



T.C.  
NECMETTİN ERBAKAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ALÜMİNYUM-KARBON ELYAF TAKVİYELİ  
KOMPOZİT LEVHALARIN YAPIŞTIRMA  
BAĞLANTILARINDAKİ NAYLON 6.6 NANO-  
ELYAF TAKVİYELİ YAPIŞTIRICILARIN  
FARKLI SICAKLIKLAR ALTINDAKİ DÜŞÜK  
HIZLI DARBE DAVRANIŞLARI**

**Musa YILMAZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği  
Anabilim Dalı**

**Haziran-2019  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Musa YILMAZ tarafından hazırlanan “Alüminyum-Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Levhaların Yapıştırma Bağlantılarındaki Naylon 6.6 Nano-Elyaf Takviyeli Yapıştırıcıların Farklı Sıcaklıklar Altındaki Eksenel Darbe Davranışları” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Unvanı Adı SOYADI

.....

#### Danışman

Dr. Öğretim Üyesi Mürsel EKREM

.....

#### Üye

Unvanı Adı SOYADI

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Süleyman Savaş DURDURAN  
FBE Müdürü

Bu tez çalışması TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) tarafından 215M777 nolu 1001 projesi ile desteklenmiştir.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

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

## **DECLARATION PAGE**

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

Musa YILMAZ

Tarih:

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

#### Alüminyum-Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Levhaların Yapıştırma Bağlantılarındaki Naylon 6.6 Nano-Elyaf Takviyeli Yapıştırıcıların Farklı Sıcaklıklar Altındaki Düşük Hızlı Darbe Davranışları

Musa YILMAZ

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Mürsel EKREM

2019,104 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Dr. Öğretim Üyesi Volkan ESKİZEYBEK

Dr. Öğretim Üyesi Mürsel EKREM

Bu çalışmada, Al 2024-T3 levhalar ile 8 katmanlı karbon elyaf takviyeli epoksi kompozit levhaların tek taraflı bindirmeli yapışma bağlantıları oluşturulmuş ve bu yapışma bağlantılarının düşük hızlı darbe sonrası yükleme durumları incelenmiştir. Bu amaçla, elektro eğirme yöntemiyle naylon 6.6 (N 6.6) nano elyaf ve ağırlıkça farklı miktarlarda (%1,%3 ve %5) grafen nano parçacık (GNP) takviye edilmiş nano elyaflar üretilmiştir. Yapışma bağlantısında kullanılan saf epoksi reçine, üretilen bu nano elyaflar ile takviye edilmiş ve bu kapsamda 5 farklı tipte tek taraflı bindirmeli yapışma bağlantısı üretilmiştir. Üretilen bu numunelere 5 farklı sıcaklıkta (-50°C, -20°C, 0°C, 25°C ve 50°C) düşük hızlı darbe (1,04m/s) testleri uygulanmıştır. Darbe testleri sonucunda kopmayan numunelere ASTM D1002-10 standardına uygun olarak oda sıcaklığında sabit çekme hızında çekme testleri yapılmıştır. Elde edilen veriler ve yapılan karşılaştırmalar doğrultusunda tek taraflı yapışma bağlantısında en yüksek mekanik özellikleri sağlayan takviye oranları belirlenmiş ve farklı sıcaklıkların etkisi incelenmiştir. Ayrıca üretilen nano elyafların ve çekme sonrası yapışma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yüzey morfolojisi incelenmiştir. Bunun yanında epoksi reçine ile N6.6 nanoelyaf takviyeli diğer epoksi yapıştırıcıların camsı geçiş sıcaklığı, erime sıcaklığı, termal bozunma sıcaklığı ve kütle kaybı, Termogravimetrik Analiz (TGA) ve Diferansiyel Termal Analiz (DTA) ile incelenmiştir.

Yapılan darbe deneyleri sonucunda numunelerin uygulanan 3J'lük enerjinin yaklaşık 1,5J lük kısmını absorbe ettiği görülmüştür. Darbe sonrası çekme testlerinde ise N 6.6 nanoelyaf katkılarının yapışmadaki kopma kuvvetini artırdığı görülmüştür. Düşük hızlı darbe sonrası en yüksek kopma kuvveti %1 GNP katkılı N 6.6 nanoelyaf katkılı yapıştırıcıda ve oda sıcaklığında tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektro eğirme, düşük hızlı darbe, grafen nanoparçacık, naylon 6.6 nanoelyaf, tek taraflı bindirmeli bağlantı, yapışma bağlantıları.

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

# **Low Velocity Impact Behavior of Nylon 6.6 Nanofiber Reinforced Adhesives Under Different Temperatures in Adhesive Joints of Aluminium-Carbon Fiber Reinforced Composite Sheets**

**Musa YILMAZ**

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

**Advisor: Asst. Prof. Dr. Mürsel EKREM**

**2019,104 Pages**

**Jury**

**Prof. Dr. Ahmet AVCI**

**Asst. Prof. Dr. Volkan ESKİZEYBEK**

**Asst. Prof. Dr. Mürsel EKREM**

In this study, Al 2024-T3 sheets and 8-layeres Carbon Fiber reinforced composite sheets are formed with single lap adhesive joints and after the low velocity impact loading status of these adhesive joints was investigated. For this purpose, Nylon 6.6 (N 6.6) nano fiber and N 6.6 nano fibers reinforced with graphene nano particle (GNP) in different ratios (1%, 3% and 5%) by weight of N 6.6 was produced by electro spinning method. The pure epoxy resin used in the adhesive connection is reinforced with these produced nano fiber and pure epoxy bonding as reference sample 5 different types of single lap adhesive joints were produced. Low velocity impact (3J) tests were applied to these samples at 5 different temperatures (-50°C, -20°C, 0°C, 25°C and 50°C). As a result of impact tests, under constant crosshead ratios tensile tests were carried out to unbroken samples at room temperature in accordance with ASTM D1002-10 standard. According to the obtained data and comparisons, the reinforcements providing the highest mechanical properties were determined and the effect of different temperatures were examined in the single lap adhesive joint. Also, surface morphology of the nano fibers and the surface of the adhesive joints after tensile tests was investigated by the scanning electron microscope (SEM). In addition, the glass transition temperature, melting temperature, thermal decomposition temperature and mass loss of epoxy resin and other epoxy adhesives reinforced with N6.6 nanofiber were investigated by Thermogravimetry Analysis (TGA) and Differential Thermal Analysis (DTA).

As a result of the impact tests, it was observed that the samples absorbed approximately 1.5 J of the applied 3J energy. It has been observed that N 6.6 nano fiber reinforcement increase the breaking force of the adhesion in tensile tests after impact. The highest breaking force after low-velocity impact was determined at 1% GNP reinforced N 6.6 nanofibers and at room temperature.

**Keywords:** Adhesive connections, electrospinning, graphene nano particle, low velocity impact, nylon 6.6 nano fiber, single lap joint.

## ÖNSÖZ

Tez çalışmamda ki değerli katkıları için danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Mürsel EKREM'e teşekkür ederim.

Tezle ilgili görüş ve önerileri için hocalarım Prof. Dr. Ahmet AVCI, Prof. Dr. Ömer Sinan Şahin, Doç. Dr. Necati ATABERK ve Dr. Okan DEMİR'e teşekkür ederim.

Tezle ilgili deney numunelerinin üretimi ve test aşamalarında ki yardımları için çalışma arkadaşlarım Arş. Görevlisi Ahmet Caner TATAR, Makine Mühendisi Mustafa Celaledin ÇELİKKOL ve Makine Mühendisi Nihat Erdem BERBER'e teşekkür ederim.

Ayrıca, 215M777 numaralı, "Havacılık Uygulamalarında Kullanılmak Üzere Naylon-6.6 Nanoelyaf ve Grafen Katkılı Epoksi Yapıştırıcıların Geliştirilmesi ve Mekanik Özellikleri" adlı projede maddi destek veren Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Son olarak eğitim hayatımda bu aşamalara gelmemde en büyük pay sahibi olan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Musa YILMAZ  
KONYA-2019

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>4</b>
2.1. Nanoteknoloji.....	4
2.2. Karbon Bazlı Nano Takviyeler .....	5
2.2.1. Karbon nanotüp (KNT).....	5
2.2.2. Karbon anoelyaf (KNE).....	7
2.2.3. Karbon nanosarmal (KNS) .....	7
2.2.4. Grafen .....	8
2.3. Elyaf lar ve Nanoelyaf lar .....	9
2.3.1. Elektro eğirme yöntemiyle nanoelyaf üretimi .....	11
2.3.2. N6.6 polimeri .....	16
2.4. Yapışma ve Yapıştırıcı.....	17
2.4.1. Epoksi Yapıştırıcı .....	19
2.4.2. Tek taraflı yapışma bağlantıları .....	20
2.5. Düşük Hızlı Darbe .....	20
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>23</b>
3.1. Kullanılan Malzemeler .....	23
3.2. Yöntem.....	24
3.2.1. Nanoelyaf üretimi .....	24
3.2.2. Alüminyum plakaların yüzey hazırlığı .....	28
3.2.3. Kompozit plakaların yüzey hazırlığı.....	31
3.2.4. Tek taraflı yapışma bağlantılarının oluşturulması .....	32
3.2.5. Darbe testleri.....	34
3.2.6. Çekme testleri .....	39
<b>4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....</b>	<b>41</b>
4.1. Darbe Testlerinin Sonuçları .....	41
4.1.1. Yapışma bağlantılarının -50°C'deki darbe verileri.....	41
4.1.2. Yapışma bağlantılarının -20°C'deki darbe verileri.....	46
4.1.3. Yapışma bağlantılarının 0°C'deki darbe verileri .....	48
4.1.4. Yapışma bağlantılarının 23°C'deki darbe verileri .....	51
4.1.5. Yapışma bağlantılarının 50°C'deki darbe verileri .....	53
4.1.6. Saf epoksili yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe verileri ....	56

4.1.7. N6.6 katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklardaki darbe verileri.....	58
4.1.8. N6.6+% 1 GNP katkılı yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe verileri.....	60
4.1.9. N6.6+%3 GNP katkılı yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe verileri.....	63
4.1.10. N6.6+%5 GNP katkılı yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe verileri.....	65
4.2. Darbe Sonrası Çekme Testlerinin Sonuçları.....	68
4.2.1. -50°C'deki darbe sonrası çekme verileri .....	68
4.2.2. -20°C'deki darbe sonrası çekme verileri .....	70
4.2.3. 0°C'deki darbe sonrası çekme verileri.....	72
4.2.4. 23°C'deki darbe sonrası çekme verileri.....	73
4.2.5. 50°C'deki darbe sonrası çekme verileri.....	75
4.2.6. Saf epoksili yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe sonrası çekme verileri .....	76
4.2.7. E+N6.6 katkılı yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe sonrası çekme verileri .....	78
4.2.8. E+N6.6+%1 GNP katkılı yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe sonrası çekme verileri .....	80
4.2.9. E+N6.6+%3 GNP katkılı yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe sonrası çekme verileri .....	81
4.2.10. E+N6.6+%5 GNP katkılı yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe sonrası çekme verileri .....	83
4.3. Kırılma Yüzeylerinin Analizi .....	85
4.3.1. Makroskobik görüntüler .....	85
4.3.2. Çekme sonrası SEM görüntüleri.....	87
4.4. TGA-DTA Sonuçları .....	90
4.5. Nanoelyafların SEM Görüntüleri.....	92
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>95</b>
5.1 Sonuçlar .....	95
5.2 Öneriler .....	98
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>99</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>104</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

nm	: Nanometre
°C	: Derece santigrat
N	: Newton
%	: Yüzde
W	: Watt
TPa	: Terapascal
GPa	: Gigapascal
Sc	: Scott
kV	: Kilovolt
mA	: Miliamper
m	: Vurucu başlığın kütlesi
V	: Vurucu başlığın hızı
a	: Vurucu başlığın ivmesi
g	: Yer çekimi ivmesi
h	: Vurucu ile numune arası yükseklik
E	: Darbe ile numuneye verilen enerji
t	: Zaman
J	: Numune tarafından absorbe edilen enerji
s	: deplasman (yer değişimi)
Tg	: Camı geçiş sıcaklığı
Tm	: Erime sıcaklığı

### Kısaltmalar

N 6.6	: Naylon 6.6
E	: Epoksi
ASTM	: American Society for Testing and Materials
GNP	: Grafen nano parçacık
KNT	: Karbon nanotüp
KNE	: Karbon nanoelyaf
KNS	: Karbon nanosarmal
AC	: Alternatif akım
DC	: Doğru akım
ÇCKNT	: Çok cidarlı karbon nanotüp
TCKNT	: Tek cidarlı karbon nanotüp
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı elektron mikroskobu)
TGA	: Termogravimetrik analiz
pH	: Potansiyel hidrojen
TAİ	: Türk havacılık ve uzay sanayi
TÜBİTAK	: Türkiye bilimsel ve teknolojik araştırma kurumu
İLTEK	: İleri teknoloji araştırma ve uygulama merkezi
BİTAM	: Bilim ve teknoloji araştırma ve uygulama merkezi
N 6.6+%1 GNP	: %1 grafen katkılı naylon 6.6 nanoelyaf takviyeli yapıştırıcı
N 6.6+%3 GNP	: %3 grafen katkılı naylon 6.6 nanoelyaf takviyeli yapıştırıcı
N 6.6+%5 GNP	: %5 grafen katkılı naylon 6.6 nanoelyaf takviyeli yapıştırıcı

## 1. GİRİŞ

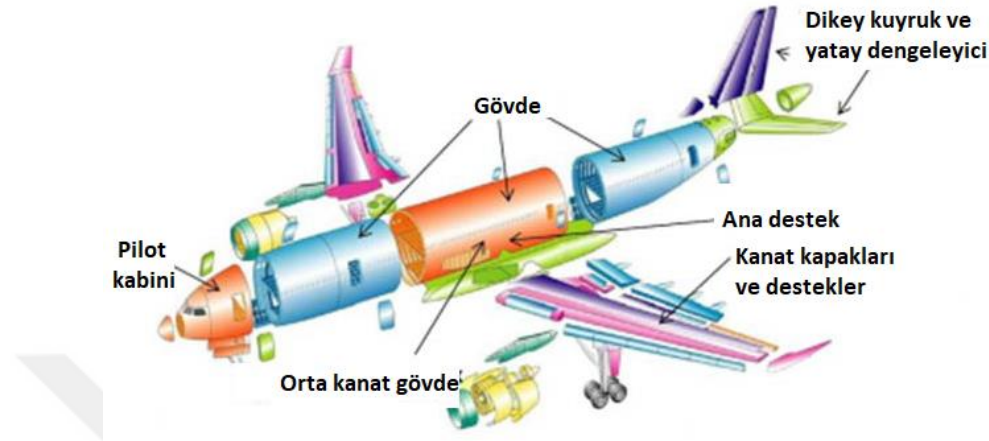
Gelişmekte olan teknoloji ile havacılık, uzay, otomotiv ve savunma sanayi gibi sektörlerde üstün özelliklere sahip malzemelere olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Kullanım yerine bağlı olarak, daha düşük tasarım ağırlığı, daha düşük maliyet ve daha basit kullanım gibi amaçlarla metal ve metal alaşımlarının yerini birbirinin zayıf yönlerini düzeltecek şekilde kompozit malzemeler almaktadır. Kompozitler, metallerle kıyaslandığında korozyona karşı daha dayanıklı ve daha iyi hasar toleranslarına sahiptir. Bu gibi sebeplerle üretilen yeni nesil birçok araç gereçte alaşımlar ve kompozitler birlikte kullanılmaktadır.

Kullanılan bu kompozitlerin mekanik, optik, iletkenlik, ısı ve kimyasal direnç gibi mevcut özelliklerinin daha da iyileştirilmesi için çalışılmalar devam etmektedir. Bu kapsamda kompozitler istenilen özelliği sağlayacak nano boyutta malzemeler ile güçlendirilmektedir. Böylece kompozitin mevcut özellikleri iyileşmekte veya kompozit sahip olmadığı yeni özellikler kazanmaktadır. Kullanılan bu kompozitlerin matris ve takviyesine bağlı olarak birçok çeşidi bulunmaktadır.

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler, plastik deformasyon sergilemeyen heterojen ve anizotropik malzemelerdir. Bu özellikleriyle özellikle uzay ve havacılık, otomotiv, denizcilik ve spor malzemeleri imalatında geniş bir yelpazede çağdaş uygulamalarda kullanılmaktadır. Takviye malzemesi olarak karbon elyaf, cam elyaf, naylon, aramid, alümina, bazalt gibi elyaf çeşitlerinin yanı sıra matris malzemesi olarak da epoksi, polietilen, poliamid, polyester gibi termoset veya termoplastik karakterde malzemeler kullanılmaktadır. Karbon elyaf ve cam elyaf takviyeli polimer kompozit malzemeleri, mükemmel mukavemet ve düşük özgül ağırlık gibi özellikleriyle diğer geleneksel elyaf takviyeli malzemelere kıyasla kullanımı giderek artmaktadır. Üstün mukavemet özellikleriyle çeşitli biçimlerde üretilebilmelerinin yanı sıra yüksek yorulma, tokluk ve yüksek sıcaklıkta aşınma ve oksidasyon direnci gibi özellikleri bu malzemeleri mühendislik uygulamalarında mükemmel bir seçim haline getirmiştir.

Yoğunluğun düşük olması uzay ve havacılık sektörü için ayrıca önem arz etmektedir. Bu kapsamda firmalar ileri kompozit kullanımını giderek artırmakta ve diğer malzemelerin de yerine kullanılmaktadır. Bu ileri kompozitlerin büyük kısmını da karbon elyaf katmanlı ve karbon elyaf sandviç kompozitler oluşturmaktadır. Böylece yakıt tüketimi ve ağırlık kaynaklı bakım masrafları azaltılmaktadır.

Şekil 1.1 Airbus 350'deki kompozit kısımları göstermektedir. Bu parçaların boyutları, kanat kapakları ve gövdeler gibi nispeten büyük kısımlardan kapılar gibi küçük parçalara kadar uzanmaktadır. Bu parçaların kalınlığı birkaç milimetreden birkaç on milimetreye kadar değişmektedir. (Hashish ve Kent, 2013).



Şekil 1. 1. Airbus 350'deki kompozit kısımlar (Hashish ve Kent, 2013)

Kompozit malzemelerin giderek artan kullanımını ve bu alanda meydana gelen hızlı değişim yapısal elemanları birleştirme tekniklerinde de etkili ve güvenilir yöntemlerin ortaya çıkmasını gerekli kılmaktadır. Malzemeleri birleştirmek ve bir bütün olarak bir arada tutmak için geçmişten bugüne birçok bağlantı elemanı geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Gelişen teknoloji ile cıvata, perçin ve çivi gibi bağlantı elemanları ile kaynak ve lehim gibi geleneksel tekniklerin yanı sıra kimyasal alandaki gelişmelerle yapıştırıcılarda alternatif olarak kullanılmaktadır. Enerji verimliliğinin önemli olduğu günümüz teknolojisinde makine elemanlarının hafifliği önemli bir parametre haline gelmiştir. Bu kapsamda malzemelerin birleştirilmesi veya kompozit malzemelerin üretiminde hafifliği ile ön plana çıkan yapıştırıcıların önemli bir rolü vardır. Kompozit ve plastik gibi farklı malzemelerin birleştirilmesinde yapıştırıcıların kullanımı giderek artmakta ve metal-metal, kompozit-metal, kompozit-kompozit gibi çeşitli yapışma bağlantıları oluşturulmaktadır.

Yapıştırıcılar; yapıştırılan malzemenin türü, yapışma şartları, kimyasal bileşenler gibi çeşitli faktörlere göre farklı şekillerde tasarlanıp üretilirler. Yapılan çalışmalar, yapışma bağlantılarının mukavemetini ve yapışma yüzeyleri ile yapıştırıcı arasındaki nüfuziyeti artırmayı hedeflemektedir. Dayanıklı ve kaliteli bir yapışma bağlantısı oluşturmak için; bağlantının yapılacağı şartlar, yapışma bağlantısının yapılacağı yerdeki çevresel etkiler iyi analiz edilmeli ve bu şartlara uygun olarak bir bağlantı tipi ve

yapıştırıcı seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca yapıştırma işlemi ve yapışma yüzeylerinin hazırlığı standartlara uygun olarak yapılmalıdır.

Yapıştırıcı alanındaki en büyük sorun laboratuvar ortamında elde edilen sonuçların kullanım sahasında aynı etkiyi gösterememesidir. Bunun en büyük sebebi yapıştırıcıların sıcaklık, nem, basınç, kimyasal gibi çeşitli çevresel faktörlere karşı aşırı duyarlılık göstererek kimyasal yapısında meydana gelen bozulmalardır (Chen ve ark., 2000).

Yapışma bağlantılarının üretiminin yanında çalışma ömrü ve çalışma esnasında uğrayabileceği hasarlara karşı vereceği tepkinde önceden bilinmesi önem kazanmaktadır. Yapışma bağlantıları gerek kullanımları gerekse bakım-onarımları esnasında darbelere maruz kalabilir. Bu durum dıştan gözle görülemezken içyapıda hasar oluşumuna sebep olabilir. Yapışma bağlantısının kullanıldığı yere göre oluşan bu hasar ani bir şekilde yıkıcı sonuçlara neden olabilir. Bu durum karşısında yapışma bağlantısının yapısal özelliğinin ve bu tür bir hasar karşısında tepkisinin nasıl olacağını önceden bilinmesi önem kazanmaktadır.

Bu tez çalışmasında, 8 katlı karbon elyaf takviyeli kompozit plakalar ile 2024-T3 alaşımlı alüminyum plakaların tek taraflı yapışma bağlantıları oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yapışma bağlantılarında yapıştırıcı olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Kullanılan epoksi reçine ayrıca saf N 6.6 nanoelyaf ve farklı oranlarda (N 6.6 ağırlığınca %1, 3 ve 5) GNP takviyeli N 6.6 nanoelyaf ile katkılanarak yapışma bağlantıları oluşturulmuştur.

Oluşturulan yapışma bağlantılarına maruz kalabileceği bir hasarı (uçığa bir kuşun çarpması, bir taşın düşmesi) modellemek amacıyla düşük hızlı darbe testleri uygulanmıştır. Bir uçığı ele aldığımızda kalktığı yerin İstanbul, varış yerinin de Kahire olduğunu varsayarsak maruz kalacağı sıcaklıklar, gökyüzünde -50°C sıcaklıklara kadar düşerken Kahire gibi çöl iklimine sahip bir yerde 50°C sıcaklıklara çıkacaktır. Bu örneği düşünerek yapılan darbe testleri -50, -20, 0, 23 ve 50°C olmak üzere 5 farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir.

Darbe sonrası kopmayan yapışma bağlantılarına kopma yüklerini tespit etmek için oda sıcaklığında ASTM D1002-10 standardına uygun olarak çekme testleri yapılmıştır. Bu çalışma 215M777 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında ki çalışmaların bir parçası olup yapıştırma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe sonrası kayma dayanımı incelenmiştir. Bu çalışmayla bağlantılı diğer yayımlara da ayrıca bakılabilir (Açık, 2017; Şenyurt, 2017; Polat ve ark., 2018).

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Nanoteknoloji

Nano yapılar uzunluk olarak 10-100 atomluk yaklaşık  $10^{-9}$  metreye karşılık gelen yapılardır. İnsan saç teli çapının yaklaşık 100 bin nanometre olduğu düşünüldüğünde ne denli küçük bir ölçekten bahsedildiği daha iyi anlaşılacaktır. Nanoteknoloji; bir malzemenin nano boyutta atomik mühendisliğinin yapılarak bu boyuttaki fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerinin anlaşılması ile yepyeni özelliklerin ortaya çıkarılarak daha fonksiyonel malzemelerin, cihazların ve sistemlerin üretilmesidir.

Günümüzde malzemeyi nano ölçekte işleyerek ve ortaya çıkan özgün özellikleri kullanarak yeni malzemeler üretilmektedir. Örneğin; özellikle havacılık sektöründe kullanımı giderek artan nano kompozitler bu teknoloji vasıtasıyla üretilmekte ve kullanılmaktadır (Dhumpa ve Foster, 2018). Nano kompozit yapısının anlaşılmasında temel morfolojik özellik, takviye edilen malzemenin yüzey alanı / hacim oranıdır. Parçacıklarda nano boyuta inildiğinde özelliklerinde etkileyici değişiklikler gözlenir. Nano parçacıklar sahip oldukları hacme kıyasla oldukça büyük yüzey alanına sahiptir. Birçok önemli kimyasal ve fiziksel özelliğin, malzemenin içyapısındaki parçacıkların yüzey özellikleri tarafından etkilendiği bilindiğine göre bir malzemenin daha küçük parçacıkları daha büyük olanlara kıyasla farklı özellikler gösterecektir (Ekrem, 2015). Genel olarak, nano takviyeler kullanarak kompozitlerin mekanik, elektriksel ve ısı özelliklerini iyileştirip çok daha işlevsel malzemeler elde etmek amaçlanmaktadır (Gojny ve ark., 2005; Maccaferri ve ark., 2019). Son zamanlarda yapılan birçok çalışma, nano takviyelerin kompozit matrisi üzerindeki etkisine odaklanmıştır. (Fiedler ve ark., 2006) ile (Hussain ve ark., 2006) nano takviyeli polimerler üzerine yapılan çalışmaların kapsamlı incelemelerini sunmuşlardır.

Gelişmiş malzemelerin sentezinde karbon bazlı nano takviyelerin kullanılması artık popüler bir yöntemdir (Gao ve ark., 2016; Liu ve ark., 2017). Son zamanlarda kompozitler, yeni nesil uçaklarda uçağın merkezi kirişi ya da uçağın merkezi kanat kutusu gibi kritik kısımlarında kullanılmaktadır (Tyler ve Stockett, 2018). Bu kompozitler, mekanik özellikleri bakımından sınırlarlarına ulaşmış ve nano ölçekte takviye edilerek güçlendirilmesi için çalışmalar yapılmaktadır. Nano parçacıkların hacimlerine kıyasla oldukça büyük yüzey alanları sayesinde yükün matristen nano

parçacığa aktarılması kolaylaşarak matrisin dolayısıyla kompozitin mekanik özellikleri iyileşecektir (Njuguna ve ark., 2007).

## 2.2. Karbon Bazlı Nano Takviyeler

Karbon harika özelliklere sahip bir elementtir ve allatropoları birçok formda bulunabilir. Yapay teknikler kullanılarak nanometre boyutunda karbon nanotüpler (Agarwal ve ark., 2018), parçacıklar (elmas benzeri nano parçacıklar) (Arora ve ark., 2001), nanoelyaflar (Zhou ve ark., 2016; Hughes ve ark., 2018) ve sarmal şekilli karbon nano elyaflar (Yang ve ark., 2005a) gibi çeşitli biçimlerde düzenlenebilir.

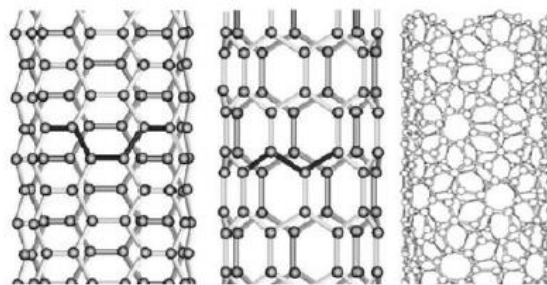
Bu çalışmada karbon elyaf takviyeli kompozitler kullanıldığı için karşılaştırma yapabilmek adına karbon nanotüp, karbon nanoelyaf ve karbon nanosarmal takviyeleri işlenmiştir. Çizelge 2.1’de kompozitlere takviye için kullanılan karbon nanotüp (KNT), karbon nanoelyaf (KNE) ve karbon nanosarmal (KNS) nano ölçekli malzemelerin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2. 1. Karbon bazlı nano takviyelerin (Karbon nanotüp, karbon nanoelyaf, karbon nanosarmal) özellikleri (Lubineau ve Rahaman, 2012)

Malzeme Özellikleri	KNT	KNE	KNS
Young modülü (TPa)	1-1,2	0,5	0,1
Çekme dayanımı (GPa)	11-100	3	-
Kırılma deformasyonu (%)	10-15	≈1	-
Isıl iletkenlik (W/mK)	2980	1900	-
Elektriksel iletkenlik (Sc/m)	1850	≈1000	180

### 2.2.1. Karbon nanotüp (KNT)

KNT'ler (Şekil 2.1), endüstriyel uygulamalardaki muazzam potansiyelleri nedeniyle birçok bilim insanının dikkatini çeken kristal karbon malzemelerdir.



Şekil 2. 1. Grafik levhalarının farklı tiplerde nanotüp oluşumunun şematik görünümü (Ma ve ark., 2010)

Tüp eksenini etrafında yuvarlanan eşmerkezli grafit levhaların sayısına göre tek cidarlı karbon nanotüp (TCKNT) veya çok cidarlı karbon nanotüp (ÇCKNT) olabilirler. İlk olarak 1991'de Iijima tarafından (O'connell, 2018) ÇCKNT'ler olarak daha sonra geçiş metallerinin (Fe, Co ve Ni) varlığında TCKNT'ler olarak keşfedilmişlerdir. Laboratuvarında başarılı bir şekilde sentezlenen ilk tüp biçimindeki karbon nanoyapıları olan ÇCKNT'ler, 0.34 nm'lik bir ara tabaka boşluğunda ve uçları kapatılmış 10-100 nm çapa sahip yarım küre biçimindeki grafit silindirlerinin eş eksenli katmanlarından oluşmuştur. TCKNT'ler, sadece bir grafit tabakasının yuvarlatılmasıyla oluştuğu için ÇCKNT'e kıyasla çok daha dayanıklıdır (Fan, 2007). ÇCKNT'ler iç içe geçmiş eş merkezli grafit tabakalarından oluştuğu için bu grafit silindirlerinin birbiri içinde kayabilme ihtimali dayanımlarını düşürür.

Karbon nanotüpler, elektrik ark boşaltma tekniği, lazerle aşındırma ve kimyasal buharla çökeltme gibi çeşitli yöntemlerle üretilebilir. Elektrik ark boşaltma ve lazerle aşındırma yöntemlerinde katı halde bulunan grafit, karbon kaynağı olarak kullanılmakta olup bu yöntemlerde yüksek sıcaklık ve basınç söz konusudur. Kimyasal buharla çökeltme tekniğinde ise karbon kaynağı olarak geleneksel gazlar kullanılmakta olup günümüzde özellikle üzerinde durulan bir yöntemdir.

KNT'lerin mükemmel özelliklerinden takviye malzemesi olarak faydalanabilmek için polimer matris içerisine homojen bir şekilde dağıtılması gerekmektedir. Homojen dağılım matris ile KNT arasındaki yük aktarımının verimli bir şekilde yapılabilmesi için gereklidir. KNT'lerin matris içerisinde homojen dağıtılmasının yanında matris ile ara yüz etkileşiminin artırılması performansı etkileyen en önemli faktörlerden biridir.

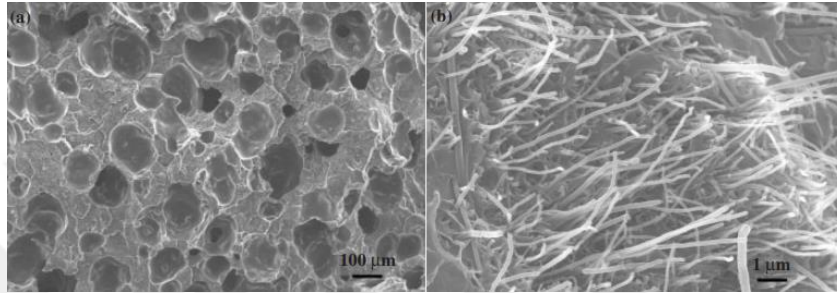
KNT'lerin hacimlerine kıyasla büyük yüzey alanlarına sahip oluşu van der Waals kuvvetlerinin KNT'yi bir arada tutmasına ve kümelenmesine neden olmaktadır. Bu durum malzemenin KNT ile takviyelenmesine rağmen mekanik özelliklerinin iyileştirilememesinde ki en önemli etken olarak karşımıza çıkmaktadır. Homojen dağılım sorununu çözmek için polimerin türüne ve viskozitesine bağlı olarak çözelti karıştırma (Tang ve ark., 2013), eriyik karıştırma (Kim ve Kim, 2006), doğal durumunda polimerizasyon (Ma ve ark., 2009) gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır.

Bu yöntemlerden de en yaygın olarak kullanılanı çözelti karıştırma yöntemidir. Bu yöntemde KNT'ler uygun bir çözücü içinde manyetik çalkalama ya da ultrasonik karıştırma vasıtasıyla çözülür. Daha sonra çözünmüş KNT oda sıcaklığında ya da daha yüksek sıcaklıklarda polimer matrisi ile karıştırılır. Sonuç olarak nanokompozit bu

karışım kullanılarak üretilir. Termoset reçinelerden olan epoksi polimerinin kullanıldığı epoksi/KNT kompozitlerin homojen dağılımı için genellikle çözelti karıştırma yöntemi kullanılır.

### 2.2.2. Karbon anoelyaf (KNE)

KNE'ler (Şekil 2.2) genellikle, 10 ila 200 nm arasında değişen çaplarda, 0.335 nm (Terrones, 2003) ile ayrılan çok küçük grafit tabakalardan oluşan silindirik veya konik yapılar olarak tanımlanmaktadır.

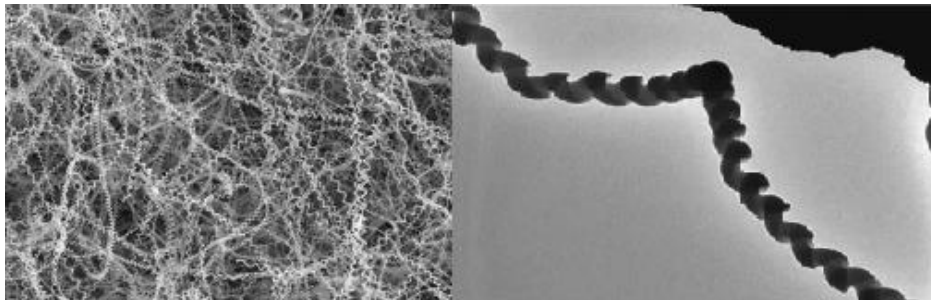


Şekil 2. 2. Karbon nanoelyaf (Yang ve ark., 2005b)

Eşsiz mekanik, elektriksel, kimyasal ve fiziksel özelliklere sahiptirler. KNE'lerin içyapısı değişkendir ve grafit tabakalarının farklı dizilişlerinden oluşur. KNT'lerin sahip olduğu silindirik kümes telli yapısına sahip değildir; bunun yerine, çeşitli açılardan istiflenmiş grafit katmanlarından amorf karbona kadar karbon formlarının karışımından oluşur. Bu değişken yapı nedeniyle, KNE'ler saf KNT'lerin gücünü göstermezler, ancak yine de oldukça güçlü olabilirler ve nanoteknoloji için gerekli olan diğer faydalı özelliklere sahip olabilirler.

### 2.2.3. Karbon nanosarmal (KNS)

3B sarmal yapıya sahip KNS'lerin (Şekil 2.3) oluşturulduğu KNE'lerin çapı 50-200 nm, KNS'ın sarmal çapı 100-1000 nm ve sarmal adımı 10-500 nm'dir (Yang ve ark., 2005a).



Şekil 2. 3. Nanosarmal (Yang ve ark., 2005a; Lubineau ve Rahaman, 2012)

Dunlap (Dunlap, 1992) ile Ihara ve diğ. (Ihara ve ark., 1993) KNS'lerin varlığını öngörmek için moleküler dinamik simülasyonlar kullanmıştır. Amelinckx ve diğ. (Amelinckx ve ark., 1994) kimyasal buhar biriktirme (KBB) kullanarak bir geçiş metali (Co) katalizörü varlığında hidrokarbonların termal olarak ayrışması yoluyla KNS'lar üretmiştir.

Reaksiyonda kullanılan katalizörün boyutuna, şekline ve doğasına bağlı olarak, KNS'lar, tek sarmal bükümlü KNS'lar veya tek sarmallı yay benzeri KNS'lar gibi çeşitli biçimlerde oluşurlar (Chen ve ark., 2003). Çeşitli tipte KNS'lar hazırlanmıştır ve şimdiye kadar elde edilen en küçük sarmal çapı yaklaşık 12 nm'dir. KNS'ların yapısı, morfolojisi ve büyüklüğü katalizör ve biriktirme koşulları tarafından belirlenir. Pan ve diğ. (Pan ve ark., 2002) tarafından katalizör olarak demir kaplı indiyum kalay oksit kullanarak KNS'ların sentezi rapor edilmiştir. Varadan ve Xie (Varadan ve Xie, 2002) katalizör olarak Ni parçacıklarını kullanarak KNS'lari başarıyla hazırlamışlardır.

#### 2.2.4. Grafen

Karbon elementinin bal peteği örgülü yapıları olan grafen, iki boyutlu sp<sup>2</sup> bağlı karbon atomlarının hegzagonal latiste bir araya gelmesiyle oluşmuş tek tabakalı yapılardır. Bu iki boyutlu malzeme, altı adet karbon halkalarının bir araya gelmesiyle oluşan nanokarbon tabakalarıdır. Grafen karbon nanotüp ve fullerenden oldukça farklı olup, sıra dışı özelliklere sahiptir. İdeal grafen yapısı tek tabakalı olmalıdır. Fakat birkaç tabakaya sahip yapılar da eşit öneme sahiptir (Randviir ve ark., 2014).

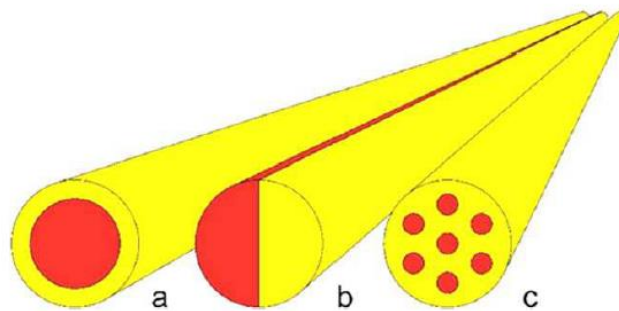
İdeal, bir tek tabakalı grafenin tahmin edilen yüzey alanı 2600 m<sup>2</sup> /gr, kalınlığı 1-2 nm, termal iletkenliği 4840-5300 W/(m<sup>2</sup>K), gerçek yoğunluğu 2.25 g/cm<sup>3</sup> , elastisite modülü 1 TPa' dır (Savage, 2012; Randviir ve ark., 2014).

Karbon atomlarının iki boyutlu altıgen bir yapıda dizilmiş bu formu, doğada iki boyutlu tek malzeme örneğini oluşturmasının yanı sıra, grafene olağanüstü özellikler de kazandırmaktadır. Dijital teknolojide önemli bir noktada bulunan silisyum, grafen ile karşılaştırıldığında, elektronların silisyum içindeki hızlarının, grafen içindeki hızlarına göre 100 kez daha yavaş olduğu tespit edilmiştir. Grafenin elektrik özellikleri bu sıra dışı malzemenin tek olağanüstü özelliği değildir. Bilinen en ince malzeme olmasının yanında, güçlü karbon bağları, grafeni bilinen en güçlü malzeme de yapmaktadır. Grafenin elastisite modülü, çelikten yaklaşık 100 kat daha fazla olup, ısıyı iyi iletmediği düşünülen diğer bir karbon allotropu olan elmadan daha iyi bir ısı iletkenidir. Ayrıca grafen, kolayca esneyebilmekte ve değişik formlardaki birçok malzemenin yüzeyine

kolayca kaplanabilmektedir. Tüm bu sebeplerden dolayı grafen, dünyada çok önemli değişikliklere sebep olabilecek bir malzeme olarak görülmektedir (Adams ve ark., 2010; Savage, 2012).

### 2.3. Elyaf lar ve Nanoelyaf lar

Elyaf lar, doğal veya sentetik kaynaklardan üretilebilen çok yönlü kullanım alanına sahip malzemelerdir. Sentetik elyaf lar günümüzde insan hayatında önemli bir rol oynamaktadır (Kotek, 2008). Sentetik elyaf ların değiştirilebilen kabiliyetleri sayesinde hava yastığı, lastik kordon, filtreler (Wootton ve Staff, 2001), taşıyıcı bantlar (Wang ve ark., 2016), kompozit güçlendirmeleri ve optik gibi geniş bir uygulama alanı vardır. Bu uygulamalarda yüksek mukavemet, yangına dayanıklılık, ısı yalıtımı gibi farklı özellikler göz önünde bulundurulur. Eriterek eğirme (Rawal ve Mukhopadhyay, 2014), kuru eğirme ve farklı polimerlerden çözelti eğirme (Hofmann ve ark., 2018) gibi bazı yerleşmiş yöntemler vardır. Eğirme yöntemi polimerin özelliklerine ve ayrıca istenen son elyaf ın performansına bağlıdır. Üretilen elyaf lar, bir, iki veya daha fazla malzemeden oluşan katı, oyuk, delta veya diğer enine kesitlere sahip olabilir. Çok bileşenli elyaf lar, iki veya daha fazla farklı termoplastik veya termoset polimer malzemenin mekanik, fiziksel veya kimyasal özelliklerinden yararlanılarak üretilen yeni elyaf larıdır (Naeimirad ve Zadhoush, 2018). Malzemeler, işleme yönteminin yanı sıra nihai uygulama amaçlarına göre seçilmelidir. Eğirme ile üretilen iki bileşenli elyaf larıda çözünmüş iki farklı polimerin her biri eğirmenin çıkışında, çekirdek / kabuk (C / S veya çekirdek / kılıf), yan yana (S / S) veya denizdeki adalar (I / S) gibi istenen biçimleri oluşturmak için farklı enine kesitlerle taşınır (Şekil 2.4). Bu elyaf lar, iki bileşenli elyaf ların üretiminde kullanılan polimerlerin doğasına bağlı olarak iletkenlik ve kendiliğinden kıvrılma gibi farklı özellikler sergiler

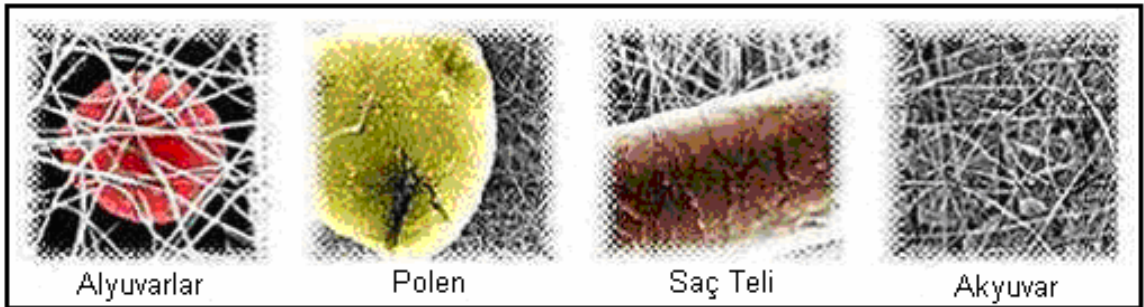


Şekil 2. 4. İki bileşenli elyaf ların şematik gösterimi: (a) C / S, (b) S / S ve (c) I / S.

Bahsedilen biçimler arasında, C / S kesiti iki bileşenli elyaflar için en yaygın tiptir, burada çekirdek olarak kullanılan polimer istenen fiziksel özellikleri sağlarken, kılıftaki polimer elyafa özel bir işlevsellik kazandırır. Bahsedilen biçimler arasında, C / S kesiti iki bileşenli elyaflar için en yaygın tiptir, burada çekirdek olarak kullanılan polimer istenen fiziksel özellikleri sağlarken, kılıftaki polimer elyafa özel bir işlevsellik kazandırır (Leal ve ark., 2016).

İki ana polimere ek olarak, eğirme işlemi sırasında belirli fonksiyonlara sahip bazı dolgu maddeleri de eklenebilir. C / S çift bileşenli kompozit elyaflarda anti bakteriyel iletkenlik ve alevlenmeyi geciktiricilik gibi özellikler vermek için nano malzemelerin kullanılması yaygın bir fikirdir (Liu ve ark., 2015; Ahangaran ve ark., 2017; Vahidifar ve ark., 2018).

Ek olarak nano elyaflar (Şekil 2.5) gibi mikroskobik elyaflar filtrasyon (Kim ve ark., 2015), nanokompozitler (Prakobna ve ark., 2015), doku mühendisliği (Perez ve Kim, 2015), ilaç dağıtımı ve diğer biyolojik çalışmalar (Persano ve ark., 2013) gibi çeşitli uygulamalar için kullanılmaktadır.



