

**NANOPARTİKÜL İÇEREN KARBON ELYAF EPOKSİ BORULARIN
TEKRARLI DARBE SONRASI HASAR DAVRANIŞLARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANIL ERDAĞ NOMER

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**MERSİN
MAYIS - 2019**

**NANOPARTİKÜL İÇEREN KARBON ELYAF EPOKSİ BORULARIN
TEKRARLI DARBE SONRASI HASAR DAVRANIŞLARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANIL ERDAĞ NOMER

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**


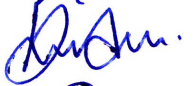

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**Danışmanlar
Doç. Dr. Memduh KARA
Prof. Dr. Ahmet AVCI**

**MERSİN
MAYIS - 2019**

ONAY

Anıl Erdağ NOMER tarafından Doç.Dr. Memduh KARA danışmanlığında ve Prof.Dr. Ahmet AVCI ikinci danışmanlığında hazırlanan "Nanopartikül İçeren Karbon Elyaf Epoksi Boruların Tekrarlı Darbe Sonrası Hasar Davranışları" başlıklı çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından 03 Mayıs 2019 tarihinde yapılan Tez Savunma Sınavı sonucunda oy birliği/~~çokluğu~~ ile Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Görevi	Ünvanı, Adı ve Soyadı	İmza
Başkan	Doç.Dr. Murat MAYDA	
Üye	Doç.Dr. Berat Barış BULDUM	
Üye	Doç.Dr. Memduh KARA	

Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 31/05/2019 tarih ve 2019.23.../635. sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, tablo ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

ETİK BEYAN

Mersin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğinde belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlâk kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak kullandığımı,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Bu tezin herhangi bir bölümünü Mersin Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,
- Tezin tüm telif haklarını Mersin Üniversitesi'ne devrettiğimi beyan ederim.

ETHICAL DECLARATION

This thesis is prepared in accordance with the rules specified in Mersin University Graduate Education Regulation and I declare to comply with the following conditions:

- I have obtained all the information and the documents of the thesis in accordance with the academic rules.
- I presented all the visual, auditory and written informations and results in accordance with scientific ethics.
- I refer in accordance with the norms of scientific works about the case of exploitation of others' works.
- I used all of the referred works as the references.
- I did not do any tampering in the used data.
- I did not present any part of this thesis as an another thesis at Mersin University or another university.
- I transfer all copyrights of this thesis to the Mersin University.

03/05/2019

İmza / Signature

Anıl Erdağ Nomer

ÖZET

NANOPARTİKÜL İÇEREN KARBON ELYAF EPOKSİ BORULARIN TEKRARLI DARBE SONRASI HASAR DAVRANIŞLARI

Hem nanoteknoloji alanı hem de kompozit malzemeler; günümüzde son derece ilgi duyulan, gelişime ve araştırmalara açık, uygulama alanları oldukça geniş (Tıp, havacılık, askeri alan gibi) çalışma konularıdır. Sağladıkları fiziksel, mekanik avantajların yanı sıra, başka malzemelerle olan uyumları ve o malzemelerin eksik yönlerini kapatma kabiliyetleri sayesinde ön plana çıkmaktadırlar. Bu tez çalışmasında, saf karbon elyaf epoksi boruların ve nanopartikül takviye edilmiş karbon elyaf epoksi boruların, tekrarlı darbe cevabı ve bu darbeye bağlı olarak gelişen hasar mekanizmaları incelenmiştir. Düşük hızlı darbenin, bu boru çeşitlerinde, gerek bu boruların bakım onarım esnasında, gerek boruların taşınma esnasında bir yere çarpmasıyla ya da yabancı bir cismin fırlayıp çarpmasıyla gerçekleşmesi mümkündür. Yapılan deneysel sonuçlar ve oluşturulan grafikler yorumlanmıştır. Bu yorumlamaya göre, tekrarlı darbe esnasında, nanopartikül ilavesinin malzemede geliştirdiği özellikler belirlenmiştir. Saf karbon elyaf epoksi borunun, nanopartikül eklenmiş borulara karşı ne gibi özellik farklarının olduğu belirlenmiştir. Tekrarlı darbe sonrasında, numunelerde meydana gelen hasar incelemeleri yapılmış ve yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tekrarlı darbe, Nanopartikül, Karbon elyaf epoksi, Boru, Hasar davranışı

Danışman: Doç.Dr. Öğretim Üyesi Memduh KARA, Mersin Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin.

İkinci Danışman: Prof.Dr. Ahmet AVCI, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.

ABSTRACT

DAMAGE BEHAVIOR OF CARBON FIBER EPOXY PIPES WHICH CONTAINING NANOPARTICLES, AFTER REPEATED IMPACT EVENT

Both nanotechnology and composite materials are research topics that are very overrated, open to developments and researches, have wide application area such as medical, aeronautic and military areas. They provide mechanical and physical advantages, and also taking attention by their harmony with other materials, and ability to fulfill their deficiencies. In this study, repeated impact response of the pure carbon fiber epoxy pipes and nanoparticle reinforced carbon fiber epoxy pipes and the damages caused by this impact were investigated. It is possible for the low-speed impact to occur in these types of pipes, either during maintenance, when the pipes hit during transportation, or when a foreign material hits somewhere on the pipe. The experimental results and graphs were interpreted. According to this interpretation, the properties of nanoparticle addition in the material were determined during the repeated impact. It has been determined that the properties of pure carbon fiber epoxy pipe against nanoparticle reinforced pipes. After repeated impact, damage investigations in samples were performed and interpreted.

Keywords: Repeated impact, Nanoparticles, Carbon fiber epoxy, Pipe, Damage behavior

Advisor: Assoc.Prof.Dr. Memduh KARA, Mersin University, Department of Mechanical Engineering, Mersin.

Second Advisor: Prof.Dr. Ahmet AVCI, Necmettin Erbakan University, Department of Biomedical Engineering, Konya.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yapılmasında ve tamamlanmasında her türlü desteği esirgemeyen tez danıőmanlarım Doç.Dr. Memduh KARA'ya ve Prof.Dr. Ahmet AVCI'ya minnet ve Őukranlarımı sunarım.

Çalışmanın yapılması esnasında bilgilerinden ve tecrübelerinden faydalandığım Dr. S. Egemen KARABULUT'a yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Son olarak, tüm çalıőmalarım süresince büyük bir sabırla bana destek olan babam Ali Erdoğan NOMER, annem Gülen NOMER ve kardeőim Naciye Zeynep NOMER'e sonsuz teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇ KAPAK	i
ONAY	ii
ETİK BEYAN	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
KISALTMALAR ve SİMGELER	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
3. MATERYAL ve YÖNTEM	5
3.1. Kompozit Malzemeler	5
3.1.1. Matris Malzemeler	5
3.1.2. Takviye Malzemeler	6
3.2. Kompozit Malzeme Üretim Metotları	6
3.2.1. Filaman Sarım Metodu	6
3.3. Nano Teknoloji	8
3.3.1. Karbon Nanotüpler	8
3.3.2. Bor Nitrür Nanotüpler	10
3.4. Nanokompozitler	11
3.4.1. Nanokompozit Çeşitleri	12
3.4.1.1. Seramik Matris Nanokompozitler	12
3.4.1.2. Metal Matris Nanokompozitler	12
3.4.1.3. Polimer Matris Nanokompozitler	12
3.4.2. Nanokompozitlerin Özellikleri	13
3.4.2.1. Termal Özellikler	13
3.4.2.2. Elektriksel Özellikler	13
3.4.2.3. Mekanik Özellikler	13
3.5. Darbe Mekanikliği	14
3.5.1. Katı Cisim Darbe Tanımı	14
3.5.2. Katı Cisim Darbe Mekanikliğinin Dayandığı Esaslar	15
3.6. Darbe Testleri	16
3.6.1. Sarkaç Testi	16
3.6.2. Ankastre Edilmiş Kiriş Darbe Testi	18
3.6.3. Ağırlık Düşürerek Darbe Testi	19
3.6.4. Yüksek Hızlı Darbe Testi	20
3.7. Darbe Sonucunda Oluşan Hasar Durumları	20
3.7.1. Matris Hasarı	21
3.7.2. Delaminasyon	24
3.7.3. Elyaf Hasarı	26
4. METOD ve DENEYSEL ÇALIŞMA	28
4.1. Kullanılan Materyallerin Tanımı	29
4.1.1. Epoksi Matrisinin Materyal Özellikleri	29
4.1.2. Karbon Fiber Takviye Materyalinin Özellikleri	30
4.1.3. Karbon Nanotüp Nanopartiküller	30
4.1.4. Bor Nitrür Nanopartiküller	31
4.2. Kompozit Boru Üretim Yöntemi	31
4.2.1. Nanopartikül İçerikli Epoksi Matrisinin Hazırlığı	31
4.2.2. Kompozit Boruların Üretim Hazırlığı	33

	Sayfa
4.2.3. Filaman Sarım Metoduyla Kompozit Boru Üretimi	34
4.3. Tekrarlı Darbe Olayı	35
4.4. Darbe Kuvvetinin ve Bazı Parametrelerin Birbirleriyle Olan İlişkisi	37
4.4.1. Darbe Kuvvetinin Yer Değiştirmeye (Deplasman) Göre (F-s) Değişim Grafiği	37
4.4.2. Darbe Kuvvetinin Zamana Göre (F-t) Değişim Grafiği	39
4.4.3. Tekrarlı Darbede Kuvvetin Zamana Göre (F-t) Değişim Grafiği	40
5. BULGULAR ve TARTIŞMA	43
5.1. Darbe Testleri	43
5.1.1. Temas Kuvvetinin Zamana Bağlı Değişimi	44
5.1.1.1. İlk Darbe İçin Temas Kuvvetinin Zamana Bağlı Değişimi	44
5.1.1.2. Tekrarlı Darbe İçin Temas Kuvvetinin Zamana Bağlı Değişimi	47
5.1.1.3. Nanopartikül Takviyesinin Temas Kuvveti Zaman Değişimine Etkisi	49
5.1.2. Temas Kuvveti Yer Değiştirme (Deplasman) Değişimi	50
5.1.2.1. Nanopartikül Takviyesinin Temas Kuvveti Yer Değiştirme Değişimine Etkisi	52
5.1.3. Düşük Hızlı Tekrarlı Darbede Enerji Dağılımı ve Hasar Bölgeleri	53
5.1.3.1. Nanopartikül Takviyesinin Enerji Yutma Kapasitesine Etkisi	53
5.1.3.2. Tekrarlı Darbe Sonucunda Meydana Gelen Hasar Bölgelerinin Analizi	56
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	60
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	66

