelliğini artırdığından kayma şekil değiştirme kabiliyetleri de artmıştır. Nano elyaflarla güçlendirilmiş yapıştırıcıların kayma birim şekil değiştirmelerinin artmasıyla toklukları önemli oranda artırılarak yapıştırma bağlantılarının kırılıncaya kadar absorbe ettiği enerji miktarının artması sağlanmıştır.

- Saf epoksi reçine ile yapıştırılan tek taraflı bindirmeli bağlantıların farklı sıcaklıklardaki çekme dayanımlarına bakıldığında kayma dayanımı sıcaklığın artması ve azalmasında ciddi oranlarda düşerken N6.6 nano elyaf takviyeli yapıştırma bağlantılarında bu düşüş daha az görülmektedir. Bunun nedeninin de N6.6 nın yüksek ve düşük sıcaklıklara kadar mekanik özelliklerini koruyabilmesi olduğu gösterilmiştir. DSC sonuçlarından elde edilen Tg sıcaklıkları farklı sıcaklıklar altında saf epoksiye göre N6.6 nano elyaf katkılı yapıştırıcılardaki düşüşün az olmasını açıklamaktadır. GNP takviyeli N6.6 nano elyafların da epoksinin bağlanma yüzey alanını artırarak nano elyafa daha iyi bağlanmasını sağlamış ve bu sebeple N6.6 nano elyafın mekanik özelliğini epoksi içerisinde daha ön plana çıkarmıştır. Ancak en iyi kayma dayanımı % 3 GNP katkılı N6.6

nano elyafta sağlanmıştır. % 5 GNP katkılı N6.6 nano elyafla güçlendirilmiş yapıştırma bağlantılarındaki kayma dayanımındaki düşüş GNP'lerin bir bölgeye topaklanmaya başlamasından dolayıdır. Belirli bir bölgeye toparlanan GNP'lerin bulunduğu bölgede ısı daha çok birikmekte ve bu sebeple o bölge ikincil bir ısı kaynağı gibi davranmaktadır. Bu da yapıştırıcıyı olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada ağırlıkça optimum kayma mukavemeti değeri % 3 GNP katkılı N6.6 nano elyaf ile güçlendirilmiş yapıştırıcılarda elde edilmiştir.

- Çekme deneyi sonucunda yapıştırma bağlantılarının kırılma yüzeyleri incelendiğinde, N6.6 nano elyaf ve ağırlıkça % 1, % 3 ve % 5 oranlarında GNP takviyeli N6.6 nano elyafların epoksi reçine içerisinde bulunması epoksi reçinenin kırılma yüzeyindeki pürüzlüğü artırdığı gözlemlenmiştir. Saf epoksi reçine ile kırılan yüzeylere bakıldığında daha düz bir kırılma gerçekleşirken takviyeli bağlantıların kırılma yüzeylerine bakıldığında daha pürüzlü kırılma yüzeyleri ile karşılaşılmıştır. Bunun sebebi ise yapıştıma bağlantısına eklenen N6.6 nano elyaf ve GNP takviyeli N6.6 nano elyafların yapıştırıcının gevrek kırılma özelliğini değiştirerek daha sünek kırılmasını sağlamalarıdır. Yani yapıştırıcının gevrek kırılma özelliğini azaltarak daha sünek kırılma ve dolayısıyla daha tok yapıştırma bağlantıları elde edilmesini sağlamıştır. Aynı zamanda N6.6 takviyesi kırılma hasarının epoksi matriks ile yapıştırılan malzeme arayüzeyinin kohezyon olarak hasar görmesine sebebiyet vermiştir.

- Kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde kırılma mekanizmalarında nano elyafların etkisi gözlemlenmiştir. Nano elyafların çatlak ilerlemelerinde bazı bölgelerde köprüleme etkisi ile çatlağın ucunun yön değiştirmesiyle çatlak ilerlemesine karşı direnç sağladığı gözlemlenmiştir. Yapıştırıcıya nano elyaf takviye etmekle aslında yapıştırıcının nanokompozit malzeme olması ve kompozit malzemelerde görülen kırılma hasar mekanizmalarının burada da görülmesi beklenmiş ve öyle de olmuştur. Elyaf sıyrılması, köprüleme, eylaf uzaması gibi tabakalı kompozit malzemelerde görülen hasarlar yapıştırma bağlatılarının kırılma yüzeylerinde görülmüştür. Bu hasarların avantajları ise her hasar bir enerji absorbe etmektedir ve bu sayede malzemenin çatlak ilerlemesine karşı direnci artarak sünekliğinin artması dolayısıyla tokluğunun artması ve kırılıncaya kadar daha fazla enerji yutması demektir.

- Farklı sıcaklıklarda yapılan çalışmalara bakıldığında, saf epoksi ile yapıştırılan yapıştırma bağlantılarında 23 °C'deki kayma mukavemeti 50 ve 80 °C sıcaklıklarda sırasıyla % 14.50 ve % 37.76 oranında düşüş gözlemlenmiştir. 0 ve -20 °C'deki kayma mukavemetleri de % 16.15 ve % 30.82 oranlarında düşmektedir.

- N6.6 ile güçlendirilmiş yapıştırma bağlantılarında 23 °C'deki kayma mukavemetine göre 50, 80, 0 ve -20 °C'lerde sırasıyla % 5.80 % 17.94, % 10.76 ve % 15.55 oranlarında düşüş gerçekleşmiştir. Saf epoksiye göre düşüşün az olması N6.6 nın daha yüksek ve daha düşük sıcaklıklara kadar mekanik özelliğini koruyabilmesi sayesinde olmaktadır.

- % 3 GNP katkılı N6.6 nano elyaf yapıştırma bağlantılarının 23 °C'deki kayma mukavemetine göre 50, 80, 0 ve -20 °C'deki kayma mukavemetleri % 5.89, % 23.52, % 9.32, ve % 19.45 oranlarında düşüş gerçekleşmiş ve saf epoksi ve N6.6 ile güçlendirilmiş yapıştırma bağlantılarına göre daha az bir düşüş sağlanmıştır. Bunun sebebi ise nano fiberler içerisine ve yüzeyine konumlanan GNP'ler çok yüsek ve çok düşük sıcaklıklara dayanabilmekte ve bir de GNP'nin iyi bir ısı iletken malzeme olması da düşünülmektedir. Yani malzeme içerisinde absorbe edilen ya da kayıp edilen ısının atılması ve/veya tekrar kazanılması sürecini hızlandırması ve bu sayede malzemeyi farklı sıcaklıklarda daha istikrarlı davranış gösterme eğilimine yöneltmesi olarak düşünülmektedir.