Şekil 2. 5. Nanoelyafların farklı yapılarla karşılaştırılması (Dinç, 2013)

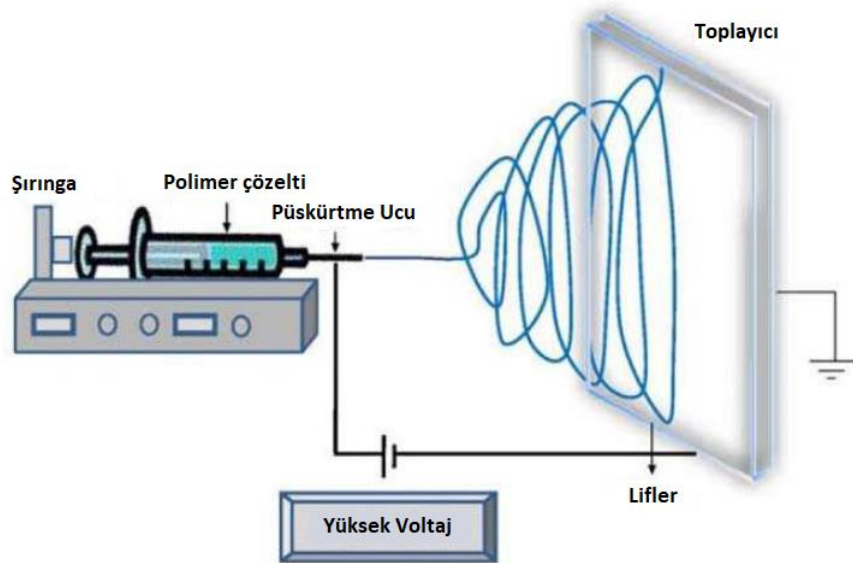
Ayrıca nano elyaflar, elektro eğirme (Beran ve ark., 2018), elektro püskürtme (Beran ve ark., 2018), gaz püskürtme işlemi (Rajgarhia ve Jana, 2017), ve santrifüj eğirme (Zhang ve Lu, 2014) gibi çeşitli teknikler kullanılarak farklı kesitlerde üretilir. Son yıllarda, daha iyi özelliklere sahip yüksek performanslı nano elyaf üretmek için elektro eğirme ve diğer yöntemlerde birçok yenilik yapılmıştır. Çok fazla dikkat çeken ve çeşitli uygulamalarıyla büyük umut vaat eden bu yeniliklerden biri, iki farklı polimerin özelliklerinden faydalanarak ortak eksenli elektro eğirme ve çözelti elektro eğirme kullanılarak C / S çift bileşenli nano elyaf yapılarının hazırlanmasıdır (Tian ve ark., 2015). Ortak eksenli elektro eğirme yönteminde iki farklı malzeme (çözünmüş), ortak eksenli bir kılcaldan birbirinden bağımsız olarak beslenir ve C / S yapısında nano

lifleri imal etmek için çekilir. Nano ölçekte gelişmekte olan ve bir tanesinin diğerinin etrafına sarılı olduğu ya da bir tanesinin diğerinin matrisinde kapsüllendiği C/S biçimindeki malzemeler biyolojik, mekanik, elektriksel gibi birçok uygulamada büyük bir potansiyel göstermektedir (Wei ve ark., 2014). Mikro akışkanlar ve biyoteknoloji gibi yeni üretim yöntemleri ve uygulamaların gelişmesiyle iki bileşenli elyaflı malzemelerin önemi hızla artmaktadır. Yeni uygulamalar ve yeni yapılar için performansların geliştirilmesi amacıyla iki bileşenli elyaflar ve nano elyaflar üzerinde çok sayıda çalışma yapılmaktadır.

### 2.3.1. Elektro eğirme yöntemiyle nanoelyaf üretimi

Polimer çözeltilerden nanoelyaf üretmek için en yaygın kullanılan yöntem elektro eğirme yöntemidir. Uzun ve kesintisiz nanoelyafların üretilebilmesi ve işlemin tekrarlanabilirliği, üzerinde en çok çalışılan ve en çok geliştirilen yöntem olmasını sağlamaktadır. Elektro eğirme yöntemi; polimer kimyası, akışkanlar dinamiği, temel fizik, elektrik fiziği gibi birçok disiplini barındıran bir yöntemdir. Bu yöntemle, yüksek voltajla elektriksel alan oluşturularak çözelti halindeki polimerden nanolifler 3 nm'den 1  $\mu\text{m}$  ye kadar değişen kalınlıklarda üretilebilir.

Elektro eğirme yönteminde ilk olarak polimerin uygun bir çözücünde çözündürülmesi ya da ısıyla eritilerek hazırlanması gerekmektedir. Böylece bu çözelti cam bir pipete ya da şırıngaya konularak elektro eğirme düzeneğinde kullanılabilir (Haider ve ark., 2018).



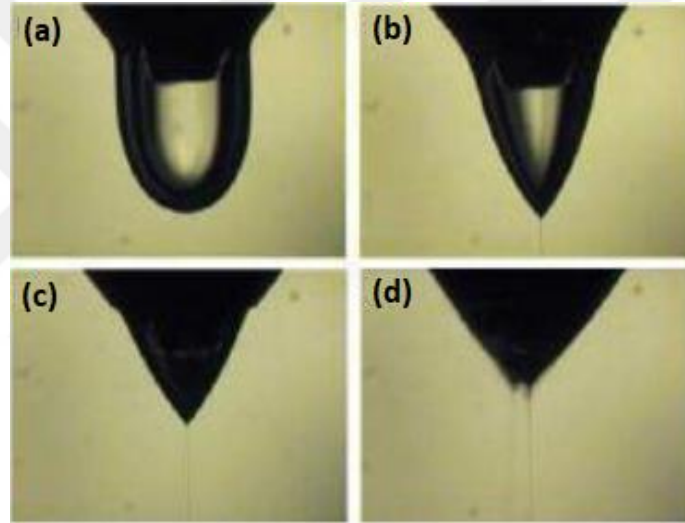
Şekil 2. 6. Elektro eğirme deney düzeneği şematik görünüm

Elektro eğirme yönteminde kullanılan deney düzeneğinde (Şekil 2.6) 3 ana kısım bulunmaktadır;

- Yüksek Voltaj (güç kaynağı),
- Besleme Ünitesi (şırınga),
- Toplayıcı (plaka ya da döner silindir)

Bu teknikte, polimer uygun çözücüde çözüldükten sonra besleme ünitesine (şırınga) alınır. Daha sonra besleme ünitesi ile toplayıcı (plaka ya da döner silindir) arasında yüksek gerilim yardımıyla elektriksel alan oluşturulur. Yüksek gerilim oluşturmak için 1-100 kV ve 1-100 mA aralıklarında AC/DC güç kaynağı kullanılır.

Elektro eğirme işlemi sırasında besleme ünitesindeki şırınga ucundan çıkan polimere yer çekimi, yüzey gerilimi ve elektriksel gerilim kuvvetleri etki eder.



Şekil 2. 7. Besleme ünitesi şırınga çıkışı Talor konisinin oluşumu a)yarı küresel polimer damlası, b)Taylor konisi, c)dengeli polimer jeti, d)dengesiz polimer jeti (Dinç, 2013)

Elektriksel alanın etkisiyle yüzey geriliminin uyguladığı kuvvetlerden dolayı besleme ünitesindeki polimer, şırınga ucunda belirli bir kritik değere kadar yarı küresel bir biçimde polimer damlası olarak asılı kalır. Uygulanan potansiyel fark eşik değere ulaştığında elektrostatik kuvvetler yüzey kuvvetlerine eşitlenir ve küresel biçimdeki polimer damlası şekil değiştirerek Taylor konisi adı verilen biçimi alır. Polimer damlası Taylor konisi biçimini aldıktan sonra voltajdaki çok küçük bir artışla koni ucundan bir jet meydana gelir. Elektriklenmiş olan bu jet uzayarak hızla toplayıcıya doğru hareket eder. Bu jetin hızla uzaması ile çözelti içindeki çözücüde hızla buharlaşır ve ipliksi yapıdaki jetin kalınlığı nanometre boyutunda inceler. Böylece toplayıcıda biriktirilen bu uzun ve sürekli lifler nanoelyafi oluşturur (Khalf ve Madihally, 2017).

Elektroegirme yöntemiyle üretilen nanoelyafların morfolojik yapısı kullanılabilirliğini etkileyen önemli bir faktördür. Bu nedenle kullanım yerine ve kullanım şartlarına uygun nanoelyaflar üretmek için elektroegirme yöntemini etkileyen faktörlerin belirlenerek optimize edilmesi son derece önemlidir.

Bu parametreler;

- Elektroegirmede kullanılan polimer çözeltisinin özellikleri (molekül ağırlığı, viskozite, yoğunluk, çözücünün dielektrik sabiti, elektrik iletkenliği, yüzey gerilimi, , pH),
- Elektroegirme süreci ile ilgili parametreler (uygulanan voltaj, toplayıcı ile iğne arasındaki mesafe, polimer çözeltisi besleme hızı, polimer sıcaklığı, toplayıcı çeşidi),
- Elektroegirmenin yapıldığı ortam koşulları (sıcaklık, nem, basınç) olarak üç ana kısma ayrılmaktadır (Chen ve ark., 2016).

Çizelge 2.2’de elektroegirme işlemini etkileyen parametrelerin nanoelyaf morfolojisine etkileri özetlenmektedir.

Elektroegirme işleminin verimli bir şekilde gerçekleşmesi için öncelikle kullanılan polimer çözeltisinin uygun molekül ağırlığında olması gerekir çünkü molekül ağırlığı viskozite ve çözelti yoğunluğu gibi diğer parametrelerle doğrudan ilişkilidir. Polimerin molekül ağırlığının artırılması polimerin zincir uzunluğunun artmasıyla viskozitenin artmasına neden olur. Bu surum elektroegirme esnasında oluşan polimer jetinin de karmaşıklaşmasına ve sonuç olarak oluşan liflerin kalınlaşmasına neden olur. Ayrıca boncuk oluşumunda azalma oluşur (Mihindukulasuriya, 2012).

Elektroegirmede kesintisiz ve düzeli lifler üretebilmek için polimer çözeltisinin yoğunluğunun ve viskozitenin belirli bir uyumda olması gerekmektedir. Yoğunluğun çok düşük olması elektroegirme ile lif oluşturmak için yeterli viskozitenin olmadığını gösterir ve şırınga ucundan damlamalara neden olabilir. Yoğunluğun çok fazla artırılması ise şırınga ucunda tıkanıklığa ve boncuklaşmaya neden olabileceği gibi şırınga ucunu tamamen tıkararak elektroegirme işleminin durmasına neden olabilir (Haider ve ark., 2018).

Yüzey gerilimi; viskozite ile doğru, çözelti yoğunluğu ile ters orantılı olarak artıp azalma eğilimi gösterir. Yüzey geriliminin artırılması polimer çözeltisinin birim hacimdeki yüzey alanını azaltma etkisine sahip oluşu çözücü moleküllerinin bir araya

toplanarak çözeltinin damlacıklara dönüşmesine neden olmaktadır. Bu durum üretilen liflerde boncuk oluşumuna neden olmaktadır (Chen ve ark., 2016).

Çizelge 2. 2. Elektroğirme işlemini etkileyen parametreler

Parametreler	Nanoelyaf Yapısına Etkileri
<u>Polimer Çözeltisinin Özellikleri</u>	
Molekül ağırlığı artarsa	Viskozite artar
Polimer yoğunluğu artarsa	Lif çapı artar
Viskozite artarsa	Lif çapı artar
Elektriksel iletkenlik artarsa	Lif çapı azalır
pH artarsa	Boncuklu yapı oluşur.
Dielektrik sabiti artarsa	Boncuklaşma ve lif çapı azalır
<u>Proses Parametreleri</u>	
Uygulanan voltaj artarsa	Lif çapı başlangıçta azalır, sonra artar
Akış hızı artarsa	Boncuklaşma ve lif çapı artar.
Toplayıcı çeşidi	Örgülü, düzgün, sıralı lifler üretilir.
Çözelti sıcaklığı artarsa	Lif çapı azalır
Toplayıcı - şırınga ucu arası mesafe azalır	Boncuklaşma görülür.
<u>Ortam Koşulları</u>	
Ortam sıcaklığı artarsa	Lif çapı azalır
Ortam nemi artarsa	Lif çapı artar

Elektroğirme işleminde, polimer çözeltisinin jetler halinde çekilebilmesi için bir iletkenliğe sahip olması gerekmektedir. İletkenliğe sahip olmayan polimer çözeltilerden lif oluşumu yapılamazken aşırı yüksek iletkenliğe sahip polimer çözeltilerinde ise Toyler konisi oluşturarak jet oluşturmak yerine çoklu jet oluşumu görülmektedir. Ancak çözelti iletkenliğinin diğer parametrelerle uyumlu olarak belli bir oranda artırılması lif çapının düşürülmesini sağlamaktadır.

Yapılan çalışmalarda çözeltinin pH değişikliğinin çözeltideki iletkenliğini de değiştirdiği görülmüştür. Asidik çözeltilerde polimerdeki proton fazlalığından kaynaklı olarak çözeltinin boncuklaşmaya neden olduğu bazik çözeltilerde ise daha düzgün ve ince liflerin oluştuğu belirtilmiştir (Beypazar, 2013).

Dielektrik sabiti çözeltinin bünyesinde hapsedebildiği elektrik yükünün miktarını ifade etmekte olup çözeltideki elektrik yükünün eşit ve homojen dağılımında

etkilidir. Dielektrik sabitinin artmasıyla, elektrik yükü polimer çözelti içerisinde daha homojen dağılır ve düzenli nanoliflerin oluşmasını sağlar böylece boncuk sayısı ve nanolif çapı azalırken birim alanda daha çok nanolif toplanmasını sağlar (Beypazar, 2013).

Elektroegirme yönteminde, nanolif üretebilmek için polimer çözeltiye belli bir voltaj değerinin uygulanması gereklidir. Uygulanan voltaj değerinin artmasıyla iletken özellikteki polimer çözelti elektriksel yüklerle yüklenerek çekilmesi kolaylaşır. Ancak değer devamlı artması jet oluşumunun kararsızlaşmasına ve nanolif çapının artmasına hatta boncuklaşmaya neden olmaktadır (Haider ve ark., 2018).

Besleme hızının fazla artırılması şırınga ucundan damlamalara neden olarak Taylor konisinin oluşumunu engeller. Besleme hızının çok düşük olması ise yine Taylor konisinin oluşumunu engellerken şırınga ucunda kurumaya neden olarak işlemin durmasına neden olabilir.

Toplayıcı ile şırınga arası mesafenin artırılması polimer jetinin havada kalış süresini artırır. Bu durum çözelti içerisindeki çözücünün tamamen buharlaşmasını ve polimer çözeltisinin kuruyarak incelesini sağlamaktadır. Mesafenin daraltılması polimer çözeltinin kurumadan toplatıcıya ulaşmasına neden olur. Bu durum boncuklaşmaya ve kalın nanoliflerin oluşmasına neden olur (Mirjalili ve Zohoori, 2016).

Çözeltinin yoğunluğu sabit tutulup sıcaklığı artırılırsa polimer zincirleri arası etkileşimin düşmesine ve zincirler arası mesafenin açılmasına neden olacağı için viskoziteyi düşürür. Ayrıca çözelti sıcaklığının artması çözücünün buharlaşmasını artıracığı için lif çapının incelmelerini sağlar (SIRIN ve ark., 2013).

Elektroegirmede farklı toplayıcılar kullanarak liflerin konumlanmasına bağlı olarak farklı yüzey özelliklerine sahip nanoelyaflar üretilmektedir. Örneğin; sabit düz plakada nanolifler rastgele toplanırken döner silindirik toplatıcıda belli bir yönelime sahip daha homejen dağılmış nanoelyaflar üretilmektedir. Toplayıcıda liflerin daha orantılı dağılması ve gözenekliliğin daha kontrollü yapılması için hareketli toplayıcılar tercih edilmektedir (Haider ve ark., 2018).

Elektroegirme işleminde ortam sıcaklığı artırılırsa çözelti içerisindeki çözücünün buharlaşması artacağından daha kuru ve daha ince lifler elde edilecektir. Fakat ortam nemi artarsa lifler tam olarak kuruyamadan toplayıcıya ulaşır ve elyaf üzerinde gözeneklilik ve topaklanma oluşacağı gibi lif çapında da artış gözlenir (Beypazar, 2013).

### 2.3.2. N6.6 polimeri

Yüksek sertlik, tokluk, aşınma direnci ve ısıl şekil değiştirme sıcaklığı değerlerine göre N-6,6 poliamidler içerisinde en iyisidir. Ayrıca çeşitli fiberler karıştırılarak daha yüksek mekanik özellikte kompozit malzemelerin elde edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Rajesh ve ark., 2002; Zhao ve ark., 2006).

N-6,6, etkili dielektrik özellikleri sayesinde, elektrik endüstrisinde, özellikle de izolasyon ve güç iletiminde kullanılmaktadır. Ayrıca, çatlak direnci, hacim ve yüzey direnci gibi üstün özelliklerinden dolayı geniş uygulama alanı bulunmaktadır. N-6,6 üzerine uygulanan kuvvet kaldırıldığında, eğer hidrojen bağları kırılmamışsa malzeme yine eski halini kolaylıkla almaktadır. Bu özelliği polimere esneklik özelliği kazandırmaktadır.

N-6,6, kristalin bölgesinin oranı % 65-85 gibi yüksek olduğu için, su molekülü ile ilişki kurabilecek fonksiyonel grupların sayısı da az olduğundan, %100 bağıl nemde en fazla % 4-4.5 nem çeker. Kristalin bölge oranının fazlalığının yanında amorf bölgelerdeki karbonil ve imino grupları arasında da H-bağları oluşabildiğinden, bu yapı naylon 6,6'yı dayanıklı kılar. Fakat ıslandığında amorf bölgelerdeki H- bağlarının büyük bir kısmı su molekülleri tarafından hidroliz edildiğinden dayanıklılığı azalmaktadır. Kopmadan %25-30 kadar uzama, %4 kadar uzatılmışsa geriye dönme oranının % 100 olması, N-6,6'nın uzama ve esneklik özelliklerinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. N-6,6'ya bu özelliği sağlayan, kuvvetli H-bağlarının oluşturduğu düzgün şebeke sistemidir. Zincirler arasındaki H-bağları çok kısa mesafeler içinde olması, polimerleri kaymaya karşı koruyarak, optimum dayanıklılık göstermesini sağlar (Baser, 1992).

Naylon bilyalar seyreltik mineral asitlerde ve organik asitlerin çoğunda çözülmez. Alkali, benzin ve benzin ürünleri, gresler, organik olmayan tuzlu çözeltiler, düşük dereceli alkoller, motor yağı, şanzıman sıvıları, metanol, ketonlar, esterler. Sert asit ve bazlara dayanmaz. Nano elyaf üretimi için hazırlanan çözeltilerde formik asit ve kloroform kullanılarak karışım yapılmakta ve Naylon 6.6'nın tam çözünmesi sağlanarak çözelti hazırlanmaktadır. Sonraki kısımlarda bu şekilde hazırlanan çözelti ve bu çözeltiyle üretilen nano-elyaflar ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Çizelge 2.3'te Naylon 6.6 (PA 66)'nın teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2. 3. Naylon 6.6'nın teknik özellikleri

Özellik	Sembol	Ölçü birimi	Tip	Not	Değerler
Yoğunluk	$\delta$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Fiziksel	Ortam sıc.	1,11
Young Modülü	E	[MPa]	Mekanik	-	2500
Sürtünme katsayısı	$\mu$	-	Mekanik	Ortam sıc.	0,25
Nem emme	Aw	%	Fiziksel	24 h	2,1
Lineer ısıl genişleme katsayısı	$\alpha$	[10 <sup>-6</sup> /°C]	Termik	( $\Delta T=0-100^\circ C$ )	87,5
Termik iletkenlik	$\lambda$	[W/(m·K)]	Termik	Ortam sıc.	0,25
Hacim direnci	$\rho$	[ $\Omega \cdot m$ ]	Elektrik	-	> 10 <sup>13</sup>
Bağıl mıknatıs geçirgenliği	$\mu$	-	Manyetik	Diyamanyetik	<~1

#### 2.4. Yapışma ve Yapıştırıcı

Geleneksel birleştirme yöntemlerine göre uygulama kolaylığı, düşük maliyeti ve hafiflikleri sayesinde özellikle kompozit malzemeleri birleştirmede yapıştırıcıların kullanımı artmıştır. Yapışma, bir yapıştırıcı kullanılarak malzemeler arasında çekim oluşturma işlemidir. Bu işlem; uygun bir yapıştırıcıyı, yapıştırılacak malzemeleri ve bu malzemelere uygun yüzey hazırlığı işlemlerini kapsamaktadır. İyi bir yapışma sağlamak ve yüksek performans elde etmek için yukarıdaki faktörlerin göz önüne katılması gerekir.

İyi bir yapışmanın temel gereksinimleri aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Kullanım yerine uygun bir bağlantı tipi seçilmelidir,
- Uygun bir yapıştırıcı seçilmelidir,
- Yapıştırmada kullanılacak malzemeler belirlenmeli ve gerekli yüzey hazırlıkları yapılmalıdır.
- Yapıştırılacak yüzeylerin ıslanabilirliği,
- Yapışmanın tamamlanması için gerekli süreçler (kürleme) işlemleridir.

Yapışma işleminin kullanımının giderek artmasıyla bu yöntemin avantaj ve dezavantajları da önem kazanmakta ve bu konuda yoğun bir şekilde çalışmalar yürütülmektedir.

Yapışma bağlantılarının avantaj ve dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir(Ebnesajjad, 2010);

### **Avantajları;**

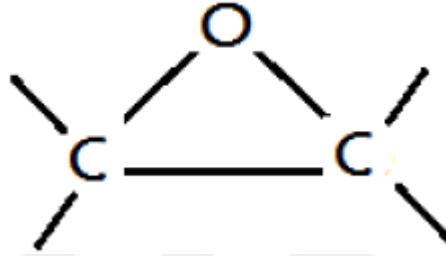
- Aynı veya farklı malzemelerin birleştirilmesinde kullanılabilir,
- Herhangi bir şekilde ki ince veya kalın bir malzemenin birleştirilmesinde kullanılabilir,
- Termal(kaynak, lehim) ve mekanik(cıvata, perçin) gibi birleştirme yöntemlerinde karşılaşılan gerilme yığılmaları ile karşılaşılmaz ve tüm yapışma alanı içerisinde düzenli bir gerilim dağılımı görülür,
- Yapıştırılan malzemelerin özelliklerini bozmaz,
- Farklı malzemeler arasında ki elektrokimyasal korozyonu engeller veya en aza indirger,
- Sızdırmazlık elemanı olarak kullanılabilir,
- Isı ve elektriği iletmez (kullanım gereği aranan bir özellikse yapıştırıcı bu özellikleri sağlayacak şekilde geliştirilebilir),
- Yüksek miktarda dayanım/ağırlık oranına sahiptir,
- Maliyeti düşük bir yöntemdir,
- Uygulanabilirliği ve kullanımı kolaydır,
- Kullanılan sistemdeki toplam ağırlığını azaltır,
- Darbe titreşimi sönümlene kabiliyetine sahiptir.

### **Dezavantajları;**

- Yapıştırılan malzeme şeffaf olmadıkça yapıştırma alanının incelenmesine imkân vermez,
- Verimli bir yapışma elde etmek için dikkatli yüzey hazırlığı işlemleri gerektirir,
- Uzun kürleşme sürelerine ihtiyaç olabilir,
- Yüksek sıcaklıklarda özelliklerini kaybettikleri için yüksek sıcaklıklarda kullanılamazlar ancak yüksek sıcaklıklara dayanıklı olup maliyeti yüksek yapıştırıcılarda vardır,
- Yapışma bağlantılarının ömrü kullanıldıkları çevre şartlarına göre değişir,
- Düşük darbe ve soyulma dayanımlarına sahiptir.

### 2.4.1. Epoksi Yapıştırıcı

Epoksi reçine, yüksek yapıştırma gücü ve başarılı kimyasal direnci ile bilinen ve termoset polimer grubunda yer alan plastik bir yapıştırıcıdır. Suya, alkaliye ve aside direnci çok iyidir ve bu özelliği dolayısıyla kullanım alanları oldukça geniştir. Çeşitli amaçlar için birçok endüstriyel uygulamada kullanılır. Diğer reçine türlerinden daha yüksek mekanik özelliklere ve daha fazla termal ve kimyasal dirence sahiptir. Epoksi reçineler, monomer biçimlerinde iki veya daha fazla oksiran (epoksit grubu) halkası ile karakterize edilmiş yapıştırıcılardır. (Ratna, 2009). Bu halkalar (Şekil 2.8), çok yönlü yapısal özellikleri sayesinde çapraz bağlanmış bileşikler oluşturan reaksiyonlara katılabilirler.



Şekil 2. 8. Epoksit halkası

Epoksit yapıştırıcılar, birçok farklı tipteki malzemenin yapıştırılmasında yaygın olarak kullanılan çok yönlü bir yapıştırıcıdır. Bu kapsamda; titanyum ve alaşımları, alüminyum ve alaşımları, fiber takviyeli plastikler (termoset ve termoplastik kompozitler), düşük ve yüksek karbon çelikleri, bakır, nikel, cam, beton ve ahşaplar gibi malzemelerin hepsinde kullanılmaktadır. Böylece bu malzeme havacılık, otomotiv, mobilya, inşaat gibi geniş bir yelpazede kullanılabilir. Böylece bu malzeme havacılık, otomotiv, mobilya, inşaat gibi geniş bir yelpazede kullanılabilir.

Dezavantaj olarak ise, bu reçine tipi yüksek çapraz bağlantılar oluşturarak moleküler hareketi zorlaştırılmalarından dolayı düşük enerji emilimine ve dolayısıyla düşük kırılma tokluğuna sahiptir. Ancak üstün özellikleri nedeniyle bu dezavantajı çözmek amacıyla çalışmalar yürütülmekte ve epoksi reçine çeşitli malzemeler ile katkılanarak iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda epoksi reçinelerin; karbon naotüpler (Ekrem, 2015), grafen nanoparçacıklar (Şenyurt, 2017) ve fullerenler gibi nano malzemeler ile veya bu malzemelerle takviyeli nanoelyaflarla takviyelendirilerek iyileştirilmesi üzerine çalışmalar yoğun olarak yapılmaktadır.

### 2.4.2. Tek taraflı yapışma bağlantıları

Yapışma bağlantısı, bağlantının kullanılacağı yere, oluşacak gerilme ve yüklere uygun şekilde, özel olarak tasarlanmalıdır. Bağlantı tasarımı genelde iki ana faktöre bağlıdır (Adin, 2007).

- Yapışma bağlantısının çalışma esnasında maruz kalabileceği yüklere,
- Kullanılan malzemeye ve bağlantının oluşturulabilme kolaylığı bağlıdır.

Eğer oluşturulan yapışma bağlantısı maruz kalacağı yüklere ve çalışma şartlarına uygun olarak tasarlanır ve iyi bir yapışma işlemi gerçekleştirilirse; civata, perçin ya da kaynak gibi geleneksel yöntemlerden bile daha dayanıklı bir birleştirme yapılabilir.

Bu tez çalışmasında tek taraflı yapışma bağlantısı (Şekil 2.9) hazırlanmış ve bu bağlantıya ilk aşamada düşük hızlı darbe, sonrasında ise çekme testleri uygulanmıştır.



Şekil 2. 9. Tek taraflı yapışma bağlantısı

Bu yapışma bağlantısı kullanılan yapıştırıcıların kayma dayanımını maksimum verimde analiz edebilmek amacıyla seçilmiştir. Kayma gerilmesi, yapıştırılan malzeme ayırmak için zorlandığında yapıştırıcının düzlemine paralel kuvvetler ile sonuçlanır ve kayma yükleri yapıştırılan alanın tümüne düzgün etki eder. Bu tür yüklemelerde yapışma alanının tamamının etki altında olması bağlantı ömrünü arttırarak ekonomiklik sağlar ve pratikte yaygın olarak kullanılır. Mümkün olduğu yerlerde bağlantılar yükün büyük bir kısmı kayma yükü olarak iletilebilecek şekilde oluşturulmalıdır. Çünkü yapıştırıcılar genellikle bağlı alanın tümünde bağlantı mukavemetine katkı sağladığından dolayı kayma gerilmesi altında çok kuvvetlidir (Petrie, 1975).

### 2.5. Düşük Hızlı Darbe

Bu tez çalışmasında, yapıştırmak için alüminyum ve nanoelyaf katkılı kompozit plakalar kullanılmış ve yapışma bağlantısına kompozit yüzey üzerinden düşük hızlı darbe uygulanmıştır. Ayrıca nanoelyaf katkılı epoksi yapıştırıcılar kullanılmış ve bunların darbe direnci araştırılmıştır. Bu epoksi yapıştırıcılar da elyaf katkılı oldukları için bir tür tek nanoelyaf katmanlı kompozit tabakası olarak değerlendirilebilir. Bu yüzden düşük hızlı darbe ile yapılan deneylerde darbe hasarı ve karakteristiği önemli bir yere sahiptir.

Darbe hasarı metal malzemelerde yüzeyden başladığı için tespit edilmesi kolaydır ancak kompozit malzemelerde hasar darbe almamış yüzeyden başlar ya da iç kısımlarda şekil değişimi olarak ortaya çıkar. Metal malzemeler süneklikleri sayesinde yüksek miktarda enerji absorbe edebilirler bu nedenle darbe hasarı metal malzemeler için bir tehdit değildir ancak kompozit malzemelerde çok farklı tiplerde hasara neden olabildikleri gibi tespit edilmesi de zordur.

Kompozit malzemelerde tabakalar arası kayma dayanımı ve tokluğun zayıf oluşu bu malzemelerin yüksek birim şekil değişimi hızına sahip uygulamalarda kullanımını sınırlamaktadır (Soliman ve ark., 2012). Ayrıca kompozit malzemelerin birçoğu gevrekler ve darbe enerjisini elastik deformasyon yoluyla ya da hasar mekanizmaları ile absorbe edebilirler. Bu nedenle genellikle darbe sonrası matris çatlağı oluşumu ve bu çatlağın ilerlemesi şeklinde hasar oluşumu beklenir (Ulus ve ark., 2016). Bununla birlikte, düşük hızlı darbe esnasındaki baskın hasar modu delaminasyondur (şekil değişimi). Delaminasyonlar genellikle kuvvetin etkisiyle matris çatlaklarının büyümesi ve birbirini köprülemesiyle ortaya çıkar. Delaminasyonların büyümesi ise darbe esnasında tabakaların eğilmesiyle ortaya çıkan tabakalar arası kayma gerilmelerinden (Mod II) kaynaklanır.

Malzeme içerisinde meydana gelen hasar, darbe esnasındaki elde edilen kuvvet verilerinden çıkarılabilir. Örneğin, bölgesel bir hasar kuvvet-zaman eğrisinin eğimindeki değişim olarak kendisini gösterir, bu da temas rijitliğinin ifadesidir. (Ulus ve ark., 2016).

Darbe testinin sonucunda; kuvvet-zaman, kuvvet-şekil değişimi ve enerji zaman eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler, aşağıdaki parametreler ve hesaplamalar kullanılarak excel programında hazırlanmıştır.

### **Parametreler;**

- $m= 5,6$  kg (vurucu başlığın sabit kütlesi)
- $E= 3J$  (deneme yanılma ile bulunan darbe enerjisi)
- Kuvvet ve zaman verileri deney cihazından elde edildi.
- $h=5,45$ cm (kompozit ile vurucu başlık arası mesafe)
- $V=1,035$  m/s (vurucu başlığın numuneye temas hızı)

**Hesaplamalar:**

- $\frac{1}{2}mV^2 = mgh$  .....Denklem 1
- $I_i = \int_0^{t_f} F dt = \sum_0^{t_f} \frac{t_2+t_1}{2} * (F_2 - F_1)$  .....Denklem 2
- $a = \frac{F}{m} = kt + c$  ..... Denklem 3
- $k_i = \frac{a_i - a_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$  ..... Denklem 4
- $c_i = \frac{t_i a_{i-1} - t_{i-1} a_i}{t_i - t_{i-1}}$  ..... Denklem 5
- $V = V_0 - \frac{1}{2}k(t^2 - t_0^2) - c(t - t_0)$  .....Denklem 6
- $s = s_0 - \frac{1}{6}k(t^3 - t_0^3) - \frac{1}{2}c(t^2 - t_0^2) + (v_0 + ct_0 + \frac{1}{2}kt_0^2)(t - t_0)$  ...Denklem 7

**İfadeler:**

- |                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| • m: vurucu başlığın kütlesi (kg)   | • a: vurucu başlığın ivmesi ( $m/s^2$ ) |
| • V: vurucu başlığın hızı (m/s)     | • t: zaman (s)                          |
| • g: yer çekimi ivmesi ( $m/s^2$ )  | • J: absorbe edilen enerji (J)          |
| • h: numune ile vurucu arası mesafe | • s: şekil değişimi (m)                 |
| • E: darbe ile verilen enerji (J)   |   |

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez kapsamında çalışmalara elektro eğirme yöntemiyle N 6.6 nanoelyafların üretilmesiyle başlanmıştır. Saf N 6.6 nanoelyafların yanı sıra %1,3 ve 5 GNP katkılı N 6.6 nanoelyaflar üretilmiştir. Üretilen nanoelyaflar yapışma bölgesi ebatlarında (20x25mm) kesilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir.

Alüminyum (Al 2024-T3 alaşım) plakalar ve 8 kat 0°/90° düz dokuma kumaş Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit plakalar, tek taraflı yapıştırma bağlantıları oluşturmak için sırasıyla ASTM D1002-10 ve ASTM D5868-01 standartlarına göre kesilmiştir. Kesilen bu plakalara yapıştırma öncesi sırasıyla ASTM D3933-98 fosforik asit anotlama ve ASTM D2093-03 standartlarına göre yüzey hazırlama yöntemleri uygulanmıştır.

Hazırlanan plakaların tek taraflı yapışma bağlantıları, yapışma kalınlığını (0,2mm) elde edebilmek amacıyla özel olarak tasarlanmış kalıp kullanılarak imal edilmiştir.

Hazırlanan tek taraflı yapışma bağlantılarına ilk olarak farklı sıcaklıklarda (-50, -20, 0, 25 ve 50°C) düşük hızlı darbe testleri (1,04m/s) uygulanmıştır. Burada yapışma bağlantısının maruz kalabileceği darbe hasarının (bir taşın çarpması ya da uçağa bir kuşun çarpması gibi) modellenmesi amaçlanmıştır. Darbe sonrasında kopmayan numunelere oda sıcaklığında ASTM D1002-10 standardına uygun olarak çekme testleri uygulanmıştır. Burada, darbe sonrası numunelerin kayma dayanımının nasıl değiştiğinin tespiti amaçlanmıştır.

#### 3.1. Kullanılan Malzemeler

Nanoelyafların üretiminde, plakaların yüzey hazırlıklarında ve yapışma bağlantılarının oluşturulması aşamalarında çeşitli malzemeler kullanılmıştır. Bu malzemeleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz;

- Naylon 6.6 (granül halinde)
- Alüminyum (Al 2024-T3 alaşım) plaka (TAİ)
- 8 kat karbon elyaf takviyeli kompozit plaka (IZOREEL)
- Epoksi reçine (HEXION,L285)
- Epoksi sertleştirici (HEXION,H285)
- Sodyum Hidroksit Boncuk (Farma Kalite) Extra pure TK.170510.01002

- Fosforik Asit 85,0 % ( Gıda Tipi ) Extra pure TK.140360.01001
- Sülfürik Asit 95-98 % Extra pure TK.170581.02501 2,5lt.
- Aseton 99,5 % Extra pure TK.010050.05001
- Sodyum Dikromat Dihidrat Extra pure TK.170550.01002
- Formik Asit
- Kloroform
- Grafen Nano Parçacık (GNP)

### 3.2. Yöntem

Tek taraflı yapışma bağlantılarının oluşturulmasını ve testleri kapsayan tüm çalışmaları 6 ana kısma ayırabiliriz. Bunlar; nanoelyafların üretimi, alüminyum plakaların yüzey hazırlıkları, kompozit plakaların yüzey hazırlıkları, tek taraflı yapışma bağlantılarının oluşturulması, darbe testleri ve çekme testleridir.

#### 3.2.1. Nanoelyaf üretimi

Çalışmalara nanoelyaf üretimi ile başlanmıştır. Nanoelyafların üretimi Selçuk Üniversitesi Kompozit Malzemeler Laboratuvarındaki elektro eğirme cihazında (Şekil 3.1) yapılmıştır. Bu kapsamda 4 farklı içerikte nanoelyaf üretilmiştir. Bunlar;

- Saf naylon 6.6 (N 6.6) nanoelyaf,
- %1 (N 6.6 ağırlığınca) grafen nanoparçacık (GNP) katkılı N 6.6 nanoelyaf,
- %3 (N 6.6 ağırlığınca) grafen nanoparçacık (GNP) katkılı N 6.6 nanoelyaf,
- %5 (N 6.6 ağırlığınca) grafen nanoparçacık (GNP) katkılı N 6.6 nanoelyaftır.



Şekil 3. 1. Elektro eğirme cihazı

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi toplayıcı, döner silindir olarak belirlenmiştir. Elektro eğirme işlemine etki eden diğer parametreler yapılan literatür çalışması neticesine belirlenmiş olup deneme-yanılma yöntemiyle en uygun parametreler belirlenmiştir. Bu kapsamda elektro eğirme parametreleri;

- Voltaj 19-21 kW,
- Çözelti besleme hızı 0,35 ml/h,
- Şırınga ucu ile döner silindir arası mesafe 13 cm,
- Hava nemi %30-40
- Oda sıcaklığı 23-26°C’dir.

Belirlenen 19-21kW voltaj değerinin altında değerler kullanıldığında N 6.6 polimer çözeltisinin damla şeklinde durağan kalmayıp damladığı görülmüş ve Taylor konisinin oluşumu gözlenememiştir. Daha yüksek değerler kullanıldığında ise ark oluşumu nedeniyle ark sesleri duyulmuştur. Sonuç olarak en uygun parametrenin 19-21kW olduğu belirlenmiş ve tüm nanoelyaf üretimleri bu aralıkta yapılmıştır.

Çözelti besleme işlemi, çözeltinin içine konulduğu şırınganın bağlandığı pompa vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Tüm nanoelyaf üretimlerinde standart şırınga kullanılmış olup şırınga çapı pompa hafızasına girildikten sonra besleme hızı 0,35ml/h olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu hızın üstünde değerler kullanıldığında N 6.6 çözeltisinin Taylor konisi oluşturmayıp şırınga ucundan aralıklarla damladığı, daha düşük değer kullanıldığında ise yine Taylor konisinin düzgün bir şekilde oluşmayıp çözelti damlacığının giderek küçüldüğü ve üretimin devam ettiği esnada şırınga ucundaki çözeltinin kuruyarak eğirme işlemini durdurduğu görülmüştür.

Yapılan denemeler sonucunda 20kW voltaj, 0,35ml/h çözelti besleme hızı ve oda sıcaklığında şırınga ucu ile döner silindir arası mesafenin en uygun 13cm olduğu görülmüştür. Daha düşük mesafeler kullanıldığında nanoliflerin yeterince kurumadığı ve üretilen nanoelyaflarda boncuklanmanın olduğu görülmüştür.

Üretilen nanoelyafların işlem süreleri ve döner silindirin ebatları göz önünde tutularak farklı üretimler yapılmış ve istenilen nanoelyaf kalınlığının (0,2mm) şırıngaya alınan 5ml çözeltinin 7 saat eğirilmesiyle elde edildiği görülmüştür. Yapılan farklı nanoelyafların kalınlık (Şekil 3.2) ölçümleri iki lamel arasına konularak yapılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak iki lamelin kalınlığı mikrometre ile ölçülmüş daha sonra arada nanoelyaf varken ölçülmüştür.

Tüm bu parametreler, üretilen nanoelyafların tamamında ortaktır ve nanoelyaf üretimi 6-7 gün içerisinde tamamlanmıştır. Bu kapsamda havalandırma sisteminin bulunduğu laboratuvar ortamındaki oda sıcaklığı ve oda neminin de tüm nanoelyaflar için ortak olduğu varsayılmıştır.



Şekil 3. 2. Nanoelyaf kalınlık ölçümü

Nanoelyafların üretimi, saf N 6.6 nanoelyaf ve GNP katkılı N 6.6 nanoelyaf için farklı aşamalar içermektedir. Saf N 6.6'nın üretiminde; granül halindeki 1gr N6.6 polimerini çözebilmek için 7ml formik asit ve 3ml kloroform kullanılmıştır. Bu kapsamda granül halindeki 1 gr N 6.6, 7ml formik asit ve 3ml kloroform karışımına eklenmiş ve 1gün boyunca manyetik karıştırıcıda homojen bir karışım oluşuncaya kadar karıştırılmıştır. Elde edilen bu çözelti 5ml'lik şırıngaya alınarak elektro eğirme düzeneğine yerleştirilmiştir. Bu kısımda ayrıca şırınganın plastik uç kısmının asidik olan bu çözeltiliye nüfuz etmesini engellemek için şırınganın plastik uç kısmı alüminyum ile kapatılmıştır.



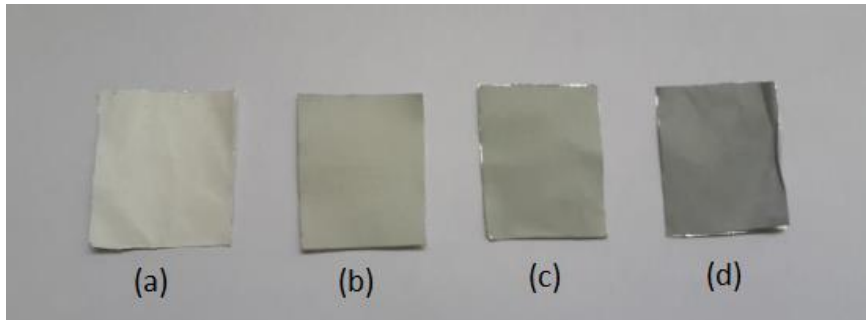
Şekil 3. 3. GNP katkılı N 6.6 çözeltisinin ultrasonik karıştırıcıda karıştırılması

GNP katkılı N 6.6 nanoelyafların üretiminde ise 1gr N 6.6 için 7ml formik asit ve 3ml kloroformun yanı sıra 1gr N 6.6 ağırlığınca %1,3 ve 5 GNP katkısı kullanılmıştır. Bu kapsamda; 1gr granül halindeki N 6.6, 7ml formik asitte tamamen çözününceye kadar manyetik karıştırıcıda 1 gün boyunca karıştırılarak hazırlanmıştır. Diğer bir kaptaki ise 1gr N 6.6 ağırlığınca %1 GNP (0,01gr), 3ml kloroform içerisine eklenerek ultrasonik karıştırıcıda 10dk boyunca buz banyosu altında karıştırılmıştır. Burada, GNP'lerin kloroform içerisinde dağılması sağlanarak ön homojenleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ayrı kaplardaki bu iki karışım birleştirilerek yine ultrasonik karıştırıcıda buz banyosu altında 50kHz frekansta 1 saat boyunca karıştırılmıştır(Şekil 3.3). Böylece oluşturulan karışım elektro eğirme için hazır hale getirilmiştir(Şekil 3.4).



Şekil 3. 4. GNP katkılı N 6.6 nanoelyaf çözeltisi

Oluşturulan bu karışım saf N 6.6 çözeltisinde olduğu gibi 5ml şırıngaya alındıktan sonra elektro eğirme düzeneğine yerleştirilmiştir. %3 ve 5 GNP katkılı N 6.6 nanoelyafların üretiminde de %1GNP katlıda olduğu gibi aynı işlemler uygulanmıştır. Sadece 1gr N 6.6 ağırlığınca GNP katkısı %3 ve 5 için sırasıyla 0,03gr ve 0,05gr'dır.



Şekil 3. 5. Üretimi yapılan N 6.6 nanoelyaflar a)saf N 6.6 nanoelyaf, b)%1 GNP katkılı N 6.6 nanoelyaf, c) %3 GNP katkılı N 6.6 nanoelyaf, d) %5 GNP katkılı N 6.6 nanoelyaf

Üretilen nanoelyaflar döner silindirin etrafına sarılan alüminyum folyo üzerinde üretilmiştir. Yapıştırma için kullanılmak üzere üretilen bu nanoelyaflar kullanımdan önce alüminyum folyodan rahat ayrılabilmesi için bir süre fırında kurutulmuş ve yapışma bölgesi ebatlarında kesilerek kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi GNP oranının artışıyla elyaflarda ki renk değişimi fark edilebilmektedir. Son işlem olarak, yapıştırma işlemine geçmeden hemen önce yapışma bölgesi ebatlarında kesilen nanoelyaflar alüminyum folyodan kısmen ayrılarak yapışmaya katılmak üzere hazır hale getirilmiştir.



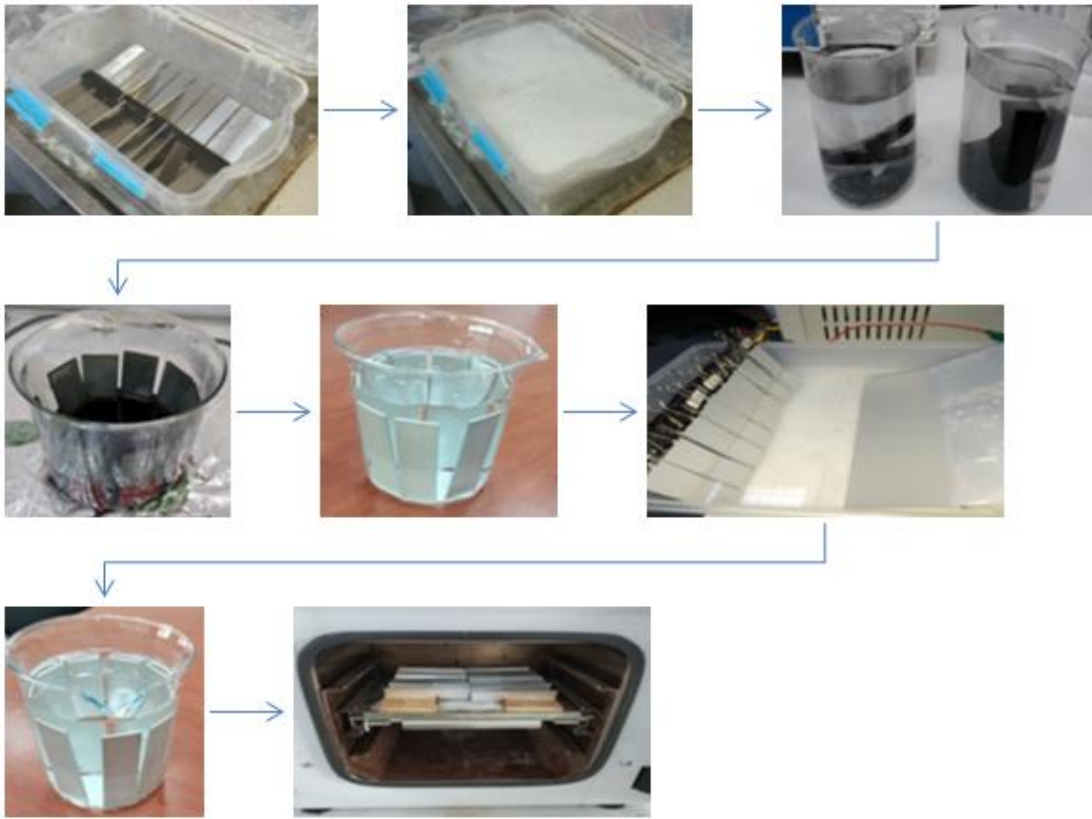
Şekil 3. 6. Tek taraflı yapışma bağlantısına katılmaya hazır nanoelyaflar

### 3.2.2. Alüminyum plakaların yüzey hazırlığı

Nanoelyafların üretiminden sonra yapışma bağlantılarında kullanılacak plakaların yüzey hazırlıklarına geçilmiştir. Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.'den (TAİ) alınan Al 2024-T3 alaşım alüminyum plakalar ASTM D1002-10 standardına uygun olarak kesilmiştir. Kesilen bu alüminyum plakalar ASTM D3933-98 fosforik asit anotlama standardına uygun olarak yüzey temizliği yapılmıştır. Bu yüzey temizliğinin amacı, verimli bir yapışma için yüzeydeki kir ve yağ gibi pislikleri temizleyip epoksinin nüfuziyetini artırmak için pürüzlülük sağlamaktır. Bu kapsamda alüminyum plakalara Şekil 3.6'da görülen işlemler aşağıdaki sırada uygulanmıştır.