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 4.1. Reçine sisteminin ürün verileri	29
Çizelge 4.2. Reçine sistemindeki tavsiye edilen karışım oranları	29
Çizelge 4.3. Reçine sisteminin filaman sarım yöntemindeki tavsiye edilen optimum uygulama koşulları	29
Çizelge 4.4. Reçine sisteminin fiziksel ve mekanik özellikleri	30
Çizelge 4.5. Reçine sistemi kullanım verileri	30
Çizelge 4.6. Karbon fiber ipliklerinin özellikleri	30
Çizelge 4.7. Çok cidarlı karbon nanotüplerin fiziksel ve mekanik özellikleri	31
Çizelge 4.8. Sarım parametreleri	34
Çizelge 5.1. Tekrarlı darbe deneylerinden elde edilen değerler	56



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Grafit tabakanın yuvarlanmasıyla oluşan TCKNT ve ÇCKNT yapı görüntüsü	9
Şekil 3.2. Tek cidarlı yapıdan, 6 cidarlı yapıya kadar olan BNNT TEM görüntüleri	11
Şekil 3.3. Charpy ve Izod darbe testi metotlarının düzenekleri	17
Şekil 3.4. Sarkaç darbe testi sistem düzeneği şematik resmi	18
Şekil 3.5. Ankastre edilmiş giriş darbe test sistemi şematik resmi, 1. Numune ve 2. Vurucu	18
Şekil 3.6. Ağırlık düşürme test düzeneği	19
Şekil 3.7. Darbe olayı neticesinde kompozit malzemelerde oluşan hasar durumları	21
Şekil 3.8. Matris çatlakları (a) Çekme çatlağı (b) Kayma çatlağı	22
Şekil 3.9. (a) Çam ağacı şeklinde (b) Ters çevrilmiş çam ağacı şeklinde ki hasar görünüşleri	23
Şekil 3.10. Delaminasyon alanlarındaki elyaf yönlendirme açısına göre şekiller	24
Şekil 3.11. Sıralı delaminasyon şeritlerinin şematik gösterimi	26
Şekil 3.12. Darbenin gerçekleştiği yüzeylere göre hasarın dağılımı, (a) Cam yüzey, (b) Aramid yüzey	27
Şekil 4.1. Epoksi matrisinin hazırlanma aşamaları	33
Şekil 4.2. Kullanılan kompozit boruların geometrisi	34
Şekil 4.3. Filaman sarım işlemi	35
Şekil 4.4. Kuvvet-yer değiştirme (F-s) grafiği ve eğrileri	38
Şekil 4.5. Kuvvetin zamana bağlı değişimi (F-t) grafik eğrileri	40
Şekil 4.6. Tekrarlı darbenin 40 Joule enerji yükleme zamanına göre grafiği	41
Şekil 4.7. Tekrarlı darbenin 60 Joule enerji yükleme zamanına göre grafiği	41
Şekil 4.8. Tekrarlı darbenin 80 Joule enerji yükleme zamanına göre grafiği	42
Şekil 5.1. Darbe test düzeneği	43
Şekil 5.2. 10 J enerji seviyesinde ilk darbe kuvvet-zaman (F-t) grafiği	45
Şekil 5.3. 15 J enerji seviyesinde ilk darbe kuvvet-zaman (F-t) grafiği	45
Şekil 5.4. 20 J enerji seviyesinde ilk darbe kuvvet-zaman (F-t) grafiği	46
Şekil 5.5. 10 J enerji seviyesinde tekrarlı darbe kuvvet-zaman (F-t) grafiği	47
Şekil 5.6. 15 J enerji seviyesinde tekrarlı darbe kuvvet-zaman (F-t) grafiği	48
Şekil 5.7. 20 J enerji seviyesinde tekrarlı darbe kuvvet-zaman (F-t) grafiği	48
Şekil 5.8. 10 J enerji seviyesinde temas kuvveti-yer değiştirme (F-s) grafiği	51
Şekil 5.9. 15 J enerji seviyesinde temas kuvveti-yer değiştirme (F-s) grafiği	51
Şekil 5.10. 20 J enerji seviyesinde temas kuvveti-yer değiştirme (F-s) grafiği	52
Şekil 5.11. 10 J darbe enerjisi seviyesinde enerji dağılımı grafiği	54
Şekil 5.12. 15 J darbe enerjisi seviyesinde enerji dağılımı grafiği	54
Şekil 5.13. 20 J darbe enerjisi seviyesinde enerji dağılımı grafiği	55
Şekil 5.14. 10 J Darbe enerji seviyesi için a) Saf b) 0.5 %wt BN ve c) 0.3 %wt KNT katkılı numunelerin hasarlı kesit görüntüleri	57
Şekil 5.15. 15 J Darbe enerji seviyesi için a) Saf b) 0.5 %wt BN ve c) 0.3 %wt KNT katkılı numunelerin hasarlı kesit görüntüleri	58
Şekil 5.16. 20 J Darbe enerji seviyesi için a) Saf b) 0.5 %wt BN ve c) 0.3 %wt KNT katkılı numunelerin hasarlı kesit görüntüleri	59

KISALTMALAR ve SİMGELER

Kısaltma/Simge	Tanım
KNT	Karbon Nanotüp
BN	Bor Nitrür
CTP	Cam Takviye Edilmiş Plastik Epoksi
ÇCKNT	Çok Cidarlı Karbon Nanotüp
TCKNT	Tek Cidarlı Karbon Nanotüp
CVD	Kimyasal Buhar Yoğunlaştırma
BNNT	Bor Nitrür Nanotüp
BNNP	Bor Nitrür Nanopartikül
TCBNNT	Tek Cidarlı Bor Nitrür
ÇCBNNT	Çok Cidarlı Bor Nitrür
HRTEM	Yüksek Çözünürlüğü Olan Geçirgen Elektron Mikroskobu
ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Derneği)
mm	Milimetre
J	Darbe enerjisi (Joule)
m/s	Darbe hızı
r	Radyal mesafe
σ_r	Gerilmenin radyal bileşeni
kN	Kilo Newton
ms	Milisaniye
%wt	Ağırlıkça yüzde oranı
F	Kuvvet (Newton)
N.s	Impuls Kuvveti
S	Yer değiştirme, Deplasman
t	Zaman

1. GİRİŞ

Dayanımlı, hafif olma ve üstün rijitlik özellikleri öncelikli sayılarak, filaman sarımlı kompozit boruların çokça avantajları bulunmaktadır. Üstte yazılan olumlu özelliklerinden ve filaman sarım usulünün verimliliklerinden ötürü, filaman sarımlı borular basınçlı hidrojen saklanması veya sıvıya dönüştürülmüş doğalgaz sistemleri uygulamasında güzel bir alternatiftir [1,2].

Üstün dayanım ve yoğunluklarının az olması sebebiyle, karbon fiberler filaman sarımında eklenip, uygulanır. Karbon fiber / epoksi katkılı filaman sarım tüplerin genel olarak akışkan sürtünmeleri düşüktür, bunun sebebi de yüzey olarak pürüzsüzlük sunmalarıdır. Karbon fiber katkılı plastikler istenilen özellikleri sağlasalar bile çatlak oluşumuna mukavemetleri düşüktür ve yapısal olarak gevreklerdir. Literatürde geniş çapta çalışmalar ve araştırmalar filaman sarım malzemeler ve mekanik kabiliyetleri konuları üstüne sürdürülmektedir [3-10].

Uçları kapalı kompozit borular için fiber karakteristikler ve sarımın açısı gibi özellikler, mekanik kabiliyetlerin bunlara bağlı olduğunu ve en uygun sarım açısının 55 derece olduğunu literatür araştırmalarında sunulmuştur [11,12].

Filaman sarımlı kompozit boruların aldığı hasar sonrası matris düzeninin mekanik kabiliyetleri yüksek önem taşımaktadır, oluşan matris zedelenmesi; sızma yol oluşumu, delaminasyon ve en sonunda da fiber zedelenmesine sebep olmaktadır [8-10].

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin ara yüz kabiliyetleri genellikle matrisin karakteristiğine bağlıdır ve yoğunlukla tasarımları kısıtlıdır [13]. Fiber takviye edilmiş kompozit malzemelere nano içerikler eklenince mekanik kabiliyetlerin geliştirilmesi açısından verimli bir yöntem olmasının yanı sıra, üstün performans sağlayan kompozit malzemelerin oluşmasına olanak oluşturmaktadır [14-16]. Kompozit malzemeler içeriğinde üstün dayanma ve dağılma miktarları ile optimum katkı malzemesi, çeşitli nano katkılardan olan Karbon Nanotüp (KNT) olarak seçilebilir [13,17].

Daha evvel yapılan çalışmalarda epoksi matrisinin içine Bor Nitrür Nanopartikül katkı eklenmesiyle çekme dayanımının yükseltildiği saptanmıştır [18].

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Mühendisliğin her alanında uygulamalar yapılırken, tasarımlar da, üretimler de, teorikte ve pratikte malzemelerin seçimi çok önemli bir yer tutar. Kompozit malzemeler ise bu malzemeler içerisinde hem geleceğe yönelik geliştirilebilirlikleriyle, diğer malzemelerle olan uyumluluklarıyla, üstün özellikleriyle, mühendislikte kolaylık sağlamalarından dolayı günümüzde ve ileride çokça tercih edilmektedir ve edilecektir. Çalışmamızda, bir kompozit malzeme çeşidi olan, nanopartikül içeren karbon elyaf epoksi boruların tekrarlı darbe sonrası hasar davranışlarını incelemek esas hedefimiz olacaktır. Kompozit filaman sarılmış borular, ağır korozyon oluşturabilecek ortamlara ve yüksek basınçlara dirençleriyle ön plana çıkmaktadırlar. Kompozit boruların bu kabiliyetleri sayesinde kimya malzemeleri, doğalgaz, su, sıvı petrol gazı, basınçlı gazlar, hava ve sıvı malzemeler rahatça taşınabilmekte ve iletilmektedir.