- % 1, 3 ve 5 GNP katkılı N6.6 ile güçlendirilmiş yapıştırma bağlantılarından aralarında en iyi kayma mukavemetine sahip olan % 3 GNP katkılı N6.6 ile güçlendirilmiş yapıştırma bağlantılarıdır. Nano partikül katkısı belirli bir seviyeden sonra topaklanma (aglegerasyon) olmasından dolayı katkı yüzdesini sınırlamaktadır. Burada kritik ve ideal oran % 3 GNP katkılıda bulunmuştur. Yalnız üretim sırasında birden fazla rastgele parametre olduğu için (çevresel şartlar, ısı, insan elinin hassasiyeti v.b.) bu oranın tam belirlenmesi için daha stabil üretim hatları ve test ortamları geliştirmek gerekmektedir.

5.2 Öneriler

- N6.6 ve ağırlıkça % 1, % 3 ve % 5 GNP katkılı N6.6 nano elyaf ile güçlendirilmiş epoksi ile yapıştırılmış tek taraflı bindirmeli bağlantıların mekanik özelliklerinde ciddi anlamda değişiklik gözlenmiştir. Ancak burada yapılan işlem malzemenin statik yükleme altındaki davranışıdır. Mekanik özelliğini gerçek manada artırdığını görebilmek için dinamik yük altında yorulma testi yapılmalıdır çünkü üretilen yapıştırıcının performansının servis ömrüne etkisi inlenmelidir.

- Bu çalışmada yapıştırılan malzeme olarak uçak gövdelerinde birbiri ile kaynatılamayacak malzemelerin (örn: alüminyum- kompozit) yapıştırılması için bir

uygulama yapılırken aynı zamanda bu uygulama alüminyum- alüminyum, kompozit-kompozit malzemeler kullanılarak da yapılabilir.

- Tek taraflı bindirmeli bağlantıların mekanik özelliklerine bakılmasına ilaveten alın-alın, kademeli, çift taraflı bindirmeli, açılı bindirme, pahlı bindirmeli bağlantı, çift taraflı takviyeli alın bağlantısı, silindirik bindirme ve soyulma gibi yapıştırma bağlantılarına da uygulanabilir.

- Bu çalışmada tek taraflı bindirmeli bağlantıların farklı sıcaklık etkisi altındaki davranışları da incelenmiştir. Bu sebeple geliştirilen yapıştırıcılar ile yapıştırılan bağlantıların servis ömrünü bulabilmek için farklı sıcaklıklarda yorulma testlerinin de yapılması gerekmektedir.

- Farklı levhaların (alüminyum- kompozit) kullanılması sebebiyle farklı sıcaklıklar altında ısıl genleşmelerinin farklı olmasından dolayı yapıştırma yüzeylerindeki gerilmeler her iki yönde aynı şekilde gerçekleşmediğinde yapıştırma bağlantısında ısıdan dolayı oluşan bir dengesizlik söz konusudur. Bu dengesizliğin yapıştırıcının üzerindeki etkisi bu çalışmada göz ardı edilmiştir. Çalışmanın devamı mahiyetinde hem alüminyumun hem de kompozitin farklı sıcaklıklar altında ısıl genleşmelerinin yapıştırma yüzeylerine etkisini belirleyebilmek için çalışma genişletilebilir.

- Çatlak karakteristiğini ve tokluk değerlerini belirleyebilmek için çift konsol kiriş testi (DCB) ve/veya çentikli üç nokta eğilme testi (ENF) gibi testlerin de farklı sıcaklıklar altında yapılması gerekmektedir.

- Bunun yanında yine çalışmanın devamı mahiyetinde sonlu elemanlar yöntemi ile yapıştırma bağlantılarının modellemesi ve mekanik test analizi yapılarak alınan sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılarak değişken parametrelerin optimizasyonu çalışması da yapılabilir.

KAYNAKLAR

Adams, R., Coppendale, J., Mallick, V. and Al-Hamdan, H., 1992, The effect of temperature on the strength of adhesive joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 12, 3, 185-90.

Adams, R. and Mallick, V., 1992, A method for the stress analysis of lap joints, *The Journal of Adhesion*, 38, 3-4, 199-217.

Adams, R. D., Comyn, J. and Wake, W. C., 1997. Structural Adhesive Joints in Engineering, Springer, p.

Adin, H., 2007, Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Ters Z Tipi Kompozit Malzemelerinin Mekanik Analizi, *Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Akderya, T., Kemiklioğlu, U. and Sayman, O., 2016, Effects of thermal ageing and impact loading on tensile properties of adhesively bonded fibre/epoxy composite joints, *Composites Part B: Engineering*, 95, 117-22.

Allman, D., 1977, A theory for elastic stresses in adhesive bonded lap joints, *The Quarterly journal of mechanics and applied mathematics*, 30, 4, 415-36.

Andrady, A. L., 2008. Science and technology of polymer nanofibers, John Wiley & Sons, p.

Arrowsmith, D., 1970, Adhesion of electroformed copper and nickel to plastic laminates, *Trans Inst Metal Finishing*, 48, 2, 88-92.

Baby, T. T. and Ramaprabhu, S., 2010, Investigation of thermal and electrical conductivity of graphene based nanofluids, *J Appl Phys*, 108, 12, 124308.

Baji, A., Mai, Y.-W., Wong, S.-C., Abtahi, M. and Du, X., 2010, Mechanical behavior of self-assembled carbon nanotube reinforced nylon 6, 6 fibers, *Compos Sci Technol*, 70, 9, 1401-9.

Baji, A., Mai, Y. W., Wong, S. C., Abtahi, M. and Chen, P., 2010, Electrospinning of polymer nanofibers: Effects on oriented morphology, structures and tensile properties, *Compos Sci Technol*, 70, 5, 703-18.

Barhate, R. S. and Ramakrishna, S., 2007, Nanofibrous filtering media: filtration problems and solutions from tiny materials, *J Membrane Sci*, 296, 1, 1-8.

Bender, D., Schuster, J. and Heider, D., 2006, Flow rate control during vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM) processing, *Compos Sci Technol*, 66, 13, 2265-71.