- Standarda uygun lazer kesimde kestirilen alüminyum numunelerin yüzeylerindeki çapak ve pürüzler zımpara ve ege ile temizlenmiştir. Bu temizleme esnasında yüzeylerin kenarlarında pah oluşmamasına dikkat edilmiştir.
- Alüminyum numuneler, yağ ve kir gibi maddelerden arındırılmak üzere bir kasaya yüzeyleri açık olacak şekilde yerleştirilmiştir.
- Kaynatılan çeşme suyu, alüminyumların yüzeyleri açık olarak yerleştirildiği kaba dökülmüştür.

- Kaynar çeşme suyu ve alüminyumların içine saf sodyum hidroksit (3lt çeşme suyu için 150gr saf NaOH) eklenmiş ve en az 10dk beklenecek yüzey aşındırması yapılmıştır.
- Bu süre sonunda alüminyum numuneler kaynatılmış (min. 43 °C olmalıdır) saf su içerisinde en az 10dk bekletilerek ön durulama işlemi yapılmıştır.
- Kaynatılmış saf suda ön durulaması yapılmış numuneler yine saf su (oda sıcaklığında) içerisinde en az 10dk durulanmıştır. Bu ikinci aşamadaki durulama işleminin 3 kez tekrarlanması daha verimli olduğu görülmüştür. Durulama işlemi ne kadar iyi olursa yüzeylerin daha temiz çıktığı belirlenmiştir.



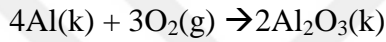
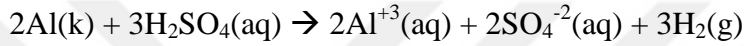
Şekil 3. 7. Alüminyum plakaların yüzey hazırlığı işlemleri

- Saf su ile yüzey kirlilerinden kısmen arındırılmış alüminyum numuneler derişik asit çözeltisinde (%26,7 sülfirik asit, %5 sodyum dikromat, %68,3 saf su), 65 - 71 °C aralığında en az 10dk bekletilmiştir. Asit beher içerisinde ısıtılarak istenilen sıcaklık korunmuştur. Ayrıca derece ile sıcaklık takip edilmiş ve kontrol altında tutulmuştur.

! Asit karışımlarında öncelikle saf su daha sonra asitler karışıma eklenmiştir. Aksi halde patlama riski vardır.

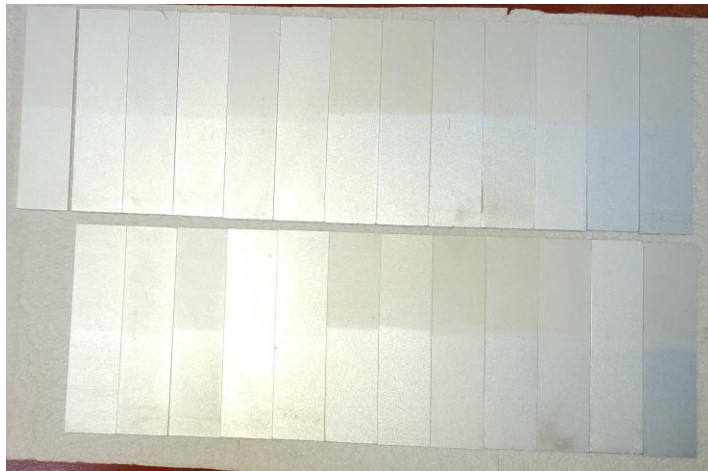
- Derişik asit çözeltilisinde yeterli miktar bekletilmiş numuneler çıkarılıp saf su içerisinde en az 10 dk bekletilerek durulanmıştır. Derişik asit sonrası saf suda durulama işleminin 2 kez tekrarlanması daha iyi sonuç vermektedir. Durulama işleminin düzgün yapılmaması alüminyum yüzeyinin tekrar kararmasına neden olmaktadır.
- Saf suda durulanan alüminyum numunelerin elektroliz ile yüzeyleri dağlanmıştır.
  - Elektroliz karışımı 9 gr saf su için 1 gr fosforik asit şeklindedir.
  - Plaka → Anot, Numuneler → Katot olacak şekilde kutuplar ayarlanmalıdır.
  - Elektroliz gerilimi 15V ve elektroliz süresi en az 20dk'dır.

Bu işlem ile alüminyum plakaların yüzeyi ince bir tabaka şeklinde oksitlenerek hava ile teması kesilmiştir. Bu işlemde aşağıdaki tepkimeler gerçekleştirilmiştir.



- Elektroliz işleminden sonra en az 10dk saf suda durulama işlemi yapılmıştır. Bu durulama işlemi de en az 2 kez tekrarlanmalı ve yüzeylerin tamamen durulanması sağlanmalıdır. Aksi halde kurutma işleminden sonra yüzeylerde sarı lekeler oluşmaktadır.
- Saf suda durulama işleminden sonra numuneler 80 °C'lik fırında 40dk kurutulmuştur.

Kurutma işleminden sonra yapıştırılmaya hazır numuneler (Şekil 3.8) tekrar kirlenmemesi için yapıştırma işlemine kadar temiz bir ortamda muhafaza edilmiştir. Ayrıca standarda uygun olarak yüzey hazırlığından sonra 72 saat içerisinde yapıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

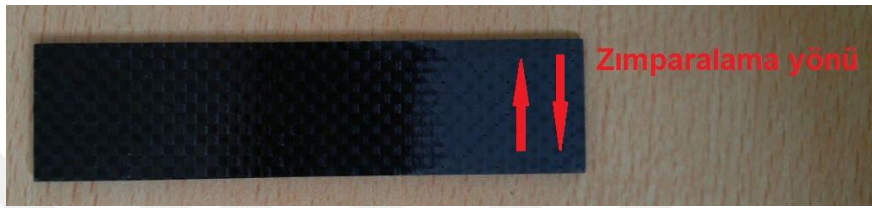


Şekil 3. 8. Yapıştırılmaya hazır alüminyum plakalar

### 3.2.3. Kompozit plakaların yüzey hazırlığı

IZOREEL firmasından temin edilen 8 kat  $0^{\circ}/90^{\circ}$  düz dokuma kumaş Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit plakalar ASTM D5868-01 standardına göre kesilmiştir. Kesilen bu plakalara yapıştırma öncesi ASTM D2093-03 standartlarına göre Şekil 3.10'da gösterilen yüzey hazırlama işlemleri aşağıdaki sırada uygulanmıştır.

- Kompozit plakaların yüzeyi epoksi kalıntısı, kirlilik gibi maddeleri temizlemek ve yapıştırıcının daha iyi nüfuz etmesini sağlayarak verimli bir yapıştırma yapmak için P 180 grid tipi zımpara kullanılarak yapışma bağlantısının çekme eksenine  $90^{\circ}$ lik bir açıyla zımparalanmıştır.



Şekil 3. 9. Kompozit plakanın zımparalanması



Şekil 3. 10. Kompozit plakaların yüzey hazırlığı işlemleri

- Zımparalama işleminden sonra kompozit plakaların daha önce aynı işlem için kullanılmış ve parçacıkları çöktürülmüş aseton ile ön durulama işlemi ile kabaca temizliği yapılmıştır.
- Ön durulama işleminden sonra kompozit plakaların yapışma yüzeyleri temiz bir bezle silinmiştir.
- Bu işlemlerden sonra kompozit plakalar ultrasonik temizleyicide 15dk aseton içerisinde temizlenmiştir.
- Ultrasonik aseton banyosundan çıkarılan kompozitler yapıştırma işleminde kullanılmak üzere temiz bir ortama bırakılmıştır.

#### 3.2.4. Tek taraflı yapışma bağlantılarının oluşturulması

Nanoelyafların üretimi ve plakaların yüzey hazırlıkları tamamlandıktan sonra yapıştırma işlemine geçilmiştir. Tek taraflı yapışma bağlantıları için yapıştırıcı olarak Hexion marka I285 model epoksi reçine ve sertleştirici olarak yine Hexion marka H285 model epoksi sertleştirici kullanılmıştır.

Epoksi reçineye, reçinenin ağırlıkça %40 kadar sertleştirici eklenmiştir. Oluşturulan karışım el yordamıyla kabarcık oluşturmadan 10dk karıştırıldıktan sonra oluşan kabarcıkların giderilmesi için oda sıcaklığında 0,2 atm basınçta 10dk vakum altında tutulmuştur.

Hazırlanan epoksi yapıştırıcı ilk olarak nanoelyaf kullanmadan referans tek taraflı yapışma bağlantılarını oluşturmak için kullanılmıştır. Bu kapsamda yapıştırıcı önceden hazırlıkları yapılmış alüminyum ve kompozit plakaların yapışma bölgelerine ( 20x25mm) sürülmüştür(Şekil 3.11).



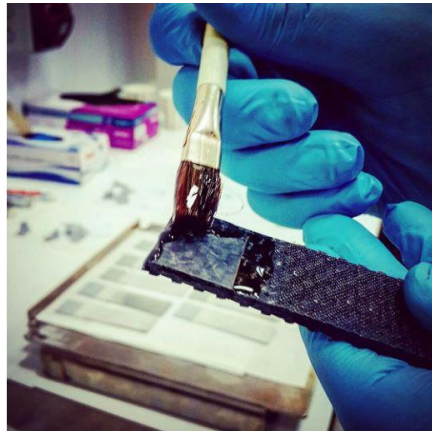
Şekil 3. 11. Epoksi yapıştırıcının yapışma bölgelerine sürülmesi

Yapıştırıcı sürülmüş yüzeyler üst üste gelecek şekilde birbiri üstüne kapatılmıştır. Bu işlem yapışma kalınlığını (0,2mm) ve yapışma boyunu (20mm) tam sağlayabilmek için kalıp (Şekil 3.12) içerisinde gerçekleştirilmiştir. Yapıştırma işlemi kalıp doluncaya kadar tekrarlandıktan sonra yapışma bağlantıları oda sıcaklığındaki kürleme aşaması boyunca kalıp içerisinde bırakılmıştır.



Şekil 3. 12. Yapıştırma kalıbı

Aynı işlemler nanoelyaf takviyeli yapıştırma bağlantıları içinde uygulanmıştır. Ancak bu kısımda farklı olarak plaka yüzeylerine yapıştırıcı sürüldükten sonra kompozit plaka yüzeyine, yapışma bölgesi ebatlarında (20x25mm) kesilmiş ve önceden hazırlanmış nanoelyaf yerleştirilmiştir. Nanoelyaf üzerine tekrar epoksi sürülerek tamamen ıslanması sağlanmıştır. Daha sonra kalıp içerisinde birbiri üstüne bindirilerek oda sıcaklığında kürleme işlemi için bırakılmıştır.



Şekil 3. 13. Nanoelyafın yapışma bölgesine yerleştirilmesi

Kalıp içerisindeki yapışma bağlantılarına iki aşamada krleme işlemi yapılmıştır. İlk aşamada kalıp içerisindeki numuneler 24 saat boyunca oda sıcaklığında bırakılmıştır. Daha sonra yapışma bağlantıları yine kalıptan çıkarılmadan 80°C fırında 15 saat boyunca kürlenmiştir. Bu işlemden sonra kalıptan çıkarılan alüminyum-kompozit tek taraflı yapışma bağlantıları testler için hazır hale getirilmiştir (şekil 3.14).



şekil 3. 14. Alüminyum-kompozit tek taraflı yapışma bağlantıları

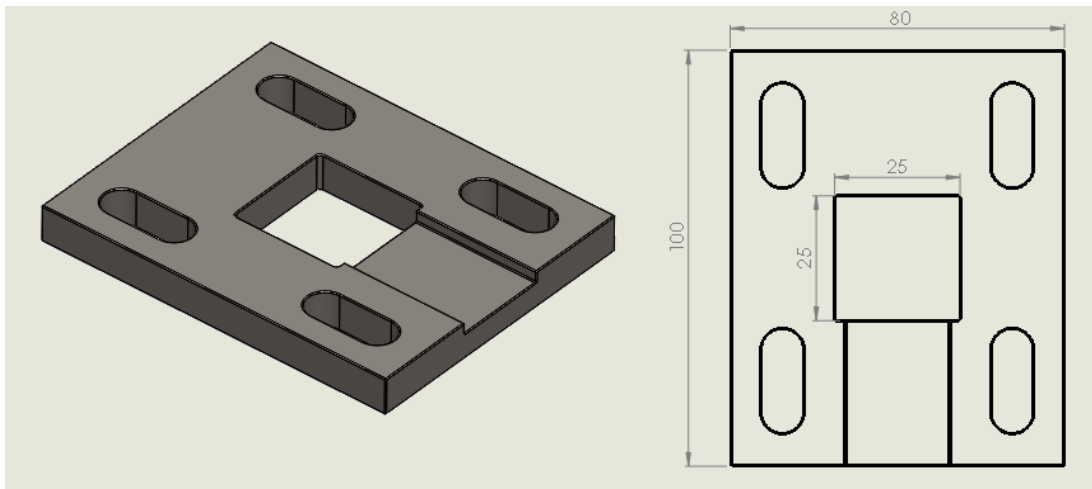
### 3.2.5. Darbe testleri

Tek taraflı yapışma bağlantılarının darbe testleri Konya Teknik Üniversitesi Mekanik Laboratuvarı'ndaki düşük hızlı darbe cihazında (şekil 3.15) yapılmıştır.

Testler 1,04 m/s darbe hızında gerçekleştirilmiştir. Bu hızı elde edebilmek için 5,6 kg kütleyle sahip vurucu başlık 5,46cm yükseklikten bırakılmıştır. Bu hızla, numuneler 3J'lük darbe enerjisine maruz bırakılmıştır. Bu enerji seviyesi (3J) deneme yanılma yoluyla bulunmuştur. Bu kapsamda numunelere 15J, 10J, 7J, 5J ve 3J lük darbe enerjileri uygulanmıştır. Uygulanan bu darbe enerjilerinden 3J dışındakilerde numunenin tamamen tahrip olduğu görülmüştür. Yapışma bağlantısına darbe sonrası çekme testleri uygulanacağı için yapışma bağlantısının tamamen tahribi istenmemiştir. Bu nedenle yapışma bağlantısını tamamen tahrip etmeyip bir miktar darbe enerjisi yüklememizi sağlayan 3J lük darbe enerjisi deneylerde kullanılmak üzere belirlenmiştir.



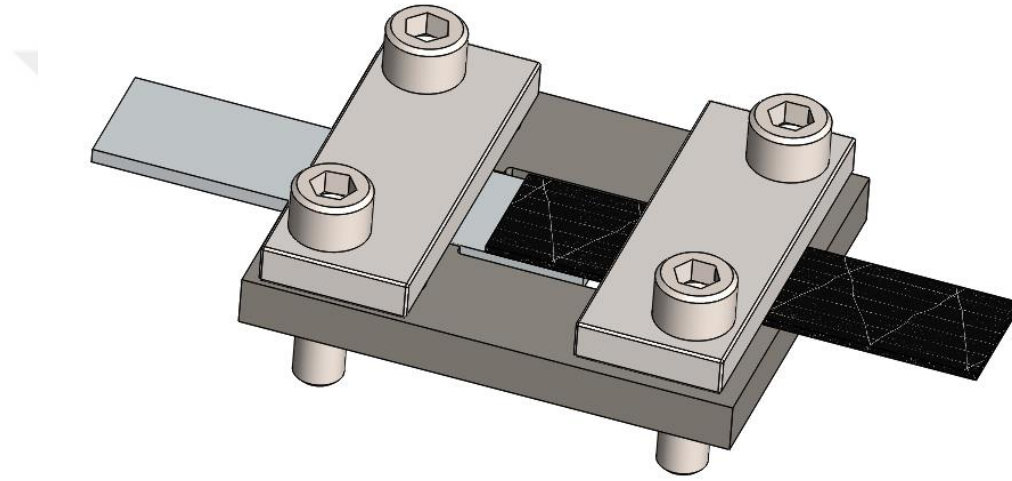
Şekil 3. 15. Düşük hızlı darbe test cihazı



Şekil 3. 16. Darbe kalıbı

Darbe testleri esnasında numuneler özel tasarım kalıba (Şekil 3.16) bağlanarak test edilmiştir. Bu şekilde yapışma bağlantılarının darbe esnasında eğilmesinin engellenmesi ve yapışma bağlantısına uygulanan 3J'lük darbe enerjisinin tamamının yüzeye normal ekseninde yapışma bağlantısına aktarılması amaçlanmıştır.

Yapışma bağlantısı, kalıba bağlanırken yapışma bölgesinin 25x25mm ebatlarında olan kalıp boşluğunu ortalaması sağlanmıştır. Ayrıca kompozit kısım üst tarafta kalacak şekilde bağlantı yapılmış ve alüminyum kısmın kalıptaki yuvaya oturarak hareket etmesi engellenmiştir. Yapışma bağlantısı kalıba konumlandırıldıktan sonra delikli metal parçalar ve civatalar ile sabitlenmiştir(Şekil 3.17).



Şekil 3. 17. Yapışma bağlantısının kalıba konumlandırılması

Deneyler -50, -20, 0, 23 ve 50°C olmak üzere 5 farklı sıcaklıkta termal kamera ile ölçüm yapılarak gerçekleştirilmiştir.

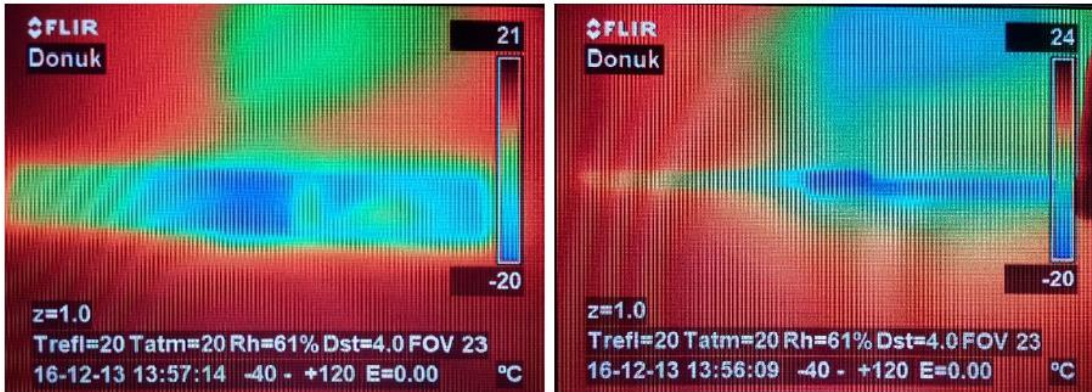
Deneylerde yapılan soğutma işlemi Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nden (İLTEK) alınan sıvı azot kullanılarak sıvı azot tabancası (Şekil 3.18) vasıtasıyla yapılmıştır.

Soğutma işlemi, -20°C (Şekil 3.19) ve 0°C (Şekil 3.20) için azotu spreysel şekilde püskürten sıvı azot tabancası ile yapılmıştır. Bu sıcaklıklarda yapışma bölgesi istenilen sıcaklıktan bir miktar daha fazla soğutulmuş ve termal kamera ile istenilen sıcaklığa geldiği anda darbe uygulanmıştır. -50°C sıcaklık için ise azot bir beher içerisine dökülmüş ve numune bu azot içerisine bırakılmıştır. Yapışma numunesi azot içerisinde 3-4 dk bekletilerek istenilen sıcaklığın üzerinde soğutulmuş ve daha sonra çıkarılarak deney düzeneğine bağlanmıştır. Ancak termal kamera en düşük -45°C yi ölçtüğü için bu kısımda azottan çıkarıp deney düzeneğine bağlama ve termal kamerada -45°C'yi görme

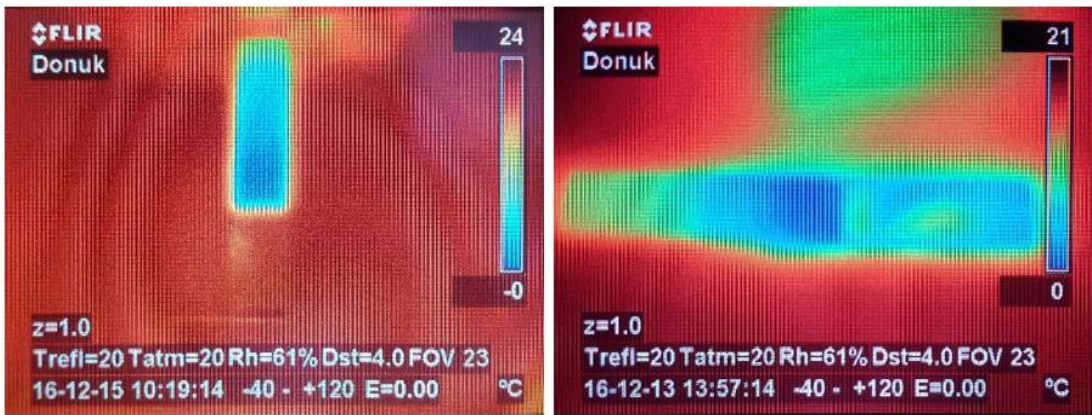
süresi hesaba katılarak ve yapılan birkaç deneme yanılma ile  $-45^{\circ}\text{C}$ 'nin altını görmeden darbe uygulanmış ve  $-50^{\circ}\text{C}$  olduğu varsayılmıştır. Soğutma işlemleri oda sıcaklığında yapıldığı için yapılan soğutma 5-10s içerisinde oda sıcaklığına yaklaşmaktadır. Bu yüzden uygulanan sıcaklık değerlerinde 5 derecelik aşağı yukarı sapma muhtemeldir.



Şekil 3. 18. Sıvı azot tabancası

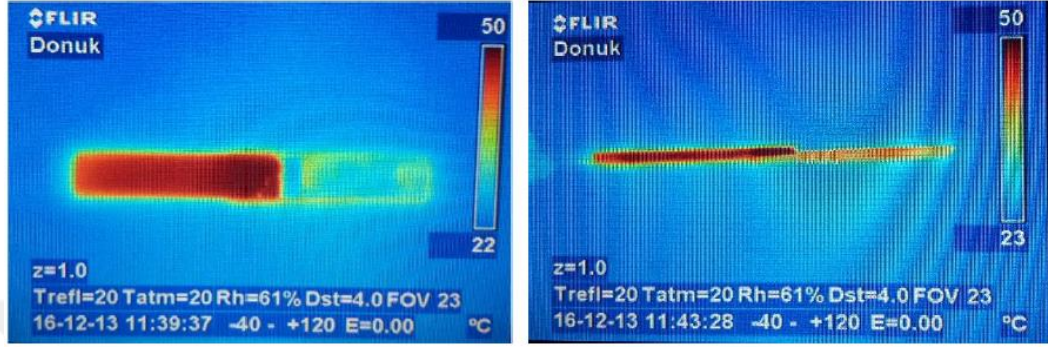


Şekil 3. 19.  $-20^{\circ}\text{C}$ 'deki termal kamera görüntüsü



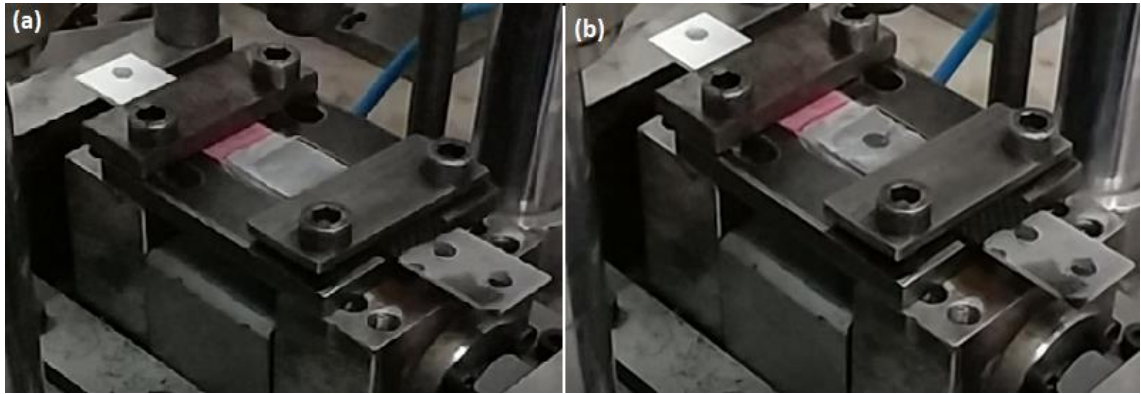
Şekil 3. 20.  $0^{\circ}\text{C}$ 'deki termal kamera görüntüsü

50°C'de yapılan testler için gerekli ısıtma ise laboratuvarında bulunan fırın vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Yapışma bağlantıları, fırından çıkarılıp bağlama süresi hesaba katılarak ve yapılan birkaç deneme yanılma ile 80°C ye ısıtılmış ve deney düzeneğine bağlantı yapıldıktan sonra termal kamerada 50°C (Şekil 3.21) görüldüğü anda darbe uygulanmıştır.



Şekil 3. 21. 50°C'deki termal kamera görüntüsü

Darbe sonrası çekme testleri uygulanacağı için darbenin tek temaslı olması gerekmektedir. Deney düzeneğindeki sensör sayesinde vurucu başlık tek temastan sonra yakalanmıştır. Ayrıca ikinci bir darbe etkisinin olup olmadığı deney esnasında çekilen yavaşlatılmış videolardan da takip edilmiştir. Bu videolardan elde edilen darbe öncesi ve darbe sonrası görsellerin kıyaslanmasında darbenin bıraktığı iz görülebilmektedir (Şekil 3.22).



Şekil 3. 22. a)darbe öncesi, b)darbe sonrası

Darbe testlerinden kuvvet ve zaman verileri elde edilmiştir. Bu veriler, üst kısımda bahsedilen hesaplamaların excelde işlenmesiyle kuvvet-şekil değişimi ve enerji-zaman eğrileri için gerekli veriler elde edilmiştir. Elde edilen tüm veriler sonuçlar kısmında verilmiştir. Ayrıca darbe sonrası kopmayan numuneler çekme testleri için herhangi bir etkiye maruz kalmayacağı şekilde muhafaza edilmiştir.

### 3.2.6. Çekme testleri

Tek taraflı yapışma bağlantılarının darbe sonrası çekme testleri ASTM D1002-10 standardına uygun olarak yapılmıştır. Deneylein yapılması için Necmettin Erbakan Üniversitesi Makine Laboratuvarındaki Shimadzu AGS-X çekme test cihazı (Şekil 3.23) ile Trapeziumx yazılımı kullanılmıştır. Deneyleler oda sıcaklığında yapılmış olup testler 2mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 23. Shimadzu AGS-X çekme test cihazı

Çekme testleri, şekil değişimini hassas olarak tespit edebilmek için ekstansiyometre (Şekil 3.24) kullanılarak yapılmıştır. Ekstansiyometrenin bağlanabilmesi için gerekli olan çentikler deney öncesi açılmıştır. Bu işlem yapılırken yapışma bağlantılarının hasar görmemesini engellemek için yapışma kısımları kâğıt bant ile sarılmış ve işlem sonunda çıkarılmıştır.



Şekil 3. 24. Ekstansiyometrenin deney numunesine bağlanması

Deneyleer sonrası veriler excel formatında alınmış ve gerekli grafikler excelde düzenlenerek oluşturulmuştur.

## 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Tek taraflı yapışma bağlantılarına ilk aşamada karşılaşılabilecek bir hasarı (uçğa kuşun çarpması ya da bir taşın düşmesi) modellemek amacıyla düşük hızlı (1,04m/s) darbe testleri uygulanmıştır. Darbe sonrası kopmayan numunelere çekme testleri uygulanarak darbe sonrası kayma dayanımı tespit edilmiş ve yapılan kıyaslamalarla en ideal katkı belirlenmiştir. Uygulanan farklı sıcaklıkların da yapışma bağlantılarındaki etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Ayrıca çekme sonrası kopan yüzeyler fotoğraflanarak incelenmiş ve yapışma bağlantısının verimliliği hakkında yorumlar yapılmıştır. Bu yüzeylerin ve nanoelyafların SEM görüntüleri alınarak yüzey morfolojisi incelenmiştir. Ek olarak üretilen nanoelyafların termal bozunma sıcaklığı ve kütle kaybı, Termogravimetri Analizi (TGA) ve Diferansiyel Termal Analiz (DTA) ile incelenmiştir.

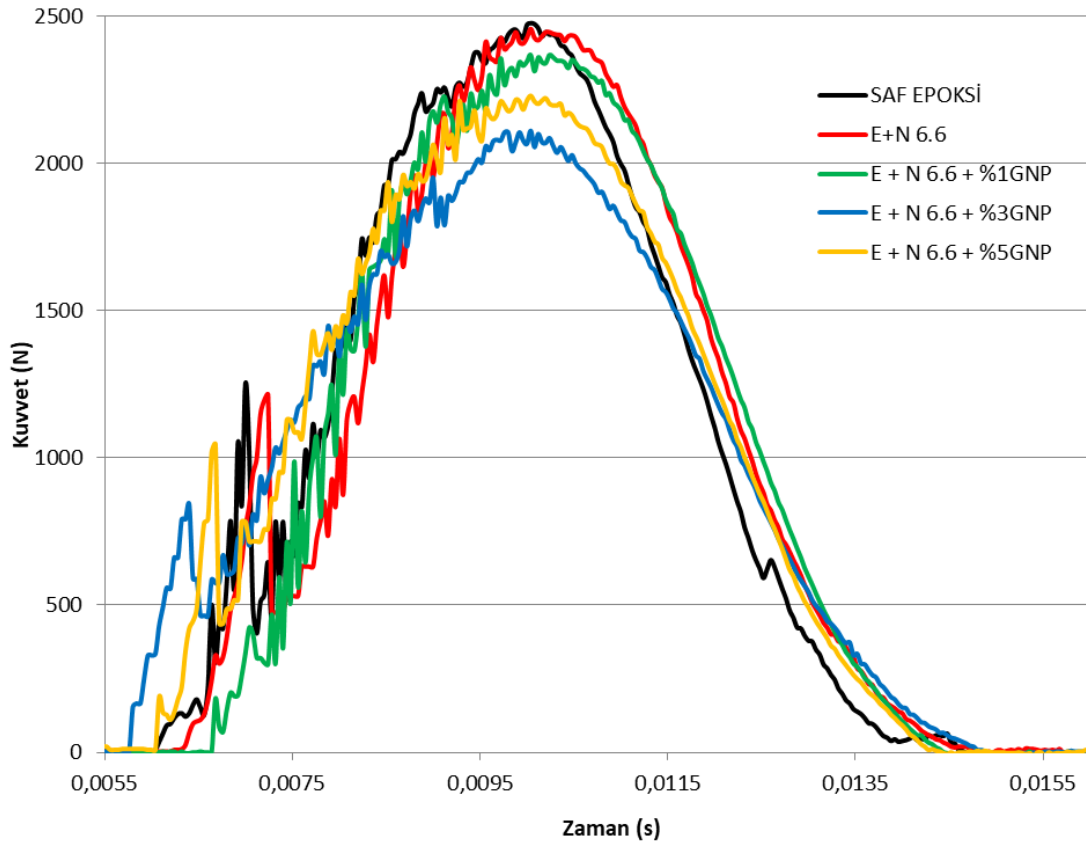
### 4.1. Darbe Testlerinin Sonuçları

Tek taraflı yapışma bağlantılarına; -50, -20, 0, 23 ve 50°C sıcaklıklarda düşük hızlı darbe enerjisi (3J) uygulanmıştır. Bu darbe enerjisi sonrasında yapışma bağlantısının gösterdiği rijitlik sonucu bir tepki kuvveti meydana gelmiş ve bu değer 3000N'u aştığında yapışma bağlantılarının tamamen tahrip olduğu görülmüştür. Bu nedenle yapışma bağlantısının tamamen tahrip olmayacağı 3J'lük darbe enerjisi deneme-yanılma yöntemiyle yapılan çalışmalar sonucu belirlenmiş ve tüm yapışma bağlantıları için ortak olarak kullanılmıştır. Bu kısımda yapıştırma bağlantıları kıyaslamalı olarak, her sıcaklık için ayrı ayrı ele alınmıştır. Ayrıca farklı katkılara sahip yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıktaki davranışları da kıyaslamalı olarak ele alınmıştır.

#### 4.1.1. Yapışma bağlantılarının -50°C'deki darbe verileri

Şekil 4.1'de -50°C'de ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinden elde edilen kuvvetlerin zamana göre değişimi verilmiştir. Grafiğe göre; saf epoksili yapışma bağlantısının temas rijitliği 2445.78N ile en yüksek iken, N6.6+%3 GNP katkılı yapışma bağlantısının temas rijitliği ise 2072.37N ile en düşük değer olarak görülmektedir. Ayrıca N6.6 katkılı yapışma bağlantısının 2437.48N, N6.6+%1 GNP katkılı yapışma bağlantısının 2368.31N ve N6.6+%5 GNP katkılı yapışma bağlantısının ise 2182.94N'luk kuvvet değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bu değerlere göre; saf epoksili yapışma bağlantısı, en düşük kuvvet değerine sahip N6.6+%3 GNP katkılı

yapışma bağlantısı ile kıyaslandığında kuvvet değerinin %15.3'lük düşüş göstererek temas rijitliğinin azaldığı belirlenmiştir. Bu durum maruz kalınacak darbe etkisinin azalmasını sağlayarak yapışma bağlantısında ki iyileşmeyi göstermektedir.



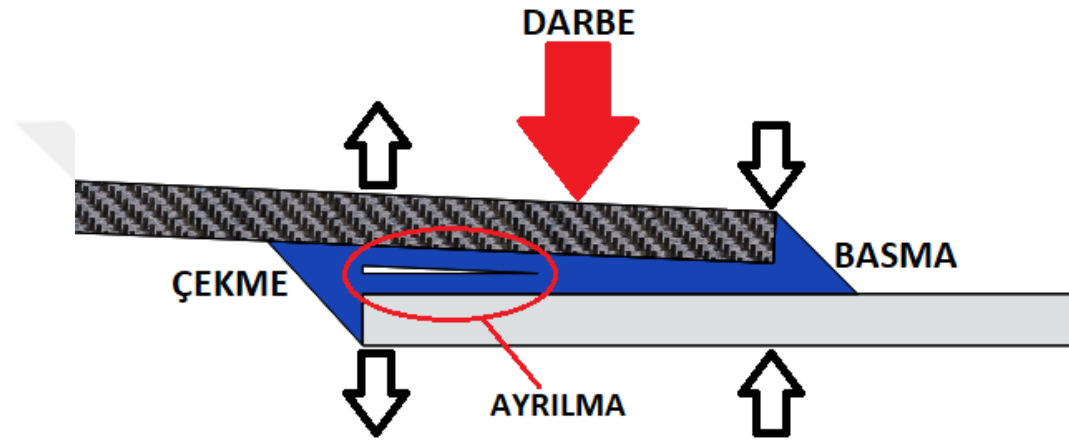
Şekil 4. 1. -50°C'deki darbe testinin kuvvet-zaman eğrileri

Grafik incelendiğinde kuvvet artışı esnasında küçük salınımların olduğu görülmektedir. Bu salınımlar kompozit yüzeye uygulanan darbenin etkisiyle kompozit malzemede ki matris hasarının göstergesidir. Ayrıca bu salınımların şiddeti oluşan matris hasarı ile orantılıdır.

Ek olarak tüm numunelerde ortak bir karakterizasyon olarak, kuvvet değerleri yükselirken bir zirve oluşturup düşüğe geçtiği daha sonra tekrar yükselişe geçtiği belirlenmiştir.

Darbe sırasında böyle bir zirvenin olması, yapıştırıcı malzeme (epoksi) gevrek olduğundan darbeden dolayı ve darbe sırasında eğilmeden dolayı çatlak oluşmaktadır. Yani hızlı bir biçimde oluşup yapıştırma boyunca ilerleyen çatlak oluşmaktadır. Uygulanan enerji bu yapışma bağlantısını boydan boya ayıracak seviyede olmadığından yapıştırıcıda gelişen çatlak bir müddet sonra durmaktadır. Ayrıca darbe kompozit tarafında olduğundan eğilme sırasında kompozitin serbest ucu ile alüminyum arasında

basma meydana gelirken alüminyumun serbest ucu ile kompozit arasında eğilmeden dolayı çekme meydana gelir. Bu da yapışmada ki çatlakın alüminyumun serbest uç bölgesinden başlayacağı anlamına gelir. Darbe sırasında çekilen video görüntüsünden ilk hasarın bu bölgeden oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.2). Darbe sonrası numunelerde oluşan hasar ve darbe sonrası kayma dayanımları bu yaklaşımın doğru olduğu göstermektedir. Çünkü darbe sonrası kayma dayanımlarında ilk zirve değeri düşük olan yapışma bağlantısı daha yüksek kayma dayanımı göstererek yapışma bağlantısında ki ayrılmanın daha az olduğu göstermektedir.

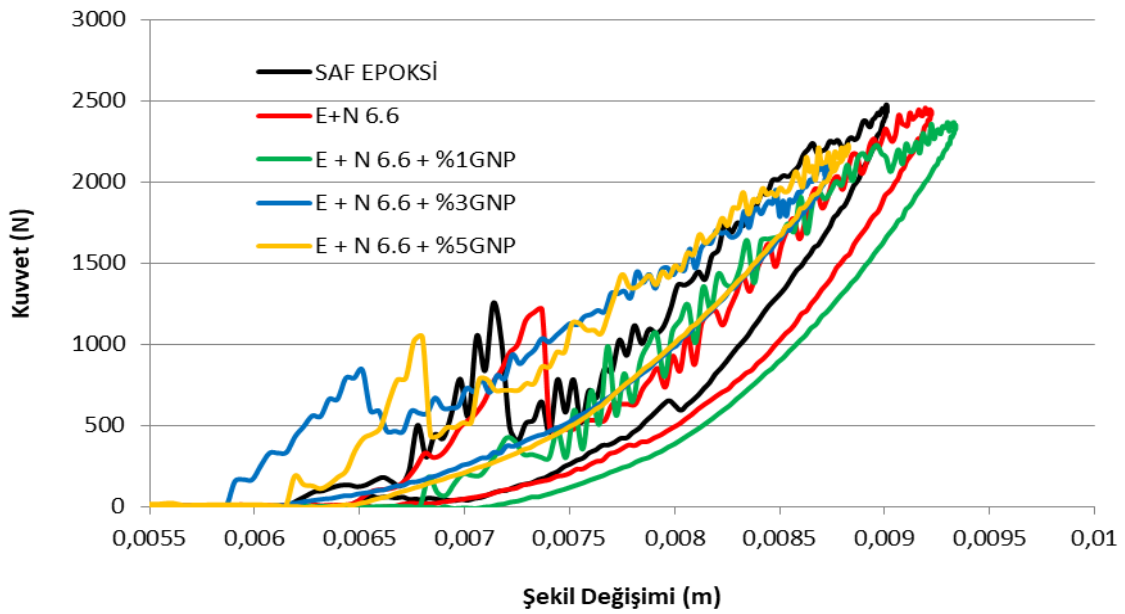


Şekil 4. 2. Darbe esnasında meydana gelen kısmi ayrılmanın şematik görünümü

Bu ilk zirve değerlerine göre; saf epoksili yapışma bağlantısı 1253.31N ile en yüksek değere, N6.6+%1 GNP katkılı yapışma bağlantısı ise 200N ile en düşük değere ulaştığı görülmektedir. Ayrıca N6.6 katkılı yapışma bağlantısının 1195.22N, N6.6+%3 GNP katkılı yapışma bağlantısının 841.07N ve N6.6+%5 GNP katkılı yapışma bağlantısının ise 1045.81N değerine ulaştığı görülmektedir. Bu değerlere göre; saf epoksili yapışma bağlantısı, en düşük kuvvet değerine sahip N6.6+%1 GNP katkılı yapışma bağlantısı ile kıyaslandığında kuvvet değerinin %84,04'lük düşüş gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, N6.6+%1 GNP katkısı ile ayrılmaya neden olan kuvvetin azaldığı ve yapışma bağlantısının darbe karşısında daha dayanıklı hale geldiğini göstermektedir.

Şekil 4.3'de -50°C'de ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinden elde edilen kuvvetlerin deplasmana (şekil değişimi) göre değişimi verilmiştir. Grafik incelendiğinde uygulanan kuvvet maksimuma ulaştığında şekil değişimi tüm numuneler için maksimuma ulaşmakta ancak kuvvet etkisi ortadan kalktığında şekil değişiminin elastik

davranarak neredeyse tamamen iade edildiği görülmektedir. Grafiğe göre N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısının 0.00933m ile en yüksek şekil değişimine, N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısının ise 0.00874m ile en düşük şekil değişimine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca saf epoksili yapışma bağlantısının 0.00896m, N6.6 katkıli yapışma bağlantısının 0.00926m ve N6.6+%5GNP katkıli yapışma bağlantısının ise 0,00885m şekil değiştirdiği görülmektedir. Bu değerlere göre; saf epoksili yapışma bağlantısı, en yüksek şekil değişimine sahip N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı ile kıyaslandığında şekil değişiminin %4.13'lük artış göstererek yapışma bağlantısında ki gevrekliği azaltarak iyileşme sağladığı belirlenmiştir.



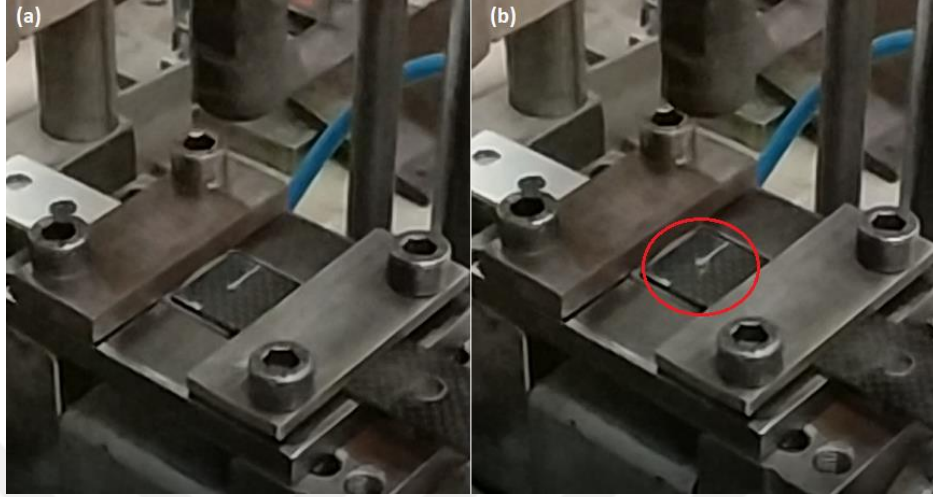
Şekil 4. 3. -50°C'deki darbe testinin kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Şekil 4.5'de -50°C'de ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinin enerji-zaman eğrileri verilmiştir. Grafiğe göre tüm numunelerin 3J'lük darbe enerjisinin yaklaşık 1.5J'lük kısmını emerken 1.5J'lük kısmını iade ettiği görülmektedir.

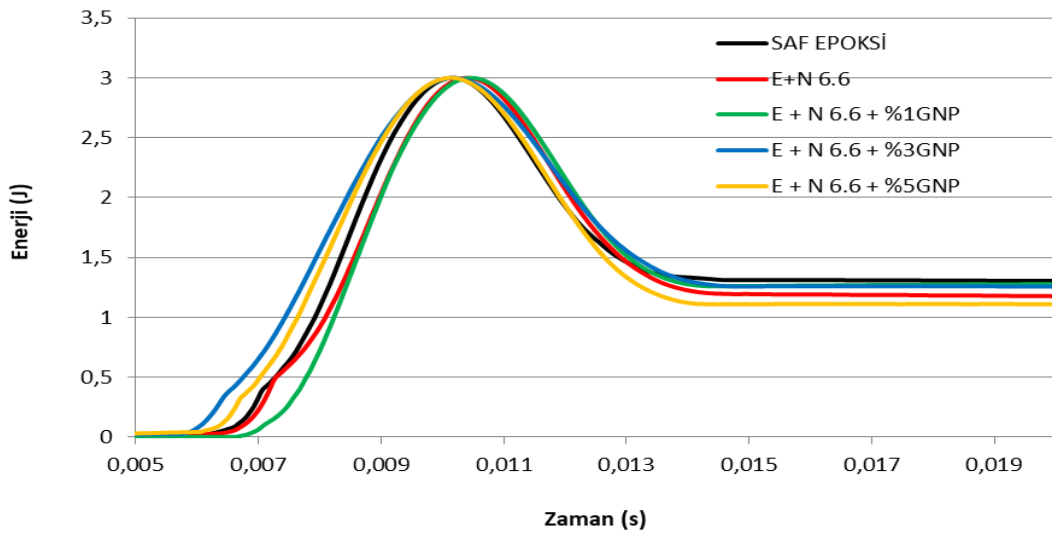
Emilen bu enerji;

- Eğilme esnasında ve bu eğilme geri iade edilirken ısıya çevrilmiş olabilir,
- Kompozit yapısından kaynaklı olarak matris çatlaması, matris-elyaf ara yüzey ayrılması gibi olaylara harcanmış olabilir,
- Yapıştırıcının bir kısmının ayrılması için harcanmış olabilir.

Darbe sırasında kompozit malzemenin vurulan kısmında renk değişimi gözlenmektedir. Bu durum kompozit malzeme de elyaf matris çatlamasının olduğunu göstermektedir (Şekil 4.4).