Kompozit boruların bu tarz ürünlerin taşınımı, iletimi esnasında ve bu boruların işletmesi, servisi ve üretim esnasında darbelere maruz kalabilmesi olası bir durumdur. Darbe sonrasında kompozit borunun mekanik özelliklerinin ne durumda değişeceği, yani hasar analizini yapmak son derecede önemli ve gerekli bir durumdur. Literatür taramasında çeşitli kompozitlerin darbelere olan tepkileri, mekanik değişimleri, malzemeye ne tür hasar verdiği araştırılmıştır, sunulmuştur.

Numunelerin ± 55 derece açıda iki farklı tutturulma biçimine uygun olarak statik yük uygulaması ve düşük hızda darbe ölçümleri, cam elyaf katkılı filaman sarılmış borular için yapılmıştır. İki farklı bağlama yöntemleri olarak, CTP malzeme örneği zeminde serbest biçimdedir diğer malzeme örneğindeyse uç kısımlar yataklanarak bağlanmıştır. Borularda oluşan zedelenmelerin alanlarının büyüklük oranını, zedelenme süreçlerini kolay aydınlatma yöntemiyle analizlenmiştir. Numune zedelenme kademelerinin karakteristik olarak iki bölüm olacağı bulunmuştur. Elastik davranış, numunenin bağlanması her ne konumda bulunursa bulunsun sabit yükleme sonucunda bittiğini birinci olarak saptamışlardır. İkinci olarak ise delaminasyon yoğunlaşması gibi elastik durumun akabinde, numune bağlanmasının konumunu ve ölçüm yönteminin önemiyetinden bahsedilmiştir [19].

Yapılan bir diğer literatür taramasında ise, dinamik olarak kompozit içerikli silindirik şekilli panellerin vereceği tepki sonlu eleman yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çalışmanın neticesinde, temas kuvvetinin artması için kavisinde artması gerekmektedir ve kavis az olan panelin darbe etkimesi, düz tabakalı paneller gibidir. Enerji düzeyi sabit, aynı tutulan darbe deneylerinde, numunenin kavisli olması uygulanan temas kuvvetini ve temas zamanını artırmaktadır, bu yüzden kavisli örnekteki tabaka arasındaki ayrılmalar, düzlem yüzeylerinde meydana gelen ayrılmalardan daha çok kritiktir [20].

Bir diğer araştırmada, $\pm 55^\circ$ 'de, iç çapı 55 mm, et kalınlığı 6 mm ve uzunluğu 110 mm olan cam epoksi filaman sarımlı silindirlerde oluşan darbe zedelenmesinin hidrostatik olarak basıncın dayanımı incelenmiştir. İlk olarak patlama basınçlarını bulabilmek için hasarsız örnekler dış basınca maruz bırakılmıştır. Dış basınç uygulanmasının sebebi ise sualtı çalışmalarında oluşabilecek hasarlara ne kadar toleranslı olduğunu göstermektir. Cam epoksi silindirler örnek olarak verilirse, 12 Joule'lük darbe enerjisini, patlama basınç yüzdesini 40'a kadar azaltarak, patlama basıncını ne denli azalttığını göstermiştir [21].

Türk mühendislik alanında da cam takviye edilmiş plastik epoksi (CTP) boruların oluşturduğu, 5 sarım açılı filamanlı sarımlı, $\pm 55^\circ$ açındaki numunelere, 24 mm yarı küre şeklindeki 6,350 kg darbe vurucusu ile sırasıyla 2, 3, 4 m/s'lik düşük çarpış hızlarıyla darbe ölçümlerini gerçekleştirmişler ve mukavemet neticelerini incelemişlerdir. Akabinde ise hasar almış CTP numuneler ASTM D 1599-99 statik patlatma testi standartına göre patlatılıp analizlenmiştir. Statik patlatma analizinde ise darbenin enerjisi arttıkça numunenin patlama basınç değerinin azaldığı neticelendirilmiştir. Asıl belirlenen analiz ve incelemelere göre, düşük hızda ki darbe testlerin de, 2, 3 ve 4 m/s'lik çarpma hızlarını baz alarak, artan darbe hızlarına göre, temas kuvveti, temas vakti, yer değişme oranı, malzemenin absorbe ettiği enerjisi ve numunelerin zedelenme miktarı artmaktadır [22].

Çokça araştırılan bir diğer konu ise polimer içerikli matrislerin içerisine nanopartiküllü katkı malzemelerinin, gerek mekanik gerek fiziksel olsun, tüm özelliklerinin iyi olması adına incelenmektedir. Nano ölçüm boylarında ki partiküllerin kapladıkları yüzey oranları yeterince yüksektir ve bu özelliklerinden dolayı malzemedeki meydana gelen darbe, yük ya da basınç kuvvetinin nano partiküle transferi kolay olacaktır ve mekanik kabiliyetleri artmış bir malzeme elde edilecektir. Karbon nanotüpler yük aktarımı için en optimum olanakları sağlamaktadır [23].

Iijima, karbon nanotüpleri 1991 senesinde keşfetmiştir ve bu keşiften sonra karbon nanotüpler araştırmacıların yoğun ilgisine sebep olmuştur. Karbon nanotüplerin üstün mekanik ve fiziksel kabiliyetleri bu ilgi odağının başlıca sebebidir. Tüp biçiminde yuvarlatılmış grafen şekilli levha karbon nanotüpün yapısına benzetilebilir. Dayanıklı olmaları, hafif, üstün termal ve elektriksel iletkenlik sağlamaları, çap-boy oranlarının büyük olması, karbon nanotüpleri, üstün nano malzemeler olarak yerini alır. Karbon nanotüplerin karakteristikleri çap, boy, yönlenme biçimlerine ve yüzey kabiliyetlerine bağlıdır [24].

Karbon nanotüpleri takviye ürünü olarak kullanabilmek için bir takım engelleri aşmak gerekir, mekanik kabiliyetlerinin üstün olması bu engelleri aşmak için takviye esnasında yeterli değildir. Karbon nanotüplerin takviye malzemesi olarak sergileyeceği performansı etkileyen bazı etkenler şunlardır; nanotüplerin matris tarafından ıslatılması, adhezyon etkenleri, polimer matrisin içerisine homojen biçimde karbon nanotüplerin dağılması [23].

Kimyasal tepkimelere dirençli, yüksek ergime sıcaklığı ve üstün termal iletkenliğine sahip, düşük yoğunluklu bor nitrür (BN) iyi bir seramik katkı maddesidir. Bu özellikleri sayesinde bor nitrür (BN) matris malzemelerinde takviye elemanı özelliğiyle kullanıldığında, genel kapsamda mekanik ve termal iletkenlik yeteneklerini yükseltmektedir. İzolasyon amaçlı dolgu malzemesi olarak bor nitrürler iyi performans verirken, KNT malzemeler polimerlerde elektrik iletkenliğini iyi bir şekilde sağlarlar [25].

Matris ve karbon nanotüp ağları içerisinde yük dağıtımının ve aktarımının iyi yapılabilmesi için bu karbon nanotüplerin matris içerisinde dengeli ve eşit bir biçimde dağılım olması gerekmektedir. Bu dağılımın yeterince homojen yapılması neticesinde gerilme dağılımları dengeli olur ve gerilim yoğunluğu yüksek olan bölgelerin düşmesini sağlar [26].

Van der waals atomlar arası bağı geniş yüzey alanından dolayı ortaya çıkar ve karbon nanotüpleri bir arada tutar, bu yüzden karbon nanotüpleri matrise homojen olarak yaymak zordur. Van der waals bağı yüzünden karbon nanotüpler matriste gruplaşarak yetersiz dağılımı ortaya çıkarır bu da karbon nanotüp takviyeli kompozit malzemelerde mekanik özelliklerin geliştirilememesinin en büyük nedenidir [27,28].

Homojen dağılımı sağlamak adına ve dağılım zorlanmasını aşabilmek için çeşitli yöntemler araştırılmış ve bulunmuştur. Bunlardan bazıları, ultrasonik yöntem [29], karbon nanotüp yüzeyinin fonksiyonlaştırılması [23], kayma kuvveti etkisiyle karıştırma, yüzeyi aktif yapan madde kullanma [30], plazma polimerizasyonudur [31].

Karbon nanotüple matris arasındaki yük aktarım olayı, karbon nanotüp eklenmiş polimerin dayanım artışı için çok önemlidir. Karbon nanotüple matris arasındaki sistemin düzgün şekilde çalışması için ara yüzey bağı önemlidir. Karbon nanotüp eklenmiş matrisin dayanım düşüklüğünü çoğu araştırmacı ara yüzey bağlanması etkenine bağlamıştır [32].

Karbon nanotüp matris arası ara yüzey bağlanması, karbon nanotüpün yüzey fonksiyonelleştirilmesiyle artırılır. Optimum fonksiyonel grupsal elemanlar karbon nanotüple matris arasında etkileştirilip kuvvetli kimyevi bağlar oluşturulabilir. Yük aktarımı esnasında fonksiyonel görevi gören gruplar köprüsel işe yararlar ve artı olarak karbon nanotüplerin matrisin içerisine basitçe geçmesini sağlarlar [32,33].

Bazı bilimsel çalışmalarda, bilim adamları moleküler dinamik simülasyonlar yaparak, karbon içeriğinin yüzde 1'i bile olsa, matrisle etkileşimde bulunup ara köprü oluşturduğunu ve dayanımın yükseldiği gözlemişlerdir [34].

Polimer malzemelerin tokluk özelliğini artırıp kırılmaların önüne geçen, çatlaklı yapıların ömrünü iyileştiren KNT-epoksi nanokompozitler, içinde KNT katkısı olmayan epoksi malzemeye oranla yüzde 139 kırılma tokluğu iyileştirmesi görülmüştür [35].

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Kompozit Malzemeler

Materyal ve yöntem bölümünde tez çalışmamız da kullanılan malzemelerden olan kompozit malzemeler, karbon nanotüplerden, bor nitrür nanopartiküllerden bahsedilmiş ve üretim metodlarından olan filaman sarım yöntemiyle nano teknoloji hakkında bilgiler verilmiştir.