Bernstein, R., Derzon, D. K. and Gillen, K. T., 2005, Nylon 6.6 accelerated aging studies: thermal–oxidative degradation and its interaction with hydrolysis, *Polymer Degradation and Stability*, 88, 3, 480-8.

Bhushan, B., 2010. Springer Handbook of Nanotechnology, Springer Berlin Heidelberg, p.

Bowditch, M., Clarke, J. and Stannard, K., 1987, The strength and durability of adhesive joints made underwater, *Adhesion*, 11, 1-16.

Buer, A., Ugbolue, S. and Warner, S., 2001, Electrospinning and properties of some nanofibers, *Textile Research Journal*, 71, 4, 323-8.

Celep, Ş. and Koç, E., 2007, Nanoteknoloji ve Tekstilde Uygulama Alanları.

Chen, D. and Cheng, S., 1983, An analysis of adhesive-bonded single-lap joints, *Journal of applied mechanics*, 50, 1, 109-15.

Cheng, S., Chen, X., Hsuan, Y. G. and Li, C. Y., 2011, Reduced graphene oxide-induced polyethylene crystallization in solution and nanocomposites, *Macromolecules*, 45, 2, 993-1000.

Chronakis, I. S., 2005, Novel nanocomposites and nanoceramics based on polymer nanofibers using electrospinning process—a review, *J Mater Process Tech*, 167, 2, 283-93.

Cirel, A., Kutlu, B., Nurhan, O. and Erkan, G., 2006, Tekstilde ileri teknolojiler, *Tekstil ve Mühendis*, 13, 61.

Corporation, L., 1995. Loctite Worldwide Design Handbook: 1996-97, Loctite Corporation, p.

Crocombe, A., Adams and RD, 1981, Influence of the spew fillet and other parameters on the stress distribution in the single lap joint, *The Journal of Adhesion*, 13, 2, 141-55.

Crocombe, A. D. and Ashcroft, I. A., 2008, Simple lap joint geometry, *Modeling of Adhesively Bonded Joints*, 3-23.

Çıracı, S., Özbay, E., Gülseren, O., Demir, H., Bayındır, M., Oral, A., Senger, T., Aydınlı, A. and Dana, A., 2005, Yeni Ufuklar, Türkiye'de Nanoteknoloji, *Bilim ve Teknik Dergisi, Ağustos*.

da Cruz, D. T., Neto, A. S. and Avila, A. F., (2013). Nano-modified adhesives by graphene: the effect ageing investigation, AIAA.

da Silva, L. F., Öchsner, A. and Adams, R. D., 2011. Handbook of adhesion technology, Springer Science & Business Media, p.

Deitzel, J. M., Kleinmeyer, J., Harris, D. and Tan, N. C. B., 2001, The effect of processing variables on the morphology of electrospun nanofibers and textiles, *Polymer*, 42, 1, 261-72.

Dickinson, J., Jensen, L., Lee, S., Scudiero, L. and Langford, S., 1994, Fracto-emission and electrical transients due to interfacial failure, *Journal of adhesion science and technology*, 8, 11, 1285-309.

Ekrem, M., 2015. Karbon Nanotüp ve Polivinil Alkol Nanoelyafla Güçlendirilmiş Epoksi Yapıştırıcıların Alüminyum Bağlantılar Üzerindeki Kırılma Davranışları, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

El Naschie, M. S., 2006, Nanotechnology for the developing world, *Chaos, Solitons & Fractals*, 30, 4, 769-73.

Erdal, M. O., 2013. Elektrospin yöntemiyle termoelektrik nano yapılar üretimi ve karakterizasyonu, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Ferg, E., Gummow, R., De Kock, A. and Thackeray, M., 1994, Spinel anodes for lithium- ion batteries, *Journal of the Electrochemical Society*, 141, 11, L147-L50.

Fong, H., Liu, W. D., Wang, C. S. and Vaia, R. A., 2002, Generation of electrospun fibers of nylon 6 and nylon 6-montmorillonite nanocomposite, *Polymer*, 43, 3, 775-80.

Geim, A. K. and Novoselov, K. S., 2007, The rise of graphene, *Nature materials*, 6, 3, 183-91.

Ghanbari, E., Sayman, O., Pekbey, Y. and Ozdemir, O., 2016, Experimental analysis of single-lap composite joints with two different adhesives at various conditions, *Journal of Composite Materials*, 50, 13, 1709-15.

Gibson, P., Schreuder-Gibson, H. and Rivin, D., 2001, Transport properties of porous membranes based on electrospun nanofibers, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 187, 469-81.

Gkikas, G., Lekatou, A., Sioulas, D. and Paipetis, A., 2014, Effect of carbon nanotube enhanced adhesives on degradation of bonded joints in corrosive environments, *Plastics, Rubber and Composites*, 43, 10, 322-9.

Gojny, F. H., Wichmann, M. H., Fiedler, B. and Schulte, K., 2005, Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites–a comparative study, *Compos Sci Technol*, 65, 15, 2300-13.

Goland, M. and Reissner, E., 1944, The stresses in cemented joints, *Journal of applied mechanics*, 11, 1, A17-A27.

Grant, L., Adams, R. and da Silva, L. F., 2009, Effect of the temperature on the strength of adhesively bonded single lap and T joints for the automotive industry, *International journal of adhesion and adhesives*, 29, 5, 535-42.

Greiner, A. and Wendorff, J. H., 2007, Electrospinning: a fascinating method for the preparation of ultrathin fibers, *Angewandte Chemie International Edition*, 46, 30, 5670-703.

Guerrini, L. M., Branciforti, M. C., Canova, T. and Bretas, R. E. S., 2009, Electrospinning and characterization of polyamide 66 nanofibers with different molecular weights, *Materials Research*, 12, 2, 181-90.

Gültekin, K., Akpinar, S., Gürses, A., Eroglu, Z., Cam, S., Akbulut, H., Keskin, Z. and Ozel, A., 2016, The effects of graphene nanostructure reinforcement on the adhesive method and the graphene reinforcement ratio on the failure load in adhesively bonded joints, *Composites Part B: Engineering*, 98, 362-9.

Hagewood, J., 2004, Production of polymeric nanofibers, *International Fiber Journal*, 19, 1, 48-50.

He, J. H., Wan, Y. Q. and Yu, J. Y., 2004, Application of vibration technology to polymer electrospinning, *Int J Nonlinear Sci*, 5, 3, 253-62.