Şekil 4. 4. Kompozitte oluşan darbe hasarı a)darbe öncesi, b)darbe sonrası

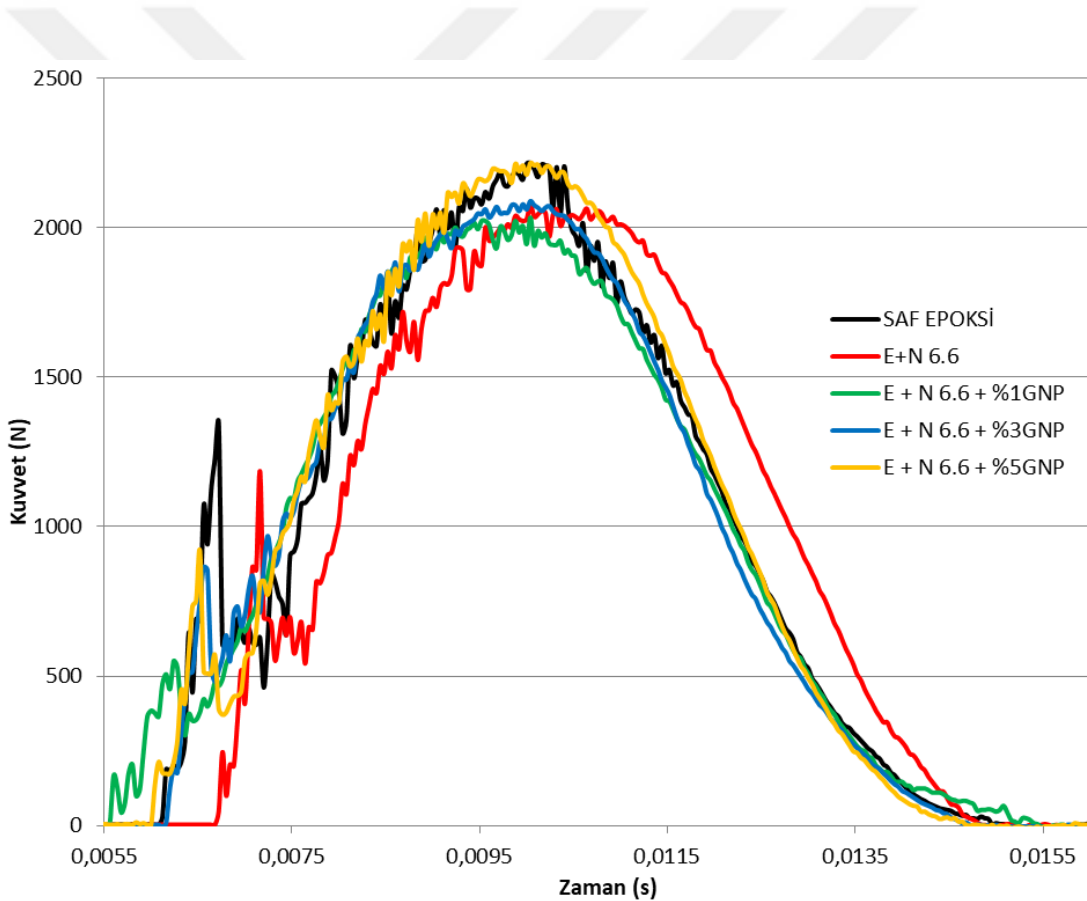


Şekil 4. 5. -50°C'deki darbe testinin enerji-zaman eğrileri

Şekil 4.5'e göre N6.6+%3 GNP katkılı yapışma bağlantısı 1.316J ile en yüksek, N6.6+%5 GNP katkılı yapışma bağlantısının ise 1.219J ile en düşük enerjiyi emdiği görülmektedir. Ayrıca, saf epoksili yapışma bağlantısı 1.306J, N6.6 katkılı yapışma bağlantısı 1.227J ve N6.6+%1 GNP katkılı yapışma bağlantısı ise 1.274J'lük enerjiyi emdiği görülmektedir. Bu değerlere göre; saf epoksili yapışma bağlantısı, en yüksek enerji emilimi yapan N6.6+%3 GNP katkılı yapışma bağlantısı ile kıyaslandığında enerji emiliminin yaklaşık %1'lik artış gösterdiği belirlenmiştir.

#### 4.1.2. Yapışma bağlantılarının -20°C'deki darbe verileri

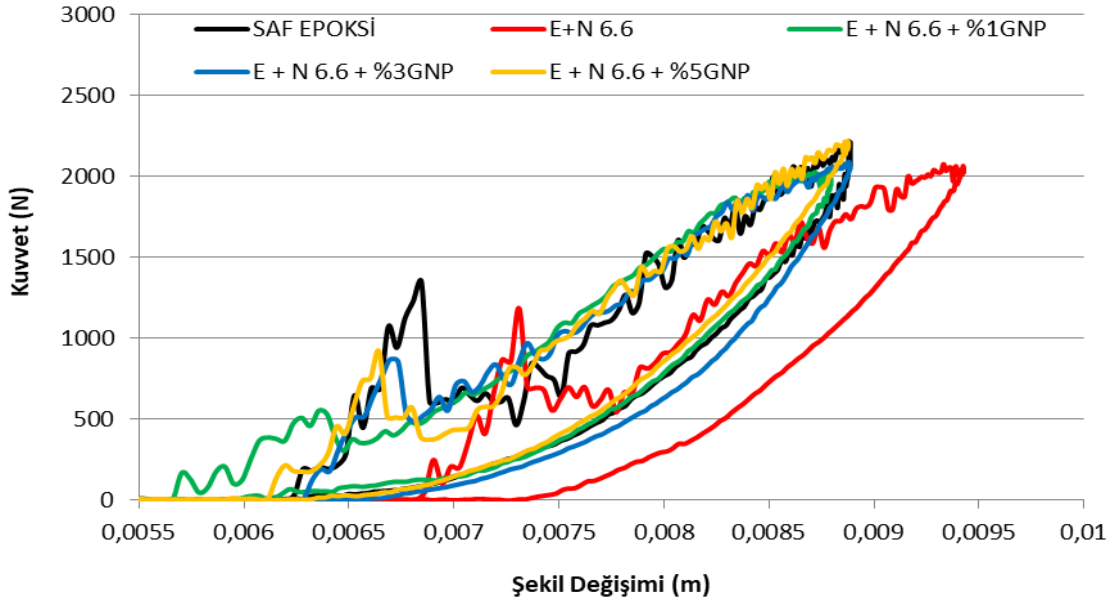
Şekil 4.6'de -20°C'de ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinden elde edilen kuvvetlerin zamana göre değişimi verilmiştir. Grafiğe göre; saf epoksili yapışma bağlantısının temas rijitliği 2216.14N ile en yüksek iken, N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısının temas rijitliği ise 2022.47N ile en düşük değer olarak görülmektedir. Ayrıca N6.6 katkıli yapışma bağlantısının 2075.04N, N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısının 2069.51N ve N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısının ise 2213.37N'luk kuvvet değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bu değerlere göre; saf epoksili yapışma bağlantısı, en düşük kuvvet değerine sahip N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı ile kıyaslandığında kuvvet değerinin %8.7'lik düşüş göstererek temas rijitliğinin azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 4. 6. -20°C'deki darbe testinin kuvvet-zaman eğrileri

Ek olarak ilk zirve değerlerine göre; saf epoksili yapışma bağlantısı 1546.59N ile en yüksek değere, N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı ise 550.57N ile en düşük değere ulaştığı görülmektedir. Ayrıca N6.6 katkıli yapışma bağlantısının 1184.15N, N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısının 864.98N ve N6.6+%5 GNP

katkılı yapışma bağlantısının ise 1018.15N değerine ulaştığı görülmektedir. Bu değerlere göre; saf epoksili yapışma bağlantısı, en düşük kuvvet değerine sahip N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı ile kıyaslandığında kuvvet değerinin %64.3'lük düşüş gösterdiği belirlenmiştir.

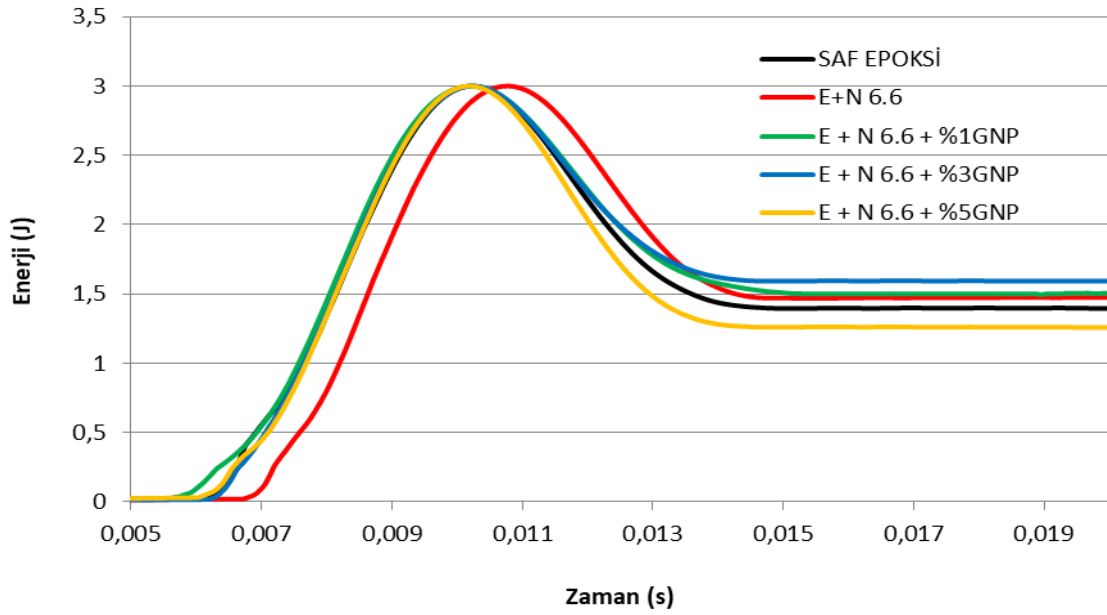


Şekil 4. 7. -20°C'deki darbe testinin kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Şekil 4.7'de -20°C'de ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinden elde edilen kuvvetlerin deplasmana(şekil değişimi) göre değişimi verilmiştir. Grafiğe göre N6.6 katkıli yapışma bağlantısının 0.00947m ile en yüksek şekil değişimine, N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısının ise 0.00873m ile en düşük şekil değişimine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca saf epoksili yapışma bağlantısının 0.00893m, N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısının 0.00881m ve N6.6+%5GNP katkıli yapışma bağlantısının ise 0,00888m şekil değiştirdiği görülmektedir. Bu değerlere göre; saf epoksili yapışma bağlantısı, en yüksek şekil değişimine sahip N6.6 katkıli yapışma bağlantısı ile kıyaslandığında şekil değişiminin %5.71'lik artış gösterdiği belirlenmiştir.

Şekil 4.8'de -20°C'de ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinin enerji-zaman eğrileri verilmiştir. Grafiğe göre N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısı 1.593J ile en yüksek, N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısının ise 1.259J ile en düşük enerjiyi emdiği görülmektedir. Ayrıca, saf epoksili yapışma bağlantısı 1.473J, N6.6 katkıli yapışma bağlantısı 1.513J ve N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı ise 1.502J'lük enerjiyi emdiği görülmektedir. Bu değerlere göre; saf epoksili yapışma bağlantısı, en yüksek

enerji emilimi yapan N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısı ile kıyaslandığında enerji emiliminin %8.14'lük artış gösterdiği belirlenmiştir.



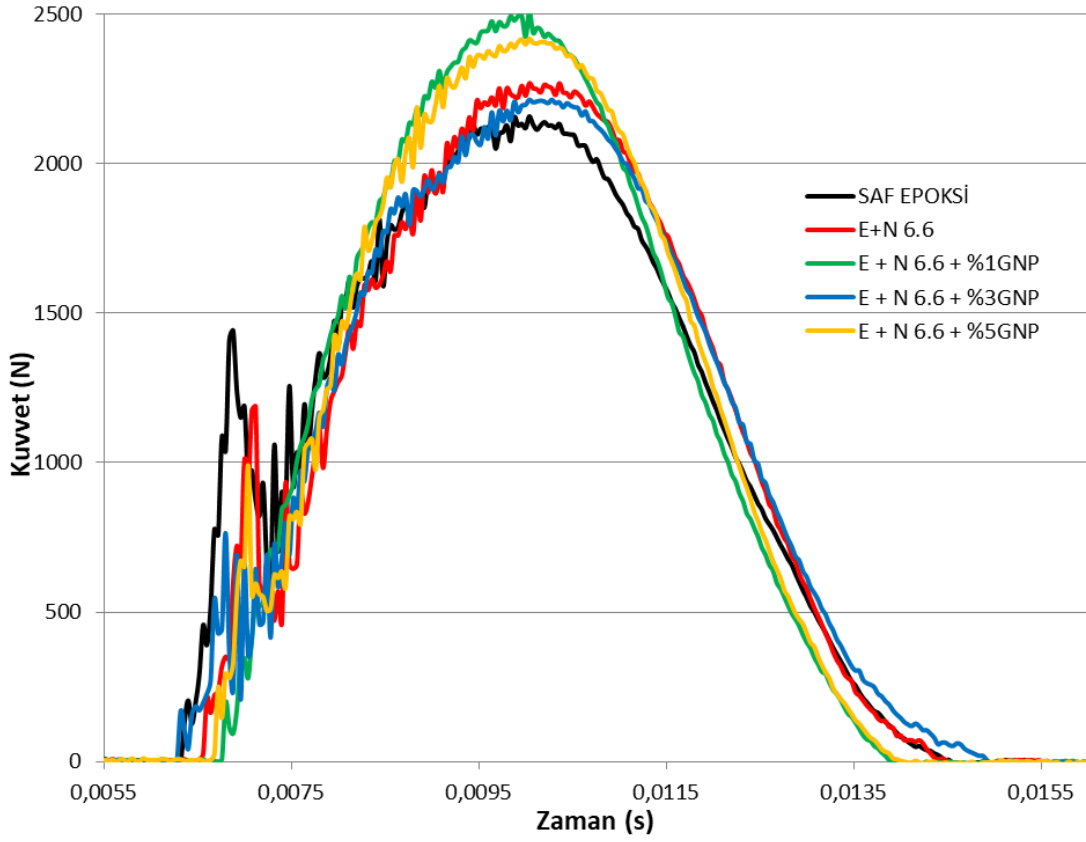
Şekil 4. 8. -20°C'deki darbe testinin enerji-zaman eğrileri

#### 4.1.3. Yapışma bağlantılarının 0°C'deki darbe verileri

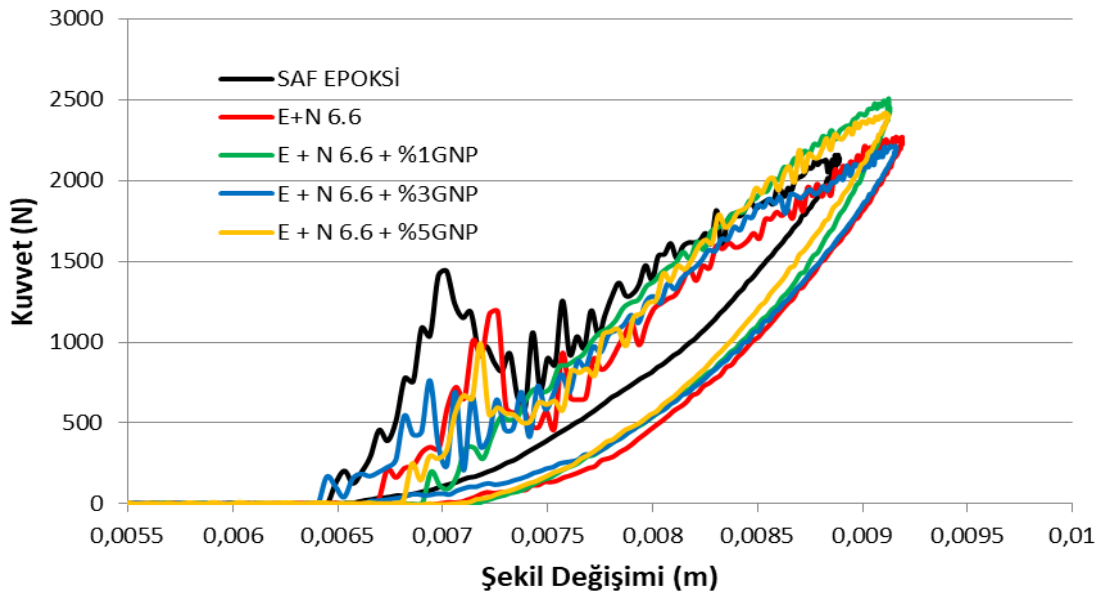
Şekil 4.9'de 0°C'de ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinden elde edilen kuvvetlerin zamana göre değişimi verilmiştir. Grafiğe göre; N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısının temas rijitliği 2492.81N ile en yüksek iken, saf epoksili yapışma bağlantısının temas rijitliği ise 2105.47N ile en düşük değer olarak görülmektedir. Ayrıca N6.6 katkıli yapışma bağlantısının 2268.71N, N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısının 2369.51N ve N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısının ise 2415.35N'luk kuvvet değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bu değerlere göre; saf epoksili yapışma bağlantısı, en düşük temas rijitliği göstermiş olup yapılan katkıler temas rijitliğini artırmıştır. Bu değerlerin en düşük çıkmasında ilk zirve değerinin yüksek olup ayrılmanın fazla olmasından kaynaklanmış olması muhtemeldir.

Ek olarak ilk zirve değerlerine göre; saf epoksili yapışma bağlantısı 1441.45N ile en yüksek değere, N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı ise 200N ile en düşük değere ulaştığı görülmektedir. Ayrıca N6.6 katkıli yapışma bağlantısının 1175.85N, N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısının 763.61N ve N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısının ise 990.48N değerine ulaştığı görülmektedir. Bu değerlere göre; saf epoksili yapışma bağlantısı, en düşük kuvvet değerine sahip N6.6+%1 GNP katkıli

yapışma bağlantısı ile kıyaslandığında kuvvet değerinin %86.13'lük düşüş gösterdiği belirlenmiştir.

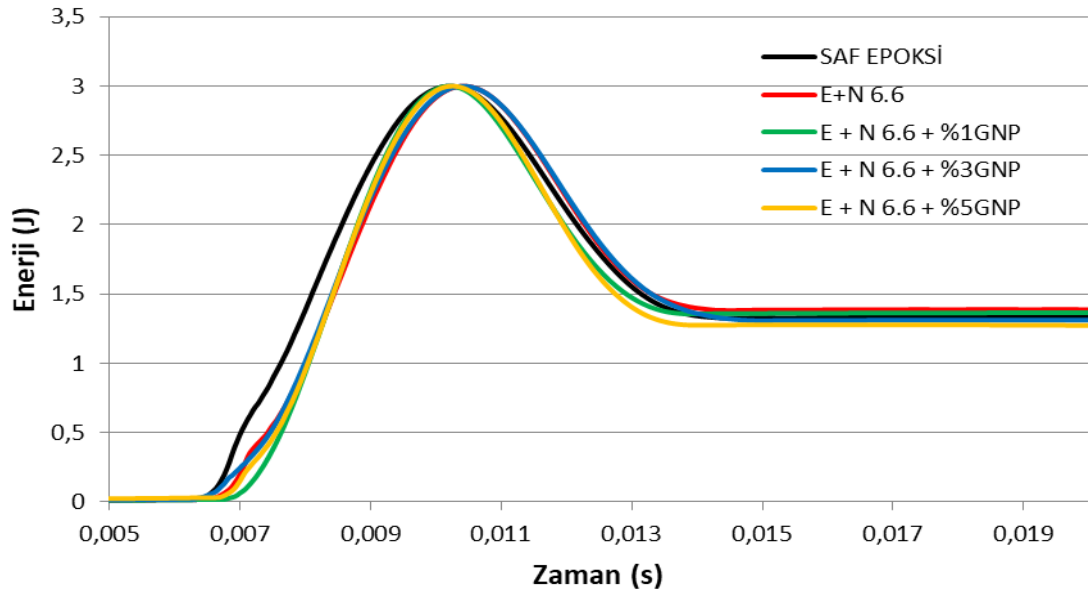


Şekil 4. 9. 0°C'deki darbe testinin kuvvet-zaman eğrileri



Şekil 4. 10. 0°C'deki darbe testinin kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Şekil 4.10'da 0°C'de ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinden elde edilen kuvvetlerin deplasmana(şekil değişimi) göre değişimi verilmiştir. Grafiğe göre N6.6 katkıli yapışma bağlantısının 0.00911m ile en yüksek şekil değişimine, saf epoksili yapışma bağlantısının ise 0.00893m ile en düşük şekil değişimine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca N6.6+%1GNP katkıli yapışma bağlantısının 0.00912m, N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısının 0.00909m ve N6.6+%5GNP katkıli yapışma bağlantısının ise 0.00910m şekil değiştirdiği görülmektedir. Bu değerlere göre; saf epoksili yapışma bağlantısı, en yüksek şekil değişimine sahip N6.6 katkıli yapışma bağlantısı ile kıyaslandığında şekil değişiminin %2.02'lik artış gösterdiği belirlenmiştir.

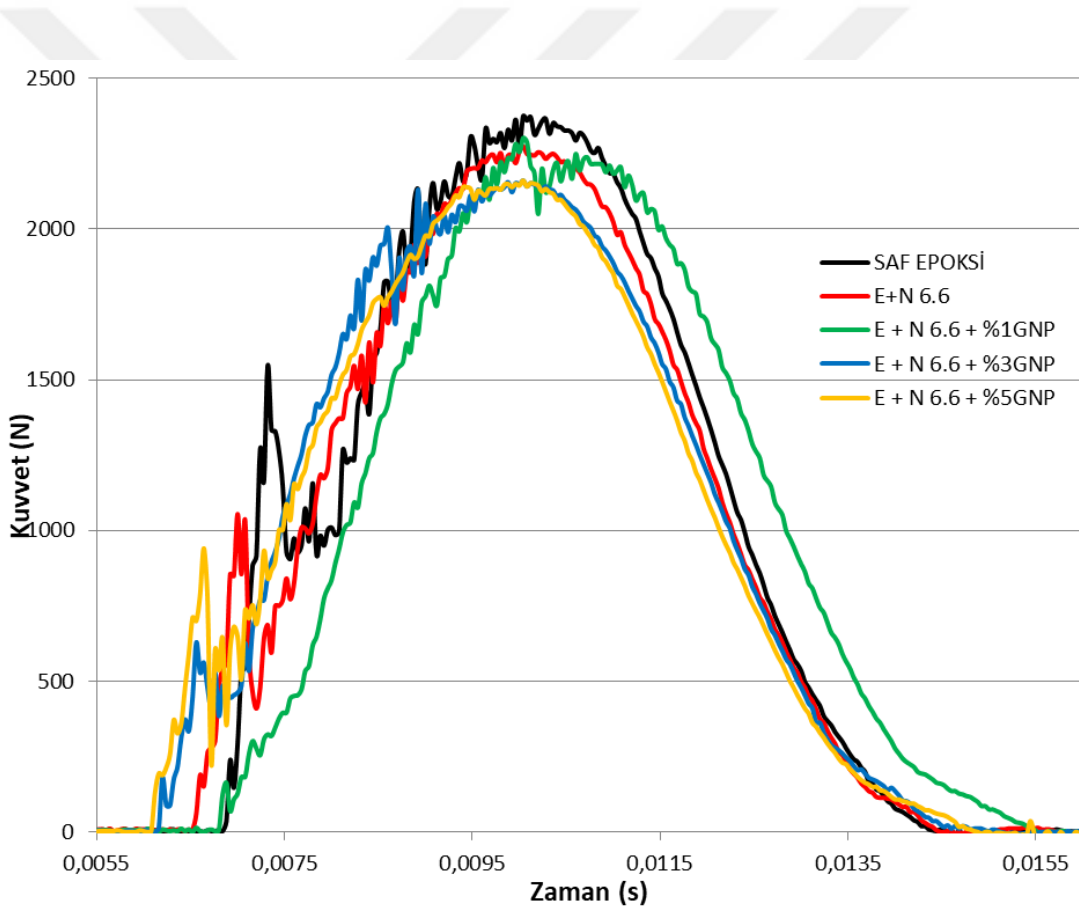


Şekil 4. 11. 0°C'deki darbe testinin enerji-zaman eğrileri

Şekil 4.11'de 0°C'de ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinin enerji-zaman eğrileri verilmiştir. Grafiğe göre saf epoksili yapışma bağlantısı 1.435J ile en yüksek, N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısının ise 1.311J ile en düşük enerjiyi emdiği görülmektedir. Ayrıca, N6.6 katkıli yapışma bağlantısı 1.306J, N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı 1.227J ve N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısı ise 1.274J'lük enerjiyi emdiği görülmektedir. Bu değerlere göre; saf epoksili yapışma bağlantısının en yüksek enerji emilimi yaptığı görülmektedir. Enerji emilimi yapabilecek diğer faktörlerin varlığı nedeniyle yapışma bağlantısında enerji emilimi için iyileşmenin olmaması durumu muhtemeldir.

#### 4.1.4. Yapışma bağlantılarının 23°C'deki darbe verileri

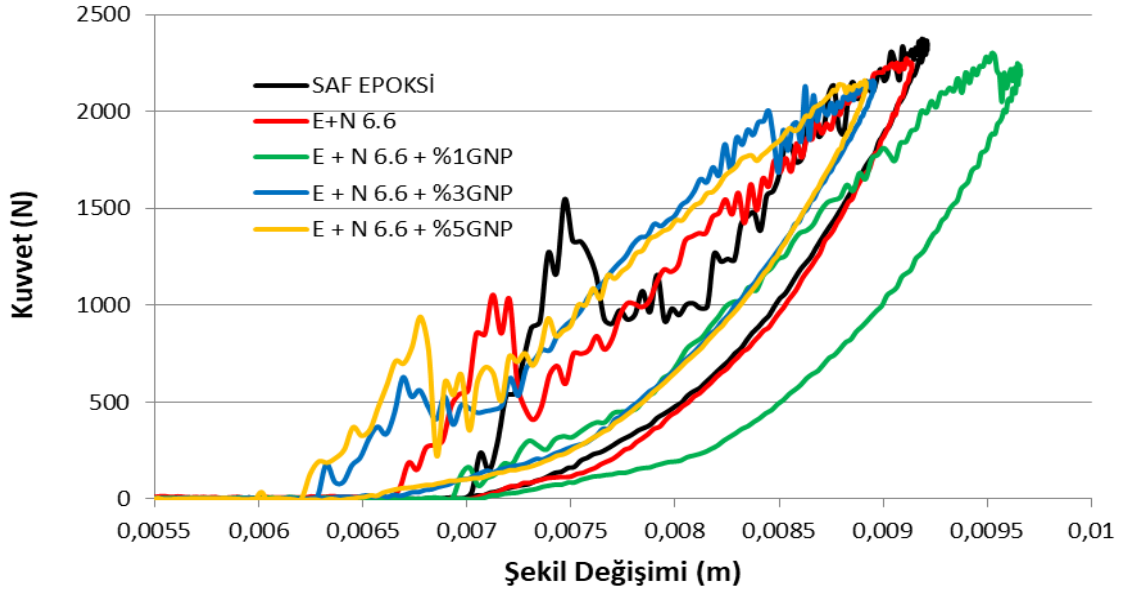
Şekil 4.12'de 23°C'de ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinden elde edilen kuvvetlerin zamana göre değişimi verilmiştir. Grafiğe göre; saf epoksili yapışma bağlantısının temas rijitliği 2371.08N ile en yüksek iken, N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısının temas rijitliği ise 2144.21N ile en düşük değer olarak görülmektedir. Ayrıca N6.6 katkıli yapışma bağlantısının 2257.64N, N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısının 2282.54N ve N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısının ise 2155.27N'luk kuvvet değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bu değerlere göre; saf epoksili yapışma bağlantısı, en düşük kuvvet değerine sahip N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısı ile kıyaslandığında kuvvet değerinin %9.6'lık düşüş göstererek temas rijitliğinin azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 4. 12. 23°C'deki darbe testinin kuvvet-zaman eğrileri

Ek olarak ilk zirve değerlerine göre; saf epoksili yapışma bağlantısı 1543.83N ile en yüksek değere, N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı ise 301.56N ile en düşük değere ulaştığı görülmektedir. Ayrıca N6.6 katkıli yapışma bağlantısının 1054.11N, N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısının 628.04N ve N6.6+%5 GNP

katkılı yapışma bağlantısının ise 940.67N değerine ulaştığı görülmektedir. Bu değerlere göre; saf epoksili yapışma bağlantısı, en düşük kuvvet değerine sahip N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı ile kıyaslandığında kuvvet değerinin %80.5'lik düşüş gösterdiği belirlenmiştir.

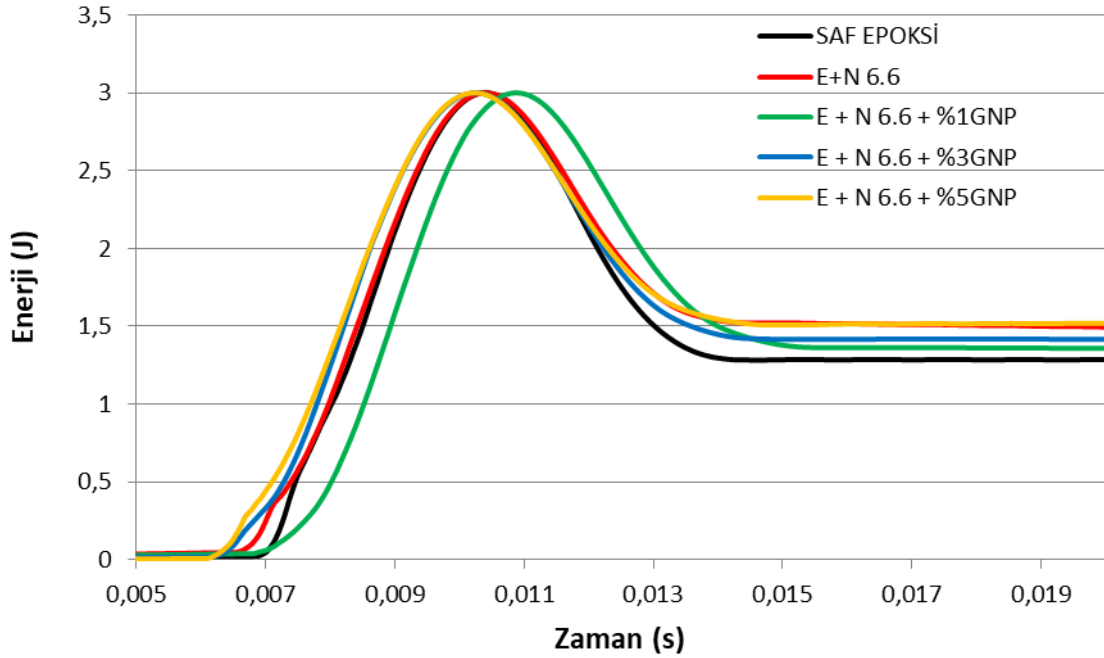


Şekil 4. 13. 23°C'deki darbe testinin kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Şekil 4.13'de 23°C'de ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinden elde edilen kuvvetlerin deplasmana(şekil değişimi) göre değişimi verilmiştir. Grafiğe göre N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısının 0.00965m ile en yüksek şekil değişimine, N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısının ise 0.00886m ile en düşük şekil değişimine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca saf epoksili yapışma bağlantısının 0.00932m, N6.6 katkıli yapışma bağlantısının 0.00908m ve N6.6+%3GNP katkıli yapışma bağlantısının ise 0.00887m şekil değiştirdiği görülmektedir. Bu değerlere göre; saf epoksili yapışma bağlantısı, en yüksek şekil değişimine sahip N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı ile kıyaslandığında şekil değişiminin %8.18'lik artış gösterdiği belirlenmiştir.

Şekil 4.14'de 23°C'de ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinin enerji-zaman eğrileri verilmiştir. Grafiğe göre N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısı 1.519J ile en yüksek, N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısının ise 1.359J ile en düşük enerjiyi emdiği görülmektedir. Ayrıca, saf epoksili yapışma bağlantısı 1.45J, N6.6 katkıli yapışma bağlantısı 1.515J ve N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısı ise 1.417J'lük enerjiyi emdiği görülmektedir. Bu değerlere göre; saf epoksili yapışma bağlantısı, en yüksek

enerji emilimi yapan N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısı ile kıyaslandığında enerji emiliminin %4.8'lik artış gösterdiği belirlenmiştir.



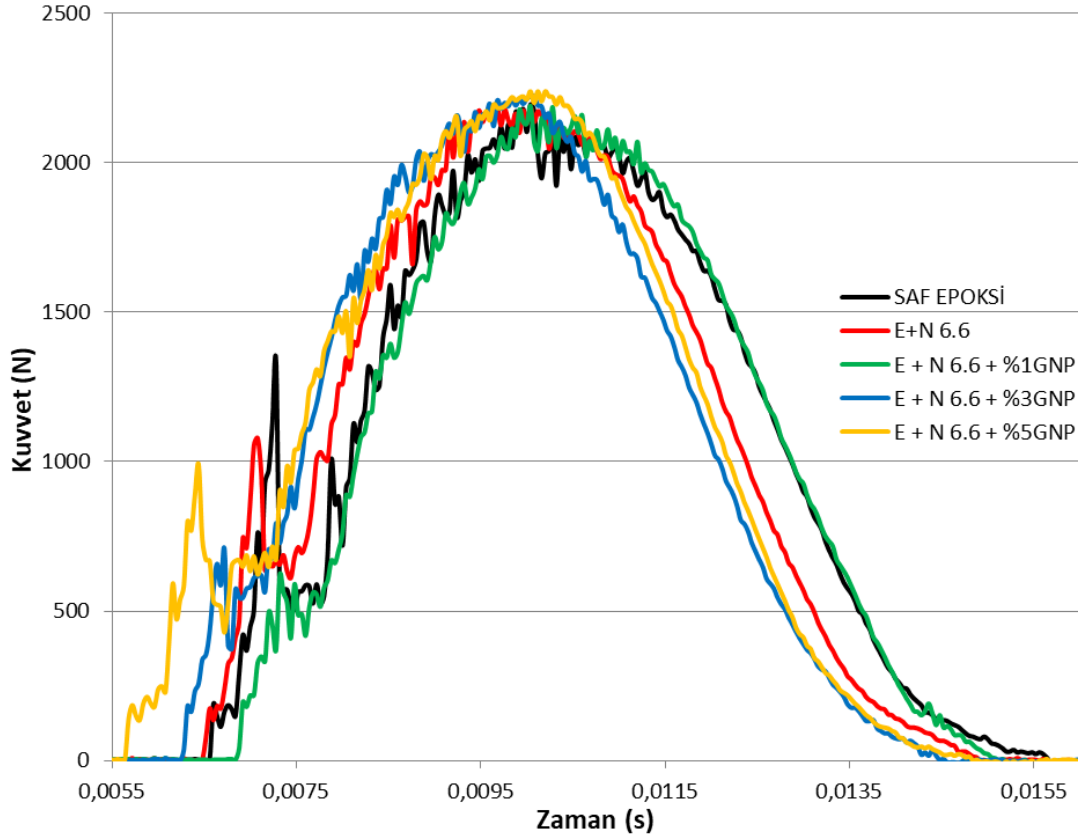
Şekil 4. 14. 23°C'deki darbe testinin enerji-zaman eğrileri

#### 4.1.5. Yapışma bağlantılarının 50°C'deki darbe verileri

Şekil 4.15'de 50°C'de ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinden elde edilen kuvvetlerin zamana göre değişimi verilmiştir. Grafiğe göre; N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısının temas rijitliği 2213.37N ile en yüksek iken, saf epoksili ve N6.6 katkıli yapışma bağlantılarının temas rijitliği ise 2130.37N ile en düşük değer olarak görülmektedir. Ayrıca N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısının 2146.97N ve N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısının 2210.61N'luk kuvvet değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bu değerlere göre; saf epoksili yapışma bağlantısı en düşük temas rijitliği kuvveti göstermiştir. İlk zirve değerine bakıldığında en yüksek değer saf epoksi olduğu görülmektedir ve yapıştırıcıda ki ayrılanın en fazla olduğu bağlantı olduğu görülmektedir. Bu nedenle en düşük değer çıkması muhtemel bir durumdur.

Ek olarak ilk zirve değerlerine göre; saf epoksili yapışma bağlantısı 1333.55N ile en yüksek değere, N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı ise 619.74N ile en düşük değere ulaştığı görülmektedir. Ayrıca N6.6 katkıli yapışma bağlantısının 1195.22N, N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısının 708.27N ve N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısının ise 990.48N değerine ulaştığı görülmektedir. Bu değerlere

göre; saf epoksili yapışma bağlantısı, en düşük kuvvet değerine sahip N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı ile kıyaslandığında kuvvet değerinin %53.5'lik düşüş gösterdiği belirlenmiştir.

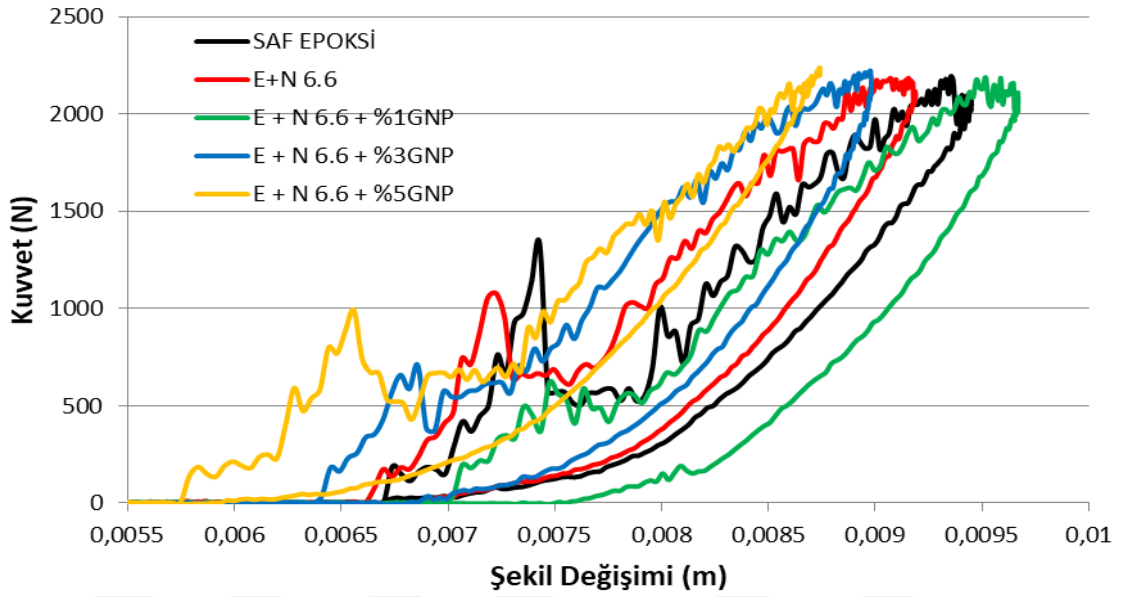


Şekil 4. 15. 50°C'deki darbe testinin kuvvet-zaman eğrileri

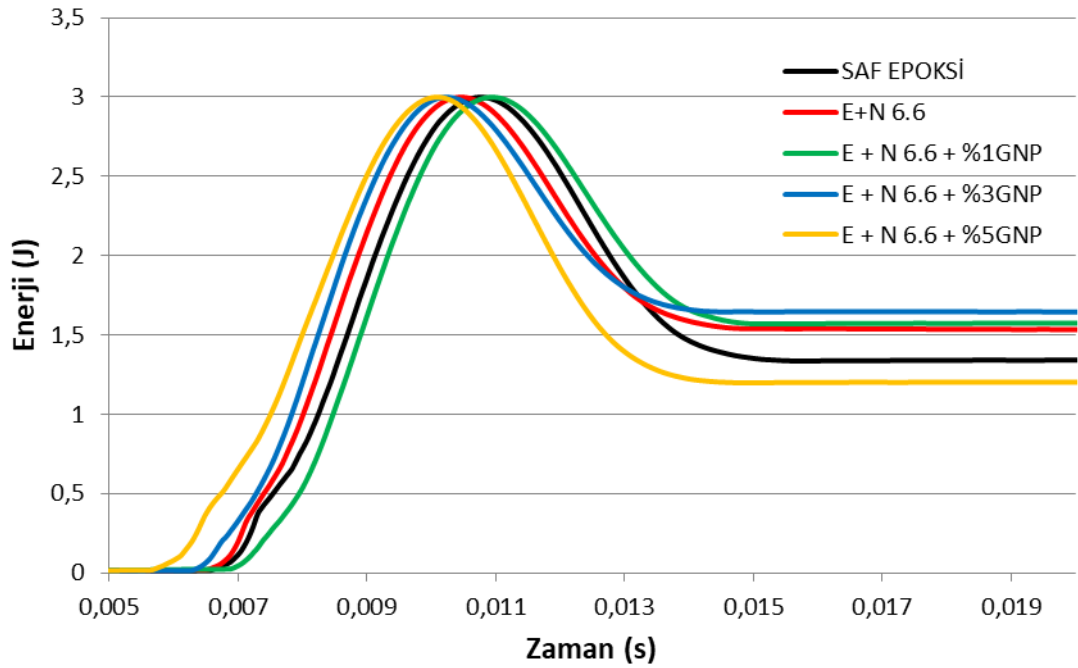
Şekil 4.16'de 50°C'de ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinden elde edilen kuvvetlerin deplasmana(şekil değişimi) göre değişimi verilmiştir. Grafiğe göre N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısının 0.00966m ile en yüksek şekil değişimine, N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısının ise 0.00883m ile en düşük şekil değişimine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca saf epoksili yapışma bağlantısının 0.00949m, N6.6 katkıli yapışma bağlantısının 0.00923m ve N6.6+%3GNP katkıli yapışma bağlantısının ise 0.00898m şekil değiştirdiği görülmektedir. Bu değerlere göre; saf epoksili yapışma bağlantısı, en yüksek şekil değişimine sahip N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı ile kıyaslandığında şekil değişiminin %1.8'lik artış gösterdiği belirlenmiştir.

Şekil 4.17'de 50°C'de ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinin enerji-zaman eğrileri verilmiştir. Grafiğe göre N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısı 1.644J ile en yüksek, N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısının ise 1.316J ile en düşük enerjiyi emdiği

görülmektedir. Ayrıca, saf epoksili yapışma bağlantısı 1.401J, N6.6 katkılı yapışma bağlantısı 1.591J ve N6.6+%1 GNP katkılı yapışma bağlantısı ise 1.572J'lük enerjiyi emdiği görülmektedir. Bu değerlere göre; saf epoksili yapışma bağlantısı, en yüksek enerji emilimi yapan N6.6+%3 GNP katkılı yapışma bağlantısı ile kıyaslandığında enerji emiliminin yaklaşık %17.3'lük artış gösterdiği belirlenmiştir.



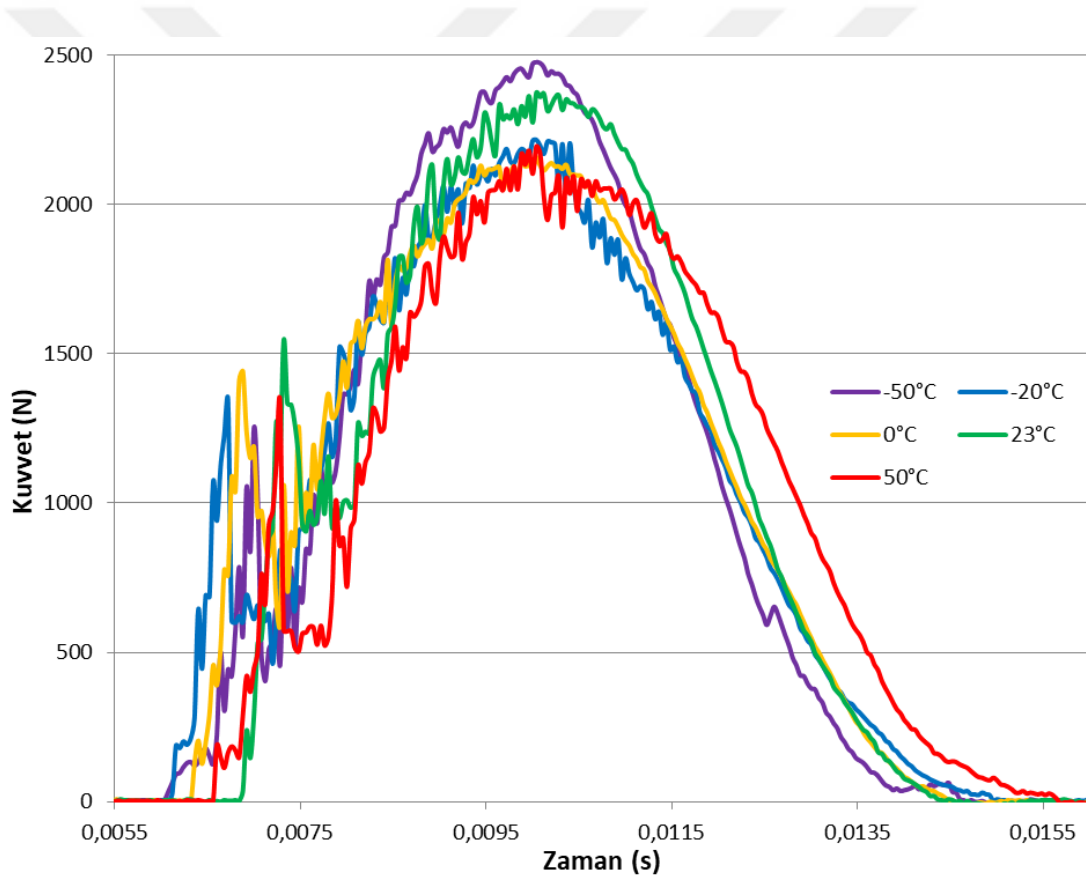
Şekil 4. 16. 50°C'deki darbe testinin kuvvet-şekil değişimi eğrileri



Şekil 4. 17. 50°C'deki darbe testinin enerji-zaman eğrileri

#### 4.1.6. Saf epoksili yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe verileri

Şekil 4.18’de saf epoksili yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki 3J’lük düşük hızlı darbe testinin kuvvet-zaman eğrileri verilmiştir. Grafiğe göre;  $-50^{\circ}\text{C}$ ’de ki yapışma bağlantısı 2445.78N ile en yüksek temas rijitliğine sahipken,  $0^{\circ}\text{C}$ ’de ki yapışma bağlantısı ise 2105.47N ile en düşük temas rijitliğine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca  $-20^{\circ}\text{C}$ ’de ki yapışma bağlantısının 2216.14N,  $23^{\circ}\text{C}$ ’de ki yapışma bağlantısının 2371.08N, ve  $50^{\circ}\text{C}$ ’de ki yapışma bağlantısının 2130.57N’luk bir tepki kuvveti görülmektedir. Bu değerlere göre oda sıcaklığı sınır şartları olan  $-50$  ve  $50^{\circ}\text{C}$  ile kıyaslandığında temas rijitliği sırasıyla %3.2 artış ve %10.1 düşüş belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre sıcaklığın düşmesiyle malzemenin gevrekleşmesi nedeniyle temas rijitliğinin arttığı ve yapışma bağlantısının zayıfladığı görülmektedir.