En az iki malzemeyle oluşturulan, istenilen oranda istenilen miktarda elde edilen, üstün özellikli mekanik ve fiziksel kabiliyetlere sahip olan malzemelere kompozit malzemeler denir. Kompozit malzemelerin üretimindeki esas amaç, malzemelerin eksik yönlerini bir diğer malzeme ya da malzemelerle kapatmaktır. Kompozit malzemeler, tasarım ve uygulama için çok uygun ve kullanışlı malzemelerdir. Çünkü her duruma göre her isteğe göre ayarlanıp, eksik olan yönler kompozit malzemeler sayesinde kapatılabilir. Aşınmaya karşı dirençli olmaları, üstün rijitliğe sahip olmaları, korozyona karşı dayanıklı olmaları, sıcaklığa karşı dirençleri ve iyi ısı, elektrik iletkenlikleri, hafif olmaları, iyi mukavemete sahip olmaları, yüksek yorulma dayanımları, yalıtımsal olarak ta kullanılabilmeleri, kompozit malzemeleri kıymetli kılan kabiliyetlerdir.

Uygun matris ve takviye elemanı çiftiyle beraber, üretim yöntemi, bileşenlerin mukavemet yetenekleriyle birlikte diğer gerekli şartlar ve faktörler değerlendirilip üretim yapılırsa, belirtilen karakteristikte özellikler sağlanabilir [36].

Hafiflik, mukavemet ve rijitliklerinden dolayı; uçak ve uzay araçları, savunma sanayi, denizaltılar, kullanım ve malzeme olarak kritik görünen makine elemanlarında, kompozit malzemeler metallerin yerini günümüzde almaktadır [36].

Kompozitler de ana bileşen matris adını alır, üstün mukavemet ve üstün elastik modül kabiliyetine sahip yan elemanlar da takviye edici (elyaf, parçacık, vs.) isimli yapısal bileşenlerdir. Takviye elemanlarının birbirine bağlanabilmesi görevi ise matrislere aittir. Matrisler, takviye elyafları bir arada tutarak destekler, korur ve gerilmeyi transfer eder. Matris yoğunluğu, rijitliği ve mukavemetleri elyaflara oranla daha düşüktür. Ancak elyaf ve matris elemanlar bir arada olup birleştiklerinde yüksek mukavemetli ve çok iyi rijitlik sağlayan malzemeler oluşturulur [36].

3.1.1. Matris Malzemeler

Matris malzeme olarak adlandırılan malzeme, kompozitler de takviye edilen malzemeleri birlikte tutmak ve bu takviye elemanlarını çevresel etkilerden sakınmak amacıyla

kullanılır. Ayrıca aktarabilmek ve dağıtabilmek içinde matris malzemeler kullanılır. Kompozit malzemelerde üç çeşit malzeme matris olarak kullanılabilir. Plastik (polimer), metal ve seramik esaslı malzemeler bu matrislerdir. Bu matris malzemelerden polimer esaslı olanlar termoplastik ve termoset olarak iki kısma ayrılmaktadır. Matris materyallerinin kabiliyetleri ve özelliklerine göre oluşturulan, yapılan kompozit malzemenin mekanik kabiliyetleri de bu matris elemanlara göre biçimlenir.

3.1.2. Takviye Malzemeleri

Kompozit malzemenin mukavemetini esas olarak sağlayan temel materyaller, matriste bulunan takviye malzemeleridir. Takviye malzemelerinin elastisite modülleri yüksektir, serttirler ancak aynı zamanda da düşük yoğunluğa sahiptirler. Bahsettiğimiz takviye malzemeler kimyasal korozyona dirençleriyle de ön plana çıkmaktadırlar. Elyaf, bu bahsettiğimiz takviye malzemeler için en uygun ve günümüzde kompozit bileşenler için en önemli, kabiliyetleri yüksek olan malzemelerdendir. Modern, ileriye dönük, gelişime açık kompozitlerin oluşumunda karbon, grafit, silisyum karbür, aramid, polietilen, cam ve boron gibi materyallerin elyaf olarak kullanımında, kısa ya da uzun elyaf lifi farketmeksizin, hacimsel olarak yüksek pekiştiriciliğe sahip olan materyaller olması, literatürde büyük önem taşımaktadır.

3.2. Kompozit Malzeme Üretim Metodları

Endüstriyel açıdan kompozit malzemelerin çok çeşitli üretim yöntemleri mevcuttur. Üretilen malzemeyi oluşturan matris ve takviye malzemelerinin kabiliyetlerine, üretimi yapılacak malzemenin boyutuna, şekline, kullanım sebeplerine ve malzemedan sağlanmak istenen özelliklere göre kompozit malzeme üretim yöntemi seçilir. Havacılık, yapı endüstrisi, otomotiv, medikal sektör ürünlerine kadar, kompozit malzemelerin geniş uygulama alanı mevcuttur [37].

3.2.1. Filaman Sarım Metodu

Tez konumuzda karbon epoksi elyaf boruların ve ekstra olarak karbon nanotüple bor nitrür takviyesi yapılmış olan boruların, tekrarlı darbe hasar davranışı inceleneceği için, kompozit boru üretim metodu olan filaman sarım metodu incelenip, tanıtılacaktır.

Silindirik forma sahip cisimler için; özellikle boru, basınçlı kap gibi cisimlerin kompozit malzeme üretimi için filaman sarım yöntemi kullanılır. Kuru ya da ıslak olarak, belirli bir kalıp

üzerine, dönme hareketiyle sürekli takviye elemanının belirlenen bir hız ile sarılması olarak filaman sarımı tanımlayabiliriz. Takviye malzemesi, matris malzemesinin ihtiva ettiği bir ıslatma banyosundan geçirilip kalıbın üstüne sarıldığı takdirde ıslak filaman sarım metodu uygulanmış olur. Takviye elemanına önceki bir vakitte matris malzemeyi emdirip, kalıba sarılıp, daha sonrada kürleme denilen (çapraz-bağların polimeri sertleştirdiği dönem) olaydan sonra üretilen filaman sarım yöntemine ise, kuru sarım metodu denir. Sarım esnasında değişik sarma açıları kullanılabilir. Kompozit malzemenin kalınlığı, filaman sarım metodunda, arzu edilen kalınlığa ulaşılan dek sarım işlemini sağlayacak özgürlüğü bize tanımaktadır. Matris malzeme olarak termoset kullanımı tercih edilmektedir. Çünkü termoset malzemeler bilindiği üzere, ilk ısı görüp istenilen şekli aldıktan sonra, bir daha ki ısı görmeleri halinde şekilleri değişmez. Takviye malzeme olarak ise, istenilen her tip takviye malzemesi kullanılabilir. Örnek olarak başlıca takviye elemanları epoksi, vinilester ve polyester gösterilebilir. İstenilen üretim sağlandıktan sonra, üzerine sarım yapılan kalıp kompozit malzemedan çıkartılır.

Kompozit malzemelerin kabiliyetlerini özelliklerini etkileyen bazı üretim parametreleri vardır ve bu parametreler filaman sarım metodunda optimum şekilde sağlanması gerekir. Bu üretim parametreleri takviye elemanının gerginliği, sarımın açı derecesi, takviye ve matris malzeme türü, kalıbın dönme hızı ve sarımda kullanılan sürekli takviye malzemesinin miktarı olarak bahsedilebilir.

Takviye elemanının gerginliği: Takviye elemanı bilindiği üzere sarımı yapılan malzemedir. Takviye elemanının gerginliği arttıkça matrisin takviye elemanı ile olan etkileşimi, nüfuziyeti yani ıslatma oranı azalır. Matris ile takviye malzemeleri arasında temassızlık ve boşluklar neticelenir. Fazla gerginlik, yük altında kalacak takviye ve matris malzemelerinin birbirlerinden bağımsız hareketlerine, birbirlerine sürtmelerine ve yükün aktarılamaması problemlerine sebep olacaktır. Gerginlik düşük olursa sarım işlemi düzensiz olacaktır çünkü matris elemanı takviye malzemesini fazla ıslatacaktır.

Sarımın açı derecesi: Sarım açısının yönüne göre, kompozit malzemenin hangi yöne hangi açıya doğru hangi çeşit gerilmeleri kaldırabileceği belirlenir. Hangi türde gerilmenin taşınması isteniyorsa ona göre sarım açısı belirlenmelidir.

Takviye ve matris malzeme türü: Takviye ve matris elemanlarının birbiriyle uyumlu olması lazımdır. İyi yüzey bağlantısının sağlanması, yüke ve gerilime olan dayanımının iyi olabilmesi için; sarım için uygun alan ve hazırlama parametrelerinin, malzemelerin kabiliyetleri ile uygun olması lazımdır.

Sarımda kullanılan sürekli takviye malzemesinin miktarı: Takviye malzeme sayısı artırıldığı takdirde, matris elemanının takviyeleri ıslatması zorlaşır, bunun sonucunda ise takviye elemanlarının arasında sürtünmeler ve neticesinde de aşınmalar ortaya çıkar. Takviye

malzeme miktarı arttığında nüfuziyetin etkilenmesi ve değişim göstermesi ortaya çıkar. Bu durum asla istenmez.

Kalıbın dönme hızı: Matris yoğunluğu, üretilen kompozit malzemenin kabiliyetlerine doğrudan etki eder. Yoğunluk ise kalıbın dönme hızına ve merkezkaç kuvvetine bağlıdır.

3.3. Nano Teknoloji

Günümüz ve gelecekte ki teknolojide insanlığın ihtiyacını karşılayabilmek için yeni malzemeler, yeni sistemler, yeni geliştirmeler gerekmektedir. Bu ihtiyaçların karşılanmasında en çok ilgi gören, geliştirilmeye açık, yatırım olanağı yüksek, özellikleri ve kabiliyetleri üstün olan nano teknoloji alanıdır.

Nano ölçeğe inildiğinde, malzemelerde dikkat çekici ve şaşırtıcı derecede malzeme özelliklerinin değiştiğini ve pozitif kabiliyetler katıldığını gözlemlemek mümkündür. Nano boyuta inildiğinde, partikülün hacmine oranla yüzey alanları büyük olur ve kimyasal, fiziksel etkileşimleri aynı bileşimden olan büyük ölçekteki malzemelerden farklı olur.