Hsiao, K.-T., Alms, J. and Advani, S. G., 2003, Use of epoxy/multiwalled carbon nanotubes as adhesives to join graphite fibre reinforced polymer composites, *Nanotechnology*, 14, 7, 791.

Hu, P., Han, X., Da Silva, L. and Li, W., 2013, Strength prediction of adhesively bonded joints under cyclic thermal loading using a cohesive zone model, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 41, 6-15.

Hu, P., Han, X., Li, W., Li, L. and Shao, Q., 2013, Research on the static strength performance of adhesive single lap joints subjected to extreme temperature environment for automotive industry, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 41, 119-26.

Huang, Z.-M., Zhang, Y.-Z., Kotaki, M. and Ramakrishna, S., 2003, A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites, *Compos Sci Technol*, 63, 15, 2223-53.

Hyer, M. W., 2009. Stress analysis of fiber-reinforced composite materials, DEStech Publications, Inc, p.

Inglis, C., 1913, Stress in a plate due to the presence of sharp corners and cracks, *Trans. Roy. Inst. Naval Architects*, 60, 219-41.

Jia, Z., Yuan, G., Ma, H.-l., Hui, D. and Lau, K.-t., 2016, Tensile properties of a polymer-based adhesive at low temperature with different strain rates, *Composites Part B: Engineering*, 87, 227-32.

Katz, J. D., 1992, Microwave Sintering of Ceramics, *Annu Rev Mater Sci*, 22, 153-70.

Kaya, F., 2004. Ana Hatlarıyla Yapıştırıcılar, İstanbul, Birsen Yayınevi, p. 240.

Kinloch, A. Relationships Between Chemistry, Microstructure And Properties Of Toughened Thermosetting Polymers. Abstracts Of Papers Of The American Chemical Society, 66-PMSE.

Kinloch, A. J., 1987. Adhesion and Adhesives: Science and Technology, Springer, p.

Kole, M. and Dey, T., 2013, Investigation of thermal conductivity, viscosity, and electrical conductivity of graphene based nanofluids, *J Appl Phys*, 113, 8, 084307.

Kozanoğlu, G., 2006, Elektrospinning Yöntemiyle Nanolif Üretim Teknolojisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.

Kut, D. and Güneşoğlu, C., 2005, Nanoteknoloji ve tekstil sektöründeki uygulamaları, *Tekstil & Teknik Dergisi, Şubat*, 224-30.

Larrondo, L. and St John Manley, R., 1981, Electrostatic fiber spinning from polymer melts. I. Experimental observations on fiber formation and properties, *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition*, 19, 6, 909-20.

Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W. and Hone, J., 2008, Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene, *science*, 321, 5887, 385-8.

Li, C. and Chou, T.-W., 2003, A structural mechanics approach for the analysis of carbon nanotubes, *International Journal of Solids and Structures*, 40, 10, 2487-99.

Li, Y., Huang, Z. and Lǔ, Y., 2006, Electrospinning of nylon-6, 66, 1010 terpolymer, *European polymer journal*, 42, 7, 1696-704.

Lian, M. K., 1998, Study of durability of epoxy bonded joints in aqueous environments.

Liljedahl, C., Crocombe, A., Wahab, M. and Ashcroft, I., 2007, Modelling the environmental degradation of adhesively bonded aluminium and composite joints using a CZM approach, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27, 6, 505-18.

Liu, S., Cheng, X., Zhang, Q., Zhang, J., Bao, J. and Guo, X., 2016, An investigation of hygrothermal effects on adhesive materials and double lap shear joints of CFRP composite laminates, *Composites Part B: Engineering*, 91, 431-40.

Luo, Q. and Tong, L., 2004, Linear and higher order displacement theories for adhesively bonded lap joints, *International journal of solids and structures*, 41, 22, 6351-81.

Ma, P. X. and Zhang, R., 1999, Synthetic nano-scale fibrous extracellular matrix, *J Biomed Mater Res*, 46, 1, 60-72.

McElvain, J., Keshavarz, M., Wang, H., Wudl, F. and Heeger, A., 1997, Fullerene-based polymer grid triodes, *J Appl Phys*, 81, 6468-72.

Meguid, S. and Sun, Y., 2004, On the tensile and shear strength of nano-reinforced composite interfaces, *Mater Design*, 25, 4, 289-96.

Naebe, M., Lin, T., Tian, W., Dai, L. M. and Wang, X. G., 2007, Effects of MWNT nanofillers on structures and properties of PVA electrospun nanofibres, *Nanotechnology*, 18, 22.

Njuguna, J., Pielichowski, K. and Alcock, J. R., 2007, Epoxy- Based Fibre Reinforced Nanocomposites, *Adv Eng Mater*, 9, 10, 835-47.

Novoselov, K., Geim, A. K., Morozov, S., Jiang, D., Katsnelson, M., Grigorieva, I., Dubonos, S. and Firsov, A., 2005, Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene, *nature*, 438, 7065, 197-200.

Oh, H. J., Kim, H. Y. and Kim, S. S., 2014, Effect of the core/shell-structured meta-aramid/epoxy nanofiber on the mechanical and thermal properties in epoxy adhesive composites by electrospinning, *The Journal of Adhesion*, 90, 9, 787-801.

Ojalvo, I. and Eidinoff, H., 1978, Bond thickness effects upon stresses in single-lap adhesive joints, *AIAA Journal*, 16, 3, 204-11.

Özdoğan, E., Demir, A. G. A. and Seventekin, N., 2006, Nanoteknoloji Ve Tekstil Uygulamalari, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 3, 2006.