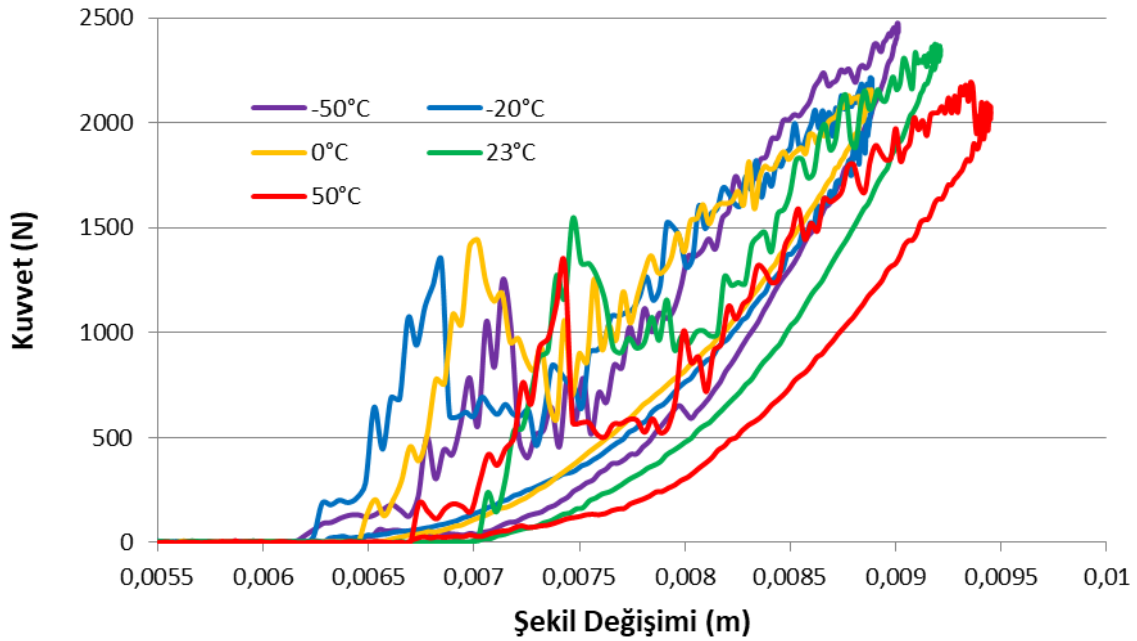


Şekil 4. 18. Saf epoksili yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklardaki darbe testi kuvvet-zaman eğrileri

Ek olarak ilk zirve değerlerine göre;  $-20^{\circ}\text{C}$ ’de ki yapışma bağlantısı 1546.59N ile en yüksek değere,  $50^{\circ}\text{C}$ ’de ki yapışma bağlantısı ise 1195.22N ile en düşük değere ulaştığı görülmektedir. Ayrıca  $-50^{\circ}\text{C}$ ’de ki yapışma bağlantısının 1253.31N,  $0^{\circ}\text{C}$ ’de ki yapışma bağlantısının 1441.45N ve  $23^{\circ}\text{C}$ ’de ki yapışma bağlantısının ise 1543.83N değerine ulaştığı görülmektedir. Bu değerlere göre oda sıcaklığı sınır şartları olan  $-50$  ve

50°C ile kıyaslandığında ilk zirve kuvvetinin sırasıyla %18.8 düşüş ve %22.6 düşüş belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre sıcaklığın azalması ve artmasıyla yapışma bağlantısındaki ayrılmaya işaret eden kuvvette azalma belirlenmiştir.

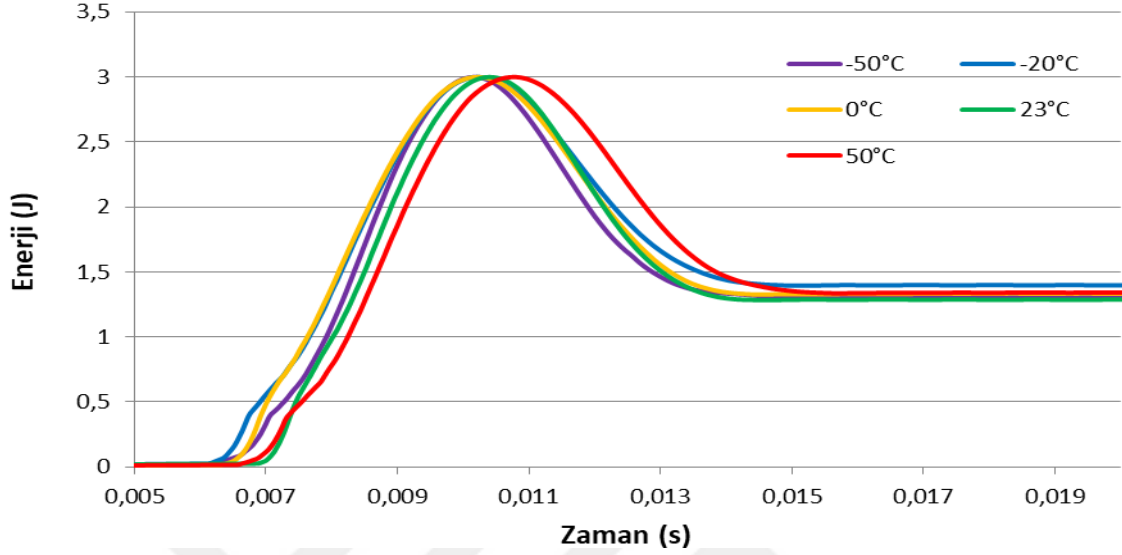
Şekil 4.19'de saf epoksili yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinin kuvvet-şekil değişimi eğrileri verilmiştir. Grafiğe göre 50°C'de ki yapışma bağlantısının 0.00949m ile en yüksek şekil değişimine, -20 ve 0°C'de ki yapışma bağlantısının ise 0.00893m ile en düşük şekil değişimine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca -50°C'de ki yapışma bağlantısının 0.00896m ve 23°C'de ki yapışma bağlantısının 0.00932m şekil değiştirdiği görülmektedir. Bu değerlere göre oda sıcaklığı sınır şartları olan -50 ve 50°C ile kıyaslandığında şekil değişiminde sırasıyla %3.9 düşüş ve %1.8 artış belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre sıcaklığın azalmasıyla gevreklenen malzemenin şekil değişiminin azaldığını ısıtılan malzemenin şekil değişiminin ise arttığını göstermektedir.



Şekil 4. 19. Saf epoksili yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklardaki darbe testi kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Şekil 4.20'de saf epoksili yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinin enerji-zaman eğrileri verilmiştir. Grafiğe göre -20°C'de ki yapışma bağlantısının 1.473J ile en yüksek, -50°C'de ki yapışma bağlantısının ise 1.306J ile en düşük enerjiyi emdiği görülmektedir. Ayrıca 0°C'de ki yapışma bağlantısı 1.435J, 23°C'de ki yapışma bağlantısı 1.45J ve 50°C'de ki yapışma bağlantısı ise

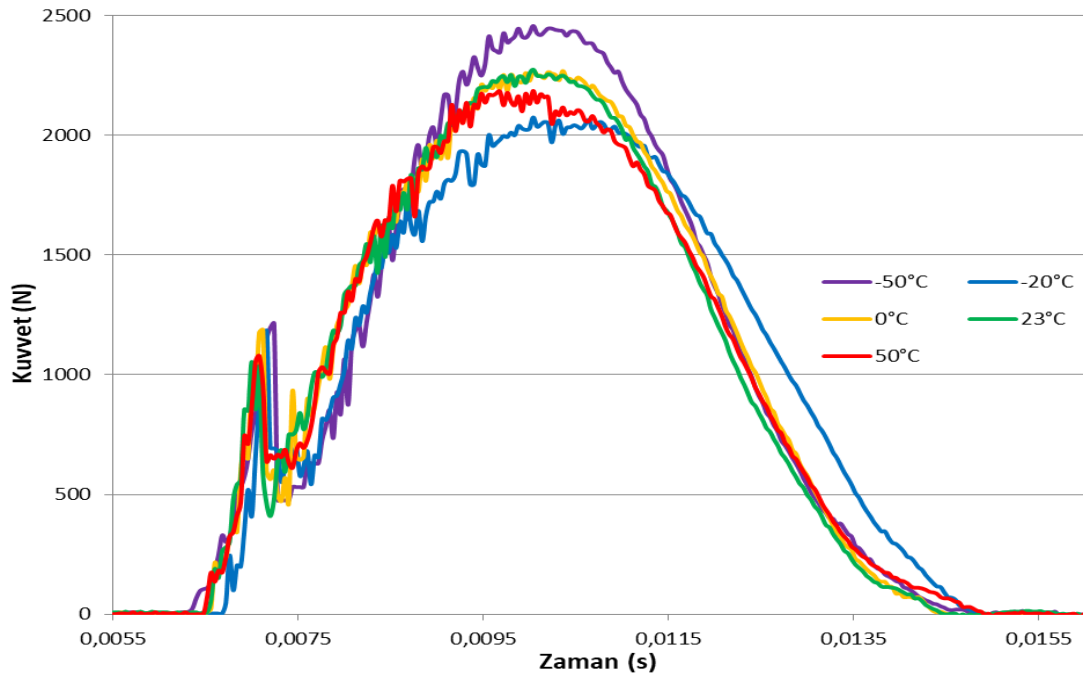
1.401J'lük enerjiyi emdiği görülmektedir. Bu değerlere göre oda sıcaklığı sınır şartları olan -50 ve 50°C ile kıyaslandığında enerji emiliminde sırasıyla %9.93 düşüş ve %3.4 düşüş belirlenmiştir.



Şekil 4. 20. Saf epoksili yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklardaki darbe testi enerji-zaman eğrileri

#### 4.1.7. N6.6 katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklardaki darbe verileri

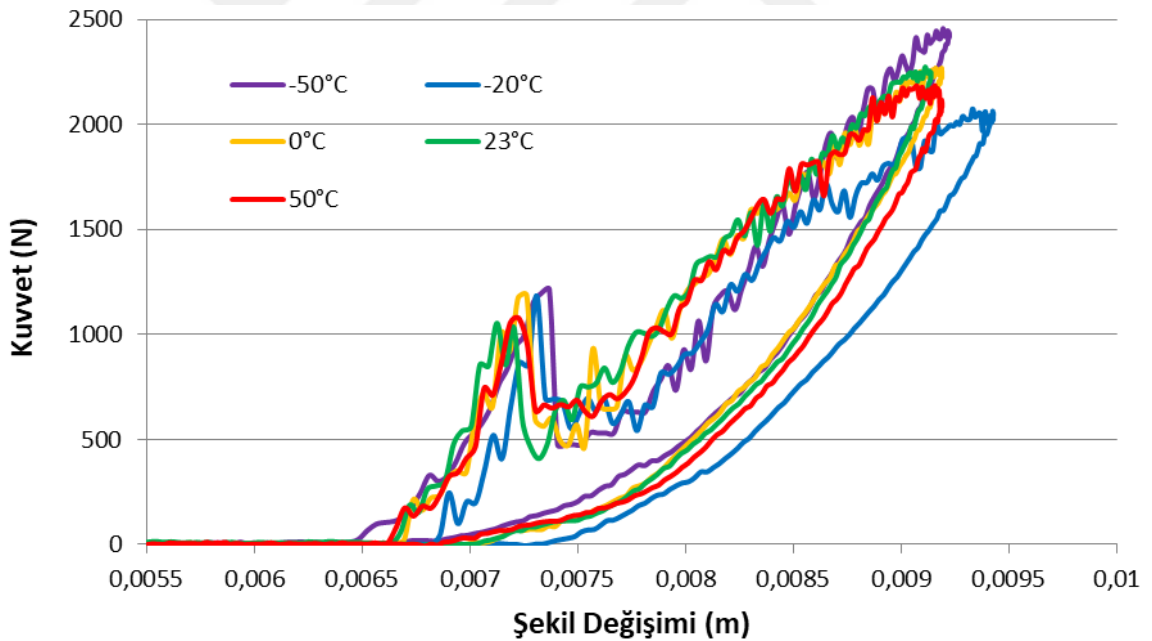
Şekil 4.21'de N6.6 katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinin kuvvet-zaman eğrileri verilmiştir.



Şekil 4. 21. N6.6 katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklardaki darbe testi kuvvet-zaman eğrileri

Grafiğe göre;  $-50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısı 2437.48N ile en yüksek temas rijitliğine sahipken,  $-20^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısı ise 2075.04N ile en düşük temas rijitliğine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca  $0^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının 2268.71N,  $23^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının 2257.64N ve  $50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının 2130.57N'luk bir tepki kuvveti görülmektedir. Bu değerlere göre oda sıcaklığı sınır şartları olan  $-50$  ve  $50^{\circ}\text{C}$  ile kıyaslandığında temas rijitliği sırasıyla %7.9 artış ve %5.6 düşüş belirlenmiştir.

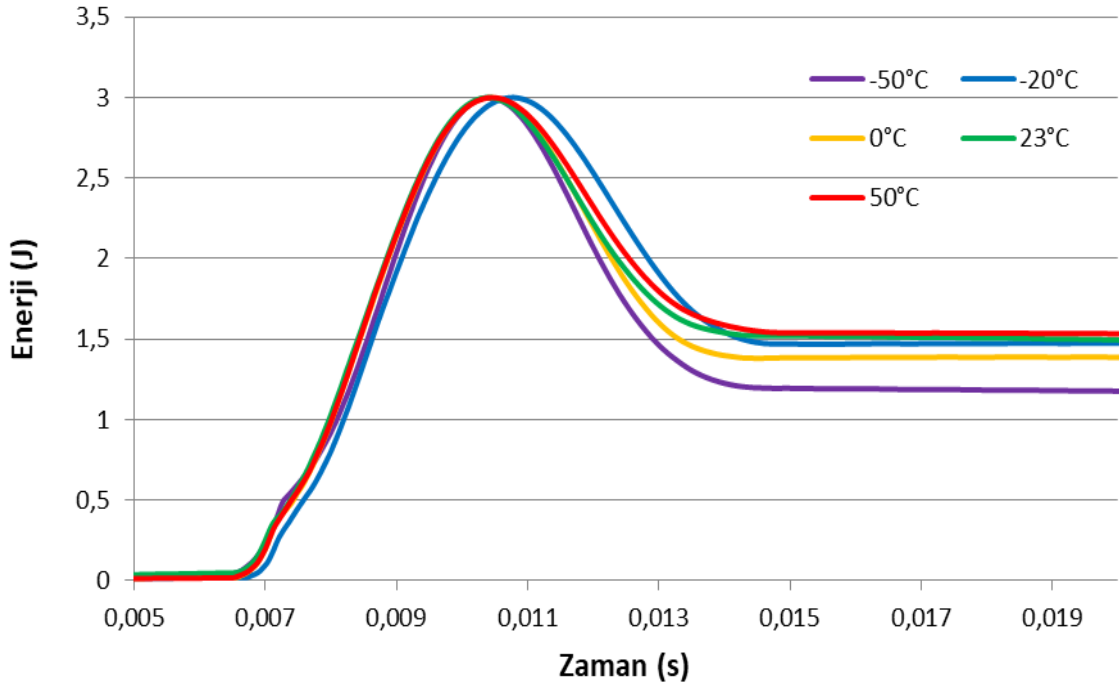
Ek olarak ilk zirve değerlerine göre;  $-50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısı 1195.22N ile en yüksek değere,  $23^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısı ise 1054.11N ile en düşük değere ulaştığı görülmektedir. Ayrıca  $-20^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının 1184.15N,  $0^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının 1175.85N ve  $50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının ise 1079.02N değerine ulaştığı görülmektedir. Bu değerlere göre oda sıcaklığı sınır şartları olan  $-50$  ve  $50^{\circ}\text{C}$  ile kıyaslandığında ilk zirve kuvvetinin sırasıyla %13.4 artış ve %2.4 artış belirlenmiştir.



Şekil 4. 22. N6.6 katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklardaki darbe testi kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Şekil 4.22'de N6.6 katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinin kuvvet-şekil değişimi eğrileri verilmiştir. Grafiğe göre  $-20^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının 0.00947m ile en yüksek şekil değişimine,  $23^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının ise 0.00908m ile en düşük şekil değişimine sahip olduğu

görülmektedir. Ayrıca  $-50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının  $0.00926\text{m}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının  $0.00911\text{m}$  ve  $50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının  $0.00923\text{m}$  şekil değiştirdiği görülmektedir. Bu değerlere göre oda sıcaklığı sınır şartları olan  $-50$  ve  $50^{\circ}\text{C}$  ile kıyaslandığında şekil değişiminde sırasıyla %1.9 artış ve %1.6 artış belirlenmiştir.



Şekil 4.23. N6.6 katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklardaki darbe testi enerji-zaman eğrileri

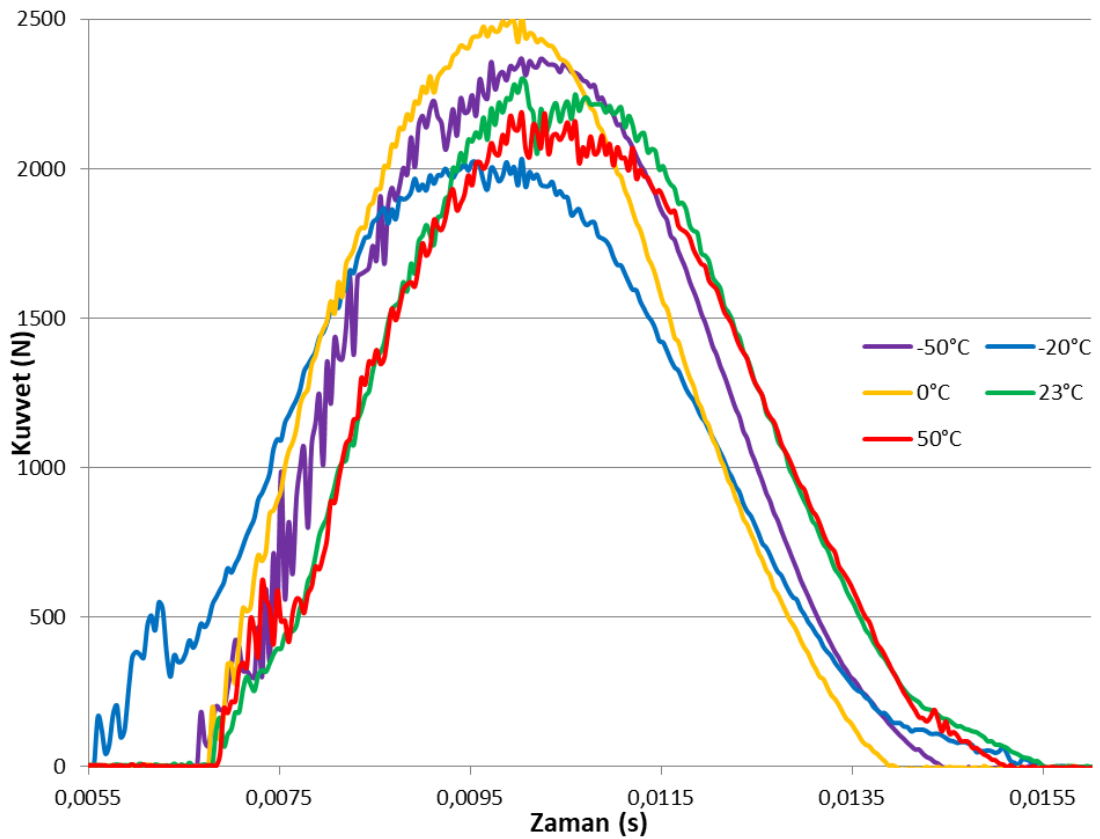
Şekil 4.23'de N6.6 katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki  $3\text{J}$ 'lük düşük hızlı darbe testinin enerji-zaman eğrileri verilmiştir. Grafığe göre  $50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının  $1.591\text{J}$  ile en yüksek,  $-50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının ise  $1.227\text{J}$  ile en düşük enerjiyi emdiği görülmektedir. Ayrıca  $0^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısı  $1.40\text{J}$ ,  $23^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısı  $1.515\text{J}$  ve  $-20^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısı ise  $1.513\text{J}$ 'lük enerjiyi emdiği görülmektedir. Bu değerlere göre oda sıcaklığı sınır şartları olan  $-50$  ve  $50^{\circ}\text{C}$  ile kıyaslandığında enerji emiliminde sırasıyla %19 düşüş ve %5.01 artış belirlenmiştir.

#### 4.1.8. N6.6+%1 GNP katkılı yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe verileri

Şekil 4.24'de N6.6+%1 GNP katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki  $3\text{J}$ 'lük düşük hızlı darbe testinin kuvvet-zaman eğrileri verilmiştir. Grafığe göre;  $0^{\circ}\text{C}$ 'de

ki yapışma bağlantısı 2492.81N ile en yüksek temas rijitliğine sahipken,  $-20^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısı ise 2022.47N ile en düşük temas rijitliğine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca  $-50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının 2368.31N,  $23^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının 2282.54N, ve  $50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının 2146.97N'luk bir tepki kuvveti görülmektedir. Bu değerlere göre oda sıcaklığı sınır şartları olan  $-50$  ve  $50^{\circ}\text{C}$  ile kıyaslandığında temas rijitliği sırasıyla %3.7 artış ve %5.9 düşüş belirlenmiştir.

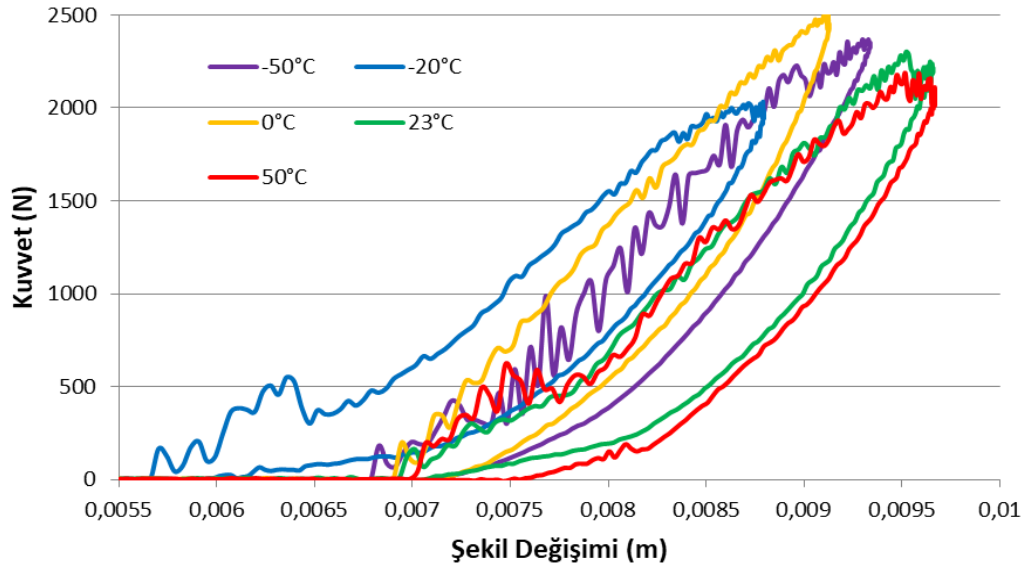
Ek olarak ilk zirve değerlerine göre;  $50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısı 619.74N ile en yüksek değere,  $-50$  ve  $0^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısı ise 200N ile en düşük değere ulaştığı görülmektedir. Ayrıca  $-20^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının 550.57N ve  $23^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının 301.56N değerine ulaştığı görülmektedir. Bu değerlere göre oda sıcaklığı sınır şartları olan  $-50$  ve  $50^{\circ}\text{C}$  ile kıyaslandığında ilk zirve kuvvetinin sırasıyla %33.7 düşüş ve %105.5 artış belirlenmiştir.



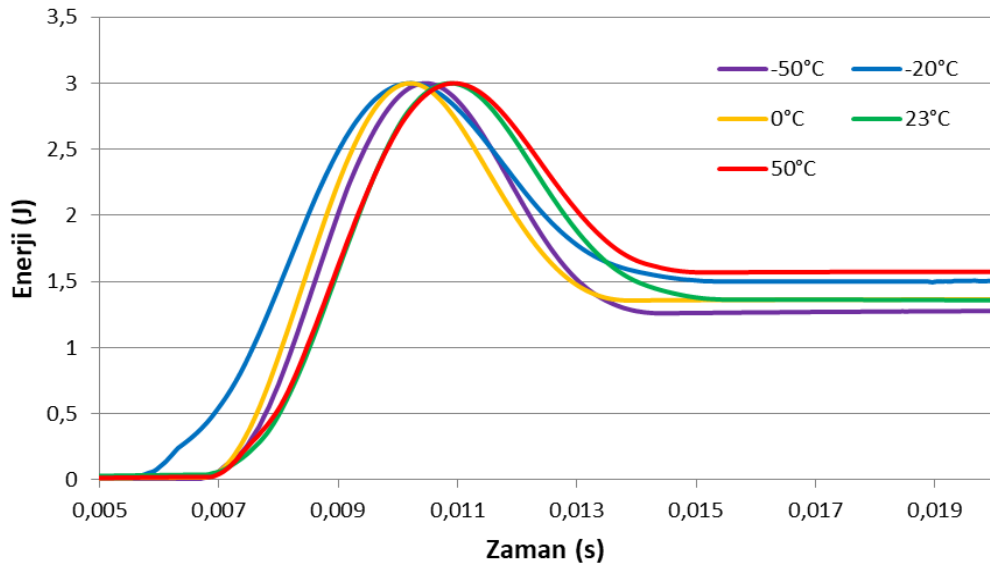
Şekil 4. 24. N6.6+%1 GNP katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklardaki darbe testi kuvvet-zaman eğrileri

Şekil 4.25'de N6.6+%1 GNP katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinin kuvvet-şekil değişimi eğrileri verilmiştir. Grafiğe göre  $50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının 0.00966m ile en yüksek şekil değişimine,  $-20^{\circ}\text{C}$ 'de ki

yapışma bağlantısının ise 0.00873m ile en düşük şekil değişimine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca  $-50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının 0.00933m,  $0^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının 0.00912m ve  $23^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının 0.00965m şekil değiştirdiği görülmektedir. Bu değerlere göre oda sıcaklığı sınır şartları olan  $-50$  ve  $50^{\circ}\text{C}$  ile kıyaslandığında şekil değişiminde sırasıyla %3.3 düşüş ve %0.1 artış belirlenmiştir.



Şekil 4. 25. N6.6+%1 GNP katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklardaki darbe testi kuvvet-şekil değişimi eğrileri

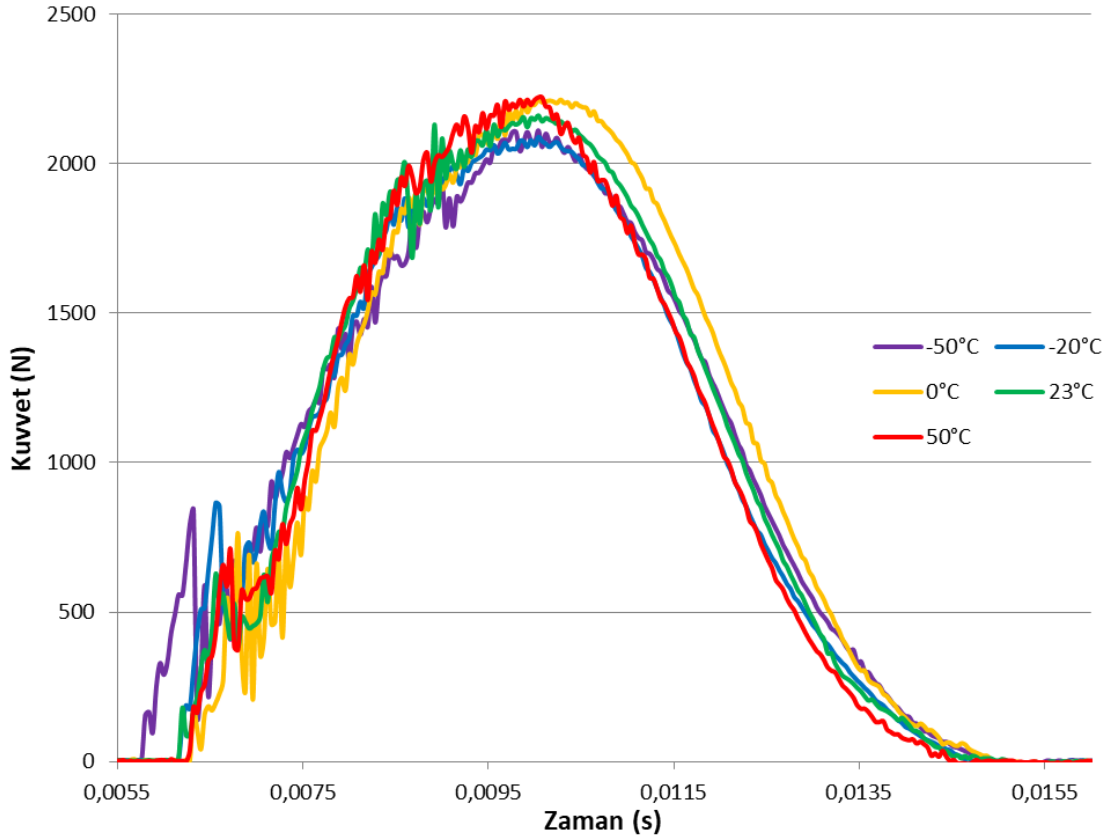


Şekil 4. 26. N6.6+%1 GNP katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklardaki darbe testi enerji-zaman eğrileri

Şekil 4.26’de N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki 3J’lük düşük hızlı darbe testinin enerji-zaman eğrileri verilmiştir. Grafiğe göre 50°C’de ki yapışma bağlantısının 1.572J ile en yüksek, -50°C’de ki yapışma bağlantısının ise 1.274J ile en düşük enerjiyi emdiği görülmektedir. Ayrıca -20°C’de ki yapışma bağlantısı 1.502J, 0°C’de ki yapışma bağlantısı 1.363J ve 23°C’de ki yapışma bağlantısı ise 1.359J’lük enerjiyi emdiği görülmektedir. Bu değerlere göre oda sıcaklığı sınır şartları olan -50 ve 50°C ile kıyaslandığında enerji emiliminde sırasıyla %6.3 düşüş ve %15.7 artış belirlenmiştir.

#### 4.1.9. N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe verileri

Şekil 4.27’de N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki 3J’lük düşük hızlı darbe testinin kuvvet-zaman eğrileri verilmiştir.

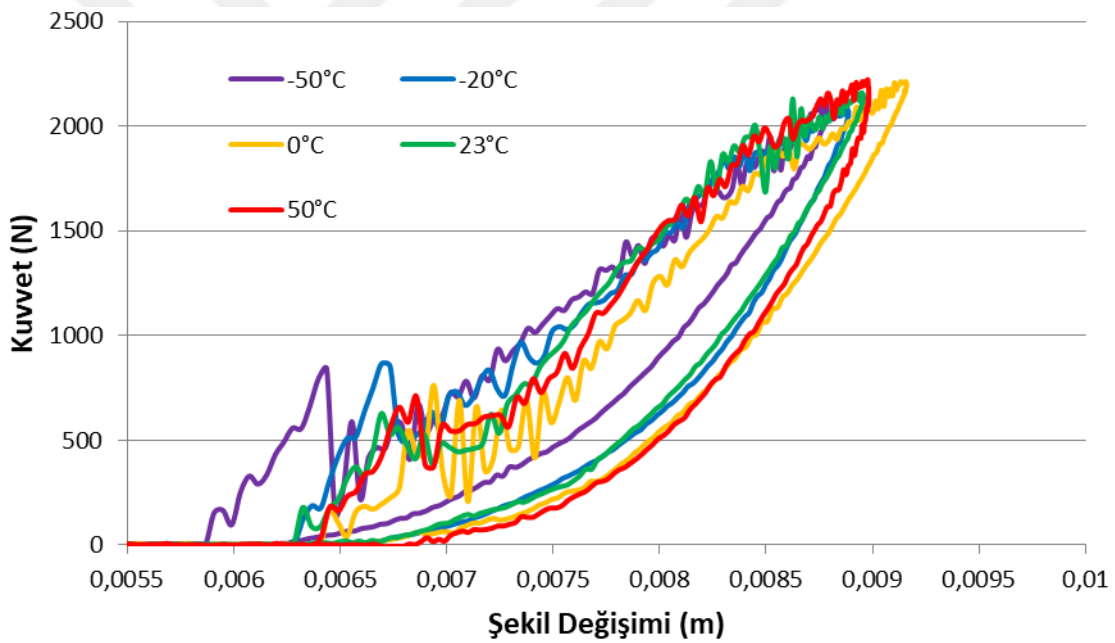


Şekil 4. 27. N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklardaki darbe testi kuvvet-zaman eğrileri

Grafiğe göre; 50°C’de ki yapışma bağlantısı 2213.37 ile en yüksek temas rijitliğine sahipken, -20°C’de ki yapışma bağlantısı ise 2069.51N ile en düşük temas

rijitliğine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca  $-50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının  $2072.37\text{N}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının  $2205.05\text{N}$  ve  $23^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının  $2155.27\text{N}$ 'luk bir tepki kuvveti görülmektedir. Bu değerlere göre oda sıcaklığı sınır şartları olan  $-50$  ve  $50^{\circ}\text{C}$  ile kıyaslandığında temas rijitliği sırasıyla  $\%3.8$  düşüş ve  $\%2.7$  artış belirlenmiştir.

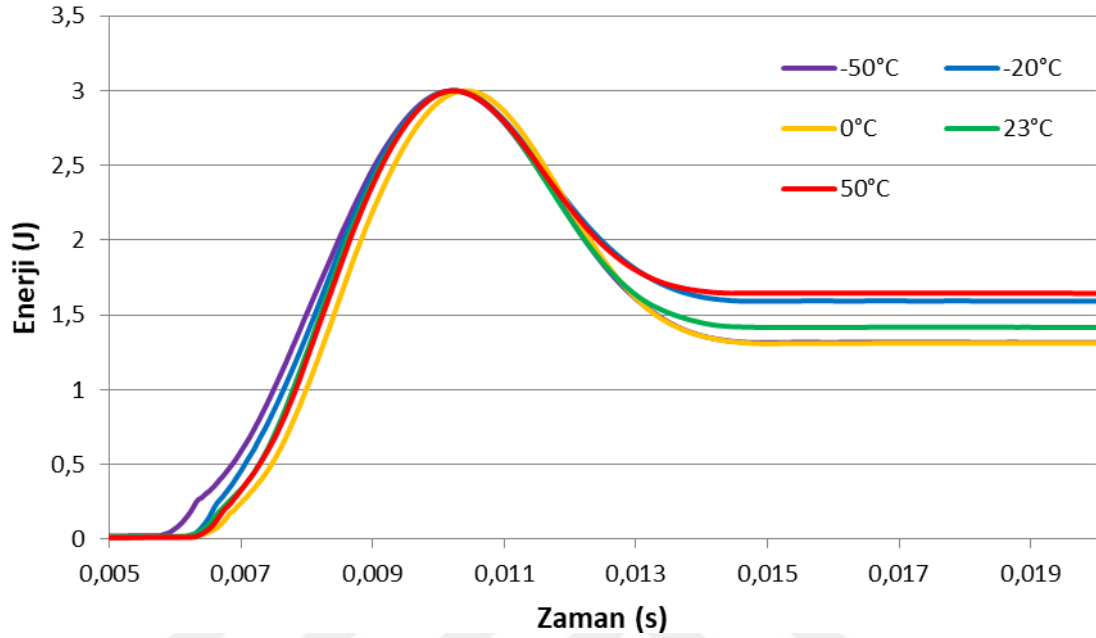
Ek olarak ilk zirve değerlerine göre;  $-20^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısı  $864.98\text{N}$  ile en yüksek değere,  $23^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısı ise  $628.04\text{N}$  ile en düşük değere ulaştığı görülmektedir. Ayrıca  $-50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının  $841.07\text{N}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının  $763.61\text{N}$  ve  $50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının ise  $708.27\text{N}$  değerine ulaştığı görülmektedir. Bu değerlere göre oda sıcaklığı sınır şartları olan  $-50$  ve  $50^{\circ}\text{C}$  ile kıyaslandığında ilk zirve kuvvetinin sırasıyla  $\%33.9$  artış ve  $\%12.8$  artış belirlenmiştir.



Şekil 4. 28. N6.6+%3 GNP katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklardaki darbe testi kuvvet-şekil değişimi eğrileri

Şekil 4.28'de N6.6+%3 GNP katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki  $3\text{J}$ 'lük düşük hızlı darbe testinin kuvvet-şekil değişimi eğrileri verilmiştir. Grafiğe göre  $0^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının  $0.00909\text{m}$  ile en yüksek şekil değişimine,  $-50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının ise  $0.00874\text{m}$  ile en düşük şekil değişimine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca  $-20^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının  $0.00881\text{m}$ ,  $23^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının  $0.00887\text{m}$  ve  $50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının  $0.00898\text{m}$  şekil

değiştirdiği görülmektedir. Bu değerlere göre oda sıcaklığı sınır şartları olan -50 ve 50°C ile kıyaslandığında şekil değişiminde sırasıyla %1.5 düşüş ve %1.2 artış belirlenmiştir.



Şekil 4. 29. N6.6+%3GNP katkıli yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklardaki darbe testi enerji-zaman eğrileri

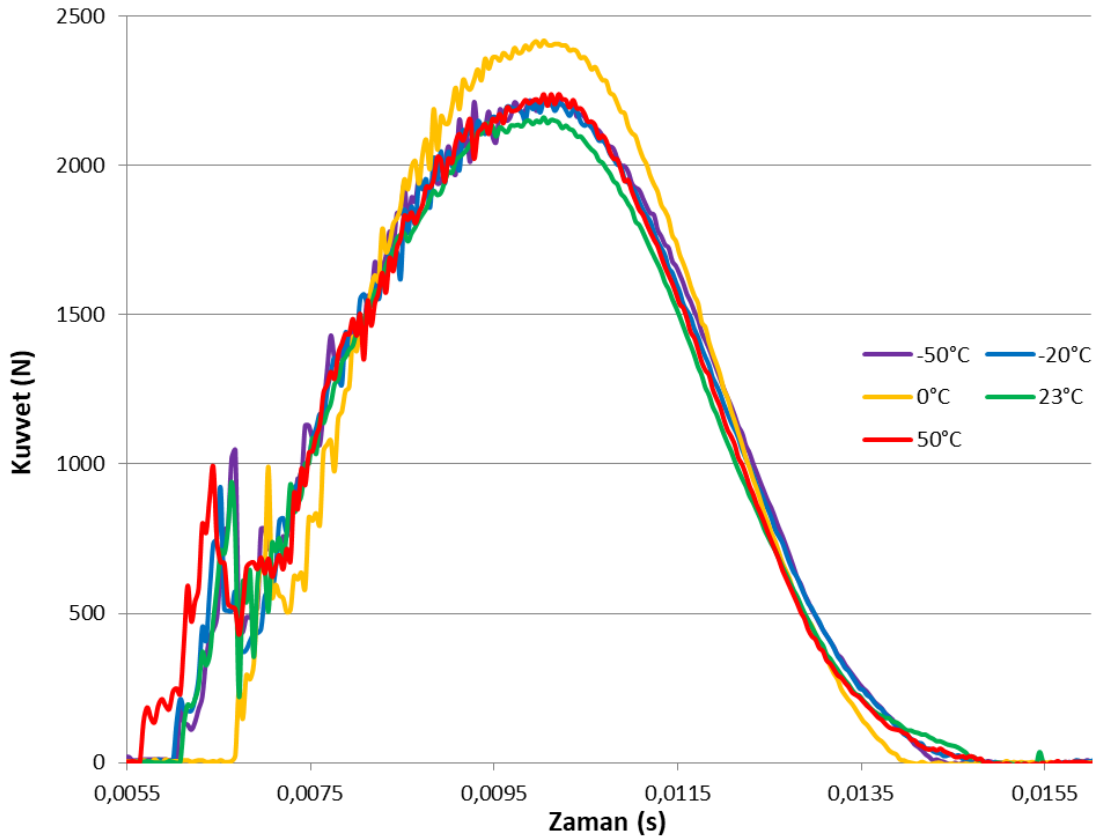
Şekil 4.29'de N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinin enerji-zaman eğrileri verilmiştir. Grafiğe göre 50°C'de ki yapışma bağlantısının 1.644J ile en yüksek, 0°C'de ki yapışma bağlantısının ise 1.311J ile en düşük enerjiyi emdiği görülmektedir. Ayrıca -50°C'de ki yapışma bağlantısı 1.316J, -20°C'de ki yapışma bağlantısı 1.593J ve 23°C'de ki yapışma bağlantısı ise 1.417J'lük enerjiyi emdiği görülmektedir. Bu değerlere göre oda sıcaklığı sınır şartları olan -50 ve 50°C ile kıyaslandığında enerji emiliminde sırasıyla %7.1 düşüş ve %16.01 artış belirlenmiştir.

#### 4.1.10. N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe verileri

Şekil 4.30'de N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinin kuvvet-zaman eğrileri verilmiştir. Grafiğe göre; 0°C'de ki yapışma bağlantısı 2415.35N ile en yüksek temas rijitliğine sahipken, 23°C'de ki yapışma bağlantısı ise 2144.21N ile en düşük temas rijitliğine sahip olduğu

görülmektedir. Ayrıca  $-50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının 2182.94N,  $-20^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının 2213.37N ve  $50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının 2210.61N'luk bir tepki kuvveti görülmektedir. Bu değerlere göre oda sıcaklığı sınır şartları olan  $-50$  ve  $50^{\circ}\text{C}$  ile kıyaslandığında temas rijitliği sırasıyla %1.8 artış ve %3.1 artış belirlenmiştir.

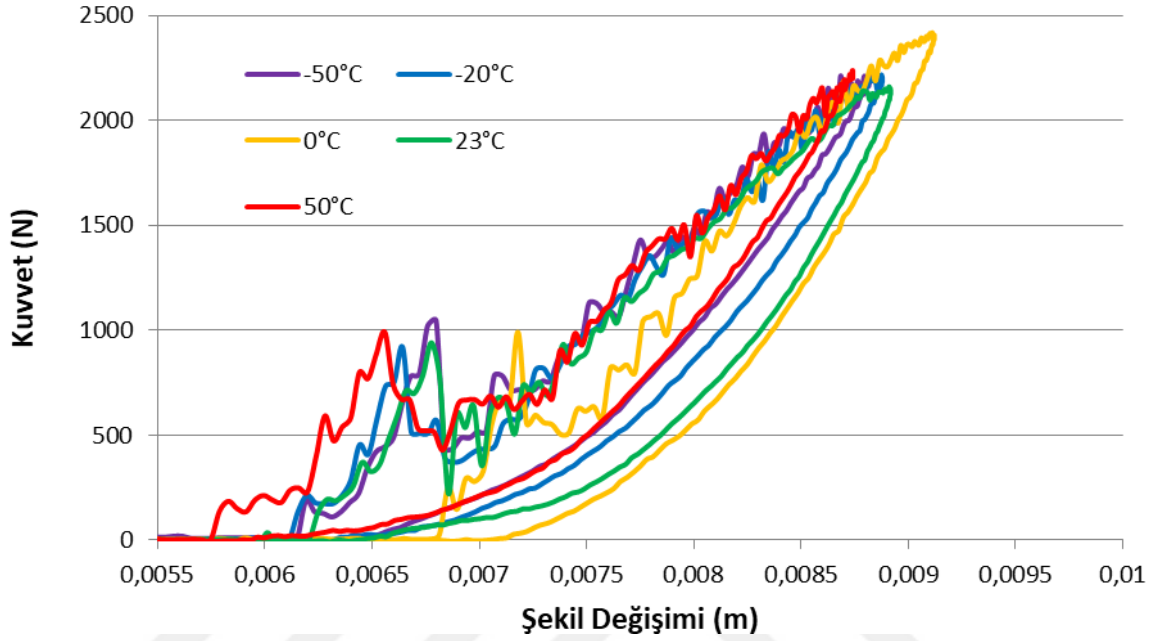
Ek olarak ilk zirve değerlerine göre;  $-50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısı 1045.81N ile en yüksek değere,  $23^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısı ise 940.67N ile en düşük değere ulaştığı görülmektedir. Ayrıca  $-20^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının 1018.15N ve 0 ile  $50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının ise 990.48N değerine ulaştığı görülmektedir. Bu değerlere göre oda sıcaklığı sınır şartları olan  $-50$  ve  $50^{\circ}\text{C}$  ile kıyaslandığında ilk zirve kuvvetinin sırasıyla %11.2 artış ve %5.3 artış belirlenmiştir.