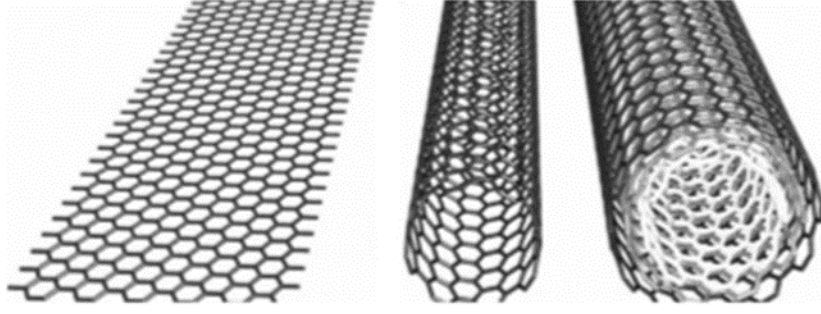
Biyoteknoloji, kompozit, elektronik gibi birçok bilim dalı nanoteknoloji alanına sahiptir [38,39].

3.3.1. Karbon Nanotüpler

Altı adet karbon atomundan oluşan ve tüp biçimine gelebilecek şekilde yuvarlanmış bir grafen levha şeklini KNT'lerin yapısı olarak düşünülebilir. (Şekil 3.1.)

Karbon nanotüpler tek cidara ya da çok cidara sahip yapılarda bulunabilmektedir. Karbon nanotüpler çok cidarlı karbon nanotüpler (ÇCKNT) ve basit olarak eş merkezli tek cidarlı karbon nanotüplerden (TCKNT) oluşmaktadırlar [38].

TCKNT'ler, ÇCKNT'lere oranla çok daha dayanıklıdırlar. Çünkü sadece bir grafit tabakasının yuvarlatılmasıyla oluşurlar [40]. ÇCKNT'ler ise iç içe geçmiş tüplerden oluşup, bu tüplerin birbirlerinin içerisinden kayma ihtimalleri dayanımlarını azaltır [41].



Şekil 3.1. Grafit tabakanın yuvarlanmasıyla oluşan TCKNT ve ÇCKNT yapı görüntüsü [42].

KNT malzemelerin kabiliyetleri çaplarına, yönlenmelerine, yüzeyel özelliklerine bağlıdır [40]. KNT malzemelerin büyük orandaki üretimi için ark-deşarj, lazer buharlaştırma ve kimyasal buhar yoğunlaştırma (CVD) gibi metotlar kullanılmaktadır. Bahsedilen metotlar genel olarak vakum altında ya da çeşitli gaz bulunan ortamlarda gerçekleştirilir. İlk olarak yüksek oranda KNT üretimi ark-deşarj metoduyla gerçekleştirilmiştir [43]. Grafit elektrotların arasında gerçekleşen ark ile ortaya çıkan yüksek sıcaklıklar sebebiyle grafit elektrot buharlaşmakta ve ortamın etkisi sebebiyle aniden tekrar katılaşmaktadır. Yeniden olan bu yapılarda KNT içeriği ağırlık oranı %30 civarlarındadır [44]. Lazer ile buharlaştırma metodunda, yüksek sıcaklıklara ısıtılan ve asal gazla doldurulmuş reaktör içine konumlandırılan grafit kaynağı lazerle buharlaştırılmaktadır. KNT'lerin toplanması için reaktör cidarlarının su kullanılarak sıcaklığının düşürülmesi gerekmektedir [45]. Kobalt ve nikel benzeri katalizörler kullanılarak TCKNT imali gerçekleştirilebilir [46]. CVD metodu ise günümüzde ticari amaçlı KNT imalinde tercih edilen metottur. Kobalt, nikel ve demir benzeri katalizörlerle kaplanmış yüzeyler, kuartz bir tüp fırının içinde ön ısıtma ile yaklaşık olarak 700 °C dolaylarına ısı yükseltilir. Tüp fırın içinden amonyak, azot ya da hidrojen benzeri taşıyıcı gazlarla beraber karbon kaynağı ihtiva eden asetilen, etanol, etilen ve metilen gibi gazlar geçirilir. Nanotüpler metal katalizler üstünde karbon ihtiva eden gazın bozulması ile büyütülmektedirler [47].

KNT malzemelerin mekanik kabiliyetleri iyi olsa bile, bu özelliklerinden kompozit malzemelerde dolgu malzemesi olarak kullanmak için bazı engelleri aşmak gerekmektedir. KNT'lerin polimer matris içinde homojen olarak dağıtılması, nanotüplerin matris malzeme tarafından ıslatılması, adezyon kuvveti gibi sebepler, karbon nanotüplerin dolgu malzemesi olarak kullanılmasında, malzemelerde göstereceği performansı etkileyen çok önemli konulardır [48].

KNT'lerin matris içinde homojen ve eşit bir şekilde dağılması, matrisle karbon nanotüp arasında etkin biçimde yük aktarımının yapılması, gerilmenin eşit olarak dağılması ve gerilme yoğunluğunun bulunduğu bölgelerin azalmasını sağlar [26].

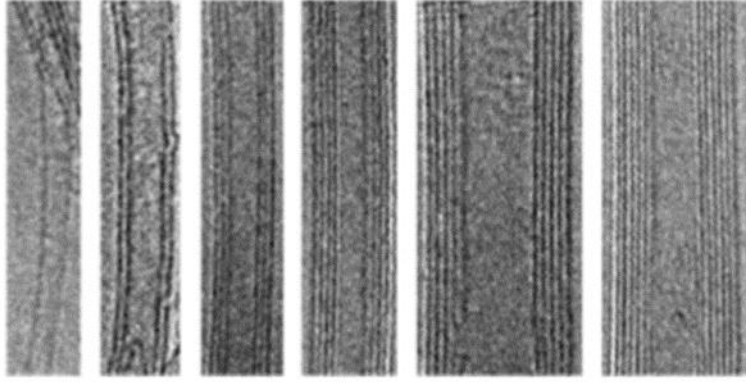
KNT malzemeleri matris içerisine homojen, eşit olarak dağıtmanın zorluğu, büyük yüzey alanlarından dolayı kaynaklanan Van der Waals kuvvetleri nedeniyle ortaya çıkmaktadır. KNT malzemelerin matris içinde küme şeklinde oluşları ve yetersiz dağılımı, karbon nanotüp takviyeli kompozit malzemelerde mekanik özelliklerin iyileştirilememesine sebep vermektedir [27,28]. KNT dağılımının problemini aşmak için fiziksel ve kimyasal metotlar bulunup geliştirilmiştir. Ultrasonikasyon [29], kayma etkisiyle karıştırma, yüzeyi aktifleştiren madde (surfactant) uygulama [30], karbon nanotüp yüzeylerinin fonksiyonel olması [49], plazma polimerizasyon [31] gibi yöntemler örnek olarak gösterilebilir.

3.3.2. Bor Nitrür Nanotüpler

Karbon nanotüpler, yüksek çözünürlüğü olan geçirgen elektron mikroskobu (HRTEM) üretilip, geliştirildiğinden beri bilinmektedir. Karbon nanotüpler, eş merkezli olarak hekzagonal tabakaların silindir biçimine getirilmesiyle oluşturulmuş çapları ise nano boyutta olan yapılardır. Tüp uzunlukları çaplara kıyasla makro boyutta olmakta ve boy/çap oranları 10⁵'e kadar yükselebilir [50].

Bor nitrür nanotüpler (BNNT), aynı KNT malzemeler gibi, hekzagonal bor nitrür tabakalarının tabaka ekseninin çevresinde dönmesiyle oluşan tüp biçimindeki yapılardır. Hekzagonal yapıların silindir üstünde sürekliliğinin devam etmesiyle oluşan sarmal biçimdeki nanotüpler, katman miktarına göre tek cidarlı, çift cidarlı ya da çok cidarlı olarak sınıflandırılabilirler [50]. Çok cidarlı nanotüpler, tek bir nanotüpün kendi içinde birden fazla katlanması ile çok cidarlı nanotüp oluşturabilme kabiliyeti olacağı gibi, değişik çap değerlerine sahip nanotüplerin iç içe geçmesiyle de oluşabilmektedir. Çok cidarlı nanotüplerin, tek cidarlı nanotüplere oranla; kimyasal etkilere dayanımlarının daha yüksek olması ve kafes yapısında oluşacak zedelenmelerden daha az etkilenmeleri gibi avantajları vardır [51].

Karbon nanotüpler sahip oldukları kabiliyetler bakımından araştırmacılar arasında oldukça ilgi çekici bir noktadadır. KNT malzemelere yaklaşık kabiliyetlere sahip olan başka çeşit malzemelerde günümüzde geniş çaplı biçimde araştırılmakta ve incelenmektedir. BNNT özellikleri bakımından ilgi çekici olup, yarı iletken bant boşluklarının olması ve üretim safılıklarının yüksek oluşundan dolayı tercih edilmektedir. Şekil 3.2'de geçirgen elektron mikroskobuyla görüntüleri elde edilmiş tek cidarlı bor nitrürden (TCBNNT), 6 cidarlı yani çok cidarlı bor nitrüre (ÇCBNNT) kadar olan BNNT görüntüleri gösterilmektedir [50].



Şekil 3.2. Tek cidarlı yapıdan, 6 cidarlı yapıya kadar olan BNNT TEM görüntüleri [50].

3.4. Nanokompozitler

Nanokompozitler, kompozit yapıdaki oluşumu sağlayan fazlardan, bir, iki veya üç boyutundan birinin ya da birkaç tanesinin 100 nanometre'den küçük olduğu veya kompozit malzeme yapısını oluşturan fazlar arasındaki nano boyut mesafelerine sahip, fazla fazdaki katı yapılar olarak adlandırılabilir. Bahsedilen tanım genel olarak gözenekli olan ortamlar, kolloidler, jeller ve kopolimerler için kullanılabilir, ancak genel açıdan matrisin asıl kütlelerinde nano boyutlu, yapısal açıdan ve kimyasal olarak farklı fazların birleşimiyle açıklanabilir. Nano kompozitlerde mekanik, elektriksel, termal, optik ve elektrokimyasal kabiliyetler, birleşen oluşturan malzemelerden belirgin farklı yetenekler gösterebilmektedir [52].

Nanokompozitler başka bir açıdan tanımlanacak olursa; meydana geldiği materyallerden birbirlerinin boyutlarının minimum nanometre (10^{-9} m) ölçüsünde olması durumunda kompozite verilen isimlendirilmez [53].