Packham, D., (2005). In Handbook of adhesion second edition, Wiley Online Library.
Packham, D. E., 2006. Handbook of Adhesion, Wiley, p.
Petrie, E., 2007. Handbook of Adhesives and Sealants, McGraw-Hill Education, p.
Phong, N. T., Gabr, M. H., Okubo, K., Chuong, B. and Fujii, T., 2013, Improvement in the mechanical performances of carbon fiber/epoxy composite with addition of nano-(Polyvinyl alcohol) fibers, *Compos Struct*, 99, 380-7.
Pocius, A. V., 2012. Adhesion and Adhesives Technology: An Introduction, Hanser Publications, p.
Possart, W., 1988, Experimental and theoretical description of the electrostatic component of adhesion at polymer/metal contacts, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 8, 2, 77-83.
Professor, C. A. and William, C., 1980, Stresses in bonded connections using finite elements, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 15, 11, 1659-80.
Prolongo, S., Gude, M., Sanchez, J. and Urena, A., 2009, Nanoreinforced epoxy adhesives for aerospace industry, *The Journal of Adhesion*, 85, 4-5, 180-99.
Qian, L. and Hinestroza, J. P., 2004, Application of nanotechnology for high performance textiles, *Journal of textile and apparel, technology and management*, 4, 1, 1-7.
Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W.-E., Lim, T.-C. and Ma, Z., 2005. An introduction to electrospinning and nanofibers, World Scientific, p.
Ratna, D., 2009. Handbook of thermoset resins, ISmithers Shawbury, UK, p.
Reddy, J. N., 2006. Theory and analysis of elastic plates and shells, CRC press, p.
Reneker, D. H., Yarin, A. L., Fong, H. and Koombhongse, S., 2000, Bending instability of electrically charged liquid jets of polymer solutions in electrospinning, *J Appl Phys*, 87, 9, 4531-47.
Sayman, O., Arikan, V., Dogan, A., Soykok, I. F. and Dogan, T., 2013, Failure analysis of adhesively bonded composite joints under transverse impact and different temperatures, *Composites Part B: Engineering*, 54, 409-14.
Sayman, O., Soykok, I. F., Dogan, T., Dogan, A. and Arikan, V., 2015, Effects of axial impacts at different temperatures on failure response of adhesively bonded woven fabric glass fiber/epoxy composite joints, *Journal of Composite Materials*, 49, 11, 1331-44.
Scherzer, T., 1994, Characterization of diol modified epoxy resins by near- and mid-infrared spectroscopy, *Journal of applied polymer science*, 51, 3, 491-502.
Selbes, M., 2013. Elektro-eğirme yöntemiyle nanofiber tabakalı hava filtresi üretimi ve performans testleri, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
Shields, J., 1974. Adhesive bonding, Published for the Design Council, the British Standards Institution and the Council of Engineering Institutions by Oxford University Press, p.
Shin, Y. M., Hohman, M. M., Brenner, M. P. and Rutledge, G. C., 2001, Electrospinning: A whipping fluid jet generates submicron polymer fibers, *Appl Phys Lett*, 78, 8, 1149-51.
Soltannia, B. and Taheri, F., 2013, Static, quasi-static and high loading rate effects on graphene nano-reinforced adhesively bonded single-lap joints, *International Journal of Composite Materials*, 3, 6, 181-90.
Srinivasan, G. and Reneker, D. H., 1995, Structure and Morphology of Small-Diameter Electrospun Aramid Fibers, *Polym Int*, 36, 2, 195-201.
Stachewicz, U., Modaresifar, F., Bailey, R. J., Peijs, T. and Barber, A. H., 2012, Manufacture of void-free electrospun polymer nanofiber composites with

optimized mechanical properties, *ACS applied materials & interfaces*, 4, 5, 2577-82.

Stoller, M. D., Park, S., Zhu, Y., An, J. and Ruoff, R. S., 2008, Graphene-based ultracapacitors, *Nano letters*, 8, 10, 3498-502.

Süslü, A., 2009. Elektro-eğirme yöntemi ile nanofiber ve nanotüp üretimi, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Sydlik, S. A., Lee, J.-H., Walish, J. J., Thomas, E. L. and Swager, T. M., 2013, Epoxy functionalized multi-walled carbon nanotubes for improved adhesives, *Carbon*, 59, 109-20.

Şekercioğlu, T., 2001. Yapıştırma bağlantılarının dinamik yükler altındaki davranışlarının incelenmesi, Pamukkale Üniversitesi.

Şekercioğlu, T. and Özenç, M., 2012, MetallerİN Yapiştirilmasinda Yüzey Hazirlama YöntemlerİNİN İncelenmesİ, *Engineer & the Machinery Magazine*, 627.

Teo, W. E. and Ramakrishna, S., 2009, Electrospun nanofibers as a platform for multifunctional, hierarchically organized nanocomposite, *Compos Sci Technol*, 69, 11-12, 1804-17.

Thostenson, E. T., Li, C. and Chou, T.-W., 2005, Nanocomposites in context, *Compos Sci Technol*, 65, 3, 491-516.

Thostenson, E. T., Ren, Z. and Chou, T.-W., 2001, Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review, *Compos Sci Technol*, 61, 13, 1899-912.

Üstündağ, G., 2009, Electrospinning Yöntemi ile Biyomedikal Kullanıma Yönelik Nanolif Yüzey Üretimi ve Uygulaması, *Yüksek Lisans Tezi*.

Vietri, U., Guadagno, L., Raimondo, M., Vertuccio, L. and Lafdi, K., 2014, Nanofilled epoxy adhesive for structural aeronautic materials, *Composites Part B: Engineering*, 61, 73-83.

Volkersen, O., 1938, The rivet load distribution in lap-joints with members of constant thickness subjected to tension, *Luftfahrtforschung*, 15, 41-7.

Wang, Y., Zhang, D. and Liu, H., 2010, A study of the catalysis of cobalt hydroxide towards the oxygen reduction in alkaline media, *J Power Sources*, 195, 10, 3135-9.

Yıldırım, D., Öktem, T. and Seventekin, N., 2004, Nano Lifler, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 14, 1, 7-10.

Yu, S., Tong, M. N. and Critchlow, G., 2009, Wedge test of carbon- nanotube-reinforced epoxy adhesive joints, *Journal of Applied Polymer Science*, 111, 6, 2957-62.