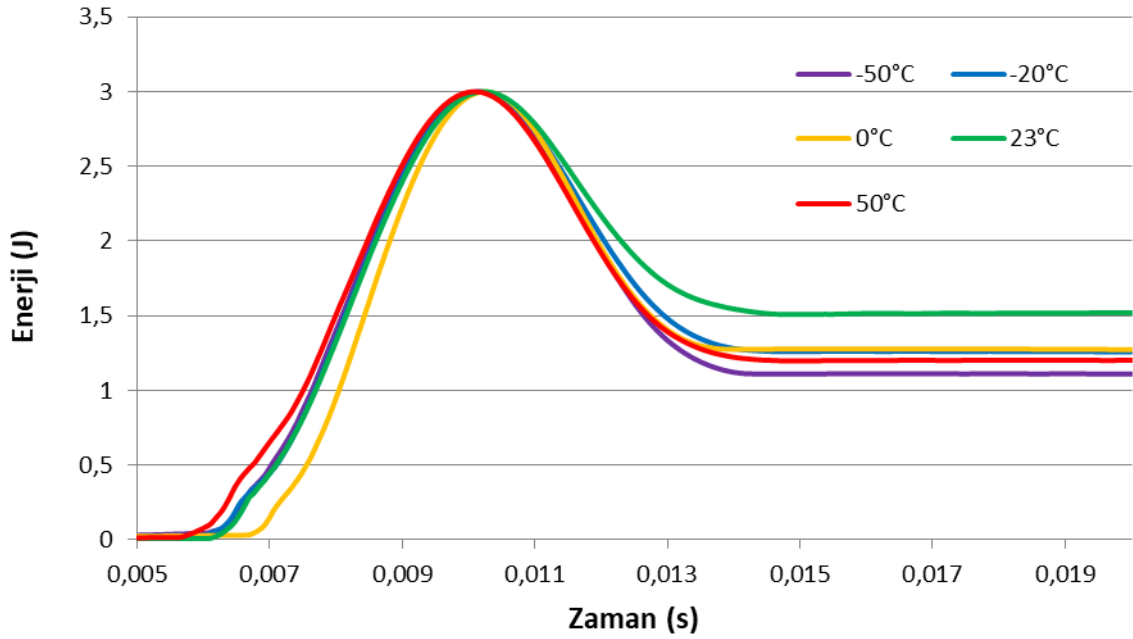
Şekil 4. 30. N6.6+%5 GNP katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklardaki darbe testi kuvvet-zaman eğrileri

Şekil 4.31'de N6.6+%5 GNP katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki 3J'lük düşük hızlı darbe testinin kuvvet-şekil değişimi eğrileri verilmiştir. Grafiğe göre  $0^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının 0.00910m ile en yüksek şekil değişimine,  $50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının ise 0.00883m ile en düşük şekil değişimine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca  $-50^{\circ}\text{C}$ 'de ki yapışma bağlantısının 0.00885m,  $-20^{\circ}\text{C}$ 'de ki

yapışma bağlantısının 0.00888m ve 23°C'de ki yapışma bağlantısının 0.00886m şekil değiştirdiği görülmektedir. Bu değerlere göre oda sıcaklığı sınır şartları olan -50 ve 50°C ile kıyaslandığında şekil değişiminde sırasıyla %0.1 düşüş ve %0.3 düşüş belirlenmiştir.



Şekil 4. 31. N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklardaki darbe testi kuvvet-şekil değişimi eğrileri



Şekil 4. 32. N6.6+%5GNP katkıli yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklardaki darbe testi enerji-zaman eğrileri

Şekil 4.32’de N6.6+%5 GNP katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki 3J’lük düşük hızlı darbe testinin enerji-zaman eğrileri verilmiştir. Grafiğe göre 23°C’de ki yapışma bağlantısının 1.519J ile en yüksek, -50°C’de ki yapışma bağlantısının ise 1.219J ile en düşük enerjiyi emdiği görülmektedir. Ayrıca -20°C’de ki yapışma bağlantısı 1.259J, 0°C’de ki yapışma bağlantısı 1.313J ve 50°C’de ki yapışma bağlantısı ise 1.316J’lük enerjiyi emdiği görülmektedir. Bu değerlere göre oda sıcaklığı sınır şartları olan -50 ve 50°C ile kıyaslandığında enerji emiliminde sırasıyla %19.7 düşüş ve %13.4 düşüş belirlenmiştir.

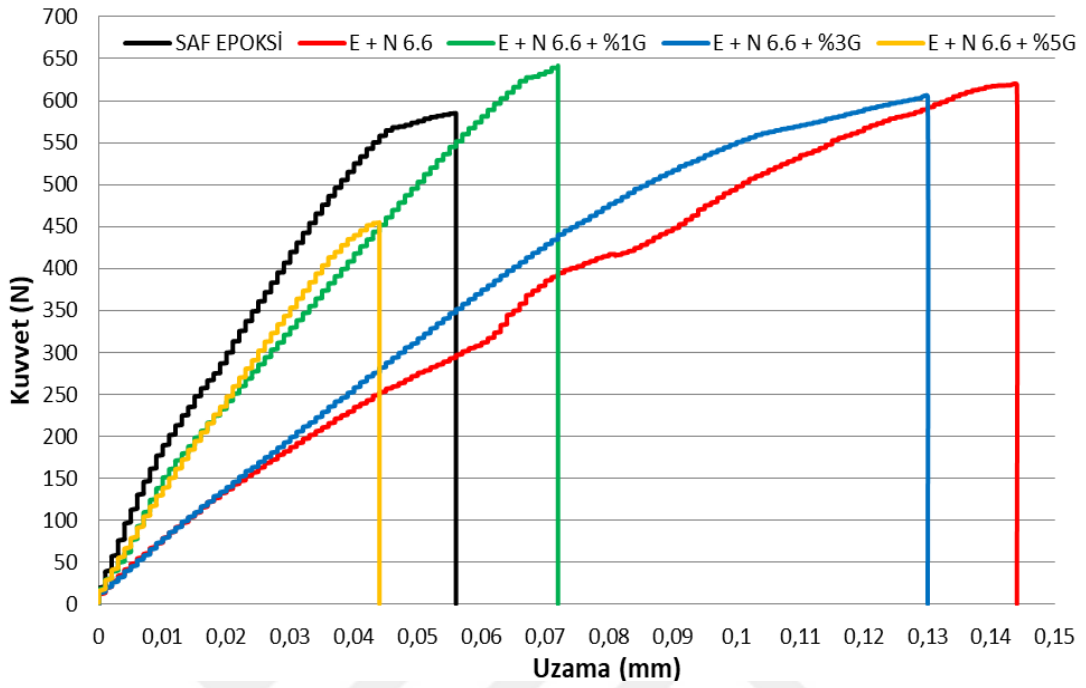
## 4.2. Darbe Sonrası Çekme Testlerinin Sonuçları

### 4.2.1. -50°C’deki darbe sonrası çekme verileri

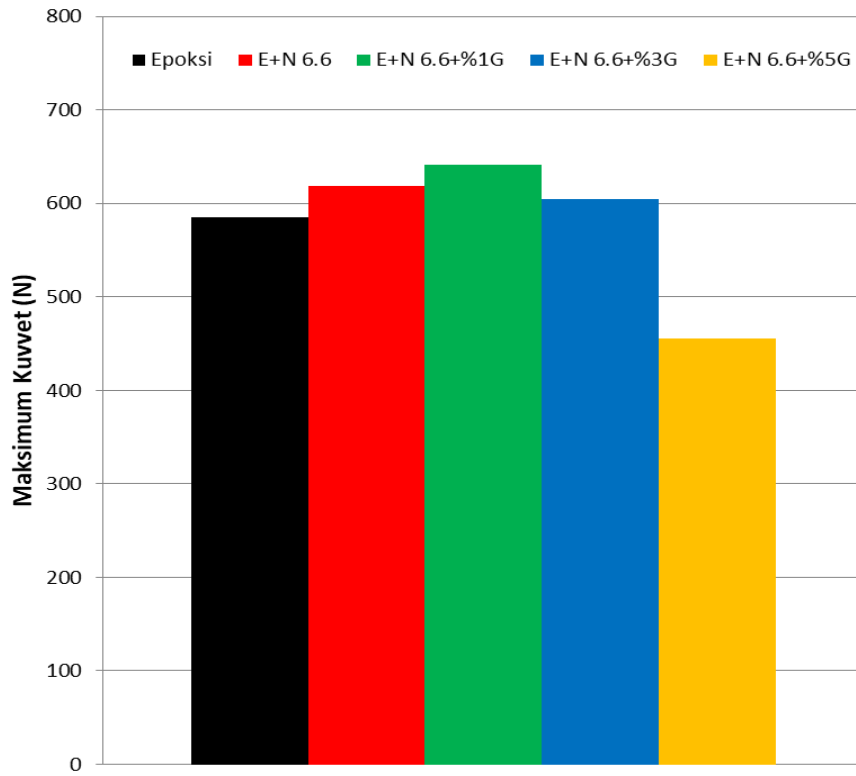
Şekil 4.32’de yapışma bağlantılarının -50°C’deki darbe sonrası çekme testinin kuvvet-uzama eğrileri verilmiştir. Grafik incelendiğinde tüm yapışma bağlantılarının literatürde ki çalışmalara uygun olarak ve birbirleri ile aynı karakteristikte artış gösterdiği görülmektedir. Artış esnasında ki dalgalanmalar şekil değişiminin tespitinde kullanılan ekstansiyometrenin hassas oluşundan dolayı meydana gelen titreşim gibi etkenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir çünkü çekme cihazından elde edilen şekil değişimi verileri kullanıldığında herhangi bir dalgalanma görülmemiştir.

Çekme deneyleri öncesinde darbe testleri yapıldığı için yapışma bağlantılarının kuvvet ve şekil değişiminin kullanılmasıyla elde edilecek kayma dayanımı-kayma şekil değişimi eğrilerinin sağlıklı bir sonuç vermeyeceği belirlenmiştir. Çünkü darbenin etkisiyle yapışma alanının içerisinde bazı ayrılmaların olduğu elde edilen darbe verileri ile belirlenmiş ancak bu ayrılmaların ne boyutta olduğu belirlenememiştir. Bu nedenle yapışma bağlantılarının verimli bir kıyaslamasını gösteremeyeceği için kayma dayanımı-kayma şekil değişimi eğrileri yerine kopma gerçekleşinceye kadar oluşan maksimum kuvvet değerlerinin ve bu kuvvete ulaşıncaya kadar elde edilen değişimin şekil değişimi ile karşılaştırmalı eğrileri kullanılmıştır. Şekil 4.33’e göre N6.6 katkılı yapışma bağlantısı 0.144mm ile en yüksek şekil değişimine ulaşırken, N6.6+%5 GNP katkılı yapışma bağlantısı 0.044mm ile en düşük şekil değişimine ulaşmıştır. Ayrıca; saf epoksili yapışma bağlantısı 0.056mm, N6.6+%1 GNP katkılı yapışma bağlantısı 0.072mm ve N6.6+%3 GNP katkılı yapışma bağlantısı 0.13mm’lik şekil değişimine ulaşmıştır. Bu değerlere göre, N6.6 katkısının saf epoksili bağlantıya kıyasla şekil

değişimini %157.1'lik artış sağlayarak gevrekliği çok yüksek bir oranda azalttığı belirlenmiştir.



Şekil 4. 33. -50°C'deki darbe sonrası çekme testi kuvvet-uzama eğrileri

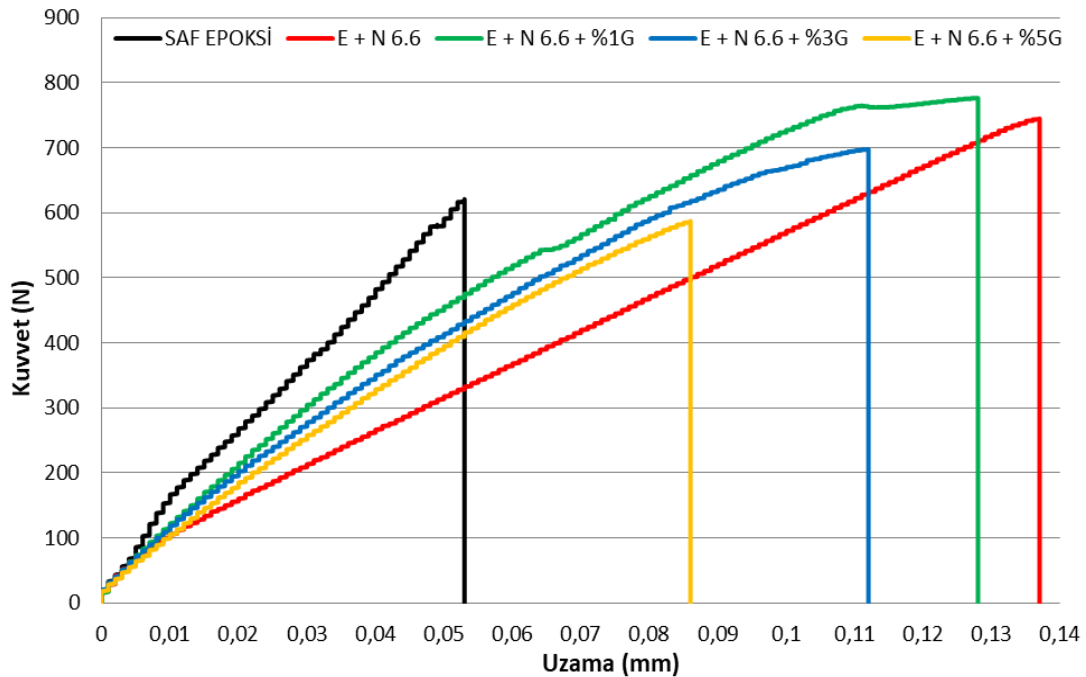


Şekil 4. 34. -50°C'deki darbe sonrası yapışma bağlantılarının maksimum çekme kuvvetleri

Şekil 4.34’de ise yapışma bağlantılarının  $-50^{\circ}\text{C}$ ’de kopma kuvvetleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Bu grafiğe göre; N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı 641.82N ile en yüksek kopma kuvvetine sahipken N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısı 455.03N ile en düşük kopma kuvvetine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca saf epoksili yapışma bağlantısı 585.16N, N6.6 katkıli yapışma bağlantısı 618.62N ve N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısı ise 604.82N’luk bir kopma kuvvetine ulaşmıştır. Bu değerlere göre, en iyi darbe sonrası kopma kuvvetini N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı göstermiş ve saf epoksili yapışma bağlantısına kıyasla %9.7’lik bir artış sağlamıştır. Ancak GNP oranı %5’e çıktığında darbe sonrası kopma kuvvetinin saf epoksiye kıyasla düştüğü görülmüştür. Ayrıca bu sonuçlar; Şekil 1’de açıklanan sonuçlarla örtüşerek ilk zirve değerinin yapışma bağlantısında ki ayrılmayı başlattığı yorumunu doğrulamaktadır çünkü ilk zirve değerinin yüksek oluşu yapışma bağlantısında ki ayrılmanın da fazla olmasına ve kopma kuvvetinin düşmesine neden olmaktadır.

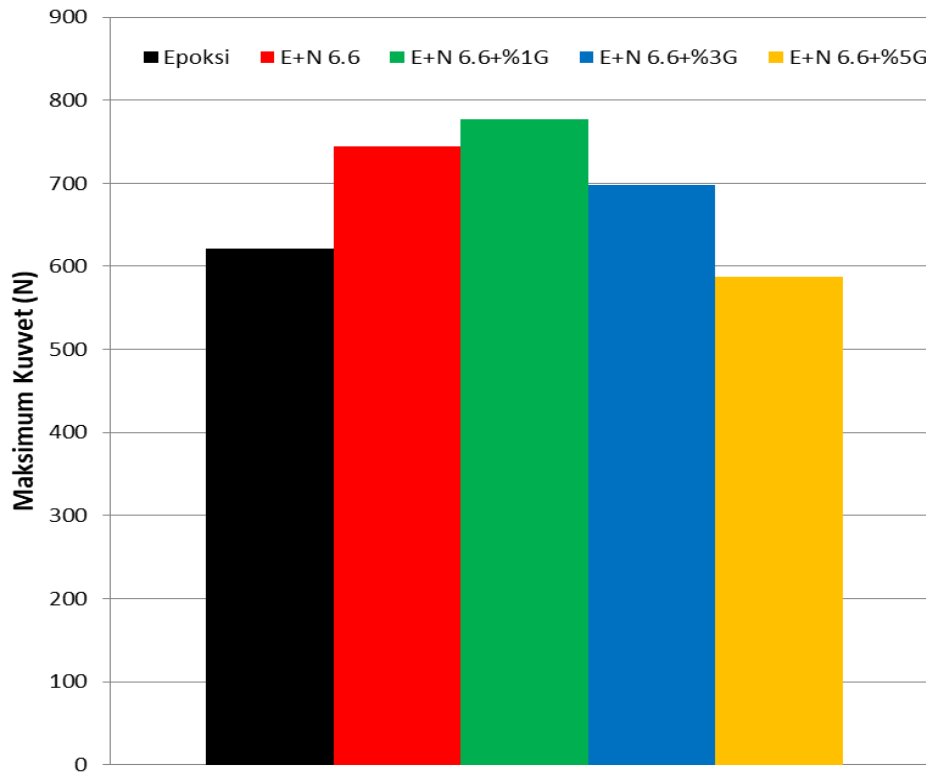
#### 4.2.2. $-20^{\circ}\text{C}$ ’deki darbe sonrası çekme verileri

Şekil 4.35’de yapışma bağlantılarının  $-20^{\circ}\text{C}$ ’deki darbe sonrası çekme testinin kuvvet-uzama eğrileri verilmiştir.



Şekil 4. 35.  $-20^{\circ}\text{C}$ ’deki darbe sonrası çekme testi kuvvet-uzama eğrileri

Grafiğe göre N6.6 katkıli yapışma bağlantısı 0.137mm ile en yüksek şekil değişimine ulaşırken, saf epoksili yapışma bağlantısı 0.053mm ile en düşük şekil değişimine ulaşmıştır. Ayrıca; N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı 0.128mm, N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısı 0.112mm ve N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısı 0.086mm'lik şekil değişimine ulaşmıştır. Bu değerlere göre, N6.6 katkısının saf epoksili bağlantıya kıyasla şekil değişimini %158.5'lik artış sağlayarak gevrekliği çok yüksek bir oranda azalttığı belirlenmiştir.

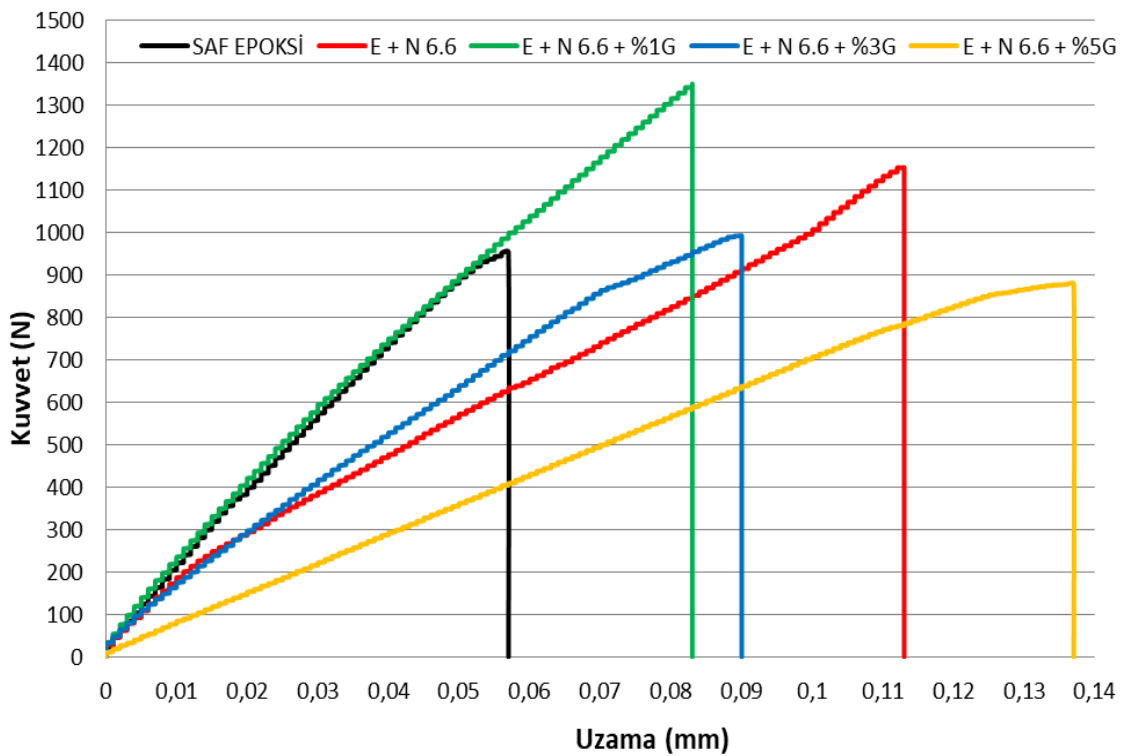


Şekil 4. 36. -20°C'deki darbe sonrası yapışma bağlantılarının maksimum çekme kuvvetleri

Şekil 4.36'de yapışma bağlantılarının -20°C'de kopma kuvvetleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu grafiğe göre; N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı 776.49N ile en yüksek kopma kuvvetine sahipken N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısı 587.24N ile en düşük kopma kuvvetine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca saf epoksili yapışma bağlantısı 620.88N, N6.6 katkıli yapışma bağlantısı 744.84N ve N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısı ise 697.76N'luk bir kopma kuvvetine ulaşmıştır. Bu değerlere göre, en iyi darbe sonrası kopma kuvvetini N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı göstermiş ve saf epoksili yapışma bağlantısına kıyasla %25.1'lik bir artış sağlamıştır.

#### 4.2.3. 0°C'deki darbe sonrası çekme verileri

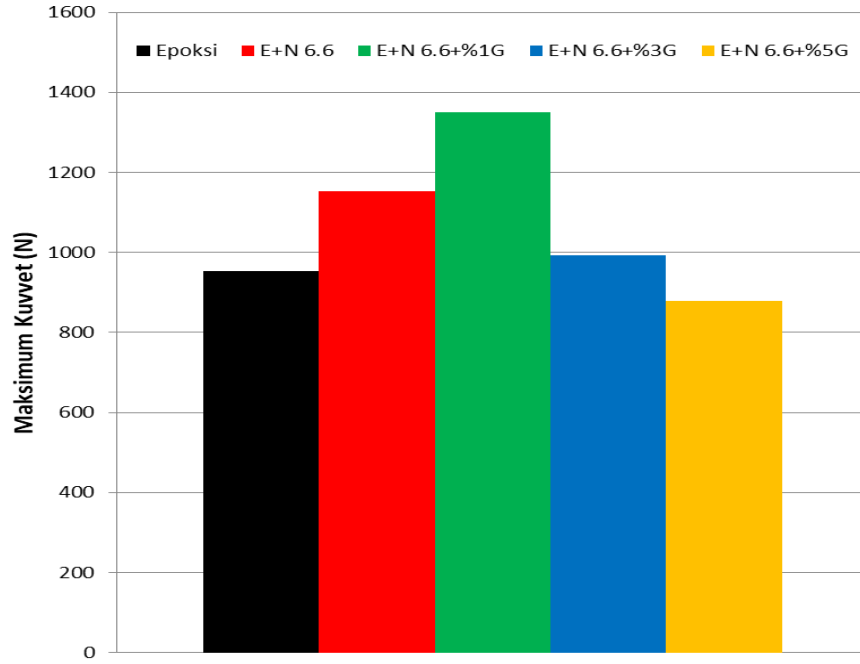
Şekil 4.37'de yapışma bağlantılarının 0°C'deki darbe sonrası çekme testinin kuvvet-uzama eğrileri verilmiştir. Grafığe göre N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısı 0.137mm ile en yüksek şekil değışimine ulaşırken, saf epoksili yapışma bağlantısı 0.057mm ile en düşük şekil değışimine ulaşmıştır. Ayrıca; N6.6 katkıli yapışma bağlantısı 0.113mm, N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı 0.083mm ve N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısı 0.09mm'lik şekil değışimine ulaşmıştır. Bu değerlere göre, N6.6+%5 GNP katkısının saf epoksili bağlantıya kıyasla şekil değışimini %140.4'lük artış sağlayarak gevrekliği çok yüksek bir oranda azalttığı belirlenmiştir.



Şekil 4. 37. 0°C'deki darbe sonrası çekme testi kuvvet-uzama eğrileri

Şekil 4.38'de yapışma bağlantılarının 0°C'de kopma kuvvetleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu grafığe göre; N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı 1350.63N ile en yüksek kopma kuvvetine sahipken N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısı 877.68N ile en düşük kopma kuvvetine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca saf epoksili yapışma bağlantısı 953.07N, N6.6 katkıli yapışma bağlantısı 1153.55N ve N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısı ise 993.11N'luk bir kopma kuvvetine ulaşmıştır. Bu değerlere göre, en iyi darbe sonrası kopma kuvvetini N6.6+%1 GNP katkıli yapışma

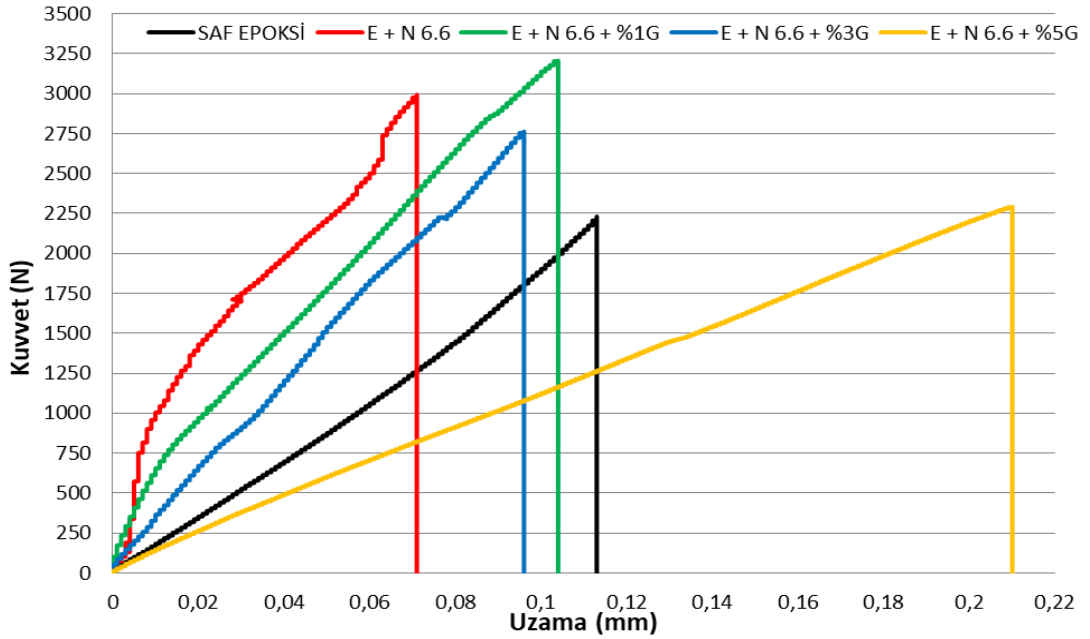
bağlantısı göstermiş ve saf epoksili yapışma bağlantısına kıyasla %41.7'lik bir artış sağlamıştır.



Şekil 4. 38. 0°C'deki darbe sonrası yapışma bağlantılarının maksimum çekme kuvvetleri

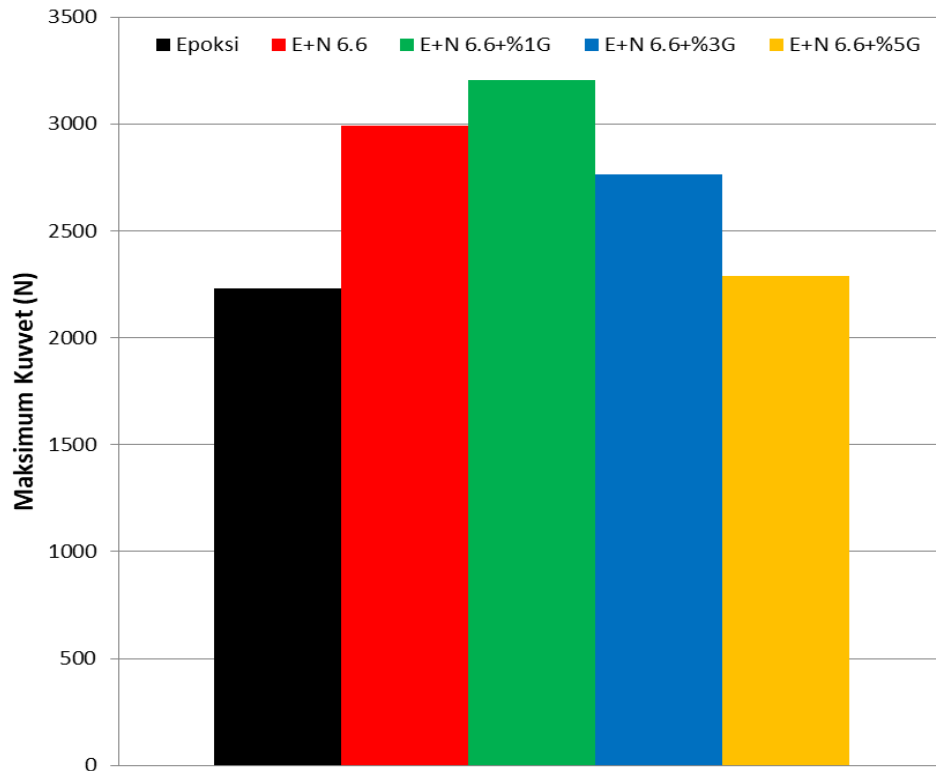
#### 4.2.4. 23°C'deki darbe sonrası çekme verileri

Şekil 4.39'de yapışma bağlantılarının 23°C'deki darbe sonrası çekme testinin kuvvet-uzama eğrileri verilmiştir.



Şekil 4. 39. 23°C'deki darbe sonrası çekme testi kuvvet-uzama eğrileri

Grafiğe göre N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısı 0.21mm ile en yüksek şekil değişimine ulaşırken, N6.6 katkıli yapışma bağlantısı 0.071mm ile en düşük şekil değişimine ulaşmıştır. Ayrıca; saf epoksili yapışma bağlantısı 0.113mm, N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı 0.104mm ve N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısı 0.096mm'lik şekil değişimine ulaşmıştır. Bu değerlere göre, N6.6+%5 GNP katkısının saf epoksili bağlantıya kıyasla şekil değişimini %85.8'lik artış sağlayarak gevrekliği yüksek bir oranda azalttığı belirlenmiştir.

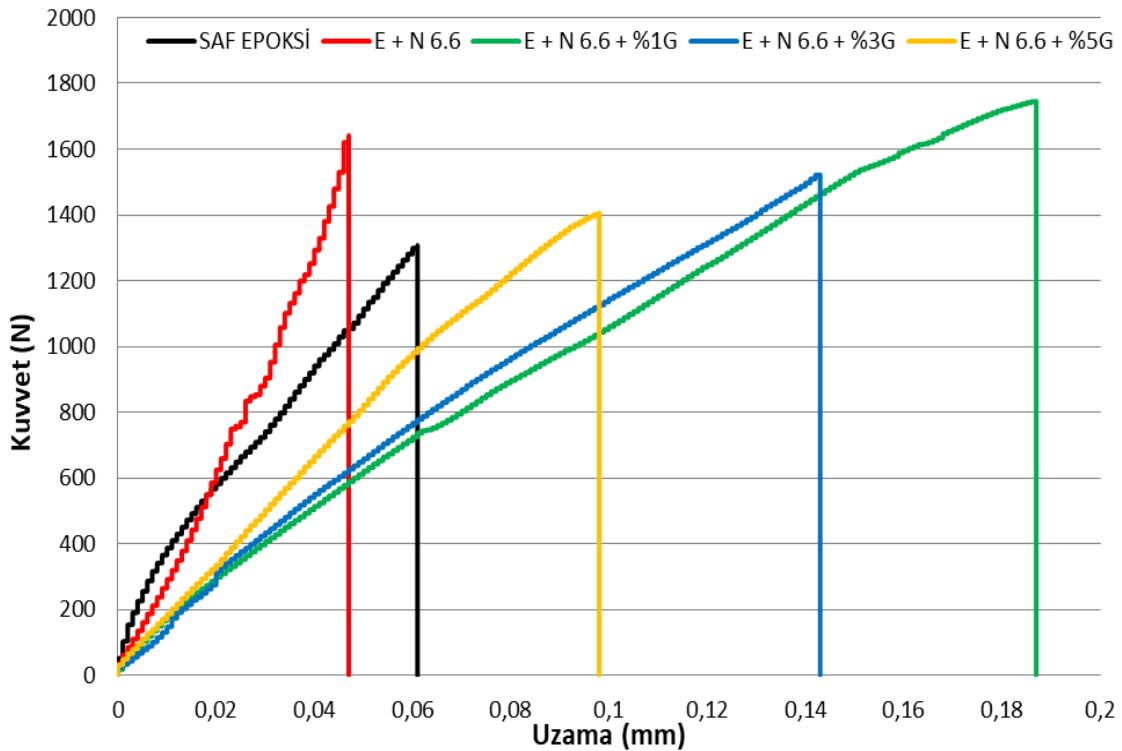


Şekil 4. 40. 23°C'deki darbe sonrası yapışma bağlantılarının maksimum çekme kuvvetleri

Şekil 4.40'de yapışma bağlantılarının 23°C'de kopma kuvvetleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu grafiğe göre; N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı 3206.39N ile en yüksek kopma kuvvetine sahipken saf epoksili yapışma bağlantısı 2230.28N ile en düşük kopma kuvvetine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca N6.6 katkıli yapışma bağlantısı 2992.74N, N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısı 2762.16N ve N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısı ise 2290.84N'luk bir kopma kuvvetine ulaşmıştır. Bu değerlere göre, en iyi darbe sonrası kopma kuvvetini N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı göstermiş ve saf epoksili yapışma bağlantısına kıyasla %43.8'lik bir artış sağlamıştır.

#### 4.2.5. 50°C'deki darbe sonrası çekme verileri

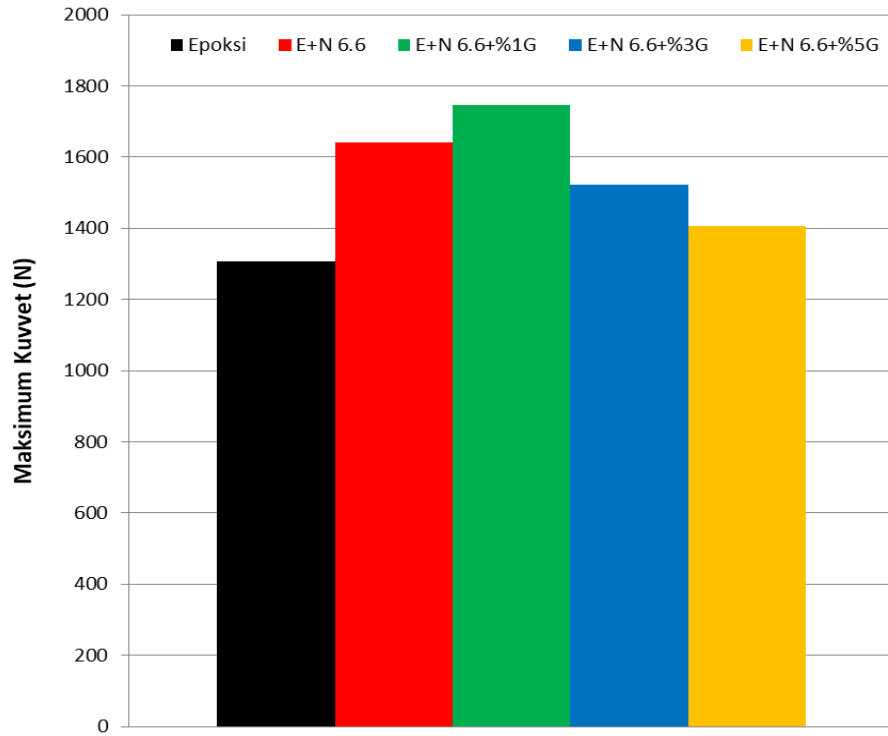
Şekil 4.41'de yapışma bağlantılarının 50°C'deki darbe sonrası çekme testinin kuvvet-uzama eğrileri verilmiştir. Grafığe göre N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı 0.187mm ile en yüksek şekil değişimine ulaşırken, N6.6 katkıli yapışma bağlantısı 0.047mm ile en düşük şekil değişimine ulaşmıştır. Ayrıca; saf epoksili yapışma bağlantısı 0.061mm, N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısı 0.143mm ve N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısı 0.098mm'lik şekil değişimine ulaşmıştır. Bu değerlere göre, N6.6+%1 GNP katkısının saf epoksili bağlantıya kıyasla şekil değişimini %206.5'lik artış sağlayarak gevrekliği çok yüksek bir oranda azalttığı belirlenmiştir.



Şekil 4. 41. 50°C'deki darbe sonrası çekme testi kuvvet-uzama eğrileri

Şekil 4.42'de yapışma bağlantılarının 50°C'de kopma kuvvetleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu grafığe göre; N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı 1745.70N ile en yüksek kopma kuvvetine sahipken saf epoksili yapışma bağlantısı 1307.04N ile en düşük kopma kuvvetine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca N6.6 katkıli yapışma bağlantısı 1641.46N, N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısı 1522.26N ve N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısı ise 1405.73N'luk bir kopma kuvvetine ulaşmıştır. Bu değerlere göre, en iyi darbe sonrası kopma kuvvetini N6.6+%1 GNP katkıli yapışma

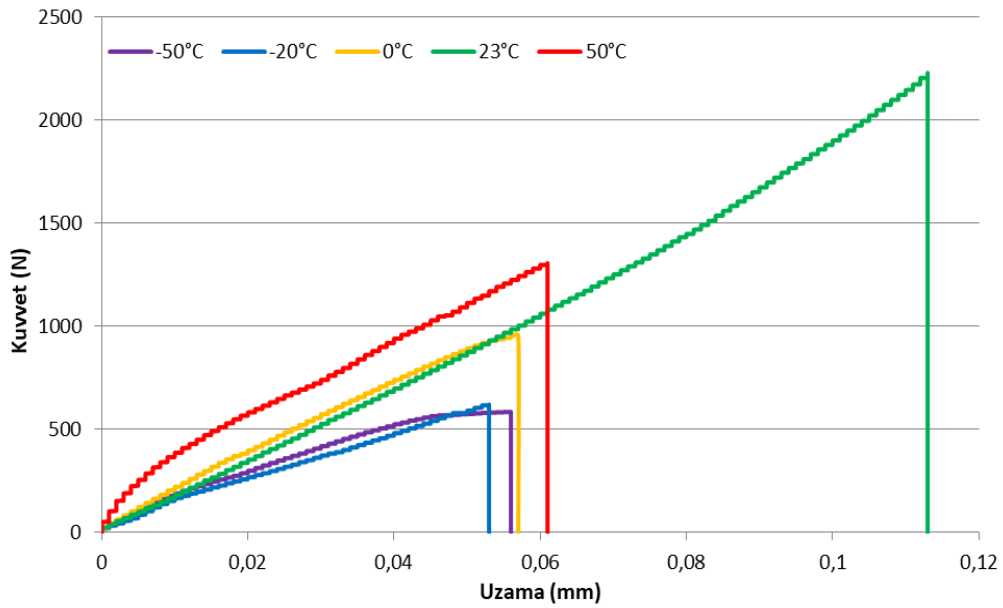
bağlantısı göstermiş ve saf epoksili yapışma bağlantısına kıyasla %33.6'lık bir artış sağlamıştır.



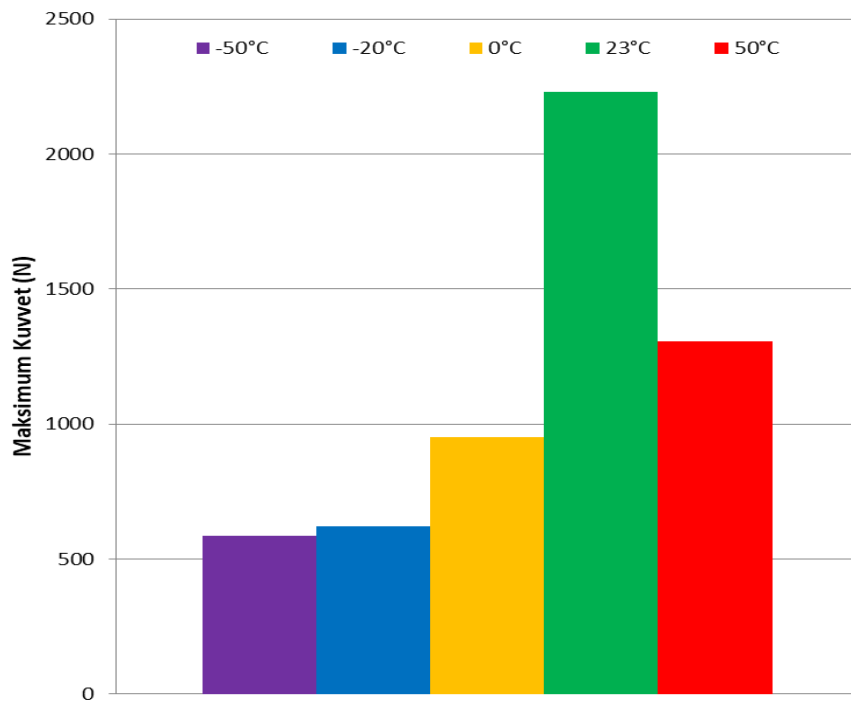
Şekil 4. 42. 50°C'deki darbe sonrası yapışma bağlantılarının maksimum çekme kuvvetleri

#### 4.2.6. Saf epoksili yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe sonrası çekme verileri

Şekil 4.43'de saf epoksili yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki darbe sonrası çekme testinin kuvvet-uzama eğrileri verilmiştir. Grafiğe göre 23°C'de ki yapışma bağlantısı 0.113mm ile en yüksek şekil değişimine ulaşırken, -20°C'de ki yapışma bağlantısı 0.053mm ile en düşük şekil değişimine ulaşmıştır. Ayrıca; -50°C'de ki yapışma bağlantısı 0.056mm, 0°C'de ki yapışma bağlantısı 0.057mm ve 50°C'de ki yapışma bağlantısı 0.061mm'lik şekil değişimine ulaşmıştır. Bu değerlere göre, saf epoksili yapışma bağlantısı en yüksek şekil değişimini oda sıcaklığında göstermiş ve sıcaklık hem arttığında hem de azaldığında şekil değişimi azalmıştır. Bu doğrultuda oda sıcaklığını sınır şartları olan -50°C ve 50°C ile kıyasladığımızda şekil değişimi sırasıyla %50.4 ve %46.0 oranlarında azalmış ve yapışma bağlantısı gevrekleşmiştir.



Şekil 4. 43. Saf epoksili yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe sonrası çekme testi kuvvet-zaman eğrileri



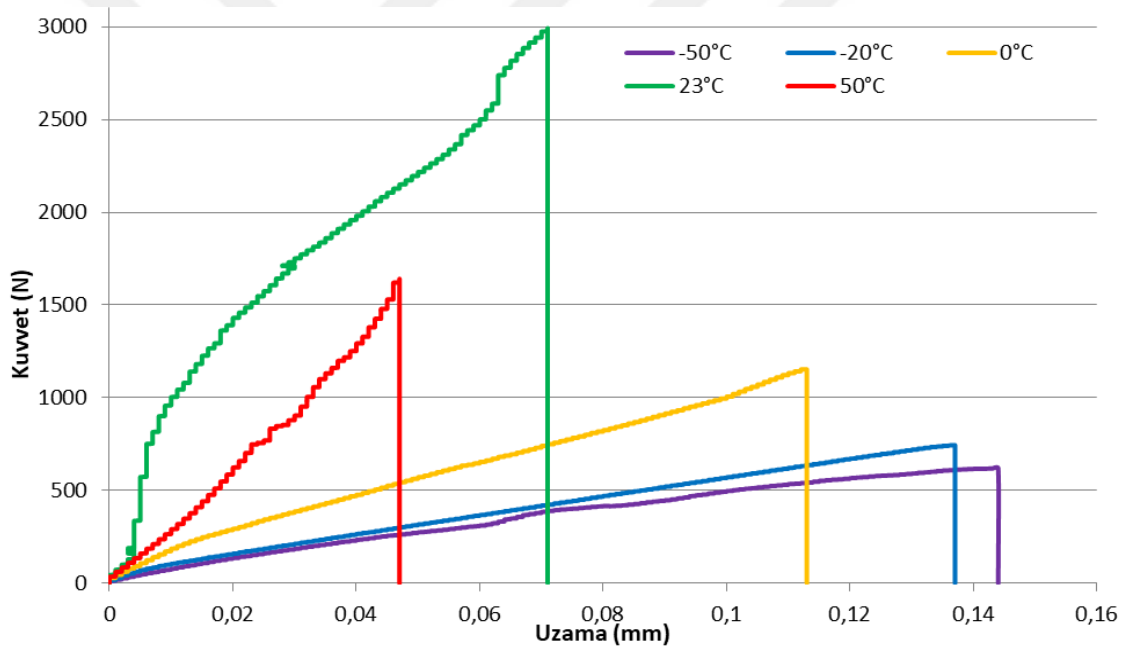
Şekil 4. 44. Saf epoksili yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe sonrası maksimum çekme kuvvetleri

Şekil 4.44’de saf epoksili yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki kopma kuvvetleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafiğe göre; oda sıcaklığındaki yapışma bağlantısı 2230.28N ile en yüksek kopma kuvvetine sahipken -50°C’de ki yapışma bağlantısı 585.16N ile en düşük kopma kuvvetine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca -

20°C’de ki yapışma bağlantısı 620.89N, 0°C’de ki yapışma bağlantısı 953.07N ve 50°C’de ki yapışma bağlantısı ise 1307.04N’luk bir kopma kuvvetine ulaşmıştır. Bu değerlere göre, saf epoksili yapışma bağlantısının darbe sonrası en iyi kopma kuvvetine oda sıcaklığında ulaşılmış ve sıcaklık hem arttığında hem de azaldığında kuvvet değerleri azalmıştır. Bu doğrultuda oda sıcaklığını sınır şartları olan -50°C ve 50°C ile kıyasladığımızda kuvvet değerleri sırasıyla %73.7 ve %41.4 oranlarında azalmış ve yapışma bağlantısı gevrekleşmiştir.