Nanokompozitler günümüz araştırma ve geliştirme çalışmalarında oldukça ilgi çekici ve gelişime müsait materyallerdir. Geleceğe yönelik çalışmalarda, teknolojik alanların gelişiminde birçok yararlı özellik sağlayan üstün malzemelerdir. Nanokompoziti oluşturan malzemelerin makro boyutundaki özellikleri farklıyken, nano boyuta geçiş yapıldığında bambaşka ve çok daha üstün özellikler ortaya çıkmaktadır. Uygulama alanları oldukça geniş ve ayrıca ileriye dönük bir alan olmasından dolayı her türlü yatırıma cazip bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Nanokompozitler; seramik matris nanokompozitler, metal matris nanokompozitler, polimer matris nano kompozitler olarak üç sınıfa ayrılabilir. Bu nanokompozit çeşitlerini ve özelliklerini tezimizde inceleyeceğiz.

3.4.1. Nanokompozit Çeşitleri

3.4.1.1. Seramik Matris Nanokompozitler

Seramik matris nanokompozitler, hacimsel olarak temel olan seramik bileşen gruplarından oksitler, nitrürler, borürler gibi materyallerden meydana gelirler. Genel durumlarda seramik matris kompozitler ikinci materyal olarakta çoğunlukla metalleri içermektedirler. Optimum açıdan, bulunan iki bileşende metalik ya da seramik, belli bir nano boyuttaki kabiliyetleri meydana çıkartmak için birbirlerinin içinde çok iyi dağıtılmalıdırlar. Dağıtımın neticesinde meydana getirilen nanokompozitlerde, optik, elektriksel ve manyetik kabiliyetlerin [54] yanı sıra tribolojik olarak, korozyona dayanım ve başka koruyucu kabiliyetlerin iyi duruma geldiği gözükmemektedir [55].

3.4.1.2. Metal Matris Nanokompozitler

Metal matris nanokompozitler hem de takviyeli metal matris kompozitler olarak tanımlanıp bahsedilebilir. Metal matris kompozitler, sürekli ve sürekli olmayan takviyeli malzemeler olarak gruplandırılabilir. Karbon nanotüplerin üstün çekme mukavemetiyle elektrik iletkenliğinden ötürü en mühim metal matris nanokompozitlerden birisi, karbon nanotüp metal matris nanokompozitler olarak belirtilebilir. Karbon nanotüp metal matris kompozitlerin uygun özelliklerde oluşturulabilmesi için metalik matris içerisinde homojen ve eşit bir biçimde nanotüp dağılımını gerçekleştiren, ekonomik, metalik matrisle karbon nanotüpler arasında güçlü şekilde bağ sağlayan üretim yöntemlerinin uygulanıp kullanılması gerekmektedir. Karbon nanotüp metal matris kompozitlerin yanı sıra bor nitrür takviyeli metal matris kompozitlerle, karbon nitrür metal matris kompozitlerin üzerinde de çalışma ve araştırmalar sürmektedir [56].

3.4.1.3. Polimer Matris Nanokompozitler

Polimer bir matrise optimum olan bir biçimde nanopartikül ilavesi vaziyetinde polimer matrisin kabiliyetleri, ilave edilen nano partikülün özelliklerine ve yeteneklerine göre etkili biçimde gelişir [57].

Nanopartiküllerin az miktardaki konsantrasyonlarında (~% 0.2 ağırlık gibi) polimer matrise ilave edilmesi, polimerik nano kompozitlerin basma ve eğilme durumlarında mekanik yeteneklerinde belirgin üstün kabiliyetler edinmesine sebep olur [58,59]. Yapılan çalışmalar mekanik takviye ilavesinin; nano mekaniğin morfolojisine, hatalara, nano materyallerin polimer

matrisinde ki dağılımına ve polimerin çapraz olarak bağlanması ki yoğunluğundan dolayı bağlı olduğunu düşündürmektedir [60].

Kompozit içerisine nano dolgu materyalinin dağılımı ya da nano yapıların kontrolü matriste daha önceden olmayan ve görülmemiş yeni fiziksel kabiliyetler ve yeni davranış durumları ortaya çıkartabilir. Belirtilen bu durum özgün olan matrisin var olan doğasını etkin bir biçimde değiştirmektedir [57].

3.4.2. Nanokompozitlerin Özellikleri

3.4.2.1. Termal Özellikler

Termal özellikler, polimerik malzemelerin mekanik kabiliyetlerine, dayanıklılıklarına, kullanım ömürlerine etki eden temel bir özelliktir. Polimerik malzemelerin metal ve seramik materyallere oranla daha düşük olan termal kabiliyetleri, inorganik nano dolguların polimer matrisine ilave edilmesiyle artış sağlanmaktadır. Polimer nanokompozitler, saf olan polimerlere oranla çok daha fazla sıcaklıkta bozulma gösterirler ve bozulma hızında ise düşüş gösterirler [61]. Nano dolguların ısı deformasyon sıcaklığını yükseltmek, yanmazlığı sağlamak veya yanmayı geciktirmek gibi ve termal genişleme katsayısının azalmasında ciddi bir rol üstlenirler [62].

3.4.2.2. Elektriksel Özellikler

Polimer nanokompozitlerin elektriksel olarak yetenekleri kullanım hedeflerine göre, iki ayrı alanda incelenebilir. Elektriksel iletkenlik istenilen materyallerin oluşturulmasında kullanılan ve iletken nano dolguları (karbon nanotüp ve metal bileşikleri örneği gibi) ihtiva eden nanokompozitler ve ürün özelliği olarak yalıtkanlık sağlanması istenilen veya dielektrik kabiliyetlerinde (silika, titanyumdioksit, alümina) iyileşmenin sağlanabilmesi hedeflenen nanokompozitler olarak sınıflandırma yapılabilir [63].

3.4.2.3. Mekanik Özellikler

Nano boyutlarda ki dolgu maddelerinin ağırlık olarak % 1-10 oranında polimer matrise eklenmesi neticesinde mekanik kabiliyetlerde iyileşmeler sağlanıp gözlenirken, mikro boyuttaki dolgu maddelerinde ise bu oran yaklaşık olarak % 20-50 civarında olmaktadır [64]. Mikro boyuttaki dolgu maddelerinin miktarındaki yükseliş kompozit malzemelerin esneklik ve işlenebilir kabiliyetlerinde kayıplar ve düşümlere sebebiyet verirken, malzeme de ki süneklik

ve darbe dayanımı azalır. Nanokompozitler içerisinde belirtilen bu kabiliyetlerde belirgin derecede kayıplar olmamaktadır. Tokluk ve dayanım mekanik özelliklerden en önemli olanlardır. Nanopartiküller yüksek boy/çap oranlarına sahip olduklarından dolayı, polimer matrisinin dayanımı ve modül değerlerinde ciddi derecede iyileşmeler sağlanmaktadır. Boy ve çap oranı bire yakın, büyük yüzeysel alan ve büyük yüzey enerjisi içeren küresel biçimli nano dolgular, polimer matrisle dolgu materyali arasında güçlü ara yüzey etkileşimleri sağlar ve dayanımla tokluğun iyileşmesine katkıda bulunur [65,66].

3.5. Darbe Mekanikliği

Çarpışma zamanında meydana gelen tepki kuvvetleri ve bu tepki kuvvetlerine çarpışan yapıların dinamik cevabı, darbe mekanikliği (impact mechanics) olarak tanımlanabilir. Darbe mekanikliği, spor aletlerinin dizaynından otomobillerin çarpışmaya karşı dayanımının geliştirilmesine kadar kapsamlı bir konudur [36]. Katı cisimler için darbe kavramının tanımı tezimiz için önemli bir noktadır.

3.5.1. Katı Cisim Darbe Tanımı

Sert cisimlerde çok ufak deformeler oluşturulduğunda, çok büyük temas basıncı oluşturulur. Deformasyonların, temas alanına temas süresi boyunca küçük kalması demek, yüzeylerin ilk başta birbirlerine yeterince temas etmediğini gösterir. Küçük temas alanında ara yüzey basınçları vardır ve bu ara yüzey basınçları, birbiriyle temas etmeyen yüzeyleri birbirlerine değdirip temas ettirinceye kadar deformasyona uğratar. Temas basıncı, cisimlerin kesit alanlarının oranıyla temas alanı ufak kalsa bile yüksek gerilme bileşkesi ya da temas kuvveti meydana getirir. Küçük bir deformasyon bölgesi temas bölgesini çevreler ve temas basıncından dolayı meydana gelen temas kuvveti, deformasyon bölgesi boyunca izafi hızın bileşenlerini ani şekilde değiştirecek kadar büyüktür ve cisimleri çok çabuk ivmelendirme kabiliyetine sahiptir [36].

Bundan dolayı temas alanındaki küçük bölge çevresinde çarpışan cisimler yüksek zorlanmalara ve malzeme akma zorlanma eşliğini aşacak yüksek gerilmelere uğrar. Çarpışma anında enerjiyi dağıtan dönüşümsüz olan plastik deformasyon, orta şiddetteki çarpışma hızları için (yapı metalleri için 0.1 m/s civarında) başlar; bunun sonucunda belli bir oranda kinetik enerji kaybolmuş olur. Temas bölgesi arası mesafeler arttıkça, temas bölgesindeki gerilmeler ne kadar yüksek olursa olsun, bu gerilmeler çabuk biçimde azalır. Küresel olan koordinat sisteminin başlangıcında ki temas eden noktaya konumlandırılmış elastik cisimde, temas eden bölgedeki radyal mesafe (r) yükseldikçe, gerilmenin radyal bileşeni σ_r , hızlı biçimde azalır

(elastik bir cisimde σ_r , 3 boyutlu deforme alanında, r^{-2} ile hızlı biçimde azalır). Sert cisim de denk olan zorlanma esnasında ki ani iniş, başlangıçta ki temas eden noktaların etrafında ki küçük alan da ciddi deformasyonların oluştuğunu bize gösterir, bundan dolayı temas alanının göçmesi çok ufak kalır [36].

Zorlanma bölgesi yeterince geniş ya da derin olmazsa, sert cisimlerin kompliyansı ufak olur, yani; yüksek dereceli kuvvetler küçük şekil de bir çökme oluştururlar. Küçük ancak önem bulunduran deformasyon bölgesi, temas zamanının da katı ve kısa bir yaya benzer, iki cisim sayesinde sıkıştırılmış gibi. Yaya benzeyen deformasyon bölgesi, büyük bir yay sabitine sahiptir ve temas süresi olarak çok küçük bir zamana izin verir. Buna örnek olarak; beyzbol topuna sopayla hızla vurulduğunda temas süresi 2.0 ms olurken, çiviye çelik çekiçe vurulurken temas süresi 0.2 ms olmaktadır. Çivi ve çekiçteki temas süresi düşüktür bunun sebebi ise, sopa ve topa göre daha sert malzemelerden üretilmişlerdir. Belirtilen bu iki darbe olayında kabaca 1 ton yani 10 kN dolaylarında en yüksek kuvvet oluşur [36].