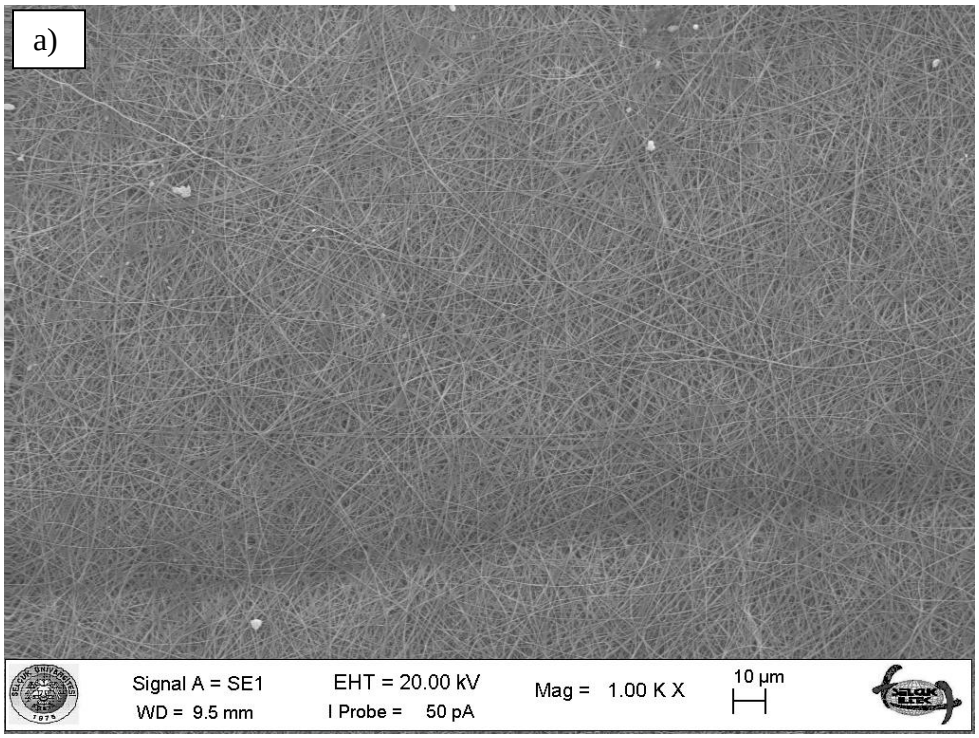
Zeleny, J., 1914, The electrical discharge from liquid points, and a hydrostatic method of measuring the electric intensity at their surfaces, *Physical Review*, 3, 2, 69.

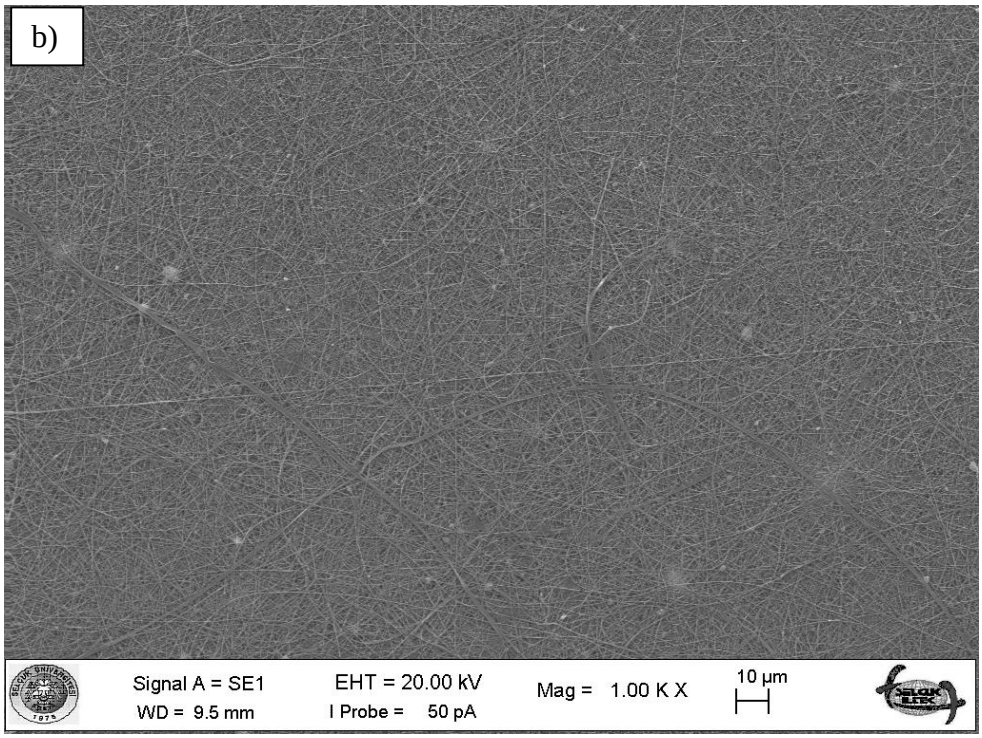
Zhang, J., Lin, T. and Wang, X. G., 2010, Electrospun nanofibre toughened carbon/epoxy composites: Effects of polyetherketone cardo (PEK-C) nanofibre diameter and interlayer thickness, *Compos Sci Technol*, 70, 11, 1660-6.

Zucchelli, A., Focarete, M. L., Gualandi, C. and Ramakrishna, S., 2011, Electrospun nanofibers for enhancing structural performance of composite materials, *Polym Advan Technol*, 22, 3, 339-49.