#### 4.2.7. E+N6.6 katkılı yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe sonrası çekme verileri

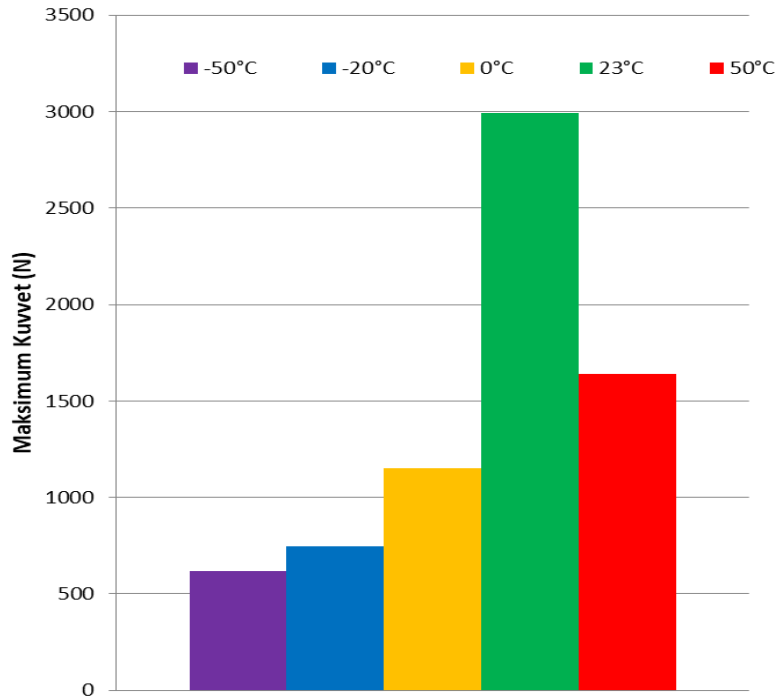
Şekil 4.45’de N6.6 katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki darbe sonrası çekme testinin kuvvet-uzama eğrileri verilmiştir.



Şekil 4. 45. E+N6.6 katkılı yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe sonrası çekme testi kuvvet-zaman eğrileri

Grafiğe göre -50°C’de ki yapışma bağlantısı 0.144mm ile en yüksek şekil değişimine ulaşırken, 50°C’de ki yapışma bağlantısı 0.047mm ile en düşük şekil değişimine ulaşmıştır. Ayrıca; -20°C’de ki yapışma bağlantısı 0.137mm, 0°C’de ki yapışma bağlantısı 0.113mm ve 23°C’de ki yapışma bağlantısı 0.071mm’lik şekil değişimine ulaşmıştır. Bu değerlere göre, N6.6 katkılı yapışma bağlantısı en yüksek şekil değişimini -50°C’de göstermiş ve sıcaklık azaldığında şekil değişimi artarken sıcaklık arttığında şekil değişimi azalmıştır. Bu doğrultuda oda sıcaklığını sınır şartları

olan  $-50^{\circ}\text{C}$  ve  $50^{\circ}\text{C}$  ile kıyasladığımızda şekil değişimi sırasıyla %102.8 oranında artmış ve %33.8 oranında azalmıştır.

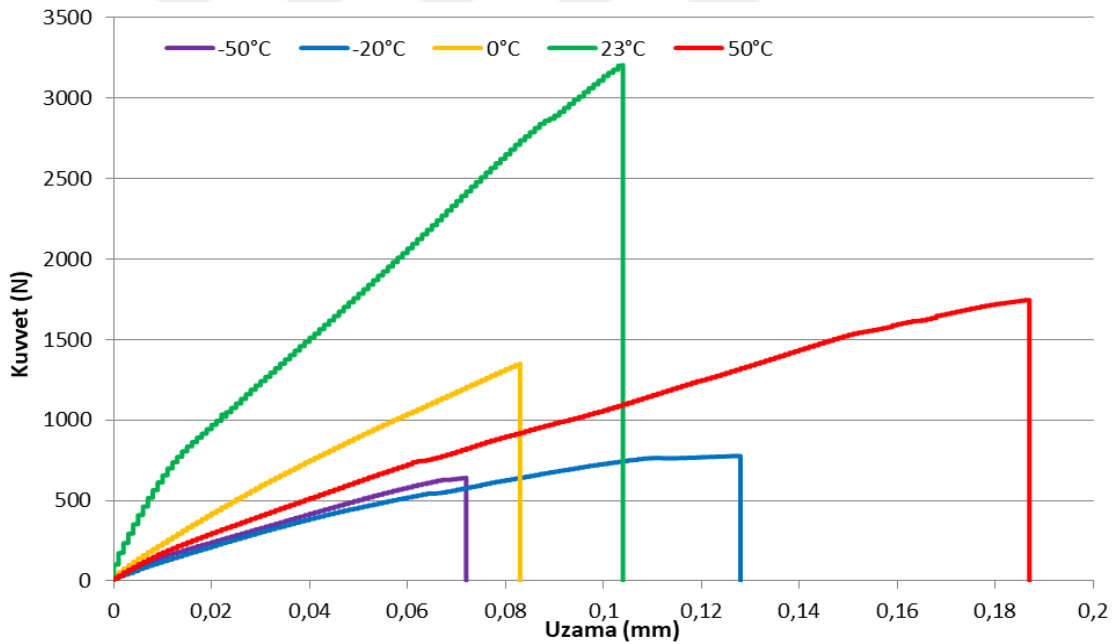


Şekil 4. 46. E+N6.6 katkılı yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe sonrası maksimum çekme kuvvetleri

Şekil 4.46’de N6.6 katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki kopma kuvvetleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafiğe göre; oda sıcaklığındaki yapışma bağlantısı 2992.74N ile en yüksek kopma kuvvetine sahipken  $-50^{\circ}\text{C}$ ’de ki yapışma bağlantısı 618.62N ile en düşük kopma kuvvetine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca  $-20^{\circ}\text{C}$ ’de ki yapışma bağlantısı 744.84N,  $0^{\circ}\text{C}$ ’de ki yapışma bağlantısı 1153.55N ve  $50^{\circ}\text{C}$ ’de ki yapışma bağlantısı ise 1641.46N’luk bir kopma kuvvetine ulaşmıştır. Bu değerlere göre, N6.6 katkılı yapışma bağlantısı, darbe sonrası en iyi kopma kuvvetine oda sıcaklığında ulaşılmış ve sıcaklık hem arttığında hem de azaldığında kuvvet değerleri azalmıştır. Bu doğrultuda oda sıcaklığını sınır şartları olan  $-50^{\circ}\text{C}$  ve  $50^{\circ}\text{C}$  ile kıyasladığımızda kuvvet değerleri sırasıyla %79.3 ve %28.4 oranlarında azalmış ve yapışma bağlantısı gevrekleşmiştir.

#### 4.2.8. E+N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe sonrası çekme verileri

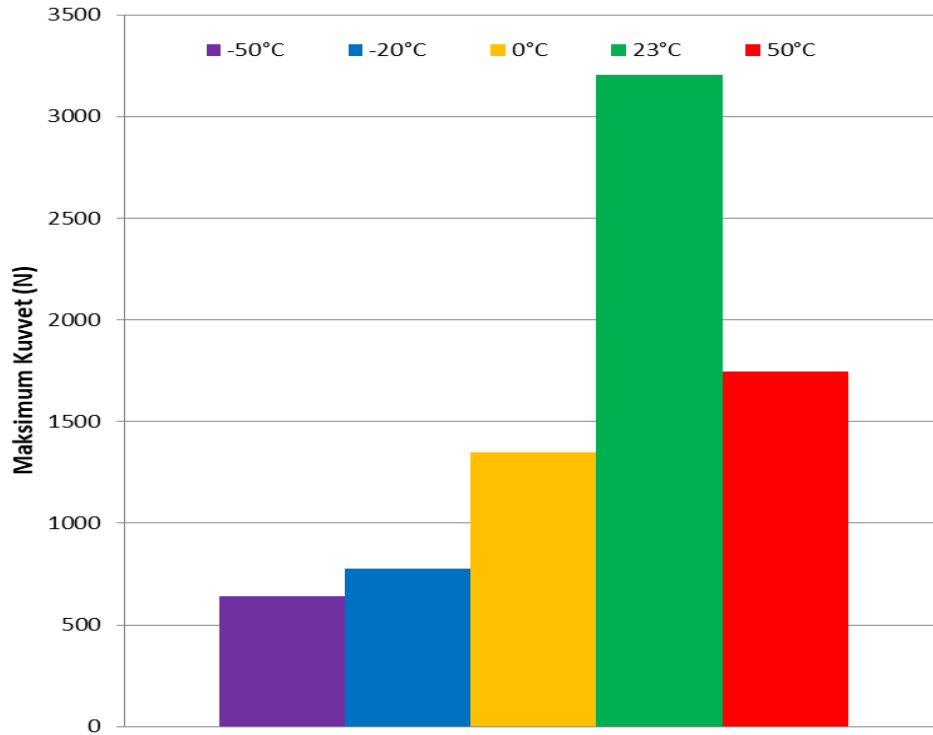
Şekil 4.47’de N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki darbe sonrası çekme testinin kuvvet-uzama eğrileri verilmiştir. Grafiğe göre 50°C’de ki yapışma bağlantısı 0.187mm ile en yüksek şekil değişimine ulaşırken, -50°C’de ki yapışma bağlantısı 0.072mm ile en düşük şekil değişimine ulaşmıştır. Ayrıca; -20°C’de ki yapışma bağlantısı 0.128mm, 0°C’de ki yapışma bağlantısı 0.083mm ve 23°C’de ki yapışma bağlantısı 0.104mm’lik şekil değişimine ulaşmıştır. Bu değerlere göre, N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı en yüksek şekil değişimini 50°C’de göstermiş ve sıcaklık arttığında şekil değişimi artarken sıcaklık azaldığında hem artmış hem de azalmıştır. Bu doğrultuda oda sıcaklığını, sınır şartları olan -50°C ve 50°C ile kıyasladığımızda şekil değişimi sırasıyla %30.7 oranında azalmış ve %79.8 oranında artmıştır.



Şekil 4. 47. E+N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe sonrası çekme testi kuvvet-zaman eğrileri

Şekil 4.48’de N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki kopma kuvvetleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafiğe göre; oda sıcaklığındaki yapışma bağlantısı 3206.39N ile en yüksek kopma kuvvetine sahipken -50°C’de ki yapışma bağlantısı 641.82N ile en düşük kopma kuvvetine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca -20°C’de ki yapışma bağlantısı 776.49N, 0°C’de ki yapışma bağlantısı

1350.63N ve 50°C'de ki yapışma bağlantısı ise 1745.70N'luk bir kopma kuvvetine ulaşmıştır. Bu değerlere göre, N6.6+%1 GNP katkılı yapışma bağlantısı, darbe sonrası en iyi kopma kuvvetine oda sıcaklığında ulaşılmış ve sıcaklık hem arttığında hem de azaldığında kuvvet değerleri azalmıştır. Bu doğrultuda oda sıcaklığını sınır şartları olan -50°C ve 50°C ile kıyasladığımızda kuvvet değerleri sırasıyla %79.9 ve %45.5 oranlarında azalmış ve yapışma bağlantısı gevrekleşmiştir.

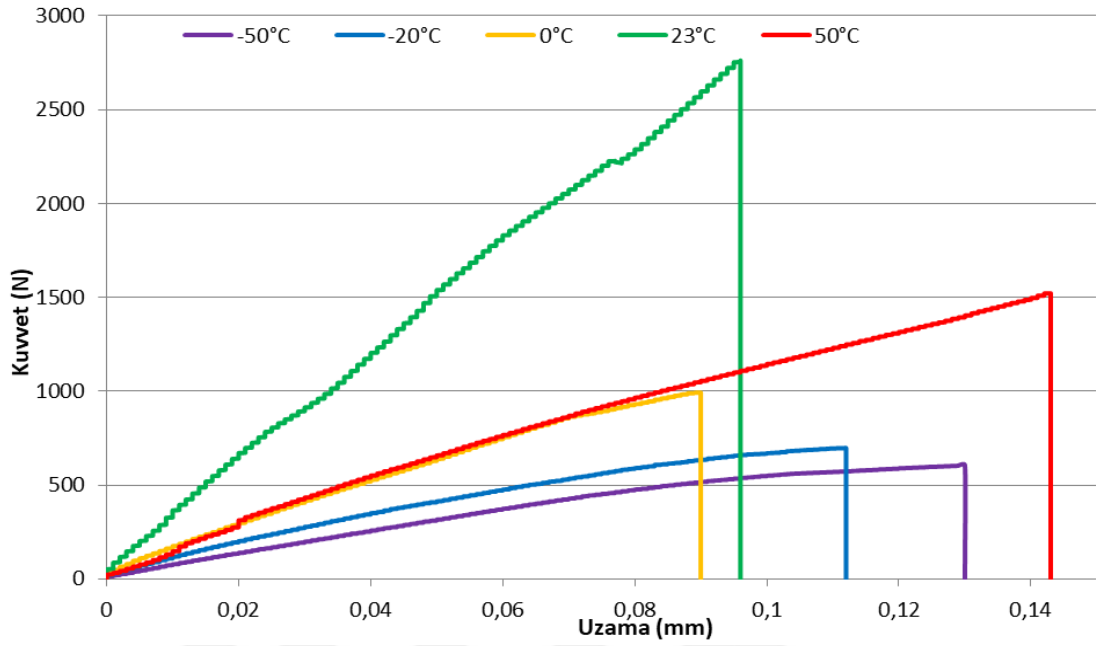


Şekil 4. 48. E+N6.6+%1 GNP katkılı yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe sonrası maksimum çekme kuvvetleri

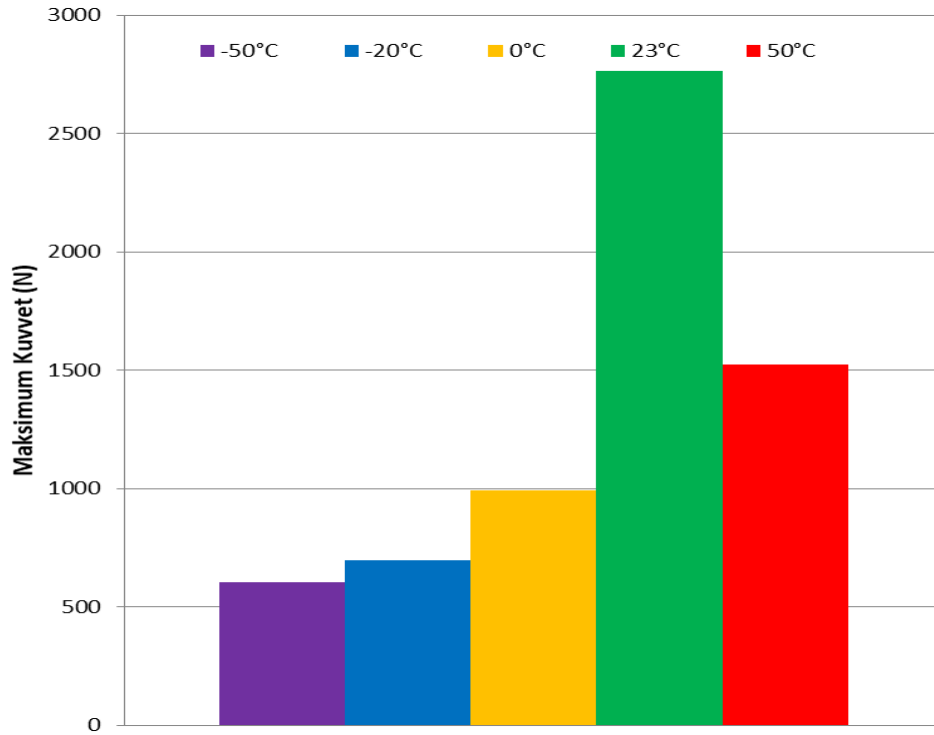
#### 4.2.9. E+N6.6+%3 GNP katkılı yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe sonrası çekme verileri

Şekil 4.49'de N6.6+%3 GNP katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki darbe sonrası çekme testinin kuvvet-uzama eğrileri verilmiştir. Grafığe göre 50°C'de ki yapışma bağlantısı 0.143mm ile en yüksek şekil değişimine ulaşırken, 0°C'de ki yapışma bağlantısı 0.09mm ile en düşük şekil değişimine ulaşmıştır. Ayrıca; -50°C'de ki yapışma bağlantısı 0.13mm, -20°C'de ki yapışma bağlantısı 0.112mm ve 23°C'de ki yapışma bağlantısı 0.096mm'lik şekil değişimine ulaşmıştır. Bu değerlere göre, N6.6+%3 GNP katkılı yapışma bağlantısı en yüksek şekil değişimini 50°C'de göstermiş ve sıcaklık arttığında şekil değişimi artarken sıcaklık azaldığında önce azalmış daha

düşük sıcaklıkta ise artmıştır. Bu doğrultuda oda sıcaklığını, sınır şartları olan  $-50^{\circ}\text{C}$  ve  $50^{\circ}\text{C}$  ile kıyasladığımızda şekil değişimi sırasıyla %35.4 ve %48.9 oranlarında artmıştır.



Şekil 4. 49. E+N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe sonrası çekme testi kuvvet-zaman eğrileri

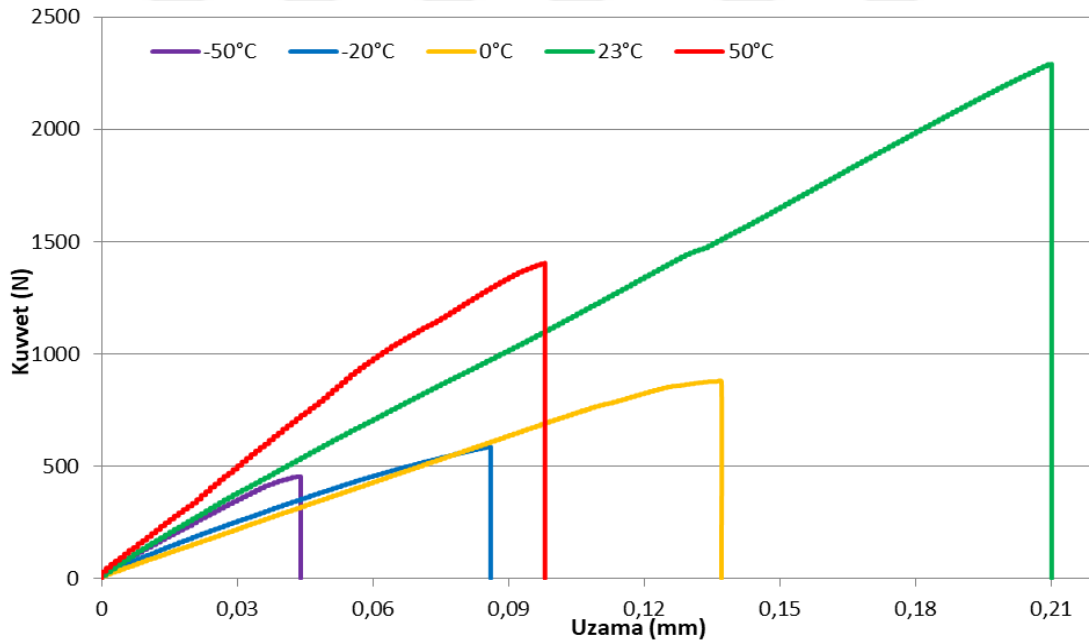


Şekil 4. 50. E+N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe sonrası maksimum çekme kuvvetleri

Şekil 4.50’de N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki kopma kuvvetleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafiğe göre; oda sıcaklığındaki yapışma bağlantısı 2672.16N ile en yüksek kopma kuvvetine sahipken  $-50^{\circ}\text{C}$ ’de ki yapışma bağlantısı 604.82N ile en düşük kopma kuvvetine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca  $-20^{\circ}\text{C}$ ’de ki yapışma bağlantısı 697.76N,  $0^{\circ}\text{C}$ ’de ki yapışma bağlantısı 993.11N ve  $50^{\circ}\text{C}$ ’de ki yapışma bağlantısı ise 1522.26N’luk bir kopma kuvvetine ulaşmıştır. Bu değerlere göre, N6.6+%3 GNP katkıli yapışma bağlantısı, darbe sonrası en iyi kopma kuvvetine oda sıcaklığında ulaşılmış ve sıcaklık hem arttığında hem de azaldığında kuvvet değerleri azalmıştır. Bu doğrultuda oda sıcaklığını sınır şartları olan  $-50^{\circ}\text{C}$  ve  $50^{\circ}\text{C}$  ile kıyasladığımızda kuvvet değerleri sırasıyla %77.4 ve %43.03 oranlarında azalmış ve yapışma bağlantısı gevreklemiştir.

#### 4.2.10. E+N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe sonrası çekme verileri

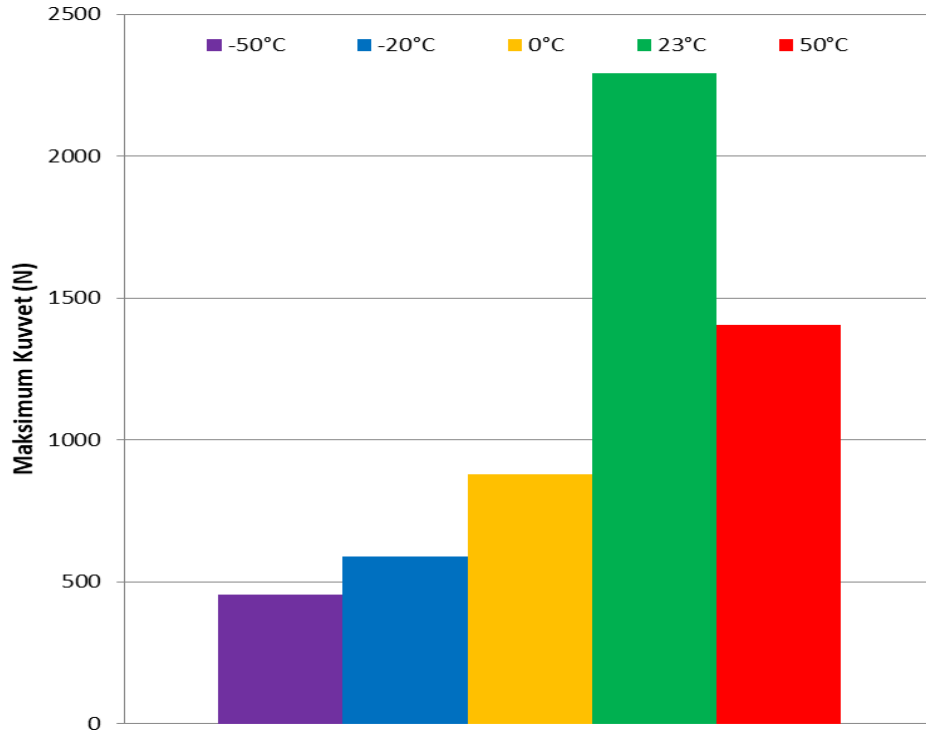
Şekil 4.51’de N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki darbe sonrası çekme testinin kuvvet-uzama eğrileri verilmiştir.



Şekil 4. 51. E+N6.6+%5 GNP katkıli yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe sonrası çekme testi kuvvet-zaman eğrileri

Grafiğe göre  $23^{\circ}\text{C}$ ’de ki yapışma bağlantısı 0.21mm ile en yüksek şekil değişimine ulaşırken,  $-50^{\circ}\text{C}$ ’de ki yapışma bağlantısı 0.044mm ile en düşük şekil değişimine ulaşmıştır. Ayrıca;  $-20^{\circ}\text{C}$ ’de ki yapışma bağlantısı 0.086mm,  $0^{\circ}\text{C}$ ’de ki

yapışma bağlantısı 0.137mm ve 50°C’de ki yapışma bağlantısı 0.098mm’lik şekil değişimine ulaşmıştır. Bu değerlere göre, N6.6+%5 GNP katkılı yapışma bağlantısı en yüksek şekil değişimini 23°C’de göstermiş ve sıcaklık hem arttığında hem de azaldığında şekil değişimi azalmıştır. Bu doğrultuda oda sıcaklığını, sınır şartları olan -50°C ve 50°C ile kıyasladığımızda şekil değişimi sırasıyla %79.04 ve %53.3 oranlarında azalmıştır.



Şekil 4. 52. E+N6.6+%5 GNP katkılı yapışma bağlantılarının farklı sıcaklıklardaki darbe sonrası maksimum çekme kuvvetleri

Şekil 4.52’de N6.6+%5 GNP katkılı yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda ki kopma kuvvetleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafiğe göre; oda sıcaklığındaki yapışma bağlantısı 2290.84N ile en yüksek kopma kuvvetine sahipken -50°C’de ki yapışma bağlantısı 455.03N ile en düşük kopma kuvvetine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca -20°C’de ki yapışma bağlantısı 587.24N, 0°C’de ki yapışma bağlantısı 877.68N ve 50°C’de ki yapışma bağlantısı ise 1405.73N’luk bir kopma kuvvetine ulaşmıştır. Bu değerlere göre, N6.6+%3 GNP katkılı yapışma bağlantısı, darbe sonrası en iyi kopma kuvvetine oda sıcaklığında ulaşılmış ve sıcaklık hem arttığında hem de azaldığında kuvvet değerleri azalmıştır. Bu doğrultuda oda sıcaklığını sınır şartları olan -50°C ve 50°C ile kıyasladığımızda kuvvet değerleri sırasıyla %80.1 ve %38.6 oranlarında azalmış ve yapışma bağlantısı gevrekleşmiştir.

### 4.3. Kırılma Yüzeylerinin Analizi

Kırılma yüzeyleri, makroskobik görüntülerle ve SEM görüntüleriyle incelenmiştir.

Makroskobik görüntüler, birbirinden kopan iki simetrik yüzeyin yan yana konumlandırılıp dijital usb mikroskop ile görüntülenmesiyle oluşturuldu. Bu görüntüler ile kırılan yüzeylerin karakteristiği incelenerek yapışma bağlantısının verimliliği hakkında fikir yürütüldü.

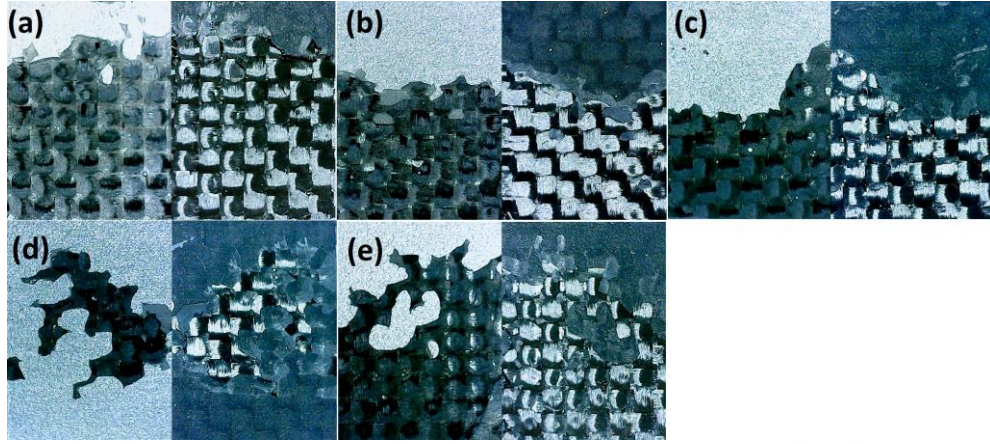
SEM analizi için, yapışma bağlantısının alüminyum yüzeyde ki ayrılma hattına dikkat edilerek 10x10mm ebatlarında parçalar kesilmiş ve bu parçalar aseton ile yıkandıktan sonra temiz havada kurutularak hazırlanmıştır. SEM analizi ile çatlakların ilerleyişleri ve katkı maddelerinin etkileri incelenmiştir.

#### 4.3.1. Makroskobik görüntüler

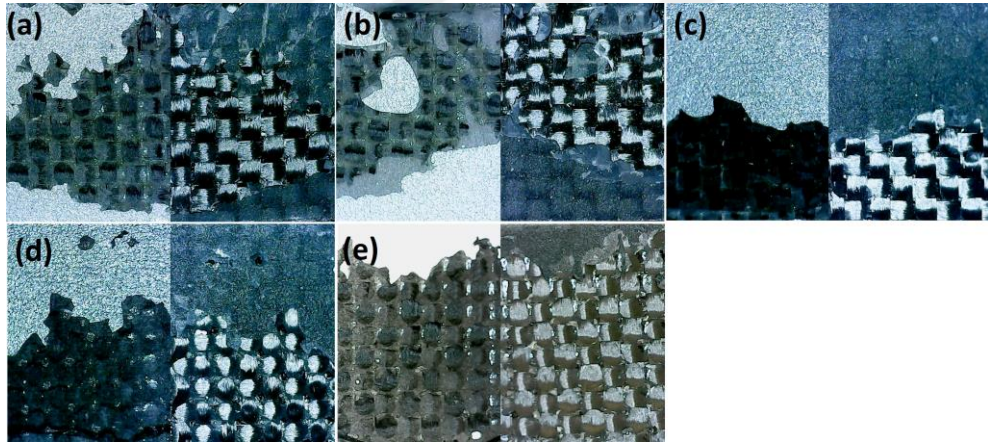
Tek taraflı yapışma bağlantılarında çatlağın başlangıcı ve ilerleyişi farklı şekillerde gerçekleşebilmektedir. Yüzey hazırlığı düzgün hazırlanmış ve verimli bir yapışma sağlanmışsa ara yüzeyin hemen üzerinden, epoksiden kırılma başlayarak ilerliyorsa bu tip kırılmaya kohezyon kırılma adı verilir ve verimli bir yapışmanın sonucunda elde edilen kırılma şeklidir. Kohezyon kırılmada kırılma yolu zikzaklar çizerek yolu uzatabilir ve yapışma bağlantısının tokluğunda artış sağlayabilir. Kırılma başlangıcı ara yüzeyden başlayıp ilerleyen yapışmalar genellikle kötü yapıştırılmış yüzeylerde ya da iyi hazırlanmamış düşük yüzey enerjili malzemelerde meydana gelmektedir. Bu tip kırılmalarda genellikle yapıştırıcı tek bir ara yüzeyden tamamıyla ayrılarak diğer numune yüzeyinde kalır. Son olarak da çatlakların ara yüzeyler arasında yön değiştirerek ilerlemesiyle ortaya çıkan bir kırılma karakteristiği mevcuttur ve zıt ara yüzeyler incelendiğinde buralarda oluşan mikro çatlaklar sayesinde tespit edilir.

Şekil 4.53'te -20°C, Şekil 4.54'te 0°C ve Şekil 4.55'te 23°C'de ki düşük hızlı darbe sonrası çekme testine tabi tutularak tamamen koparılan yapışma bağlantılarının makroskobik görüntüleri verilmiştir. Tüm yapışma bağlantılarında ortak bir karakteristik gözlenmiş olup yapışma bağlantılarında ayrılmanın ara yüzeyden olmayıp yapıştırıcının kırılması ile gerçekleşerek kohezyon kırılma ile ayrıldığı gözlenmiştir. Yapıştırıcının hem alüminyum hem de kompozit yüzeye verimli bir şekilde nüfuz ettiği ve katkılanan N6.6 nanoelyafların verimli bir şekilde ıslanarak yapışma bağlantısında ki yapıştırıcı ile etkileşime geçtiği görülmektedir. Ayrıca kohezyon kırılmada gözlemlenmesi beklenen kırık yollarının zikzaklar çizdiği ve tokluk değerlerinin de iyi olacağı görülmektedir. Sonuç

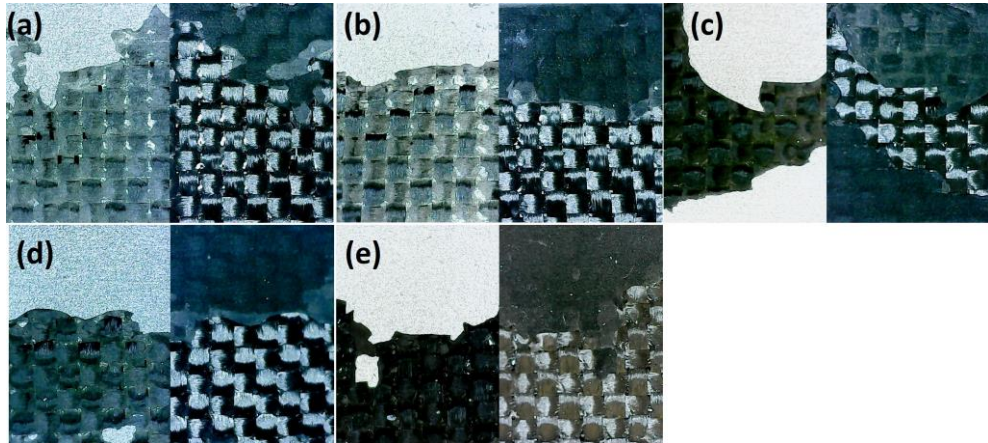
olarak yapışma bağlantılarda verimli bir yapışmanın sağlandığı ve N6.6 nanoelyaf katkısının ve GNP katkılarının kıyaslanması için uygun olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4. 53. -20°C'de ki darbe numunelerinin çekme sonrası yüzeyleri a)saf epoksi, b)N6.6, c)N6.6+%1 GNP, d)N6.6+%3 GNP, e)N6.6+%5 GNP katkılı yapışma bağlantısı



Şekil 4. 54. 0°C'de ki darbe numunelerinin çekme sonrası yüzeyleri a)saf epoksi, b)N6.6, c)N6.6+%1 GNP, d)N6.6+%3 GNP, e)N6.6+%5 GNP katkılı yapışma bağlantısı



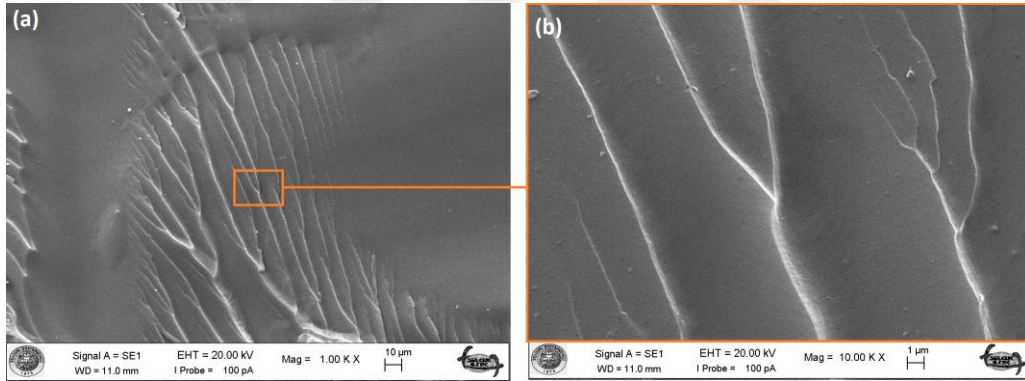
Şekil 4. 55. 23°C'de ki darbe numunelerinin çekme sonrası yüzeyleri a)saf epoksi, b)N6.6, c)N6.6+%1 GNP, d)N6.6+%3 GNP, e)N6.6+%5 GNP katkılı yapışma bağlantısı

### 4.3.2. Çekme sonrası SEM görüntüleri

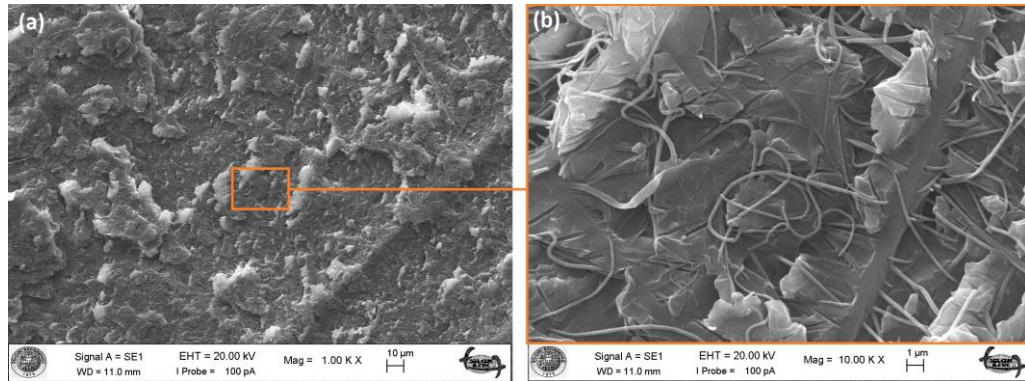
Çekme sonrası alüminyum yüzeylere ait SEM görüntüleri Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde bulunan ZEISS Evo LS 10 cihazı ile 20kV gerilimde elde edilmiştir.

Şekil 4.56,57,58,59 ve 60'da  $-50^{\circ}\text{C}$ 'de ki darbe sonrası çekme testleri ile tamamen koparılan yapışma bağlantılarının 1 KX ve 10 KX büyütme SEM görüntüleri verilmiştir. Bu kapsamda sırasıyla; saf epoksili, N6.6 nanoelyaf katkılı, N6.6+%1 GNP nanoelyaf katkılı, N6.6+%3 GNP nanoelyaf katkılı ve N6.6+%5 GNP nanoelyaf katkılı yapışma bağlantılarının SEM görüntüleri görülmektedir.

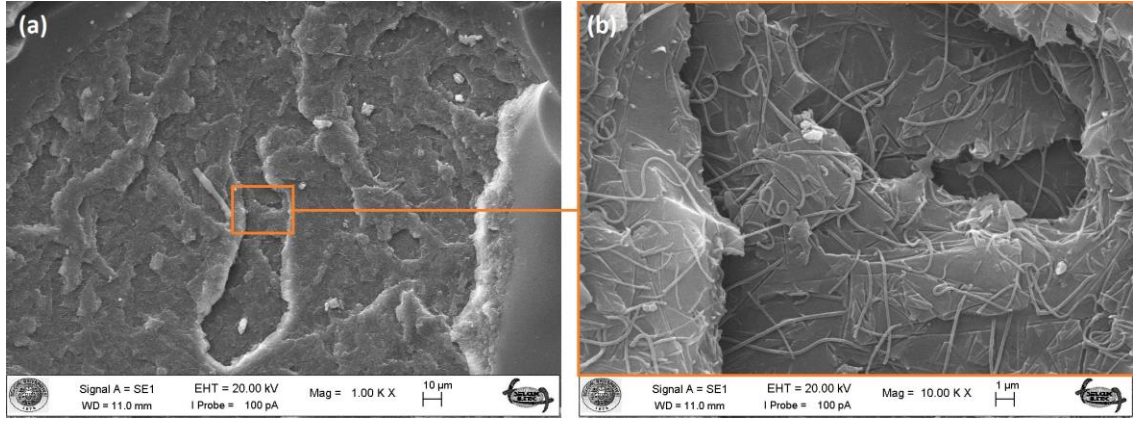
Yapışma bağlantılarında; yapıştırıcıya nanoelyaf takviyesi, yapıştırıcının bir tür nanoelyaf takviyeli kompozite dönüşmesini ve tıpkı nano kompozitlerde görülen hasarların(fiber sıyrılması, köprülme, fiber kopması, vb.) görülmesine neden olmaktadır. Oluşan bu hasarlar enerji absorbe etmekte ve böylece yapışma bağlantısının mukavemetini ve tokluğunu artırmaktadır.



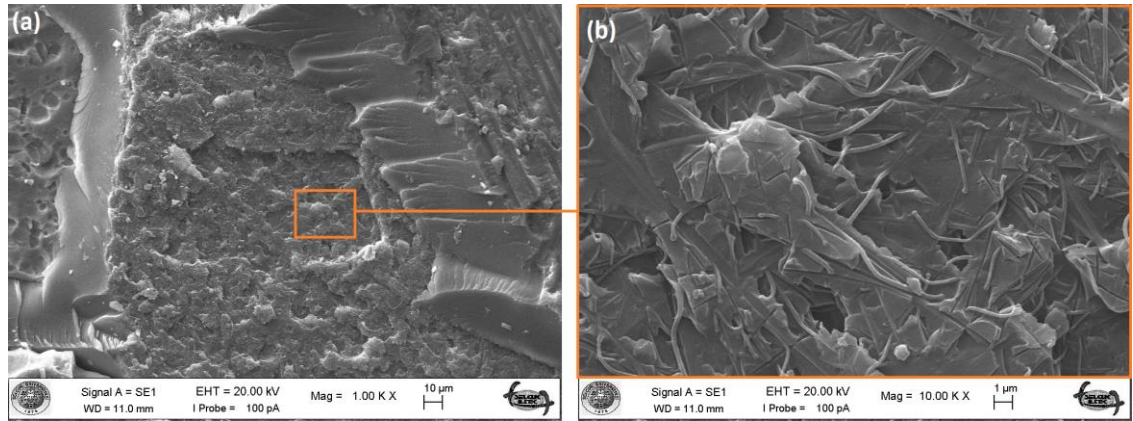
Şekil 4. 56.  $-50^{\circ}\text{C}$ 'de darbe sonrası çekme testi ile tamamen koparılan saf epoksili yapışma bağlantısının alüminyum tarafının SEM görüntüleri a)1 KX büyütme, b)10 KX büyütme



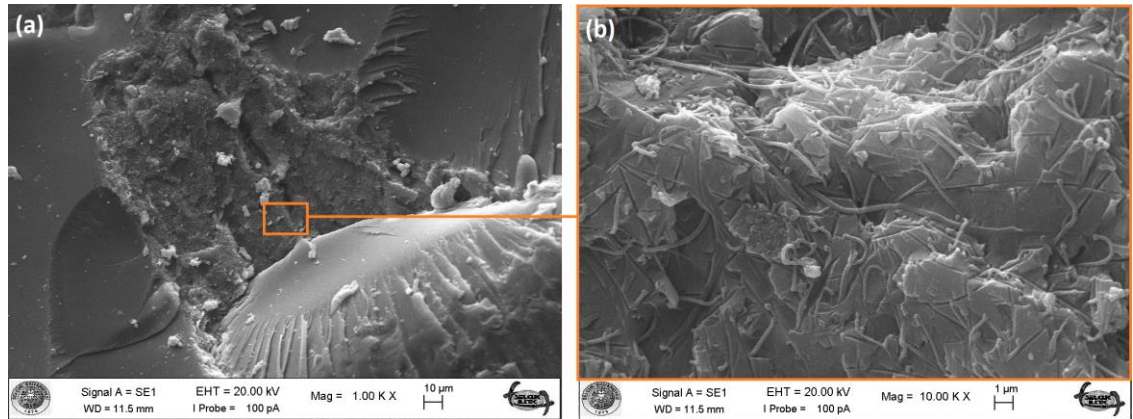
Şekil 4. 57.  $-50^{\circ}\text{C}$ 'de darbe sonrası çekme testi ile tamamen koparılan N6.6 nanoelyaf katkılı yapışma bağlantısının alüminyum tarafının SEM görüntüleri a)1 KX büyütme, b)10 KX büyütme



Şekil 4. 58. -50°C'de darbe sonrası çekme testi ile tamamen koparılan N6.6+%1 GNP nanoelaf katkı yapışma bağlantısının alüminyum tarafının SEM görüntüleri a)1 KX büyütme, b)10 KX büyütme



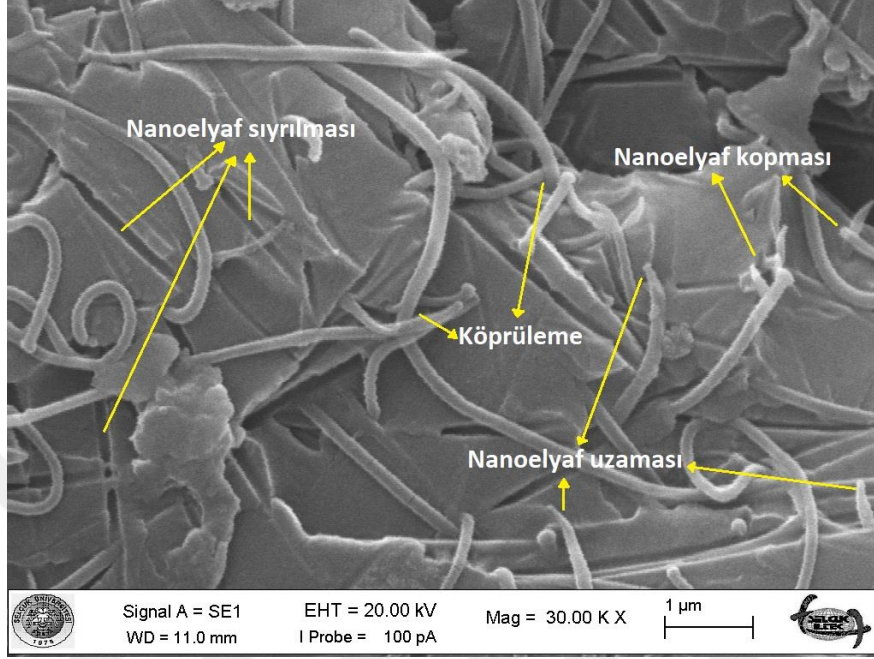
Şekil 4. 59. -50°C'de darbe sonrası çekme testi ile tamamen koparılan N6.6+%3 GNP nanoelaf katkı yapışma bağlantısının alüminyum tarafının SEM görüntüleri a)1 KX büyütme, b)10 KX büyütme



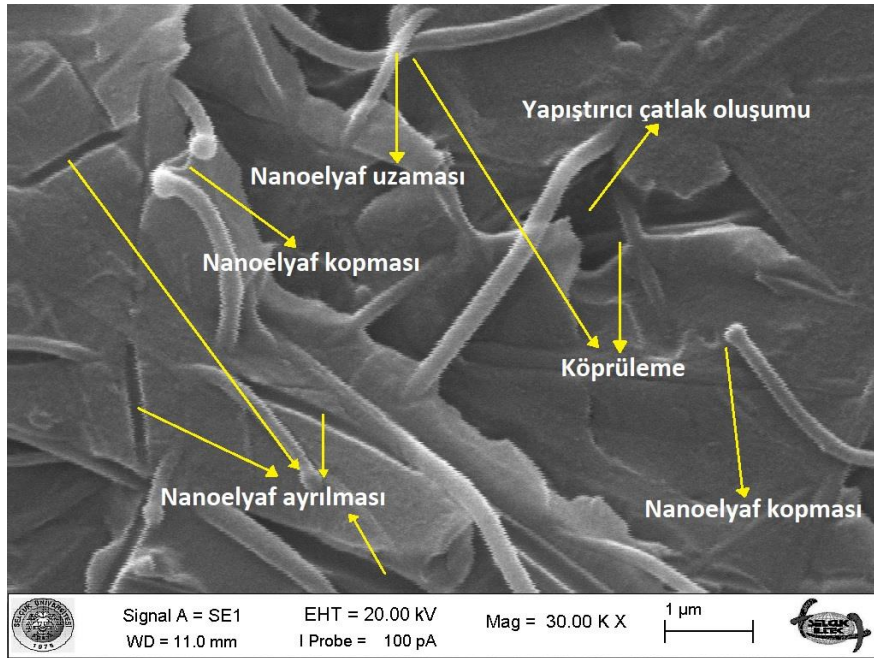
Şekil 4. 60. -50°C'de darbe sonrası çekme testi ile tamamen koparılan N6.6+%5 GNP nanoelaf katkı yapışma bağlantısının alüminyum tarafının SEM görüntüleri a)1 KX büyütme, b)10 KX büyütme

Şekil 4.61 ve 62' de sırasıyla N6.6+%1 ve %3 GNP katkı yapışma bağlantılarına ait 30K büyütmeli SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde yapışma bağlantısında enerji absorbe ederek tokluğun artmasını sağlayan

hasar tipleri belirlenmiştir. Bu hasar tiplerinin oluşumu, iyi yapıştırıcılar sağladığımızı ve yapıştırıcının mukavemetini ve tokluğunu artırmak amacıyla yaptığımız takviyelerin başarılı olduğunu göstermektedir.