Analitik olarak bakıldığında, katı cisimler küçük kompliyansa sahiptirler, bunun sebebi ise, düşük temas zamanında çok az yer değiştirmesinin oluşmasıdır. Temas kuvvetleri çok büyük olsa bile cisimler önemli miktarda yer değiştiremez, bunun sebebi de yeterli çarpışma zamanının olmamasıdır. Bu tanı, rijit cisimlerin çarpışmalarının temel teori hipotezini oluşturmaktadır. Darbe analizi esnasında, katı cisimler için, temas zamanının ortadan kalkabilecek miktarda düşük olduğu düşünülebilir. Bu sebepten dolayı hız değişimi ani biçimde oluşur. Belirtilen bu teori temas zamanı esnasında, hareket oluşmadığı söylenebilir [36].

3.5.2. Katı Cisim Darbe Mekanizmasının Dayandığı Esaslar

(a) Çarpışan cisimlerde ki her bir temas alanı, cisimlerin normal doğrultu derinliklerine ve kesit ölçülerine göre küçük kalır.

(b) Sistem durumunda değişme olmamaktadır, temas anındaki yer değiştirmeler ihmal edilebilecek biçimde temas zamanı yeterince az olursa.

Belirtilen şartlar yaklaşık biçimde sağlanır ise katı cisimler için darbe teorisi uygulanır. Genel olarak cisimlerin sert yapıya sahip olmaları ve çarpışma esnasında küçük yerel deformasyonları kaldırabilmesi bu gereksinimlerden sayılabilir. Katı bir cisimde küçük temas alanı denilen bölge yalnızca temas noktasının başlangıcında ki küçük bölgede ciddi zorlanmalar yani strain, gerilme oluşturur. Cisim sert yapıya sahip ise ciddi deformasyonların sınırlı bölgesindeki kompliyansın düşük olmasına sebep olur ve bundan dolayı temas süresi çok azdır. İki önemli basitleşme bu sebeplerden dolayı oluşmaktadır [36].

a) Hız değişimiyle impulsun tepkisi arasında sayısal bağlantı elde etmek için, düzlem denklemlerinin integrali alınmalıdır.

b) Temas esnasında etkiye sebep olan yerçekimi ya da manyetik çekim gibi sonlu etken kuvvetleri, darbe esnasında hiçbir iş yapmadıkları için görmezden gelinir.

Temas esnasında etkin olan mühim kuvvetler yalnızca temas noktasındaki tepkisel kuvvetlerdir. Oluşan tepkiler yer değiştirmenin engellenmesinden dolayı ortaya çıkmaktadır [36].

Katı cisim teorisi kurularak, darbe ile çarpışan cisimleri biçim değiştiren sonsuz ufak bir partikülle ayırmayı düşünebiliriz. Biçim değiştiren partikül, iki cismin noktaları ne kadar da üst üste çakışma yapsa bile, çarpışma yapan cisimlerin birinci değme noktalarında bulunmaktadır. Temas noktasındaki, cisimlerin birbirlerinden ayrılmasını sağlayan, tamamlayıcı sonsuz küçük elemanın fiziksel özellikleri, darbe esnasındaki hızın değişimini, impulsta ki normal olan bileşeni fonksiyon olarak ayırabilmesine izin verir. İmpulstaki normal bileşen, çarpışmanın sonucunda ki normal olan temas kuvvetinin temas periyodunda ki integrale eşittir. Birbirine yapışmayan temas yüzeyli cisimlerin arasında impulstaki normal bileşen darbenin akabinde, monoton şekilde artışta olan bir fonksiyon olur. Bundan dolayı ani olan çarpışmada, hızda gerçekleşen değişimler, zamanın yerine impuls normal bileşeninde bağımsız bileşene ayrılır. Bu bize impulsun düzgün fonksiyonu olan hızın değişimini vermektedir [36].

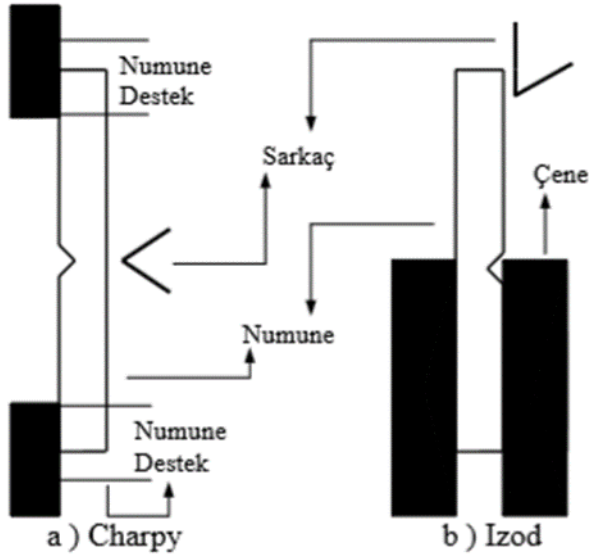
3.6. Darbe Testleri

Kompozit malzemelerde ki darbe davranışlarının karakterlerini anlamak için belli bir standart test tekniği ya da farklı ülkeler, kuruluşlar ve araştırmacılar içerisinde yaygın biçimde uygulanan herhangi bir test tekniği bulunmamaktadır. Bu durum sonucunda, değişik kaynaklardan elde edilen neticelerin karşılaştırılacağı vakit, kompozit malzemelerin darbeye nasıl cevap verdiklerini bulabilmek için uygun bir model geliştirme girişimlerinde problem oluşturmaktadır. Bahsedilen olumsuzluklar olmasına rağmen kompozit malzemelerde darbe davranışlarının saptanmasında günümüz şartlarında bir takım test yöntemleri ve cihazları geniş alanda kullanılmaktadır. Bunlar: Sarkaç testleri (Izod, Charpy ve Pendulum), ankastre edilmiş kiriş darbe test metodu, ağırlık düşürme testleri ve yüksek hızlı darbe testleri (Basıncılı hava ve Split-Hopkinson) olarak belirtilebilir [67].

3.6.1. Sarkaç Testi

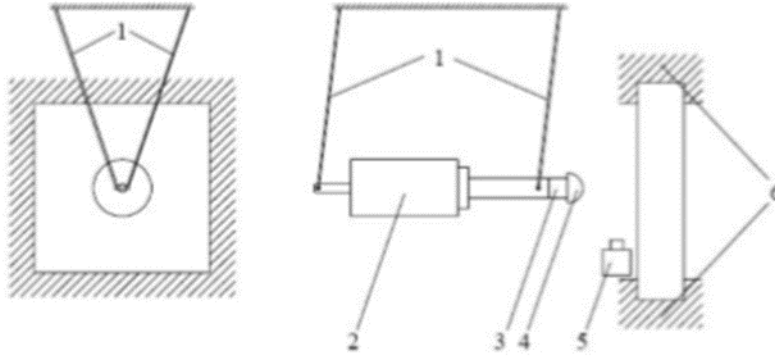
Charpy ve Izod darbe testi metotlarında, test numunesinde çentik açılmıştır ve belirli standart bir yükseklikten bir sarkaç bırakılarak, numune darbeye maruz bırakılır. Darbe uygulanmasından sonra sarkacın ulaştığı yükseklik bulunarak, sarkacın ilk ve son konumunda ki enerjinin farkı numune tarafından absorbe edilen darbe enerjisi olarak saptanmaktadır. Darbe sonrasında ki sarkacın ulaştığı yükseklik ne kadar azsa, absorbe edilen darbe enerjisi,

yani malzemenin darbe direnç kabiliyeti ya da tokluk derecesi o kadar yüksektir. Charpy ve Izod darbe testi metotları, birbirlerinden çok az farklılıklara sahiptirler. Bunun neticesinde birbirlerine çok benzeyen metotlardır. Bu farklılıklardan en dikkat çeken, numunenin desteklenme şekliyle çentikte ki destek ve darbe noktalarına göre konumudur (Şekil 3.3.) [68].



Şekil 3.3. Charpy ve Izod darbe testi metotlarının düzenekleri [68].

Sarkaç darbe testindeki sistem, ağırlık düşürmeli darbe testindeki sisteme göre avantajlara sahip bir test düzeneğidir. Bu sistem düzeneği, benzer tipte ki ağırlık için ufak darbe enerji verilerinin bulunmasında güvenilir olduğu gibi, darbe hızının ölçülmesi ve geri sekme hızının saptanmasında da avantaj oluşturmaktadır. Oluşan bu avantaj sayesinde, hareket denklemindeki integrasyon için kontrol sağlanmakta ve absorbe edilen enerji doğru şekilde bulunabilmektedir. Sarkaç darbe testi sistem düzeneğinin şema resmi Şekil 3.4.'te görülmektedir [67].

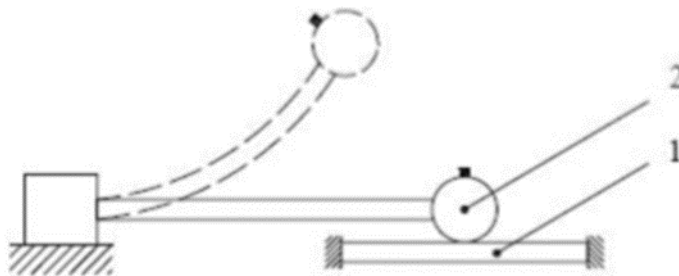


Şekil 3.4. Sarkaç darbe testi sistem düzeni şematik resmi [69].

Sarkaç darbe test düzeninde bulunan parçaların adları şöyledir; 1) Dört adet sarkacın asıldığı aramid ip, 2) Düzlemsel ağırlık, 3) Ağırlık ve kütle arasındaki kuvveti ölçebilmek için sarkaç uç kısmına konumlandırılmış yük hücresi, 4) Yük hücresinde ki uç noktaya konumlandırılmış küre biçimli, sertleştirilmiş çelik uç, 5) Darbe öncesindeki ve darbe sonrasındaki hızı saptayabilmek adına numune önüne konulan hız sensörü ve 6) Rijit bir numune sabitleyici [69, 70].