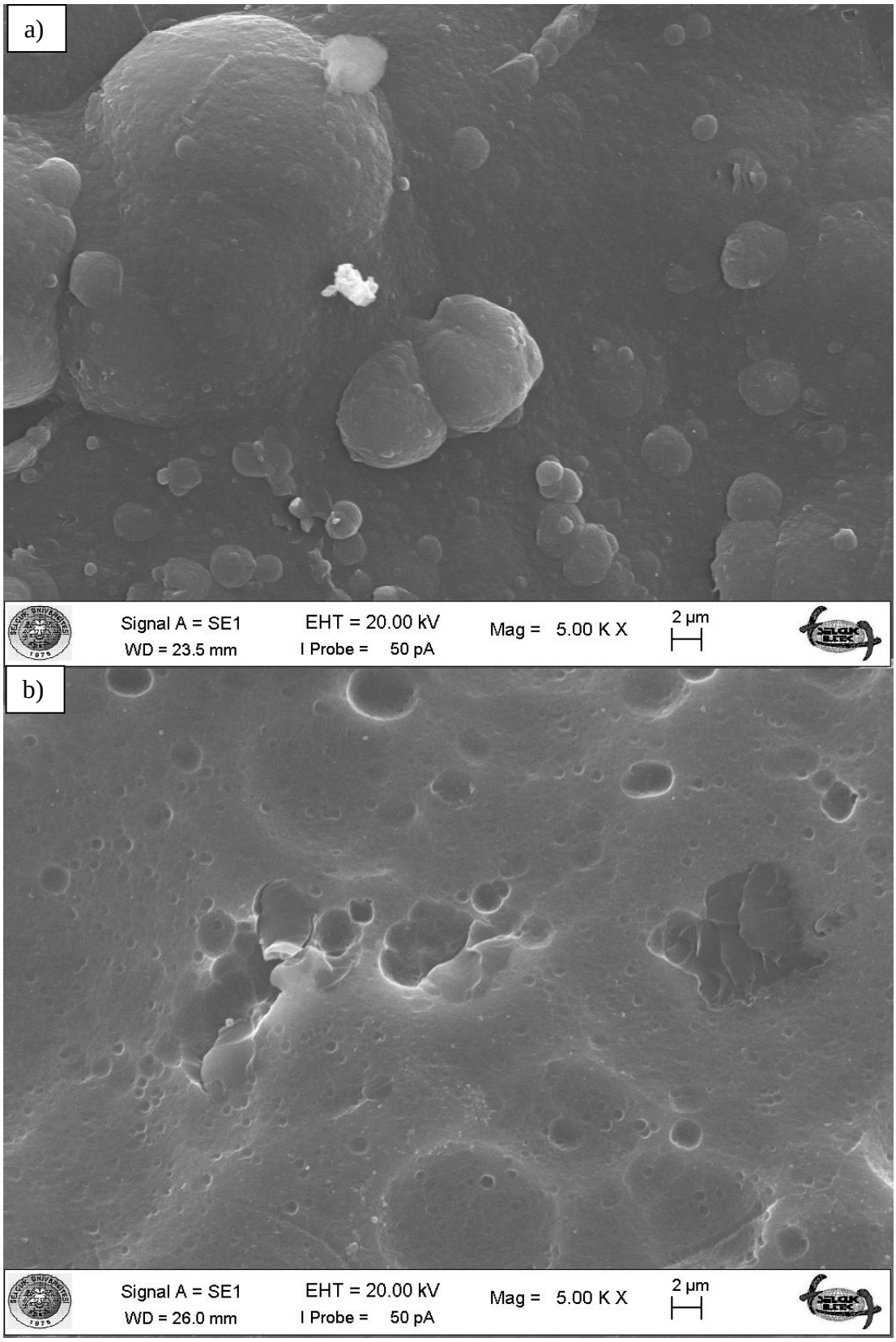
EKLER

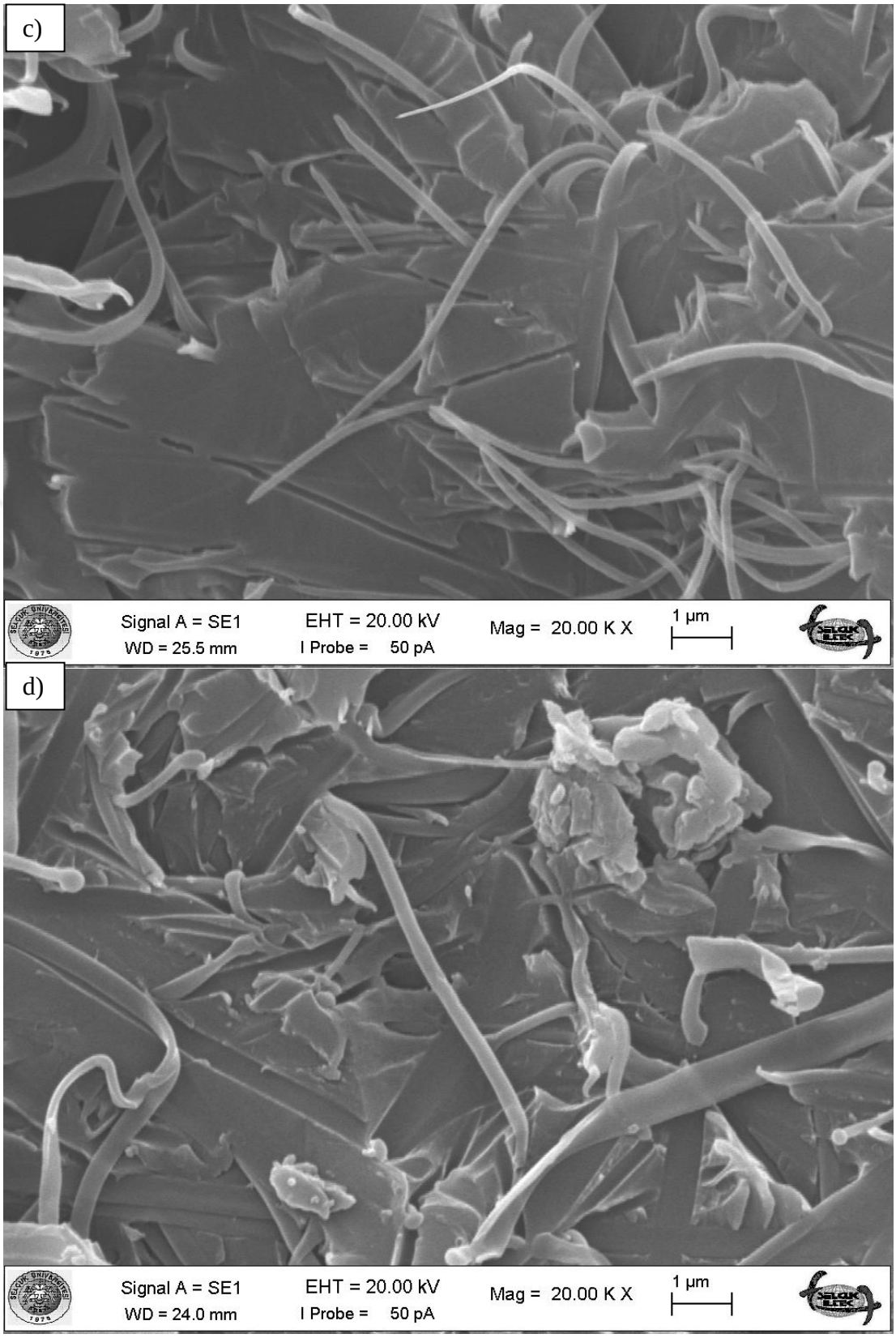
EK-1 a) N6.6 nano elyafların ve b) N6.6+% 3 GNP takviyeli nano elyafların 1 000 X büyütmeli SEM görüntüleri.