Şekil 4. 61. N6.6+%1 GNP katkılı yapışma bağlantısına ait 30 KX büyütme SEM görüntülerinde gözlemlenen hasar tipleri



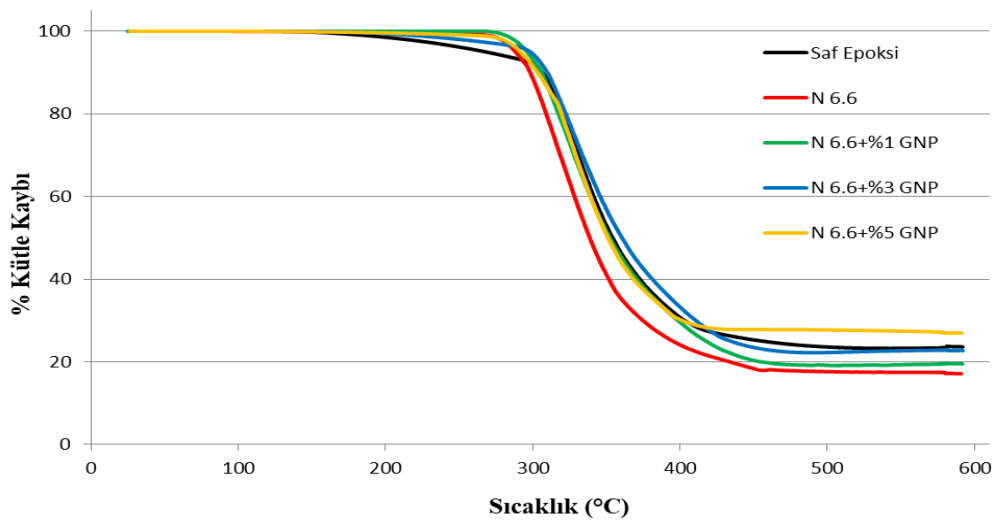
Şekil 4. 62. N6.6+%3 GNP katkılı yapışma bağlantısına ait 30 KX büyütme SEM görüntülerinde gözlemlenen hasar tipleri

#### 4.4. TGA-DTA Sonuçları

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

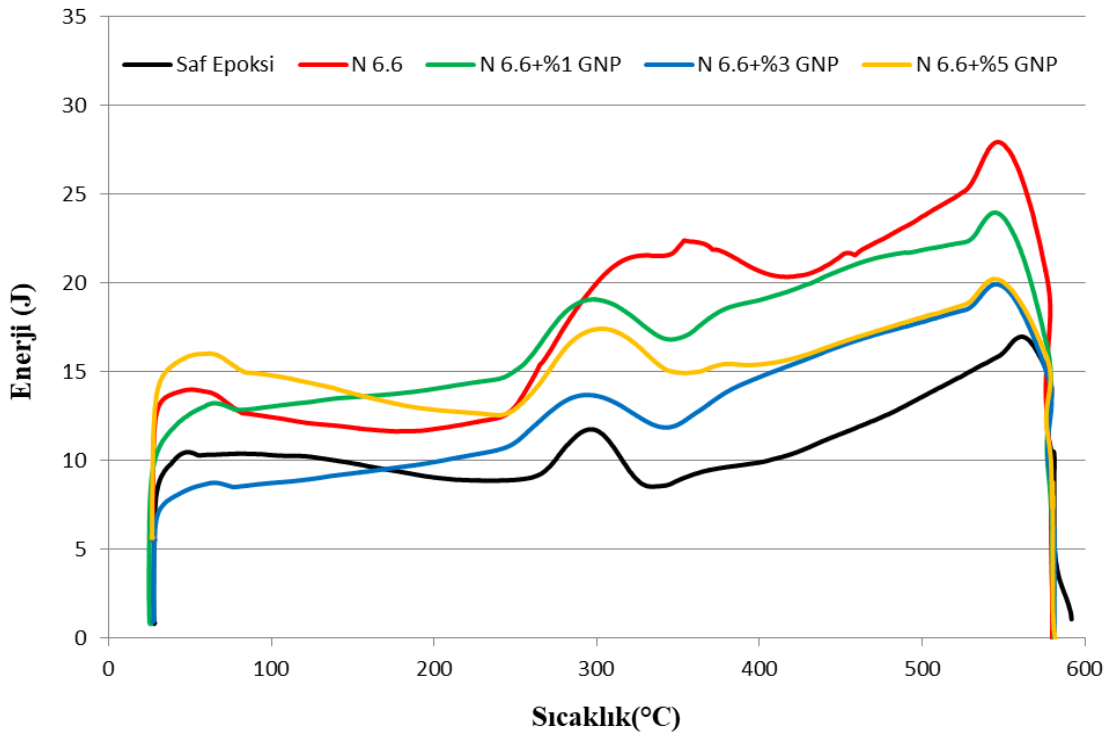
TGA analizinde numune sabit sıcaklık değerinde belirli bir sıcaklık aralığında ısıtılır ya da numune sabit sıcaklıkta belirli bir süre bekletilir. Uygulanacak sıcaklık numune hakkında istenen bilgiye göre ayarlanır. TGA testi sırasında numune yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılır ve oksitlenme ihtimali yüksek olduğu için deneyin yapıldığı ortam çok önemlidir. TGA deneylerinde atmosfer seçimi, kimyasal tepkimelere açık veya kapalı olacak şekilde belirlenebilir böylece numunenin oksitlenmesi veya sadece bozunması test edilebilir.

DTA analizi, sıcaklık artışı ile numunenin yuttuğu ve verdiği enerjiyi gösterir. DTA grafiğinin sol tarafındaki ilk pikten sonraki düşüşün başladığı noktadaki sıcaklık malzemenin katılığını kaybettiği sıcaklık olan camı geçiş (T<sub>g</sub>) sıcaklığını göstermektedir. Bu ilk pik oluşumundan sonra bir pik daha oluşur. Bu pik yukarı doğru ise malzemenin hızla erimeye başlayarak enerji yuttuğunu gösterir ve endotermik reaksiyon olarak nitelenir. Eğer pik aşağı doğru ise malzeme dışarı doğru ısı vermektedir ve bu reaksiyonada ekzotermik reaksiyon olarak adlandırılır. Bahsedilen pikin tepe noktası erime noktası sıcaklığını (T<sub>m</sub>) göstermektedir.



Şekil 4. 63. Epoksi yapıştırıcıların TGA eğrileri

Şekil 4.63’de saf epoksi, N 6.6 nanoelyaf katkıli yapıştırıcı, N6.6+%1 GNP nanoelyaf katkıli epoksi yapıştırıcı, N6.6+%3 GNP nanoelyaf katkıli epoksi yapıştırıcı ve N6.6+%5 GNP nanoelyaf katkıli epoksi yapıştırıcının karşılaştırmalı TGA eğrileri verilmiştir. Şekle göre; saf epoksili yapıştırıcıya ait %5, %50 ve kütle kaybının durduğu sıcaklıklar sırasıyla 264.7, 353.8 ve 471.9 °C olarak ölçülürken bozunma sıcaklıkları en çok artan N 6.6+%3 GNP nanoelyaf katkıli yapıştırıcıya ait %5, %50 ve kütle kaybının durduğu sıcaklıklar sırasıyla 397.9, 361.2 ve 482.7 °C olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre N 6.6+%3 GNP nanoelyaf takviyesinin yapıştırıcıda tamamen bozunma sıcaklığını %2.3 kadar iyileştirdiği tespit edilmiştir. Bu artış, nano parçacıkların homojene yakın dağılım göstermesi ve bu sebeple çapraz bağlar oluşturan polimer zincirlerdeki düzensizliklere girerek termal kararlılığı artırması olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca tüm yapıştırıcılara ait veriler Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4. 64. Epoksi yapıştırıcıların DTA eğrileri

Şekil 4.64’de saf epoksi, N 6.6 nanoelyaf katkıli yapıştırıcı, N6.6+%1 GNP nanoelyaf katkıli epoksi yapıştırıcı, N6.6+%3 GNP nanoelyaf katkıli epoksi yapıştırıcı ve N6.6+%5 GNP nanoelyaf katkıli epoksi yapıştırıcının karşılaştırmalı DTA eğrileri verilmiştir. Ayrıca, tüm yapıştırıcılara ait camsı geçiş sıcaklıkları (Tg) ve erime sıcaklıkları (Tm) Tablo 1’de verilmiştir. Bu verilere göre en düşük camsı geçiş

sıcaklığını (48.4°C) ve en düşük erime sıcaklığını (295.2°C) saf epoksili yapıştırıcının gösterirken N6.6 nanoelyaf takviyesinin ve bu takviyeye de GNP ilavesinin ısı direnci artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca camsı geçiş sıcaklığında en iyi sonucu 65.3°C ile N6.6+%1 GNP katkılı epoksi yapıştırıcı vermiş ve saf epoksiye kıyasla %34.9'lük artış göstermiştir. Erime sıcaklığında ise 317.9°C ile en iyi sonucu N6.6 katkılı epoksi yapıştırıcı vermiş ve saf epoksiye kıyasla %7.7'lik artış göstermiştir.

Çizelge 4. 1. Epoksi yapıştırıcıların TGA-DTA verileri

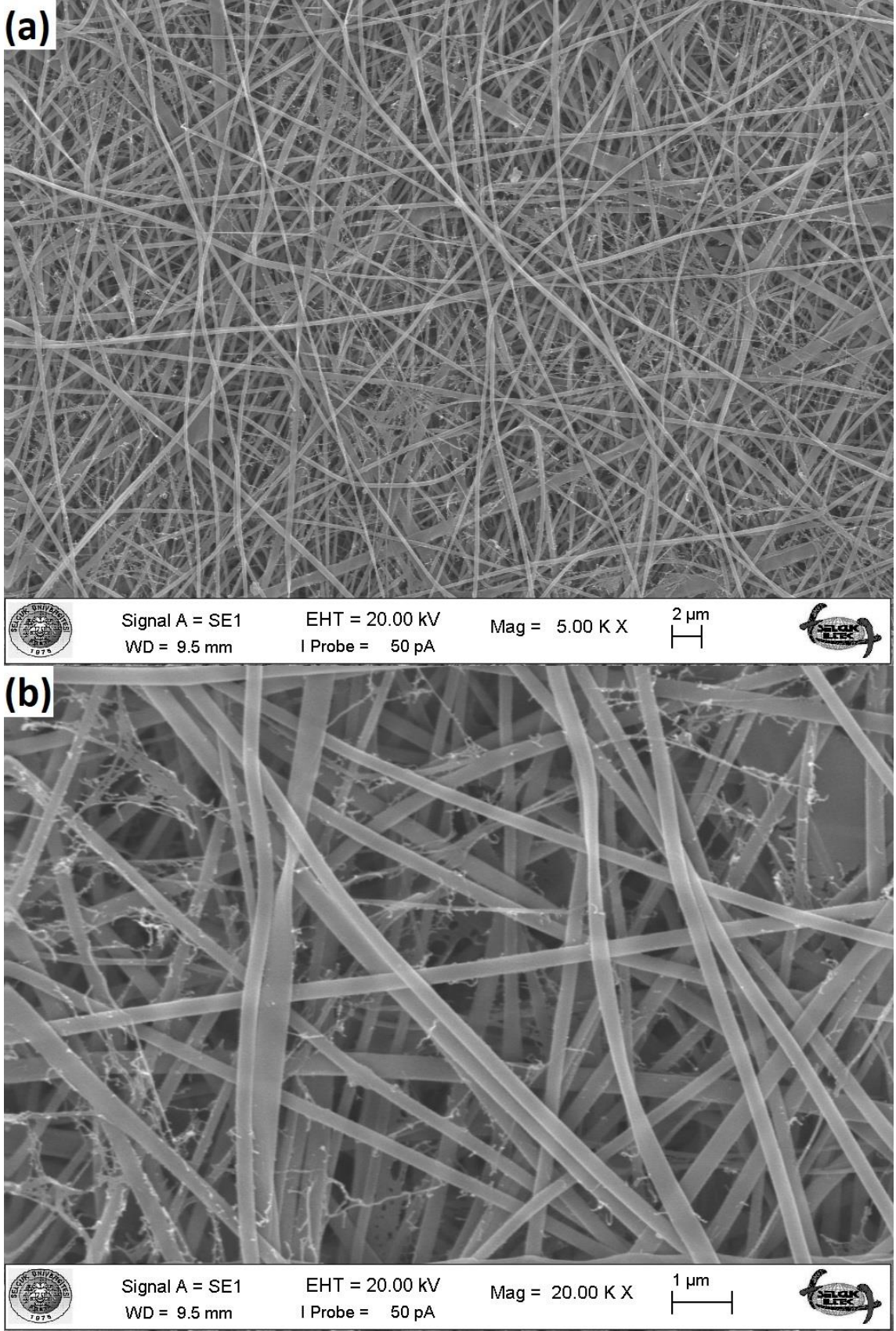
Numune İsmi	% Kütle kaybındaki bozunma sıcaklıkları (°C)			Kalan Kütle (%)	Tg(°C)	Tm(°C)
	5%	50%	Kütle Kaybının Durduğu			
Saf Epoksi	264.7	353.8	471.9	23	48.4	295.2
N 6.6	287.6	338.4	485.7	17	51.1	317.9
N 6.6+%1 GNP	295.7	352.2	476.6	19	65.3	298.5
N 6.6+%3 GNP	297.9	361.2	482.7	23	64.4	298.3
N 6.6+%5 GNP	292.2	351.5	428.6	27	53.5	301.7

#### 4.5. Nanoelyafların SEM Görüntüleri

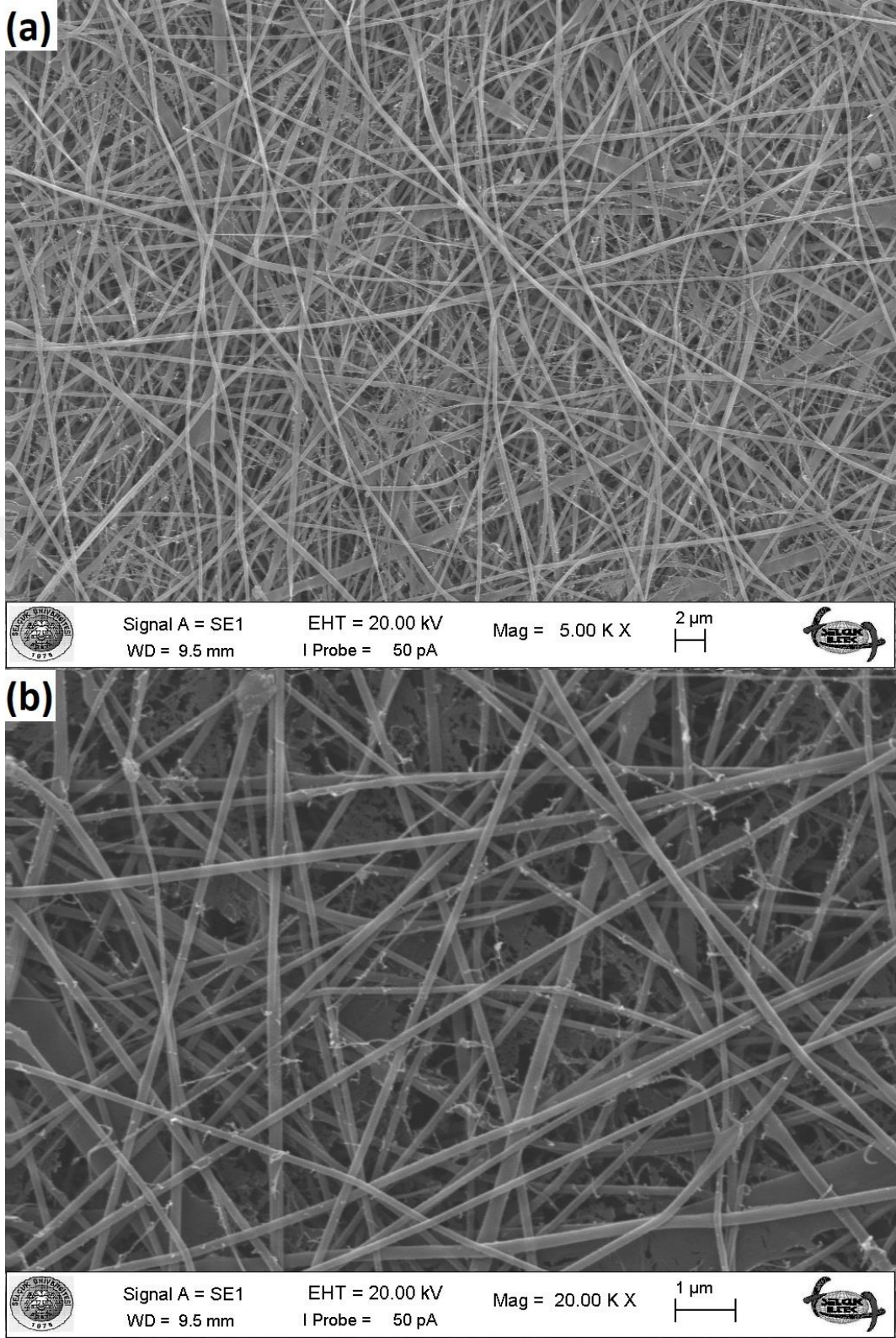
Katkı malzemesi olarak kullanılan N6.6 nanoelyaflarda ki nanoelyaf çaplarını ve düz-kesintisiz olma durumlarını belirlemek için SEM görüntüleri alınmıştır.

N 6.6 nanoelyaflara ait SEM görüntüleri Necmettin Erbakan Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde bulunan ZEİSS Evo LS 10 cihazı ile 20kV gerilimde elde edilmiştir.

Şekil 4.65 ve 66'da sırasıyla N6.6 nanoelyafların ve N6.6+%5 GNP katkılı nanoelyafların 5KX ve 20KX büyütme SEM görüntüleri verilmiştir. Bu SEM görüntüleri incelendiğinde nanoelyafların düz ve kesintisiz olduğu görülmektedir. Ayrıca N6.6 nanoelyafların çapı 250-280 nm olarak, N6.6+%5 GNP katkılı nanoelyafların çapı ise 130-160 nm olarak ölçülmüş ve GNP katkısının nanoelyaf çapını yaklaşık %45 oranında azalttığı belirlenmiştir.



Şekil 4. 65. N6.6 nanoelyafların a)5 KX ve b)20 KX büyütme SEM görüntüleri



Şekil 4. 66. N6.6+%5 GNP katkılı nanoelyafların a)5 KX ve b)20 KX büyütme SEM görüntüleri

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, 8 katlı karbon elyaf takviyeli kompozit plakalar ile 2024-T3 alaşımlı alüminyum plakaların tek taraflı yapışma bağlantıları oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yapışma bağlantılarında yapıştırıcı olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Kullanılan epoksi reçine ayrıca saf N 6.6 nanoelyaf ve farklı oranlarda (N 6.6 ağırlığınca %1, 3 ve 5) GNP takviyeli N 6.6 nanoelyaf ile katkılanarak yapışma bağlantıları oluşturulmuştur.

Oluşturulan yapışma bağlantılarına maruz kalabileceği bir hasarı (uçğa bir kuşun çarpması, bir taşın düşmesi) modellemek amacıyla düşük hızlı darbe testleri (1,04m/s) uygulanmıştır. Bir uçğı ele aldığımızda kalktığı yerin İstanbul, varış yerinin de Kahire olduğunu varsayarsak maruz kalacağı sıcaklıklar, gökyüzünde -50°C sıcaklıklara kadar düşerken Kahire gibi çöl iklimine sahip bir yerde 50°C sıcaklıklara çıkacaktır. Bu örneği düşünerek yapılan darbe testleri -50, -20, 0, 23 ve 50°C olmak üzere 5 farklı sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Darbe sonrası kopmayan yapışma bağlantılarına kopma yüklerini tespit etmek için oda sıcaklığında ASTM D1002-10 standardına uygun olarak çekme testleri yapılmıştır.

Farklı katkıları kullanılan yapışma bağlantılarının kopma yüklerinin kıyaslaması yapılmıştır. Ayrıca her yapışma bağlantısının farklı sıcaklıklarda nasıl davrandığı analiz edilmiştir. Çekme sonrası kopan yüzeylerin ve üretilen nanoelyafın SEM görüntüleri alınarak kopma yüzeyleri ve nanoelyaf lif çapları incelenmiştir. Ek olarak kullanılan yapıştırıcıların TGA-DTA numuneleri hazırlanarak yapıştırıcıların termal bozunma sıcaklıkları, kütle kayıpları, camsı geçiş sıcaklıkları ve erime sıcaklıkları karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve yorumlanmıştır.

Bu tez çalışmasında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- N6.6 nanoelyaf ve %1, 3 ve 5 GNP katkılı (N6.6 ağırlığınca) N6.6 nanoelyafın SEM görüntüleri incelenmiş ve GNP katkısının artmasıyla lif çaplarının incelendiği belirlenmiştir. GNP katkısının çözelti iletkenliğini artırarak elektro eğirme yönteminde ince lif oluşumunu sağlaması durumu belirlenen sonuçlarla desteklenmiştir.
- Çekme sonrası SEM görüntüleri incelenmiş ve nanoelyaf katkısıyla yapıştırıcının tıpkı tek nanoelyaf katmanından oluşan kompozit gibi davranarak

benzer hasar mekanizmaları oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu kapsamda saf N6.6 nanoelyaf ile %1, 3 ve 5 GNP katkılı yapışma bağlantılarının kopma sonrası alüminyum yüzeyleri incelendiğinde nanoelyaf sıyrılması, nanoelyaf kopması ve köprüleme gibi hasar mekanizmalarının olduğu gözlemlenmiştir. Bu hasar mekanizmaları enerji absorblayarak yapışma bağlantısının dayanımını ve tokluğunu artıracakları incelenen SEM görüntülerinden de anlaşılmıştır.

- Çekme sonrası kopan yüzeyler makroskobik olarak incelendiğinde tüm yapışma bağlantılarında ortak bir karakteristik gözlenmiş olup yapışma bağlantılarında ayrılmanın ara yüzeyden olmayıp yapıştırıcının kırılması ile gerçekleşerek kohezyon kırılma ile ayrıldığı gözlenmiştir. Yapıştırıcının hem alüminyum hem de kompozit yüzeye verimli bir şekilde nüfuz ettiği ve katkılanan N6.6 nanoelyafın verimli bir şekilde ıslanarak yapışma bağlantısında ki yapıştırıcı ile etkileşime geçtiği görülmüştür. Ayrıca kohezyon kırılmada gözlemlenmesi beklenen kırık yollarının zikzaklar çizdiği ve tokluk değerlerinin de iyi olacağı belirlenmiştir. Sonuç olarak yapışma bağlantılarda verimli bir yapışmanın sağlandığı ve N6.6 nanoelyaf katkısının ve GNP katkılarının kıyaslanması için uygun olduğu belirlenmiştir.
- Kullanılan yapıştırıcıların TGA ve DTA sonuçları incelenmiş ve nanoelyaf katkısının ısıl kararlılığı artırdığı belirlenmiştir. Bu kapsamda saf epoksili yapıştırıcıya ait %5, %50 ve kütle kaybının durduğu sıcaklıklar sırasıyla 264.7, 353.8 ve 471.9 °C olarak ölçülürken bozunma sıcaklıkları en çok artan N 6.6+%3 GNP nanoelyaf katkılı yapıştırıcıya ait %5, %50 ve kütle kaybının durduğu sıcaklıklar sırasıyla 397.9, 361.2 ve 482.7 °C olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre N 6.6+%3 GNP nanoelyaf takviyesinin yapıştırıcıda tamamen bozunma sıcaklığını %2,3 kadar iyileştirdiği tespit edilmiştir. Ek olarak en düşük camsı geçiş sıcaklığını (48.4°C) ve en düşük erime sıcaklığını (295.2°C) saf epoksili yapıştırıcının gösterirken N6.6 nanoelyaf takviyesinin ve bu takviyeye de GNP ilavesinin ısıl direnci artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca camsı geçiş sıcaklığında en iyi sonucu 65.3°C ile N6.6+%1 GNP katkılı epoksi yapıştırıcı vermiş ve saf epoksiye kıyasla %34.9'luk artış göstermiştir. Erime sıcaklığında ise 317.9°C ile en iyi sonucu N6.6 katkılı epoksi yapıştırıcı vermiş ve saf epoksiye kıyasla %7.7'lik artış göstermiştir.

- Darbe testleri sonrası kuvvet-zaman eğrileri incelendiğinde yapışma bağlantılarının tümünde ortak bir karakterizasyon olarak ilk zirve oluşumu gözlenmiş ve yapıştırıcılarında kompozit gibi davranarak hasar mekanizmaları oluşturduğu belirlenmiştir. Bu kapsamda yapışma bağlantısında darbe hasarı ile bir çatlak oluştuğu ve bu çatlağın ilerlelediği ancak darbe hasarının yapışma bağlantısını tamamen tahrip etmeye yetmemesi ve kalıba bağlı durumdaki numunede çekme ve basma kuvvetlerinin oluşmasıyla tamamen ilerleyip numuneyi tamamen koparamadığı belirlenmiştir. Bu kapsamda ilk zirve değerlerinde en yüksek kuvvet değerlerini saf epoksili yapışma bağlantısı verirken sırasıyla N6.6, N6.6+%5 GNP, N6.6+%3 GNP ve N6.6+%1 GNP katkılı yapışma bağlantılarının en yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür. Bu sonuçlara göre ise en yüksek darbe dayanımını N6.6+%1 GNP katkılı yapışma bağlantısının gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca elde edilen darbe verileri ile kuvvet-deplasman ve enerji-zaman eğrileri de oluşturulmuştur ancak bu eğrilerde, yapışma bağlantısında kullanılan kompozitin de hasar mekanizmalarında etkisi olduğu için tüm yapışma bağlantılarında ortak bir karakterizasyon oluşmamıştır. Yapıştırıcıların sıcaklık kıyaslamalarında ise hasar mekanizmalarının en az oda sıcaklığında oluşurken sıcaklık artışıyla bu hasarların arttığı, sıcaklık düşüşüyle ise daha da arttığı görülmüş ve yapışma bağlantılarında en yüksek hasar oluşumu  $-50^{\circ}\text{C}$ 'de görülmüştür. Bu sonuçlara göre  $23^{\circ}\text{C}$ 'de ki N6.6+%1 GNP katkılı yapışma bağlantısı saf epoksiye kıyasla %80.5'lik artış sağladığı belirlenmiştir.
- Darbe sonrası çekme testleri ile yapışma bağlantılarının kayma dayanımlarının kıyaslaması yapılmıştır. Bu kapsamda kayma yüküne karşı maksimum kopma kuvvetine N6.6+%1 GNP katkılı yapışma bağlantısı ulaşırken en düşük kopma kuvvetine saf epoksili yapışma bağlantısı ulaşmıştır. Bu sonuçlar darbe sonrası yapılan yorumları ve çıkarımları da desteklemiştir. Bu kapsamda çekme sonuçlarına göre darbe dayanımları sırasıyla N6.6+%1 GNP, N6.6+%3 GNP, N6.6+%5 GNP, N6.6 katkılı yapışma bağlantısı ve en son saf epoksili yapışma bağlantısı şeklinde belirlenmiştir. Ayrıca en iyi dayanım değerleri oda sıcaklığında elde edilirken en düşük değerler melzemelerin ve yapıştırıcının daha da gevrekleşmesine neden olarak  $-50^{\circ}\text{C}$ 'de gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara

göre ise 23°C'de ki N6.6+%1 GNP katkıli yapışma bağlantısı saf epoksiye kıyasla %43,8'lik artış sağladığı belirlenmiştir.

## 5.2 Öneriler

- Bu çalışmada farklı katkı oranları ve bu oranların mekanik özellikleri ne kadar iyileştirildiği araştırılmıştır. Ayrıca hazırlanan yapışma bağlantılarına yorulma testleri yapılarak kullanılan yapıştırıcıların servis ömrünü bulmak için çalışmalar yapılabilir.
- Epoksi yapıştırıcıya yapılan nanoelyaf katkısı farklı polimerler (PVA, PAN, PS gibi) ve farklı katkı maddeleri (CNT, metat oksit nano parçacıkları gibi) kullanılarak çalışma genişletilebilir.
- Bu çalışmada, yapışma bağlantısı oluşturulurken alüminyum ve kompozit plakalar kullanılmıştır. Buna ek olarak kompozit-kompozit ve alüminyum-alüminyum yapışma bağlantıları da yapılabilir.
- Çatlak karakteristiğini ve tokluk değerlerini belirleyebilmek için çift konsol giriş testi (DCB) ve/veya çentikli üç nokta eğilme testi (ENF) gibi testlerin de farklı sıcaklıklar altında yapılması gerekmektedir.
- 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.
- Ayrıca çalışmanın devamı mahiyetinde sonlu elemanlar yöntemi ile yapıştırma bağlantılarının modellenmesi ve mekanik test analizi yapılmalı, alınan sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılarak değişken parametrelerin optimizasyonu için çalışmalar yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- Açık, M., 2017, Fracture behaviors of epoxy adhesively bonded composite joints reinforced with graphene and nylon 6.6 nanofibers, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Adams, J., King, C. ve Ma, N., 2010, Global research report, *Africa. Leeds, UK: Evidence, a Thomson Reuters business*.
- Adin, H., 2007, Yapıştırıcı İle Birleştirilmiş Ters Z Tipi Kompozit Malzemelerinin Mekanik Analizi, *Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Agarwal, A., Bakshi, S. R. ve Lahiri, D., 2018, Carbon nanotubes: reinforced metal matrix composites, CRC press, p.
- Ahangaran, F., Hassanzadeh, A., Nouri, S. ve Esmaeely Neisiany, R., 2017, Investigation of thermal and dielectric properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/high-density polyethylene nanocomposites, *Journal of composite materials*, 51 (28), 3923-3929.
- Amelinckx, S., Zhang, X., Bernaerts, D., Zhang, X., Ivanov, V. ve Nagy, J., 1994, A formation mechanism for catalytically grown helix-shaped graphite nanotubes, *Science*, 265 (5172), 635-639.
- Arora, A. K., Ravindran, T., Reddy, G., Sikder, A. K. ve Misra, D., 2001, Nature of confinement of phonons in nanocrystalline CVD diamond, *Diamond and related materials*, 10 (8), 1477-1485.
- Baser, I., 1992, Elyaf Bilgisi, *Marmara Üniversitesi*, 524, 136.
- Beran, J., Valtera, J., Bilek, M., Skrivanek, J., Batka, O., Lukas, D., Pokorny, P., Kalous, T., Soukupova, J. ve Kostakova, E., 2018, Method for Producing Polymeric Nanofibers by Electrospinning of a Polymer Solution or Melt, a Spinning Electrode for Performing the Method and a Device for Producing Polymeric Nanofibers Equipped with at Least One such Spinning Electrode, Google Patents.
- Beypazar, Ö., 2013, Nanolif üretiminde çap kontrolü, *Namık Kemal Üniversitesi*.
- Chen, J.-Y., Yu, G.-P. ve Huang, J.-H., 2000, Corrosion behavior and adhesion of ion-plated TiN films on AISI 304 steel, *Materials chemistry and physics*, 65 (3), 310-315.
- Chen, X., Yang, S., Takeuchi, K., Hashishin, T., Iwanaga, H. ve Motojiima, S., 2003, Conformation and growth mechanism of the carbon nanocoils with twisting form in comparison with that of carbon microcoils, *Diamond and related materials*, 12 (10-11), 1836-1840.
- Chen, Z., Chen, Z., Zhang, A., Hu, J., Wang, X. ve Yang, Z., 2016, Electrospun nanofibers for cancer diagnosis and therapy, *Biomaterials Science*, 4 (6), 922-932.
- Dhumpa, R. ve Foster, J., 2018, HIGH-PERFORMANCE NANOCELLULOSE COMPOSITE FOR AVIATION AND AEROSPACE, *Innovatech Engineering LLC*.
- Dinç, H., 2013, Polivinil borat sentezin; elektrospin yöntemiyle nanofiber hazırlanması ve karakterizasyonu, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Dunlap, B. I., 1992, Connecting carbon tubules, *Physical Review B*, 46 (3), 1933.
- Ebnesajjad, S., 2010, Handbook of adhesives and surface preparation: technology, applications and manufacturing, William Andrew, p.
- Ekrem, M., 2015, Karbon nanotüp ve polivinil alkol nanoelyafla güçlendirilmiş epoksi yapıştırıcıların alüminyum bağlantılar üzerindeki kırılma davranışları, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.

- Fan, Z., 2007, Flow and rheology of multi-walled carbon nanotubes thermoset resin suspensions in processing of glass fiber composites, University of Delaware, p.
- Fiedler, B., Gojny, F. H., Wichmann, M. H., Nolte, M. C. ve Schulte, K., 2006, Fundamental aspects of nano-reinforced composites, *Composites science and technology*, 66 (16), 3115-3125.
- Gao, B., Zhang, R., He, M., Sun, L., Wang, C., Liu, L., Zhao, L., Cui, H. ve Cao, A., 2016, Effect of a multiscale reinforcement by carbon fiber surface treatment with graphene oxide/carbon nanotubes on the mechanical properties of reinforced carbon/carbon composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 90, 433-440.
- Gojny, F. H., Wichmann, M. H., Fiedler, B., Bauhofer, W. ve Schulte, K., 2005, Influence of nano-modification on the mechanical and electrical properties of conventional fibre-reinforced composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36 (11), 1525-1535.
- Haider, A., Haider, S. ve Kang, I.-K., 2018, A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology, *Arabian Journal of Chemistry*, 11 (8), 1165-1188.
- Hashish, M. ve Kent, W., 2013, Trimming of CFRP aircraft components, *WJTA-IMCA conference and Expo*.
- Hofmann, E., Krüger, K., Haynl, C., Scheibel, T., Trebbin, M. ve Förster, S., 2018, Microfluidic nozzle device for ultrafine fiber solution blow spinning with precise diameter control, *Lab on a Chip*, 18 (15), 2225-2234.
- Hughes, R., Drinkwater, B. ve Smith, R., 2018, Characterisation of carbon fibre-reinforced polymer composites through radon-transform analysis of complex eddy-current data, *Composites Part B: Engineering*, 148, 252-259.
- Hussain, F., Hojjati, M., Okamoto, M. ve Gorga, R. E., 2006, Polymer-matrix nanocomposites, processing, manufacturing, and application: an overview, *Journal of composite materials*, 40 (17), 1511-1575.
- Ihara, S., Itoh, S. ve Kitakami, J.-i., 1993, Helically coiled cage forms of graphitic carbon, *Physical Review B*, 48 (8), 5643.
- Khalf, A. ve Madihally, S. V., 2017, Recent advances in multi-axial electrospinning for drug delivery, *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 112, 1-17.
- Kim, J. Y. ve Kim, S. H., 2006, Influence of multiwall carbon nanotube on physical properties of poly (ethylene 2, 6-naphthalate) nanocomposites, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 44 (7), 1062-1071.
- Kim, M., Kim, Y. K., Lim, S. K., Kim, S. ve In, S.-I., 2015, Efficient visible light-induced H<sub>2</sub> production by Au@ CdS/TiO<sub>2</sub> nanofibers: synergistic effect of core-shell structured Au@ CdS and densely packed TiO<sub>2</sub> nanoparticles, *Applied Catalysis B: Environmental*, 166, 423-431.
- Kotek, R., 2008, Recent advances in polymer fibers, *Polymer Reviews*, 48 (2), 221-229.
- Leal, A. A., Naeimirad, M., Gottardo, L., Schuetz, P., Zadhoush, A. ve Hufenus, R., 2016, Microfluidic behavior in melt-spun hollow and liquid core fibers, *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 65 (9), 451-456.
- Liu, H., Xiao, C., Huang, Q., Fan, Z., Hu, X. ve Shu, W., 2015, Study on interface structure and performance of homogeneous-reinforced polyvinyl chloride hollow fiber membranes, *Iranian Polymer Journal*, 24 (6), 491-503.

- Liu, R., Chen, Y., Ma, Q., Luo, J., Wei, W. ve Liu, X., 2017, Noncovalent functionalization of carbon nanotube using poly (vinylcarbazole)-based compatibilizer for reinforcement and conductivity improvement in epoxy composite, *Journal of Applied Polymer Science*, 134 (26).
- Lubineau, G. ve Rahaman, A., 2012, A review of strategies for improving the degradation properties of laminated continuous-fiber/epoxy composites with carbon-based nanoreinforcements, *Carbon*, 50 (7), 2377-2395.
- Ma, P.-C., Liu, M.-Y., Zhang, H., Wang, S.-Q., Wang, R., Wang, K., Wong, Y.-K., Tang, B.-Z., Hong, S.-H. ve Paik, K.-W., 2009, Enhanced electrical conductivity of nanocomposites containing hybrid fillers of carbon nanotubes and carbon black, *ACS applied materials & interfaces*, 1 (5), 1090-1096.
- Ma, P.-C., Siddiqui, N. A., Marom, G. ve Kim, J.-K., 2010, Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: a review, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41 (10), 1345-1367.
- Maccaferri, E., Mazzocchetti, L., Benelli, T., Zucchelli, A. ve Giorgini, L., 2019, Morphology, thermal, mechanical properties and ageing of nylon 6, 6/graphene nanofibers as Nano2 materials, *Composites Part B: Engineering*, 166, 120-129.
- Mihindukulasuriya, S. D. F., 2012, Investigations of heat seal parameters and oxygen detection in flexible packages.
- Mirjalili, M. ve Zohoori, S., 2016, Review for application of electrospinning and electrospun nanofibers technology in textile industry, *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 6 (3), 207-213.
- Naeimirad, M. ve Zadhoush, A., 2018, Melt-spun liquid core fibers: A CFD analysis on biphasic flow in coaxial spinneret die, *Fibers and Polymers*, 19 (4), 905-913.
- Njuguna, J., Pielichowski, K. ve Alcock, J. R., 2007, Epoxy-based fibre reinforced nanocomposites, *Advanced Engineering Materials*, 9 (10), 835-847.
- O'connell, M. J., 2018, Carbon nanotubes: properties and applications, CRC press, p.
- Pan, L., Hayashida, T., Harada, A. ve Nakayama, Y., 2002, Effects of iron and indium tin oxide on the growth of carbon tubule nanocoils, *Physica B: Condensed Matter*, 323 (1-4), 350-351.
- Perez, R. A. ve Kim, H.-W., 2015, Core-shell designed scaffolds for drug delivery and tissue engineering, *Acta biomaterialia*, 21, 2-19.
- Persano, L., Camposeo, A., Tekmen, C. ve Pisignano, D., 2013, Industrial upscaling of electrospinning and applications of polymer nanofibers: a review, *Macromolecular Materials and Engineering*, 298 (5), 504-520.
- Petrie, E., 1975, Plastics and adhesives as adhesives, *Handbook of plastics and elastomers*.
- Polat, S., Avcı, A. ve Ekrem, M., 2018, Fatigue behavior of composite to aluminum single lap joints reinforced with graphene doped nylon 66 nanofibers, *Composite Structures*, 194, 624-632.
- Prakobna, K., Galland, S. ve Berglund, L. A., 2015, High-performance and moisture-stable cellulose-starch nanocomposites based on bioinspired core-shell nanofibers, *Biomacromolecules*, 16 (3), 904-912.
- Rajesh, J. J., Bijwe, J. ve Tewari, U., 2002, Abrasive wear performance of various polyamides, *Wear*, 252 (9-10), 769-776.
- Rajgarhia, S. ve Jana, S. C., 2017, Influence of secondary stretching on diameter and morphology of bicomponent polymer nanofibers produced by gas jet fiber process, *Polymer*, 123, 219-231.

- Randviir, E. P., Brownson, D. A. ve Banks, C. E., 2014, A decade of graphene research: production, applications and outlook, *Materials Today*, 17 (9), 426-432.
- Ratna, D., 2009, Handbook of thermoset resins, ISmithers Shawbury, UK, p.
- Rawal, A. ve Mukhopadhyay, S., 2014, Melt spinning of synthetic polymeric filaments, In: *Advances in filament yarn spinning of Textiles and Polymers*, Eds: Elsevier, p. 75-99.
- Savage, N., 2012, Materials science: Super carbon, *Nature*, 483 (7389), S30-S31.
- SIRIN, S., CETINER, S. ve SARAC, A. S., 2013, Elektro çekim yoluyla polimer nanolifler: nanolif kalitesini etkileyen faktörler, *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16 (2), 1-12.
- Soliman, E., Al-Haik, M. ve Taha, M. R., 2012, On and off-axis tension behavior of fiber reinforced polymer composites incorporating multi-walled carbon nanotubes, *Journal of composite materials*, 46 (14), 1661-1675.
- Şenyurt, M. A., 2017, Grafen ve naylon 6.6 nano elyaf katkılı yapıştırıcıların alüminyum-karbon elyaf takviyeli kompozit levhaların yapıştırma bağlantılarına farklı sıcaklık koşulları altında etkisi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Tang, L.-C., Wan, Y.-J., Yan, D., Pei, Y.-B., Zhao, L., Li, Y.-B., Wu, L.-B., Jiang, J.-X. ve Lai, G.-Q., 2013, The effect of graphene dispersion on the mechanical properties of graphene/epoxy composites, *Carbon*, 60, 16-27.
- Terrones, M., 2003, Science and technology of the twenty-first century: synthesis, properties, and applications of carbon nanotubes, *Annual review of materials research*, 33 (1), 419-501.
- Tian, L., Prabhakaran, M. P., Hu, J., Chen, M., Besenbacher, F. ve Ramakrishna, S., 2015, Coaxial electrospun poly (lactic acid)/silk fibroin nanofibers incorporated with nerve growth factor support the differentiation of neuronal stem cells, *RSC Advances*, 5 (62), 49838-49848.
- Tyler, K. L. ve Stockett, R. C., 2018, Composite vehicle body, Google Patents.
- Ulus, H., Üstün, T., Şahin, Ö. S., Karabulut, S. E., Eskizeybek, V. ve Avcı, A., 2016, Low-velocity impact behavior of carbon fiber/epoxy multiscale hybrid nanocomposites reinforced with multiwalled carbon nanotubes and boron nitride nanoplates, *Journal of composite materials*, 50 (6), 761-770.
- Vahidifar, A., Esmizadeh, E., Naderi, G. ve Varvani-Farahani, A., 2018, Ratcheting response of nylon fiber reinforced natural rubber/styrene butadiene rubber composites under uniaxial stress cycles: Experimental studies, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 41 (2), 348-357.
- Varadan, V. K. ve Xie, J., 2002, Large-scale synthesis of multi-walled carbon nanotubes by microwave CVD, *Smart materials and structures*, 11 (4), 610.
- Wang, J., Ayyar, R., Olah, A. ve Baer, E., 2016, Processing-structure-property relationships of novel fibrous filters produced by a melt-process, *Journal of materials science*, 51 (1), 188-203.
- Wei, Z., Zhang, Q., Peng, M., Wang, X. ve Yang, J., 2014, Preparation and drug delivery study of electrospun hollow PES ultrafine fibers with a multilayer wall, *Colloid and Polymer Science*, 292 (6), 1339-1345.
- Wootton, D. B. ve Staff, R. T. L., 2001, The application of textiles in rubber, Rapra Technology Shawbury, Shrewsbury, p.
- Yang, S., Chen, X., Motojima, S. ve Ichihara, M., 2005a, Morphology and microstructure of spring-like carbon micro-coils/nano-coils prepared by catalytic pyrolysis of acetylene using Fe-containing alloy catalysts, *Carbon*, 43 (4), 827-834.

- Yang, Y., Gupta, M. C., Dudley, K. L. ve Lawrence, R. W., 2005b, Conductive carbon nanofiber-polymer foam structures, *Advanced materials*, 17 (16), 1999-2003.
- Zhang, X. ve Lu, Y., 2014, Centrifugal spinning: an alternative approach to fabricate nanofibers at high speed and low cost, *Polymer Reviews*, 54 (4), 677-701.
- Zhao, L.-x., Zheng, L.-y. ve Zhao, S.-g., 2006, Tribological performance of nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced polyamide 6 composites, *Materials Letters*, 60 (21-22), 2590-2593.
- Zhou, H., Mishnaevsky Jr, L., Yi, H., Liu, Y., Hu, X., Warriar, A. ve Dai, G., 2016, Carbon fiber/carbon nanotube reinforced hierarchical composites: Effect of CNT distribution on shearing strength, *Composites Part B: Engineering*, 88, 201-211.



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Musa Yılmaz  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Selçuklu / 02.11.1994  
**Telefon** : 0 537 794 63 62  
**Faks** : -  
**e-mail** : musa.yilmazz@yandex.com

### EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Konevi Anadolu Lisesi, Selçuklu, Konya	2012
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya	2017
Yüksek Lisans	: Necmettin Erbakan Üniversitesi, Meram, Konya	
Doktora	:	

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2017-18	Koçak Park Kent Mobilyaları	Ar-Ge Mühendisi
2018	TÜBİTAK	Bursiyer

### UZMANLIK ALANI

Rotasyon plastik kalıp modelleme, elektro eğitme ile nano elyaf üretimi, yapıştırma

### YABANCI DİLLER

İngilizce

### YAYINLAR

Yılmaz, M., Ekrem, M., 2019, Hava Araçlarındaki Bağlantıların N 6.6 Nano Elyaf ile Takviyelendirilmiş Epoksi Yapıştırıcılarla İyileştirilmesi, 5.Ulpaş, İstanbul, Türkiye, 59-64.