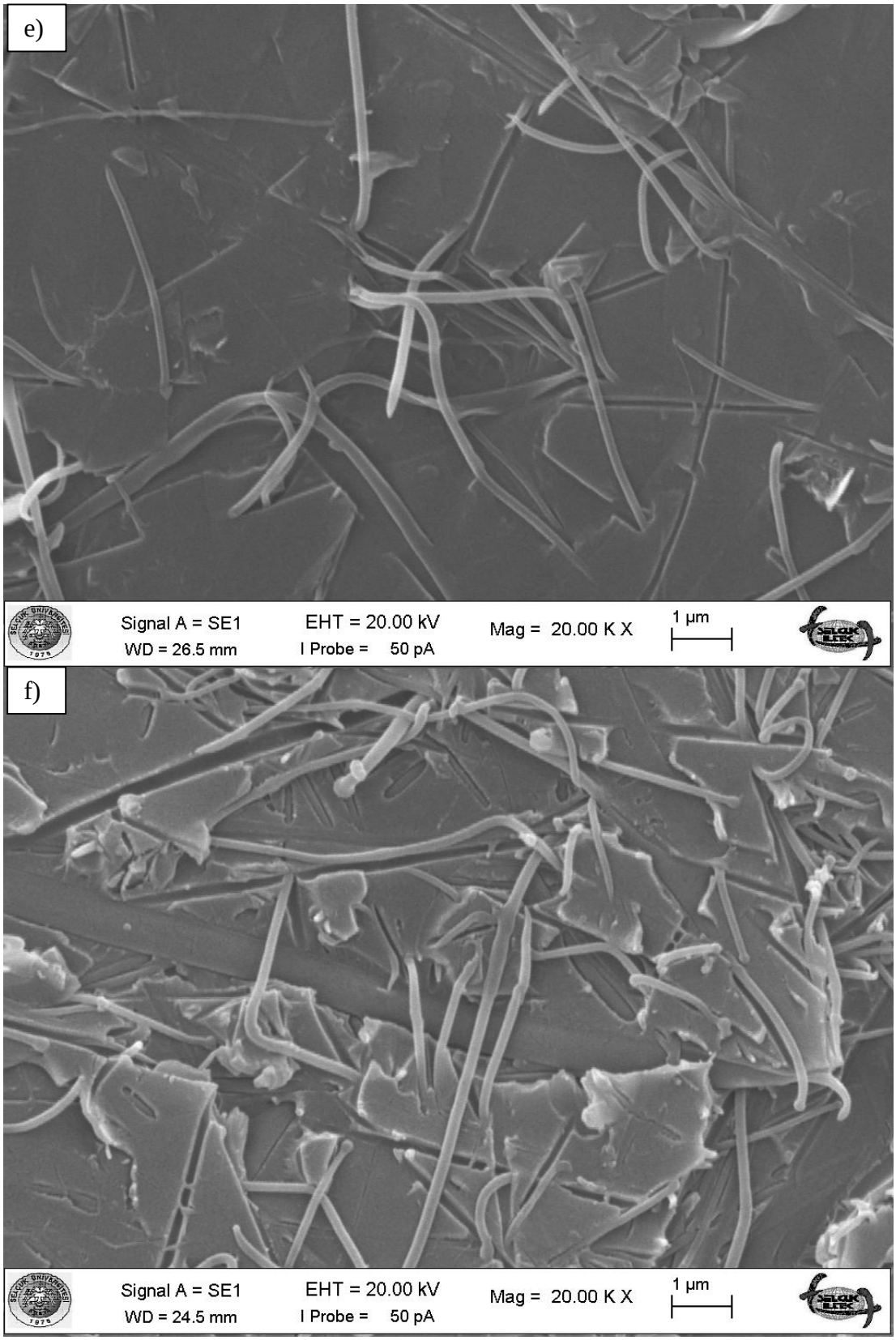




EK-2 a) Saf epoksi Al tarafı, b) Saf epoksi kompozit tarafı, c) N6.6 nano elyaf katkılı epoksi Al tarafı, d) N6.6 nano elyaf katkılı epoksi kompozit tarafı, e) N6.6+% 3 GNP takviyeli nano elyaf eklenmiş epoksi Al tarafı ve f) N6.6+% 3 GNP takviyeli nano elyaf eklenmiş epoksi kompozit tarafı kırık yüzey SEM görüntüleri




c)
Signal A = SE1
WD = 25.5 mm
EHT = 20.00 kV
I Probe = 50 pA
Mag = 20.00 K X
1 µm
d)
Signal A = SE1
WD = 24.0 mm
EHT = 20.00 kV
I Probe = 50 pA
Mag = 20.00 K X
1 µm


e)
Signal A = SE1
WD = 26.5 mm
EHT = 20.00 kV
I Probe = 50 pA
Mag = 20.00 K X
1 µm
f)
Signal A = SE1
WD = 24.5 mm
EHT = 20.00 kV
I Probe = 50 pA
Mag = 20.00 K X
1 µm

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Muhammet Ali ŞENYURT
Uyruğu	**:**	T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	SELÇUKLU- 13.05.1989
Telefon	**:**	+90 532 476 6764
Faks	**:**	-
e-mail	**:**	muhammetalisenyurt@gmail.com

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	Selçuklu Anadolu Lisesi, Selçuklu, Konya	2007
Üniversite	:	Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya	2013
Yüksek Lisans	:	Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya	
Doktora	:	-	-

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2013-2014	ANKA Otomotiv Kalıp ve Üretim A.Ş.	Üretim ve Ar-ge Mühendisi
2014-2016	Şafak İş Makineleri Sürücü Kursu	Motor Öğretmeni ve Usta Öğretici
2015	DREAM Endüstriyel Makina Otomotiv Ltd. Şti.	Ar-ge ve Aerodinamik Mühendisi
2015	AKŞA İnşaat Müteah. Tic. ve San. Ltd. Şti.	Mekanik Kontrol Mühendisi
2017	KOS Enerji A.Ş.	Yatırım ve Proje Sorumlusu

UZMANLIK ALANI

YABANCI DİLLER

İngilizce- 75.00

YAYINLAR

- Ekrem, M., **Şenyurt, M. A.**, Düzcükoğlu, H., Şahin, Ö. S., Avcı, A., 2016, The Effect Of Boron Nitride Nano Platelets Upon Wear And Thermal Stability Of Epoxy Resin, International Conference on Material Science and Technology, IMSTEC'16, Nevşehir, Turkey, 332-335.
- Ekrem, M., **Şenyurt, M. A.**, Düzcükoğlu, H., Şahin, Ö. S., Avcı, A., 2016, The Effect Of Multiwall Carbon Nanotubes Upon Wear And Thermal Stability Of Epoxy Resin, International Materials Symposium, IMSP'2016, Denizli, Turkey, 470-477.