3.6.2. Ankastre Edilmiş Kiriş Darbe Testi

Çok yaygın olmayan ankastre edilmiş kiriş darbe test metodu düşük hızlı darbe testi sistemlerindedir. 1 inç çaplı çelik küre, esnek kirişin ucuna konumlandırılmıştır ve bahsedilen darbe sisteminde, çelik küre çekilip bırakıldığında numune üstüne çarpar ve darbe meydana gelir. Şekil 3.5. ankastre edilmiş kiriş darbe testinin şemasını göstermektedir [69].

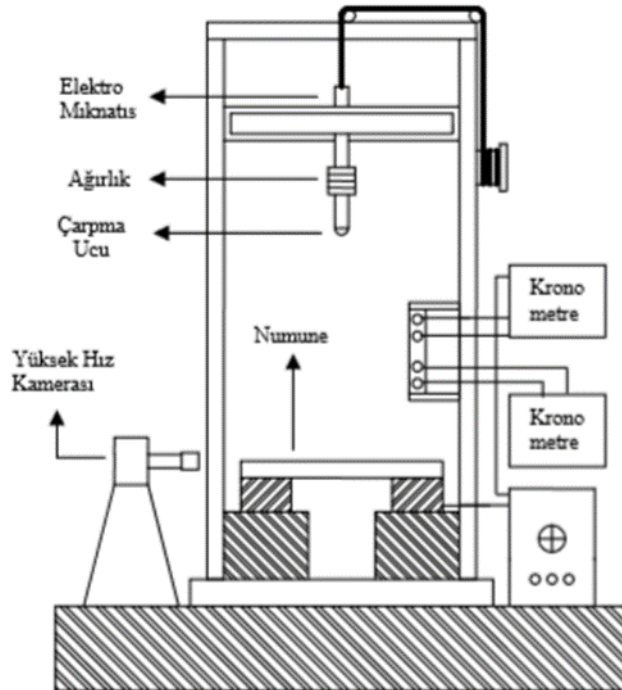


Şekil 3.5. Ankastre edilmiş kiriş darbe test sistemi şematik resmi, 1. Numune ve 2. Vurucu [69].

3.6.3. Ağırlık Düşürerek Darbe Testi

Ağırlık düşürmeli darbe testi yöntemi, Izod ve Charpy testi yöntemleri yerine malzemelerin dinamik olarak kabiliyetlerinin saptanmasında çokça kullanılan bir yöntemdir. Izod ve Charpy testi yöntemlerinde darbe limiti belirliken, ağırlık düşürmeli darbe testi yönteminde, numuneye çarpma hızı ve darbe enerjisi arzu edilen biçimde ve tercih edilen ağırlığın istenen yükseklikten numunenin üstüne düşürülüp çarpması sağlanabilmektedir. Bu metodun başka özellikleriyse, numuneye üzerine saplanma, delinme ve tekrarlı darbe testleri de yapılmaktadır [67].

Ağırlık düşürmeli test cihazlarının bazısı yer değiştirmeyi ya da ivmeyi ölçümlenmektedirler. Bu sayede yük, yer değiştirme ve ivmenin çarpma esnasındaki değişimi kayıtlanabilir. Belirlenen bu ölçümler, darbe yükü-zaman ve darbe enerjisi-zaman değişimlerine çevrilebilir. Bunlar sayesinde, en ileri noktadaki yük ve absorbe edilen enerji gibi özelliklerin malzemenin üzerinde meydana getirdiği kırılma işlemiyle düşünülebilir. Standart bir ağırlık düşürme testi cihazı Şekil 3.6.'da görülmektedir. Böyle bir cihazı oluşturan parçalar: platformlar aracılığıyla desteklenen numune, tüp içine yerleştirilen yük ölçüm cihazları, çarpışma anından önceki tüp hızını ölçen fotoelektrik hücreleri ve darbeyi görüntülemek için kullanılan yüksek hız kamerasıdır [68].



Şekil 3.6. Ağırlık düşürme test düzeneği [68].

Kompozit malzemelerde darbe kabiliyetlerini, darbe test cihazı (serbest ağırlık düşürme, sarkaç, silah vb.), çarpan cisim karakteristiği (içi dolu ya da boş, uç şekli ve boyutu vb.), çarpan cisim hızı ve kütlesi (ya da enerjisi), numune yapısı (boyutu, geometrisi, numune ve destek noktalarındaki uçların sabitlenmesi vb.) etkilemektedir. Bu sebepten dolayı kompozit malzemelerde darbe kabiliyetleri üstüne çalışılırken bu kıstasların göz önünde bulundurulması gerekmektedir [68].

3.6.4. Yüksek Hızlı Darbe Testi

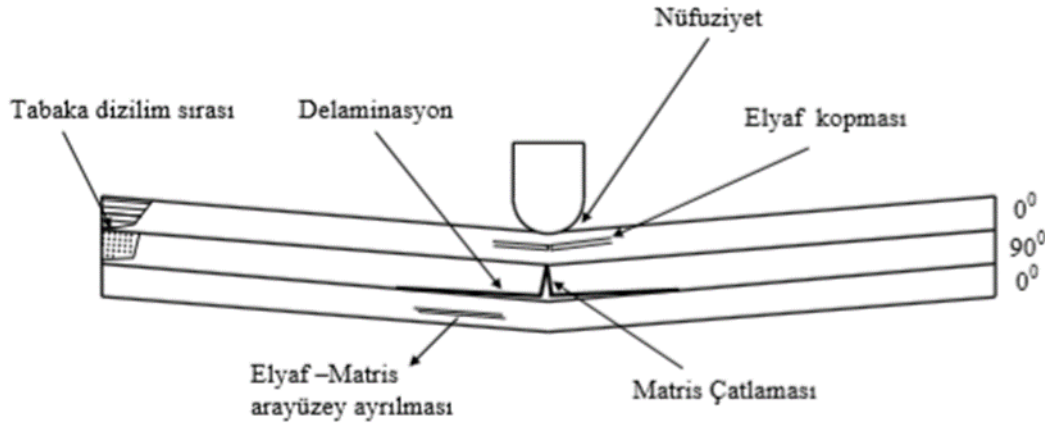
Yüksek hızlı darbe test yönteminde, düşük ağırlıkta fakat yüksek hızdaki parçaların malzeme ya da yapılar üzerinde ki darbe olayı incelenir. Yüksek hızlı darbe testi yöntemlerinden birkaçı, basınçlı havayla darbe testi yöntemi ve Split-Hopkinson basınçlı çubuk testi yöntemidir. Basınçlı havayla darbe testi, kütlesi 250 gram ve daha hafif ve hızı 100 m/s'den yüksek vurucular için uygun bir yöntemdir. Split-Hopkinson basınçlı çubuk testindeyse, malzemelerdeki yüksek şekil değiştirme ve şekil değişme hızının nasıl etkilediğini araştırabilmek ve malzemelerdeki değişik modlardaki dinamik davranışların incelenmesini sağlamak için çokça kullanılan bir yöntemdir [71].

3.7. Darbe Sonucunda Oluşan Hasar Durumları

Kompozit malzemelerde kalınlık boyunca bir takviye yoksa en hassas oldukları yüklenme durumu enine yüklenme (tabaka ya da elyafa dik yüklenme) durumudur. Tabakalı kompozit malzemedeyse darbe hasarının en çok olduğu yer enine doğrultudadır. Bunun nedeni, kompozit malzemeler kalınlık doğrultusunda tabakanın düzleminde olduğundan çok daha zayıftırlar. Kompozit malzemeler enine darbeye maruz kalırlarsa, yük taşıma kapasitelerinde ciddi düşümlere neden olan zedelenmelere uğrarlar. Kompozit malzemelerde darbe yüklerine verdikleri cevap oldukça karışıktır. Bu, kompozit malzemeyi oluşturan her bileşenin kendi kabiliyetleri kadar yapılandırılmasına da bağlıdır. Ayrıca, darbeye karşılık verilen darbe cevabı çarpan cismin geometri tipine, hızına ve kütlesine bağlı kalmaktadır. Her bir unsur enine darbedeki toplam etki nitelendirmesinde ciddi bir yere sahiptir. Darbe yüklemesi esnasında çarpan cismin gözle görülmeyen ya da zayıf biçimde seçilen nüfuziyetine kadar değişkenlik gösteren değişik biçimlerde hasar modları bulunmaktadır. Düşük hızdaki darbeler tabakalar üstünde gözle görülür zedelenmeler belki oluşturmazlar ancak tabaka içinde, matris çatlaması, delaminasyon, elyaf kopması şeklinde hasarlar oluşturabilirler. Bu hasarlar da mukavemette önemli ve ciddi oranda düşüğe neden olurlar. Rijitlik oranında azalma da mümkündür ancak genel olarak ihmal edilebilirler. Tabakalar arasındaki gerilmeler (kesme ve normal), tabakalar

arasındaki mukavemetin az olmasından ötürü ilk gerçekleşen kopmalara neden olan gerilmelerdir. Darbe sırasında kompozit malzemeye aktarılan enerji miktarı, malzemenin bu enerjiyi absorbe edebilmesi için, oluşacak hasar modlarını belirlemektedir [68].

Genel kapsamda kompozitlerin darbeye maruz kalması esnasında oluşan darbe hasar örnekleri matris çatlakları, delaminasyonlar ve elyaf hasarlarını içermektedir. Düşük hızdaki darbeye, matris çatlaklarıyla başlayan zedelenme, değişik elyaf yönlendiren açılara sahip tabakalar arasında delaminasyon durumunun (tabakalar arası ayrılma) oluşmasına neden olmaktadır. Kompozit malzemeye uygulanan darbe enerjisinin artışıyla delaminasyonlar ve neticesinde de elyaf hasarlanma durumları meydana gelerek, vurucu ucun numuneye saplanması ve neticesinde de numunenin vurucu uç tarafından delinmesi olayı gerçekleşir. Şekil 3.7’de, çeşitli hasar olaylarını gösteren şematik resim gösterilmektedir. Malzeme üzeri ve içerisinde gerçekleşen zedelenmelerin saptanması yalnızca darbe olayının durumu hakkında bilgilenmek için değil, ayrıca yapının kalıcı mukavemet durumu açısından fikir edinilmesini sağladığından dolayı da ciddi derecede önemlidir. Hasar durumlarının arasındaki etkileşimi anlamak, hasar durumlarının başlangıcını ve ilerleyişini anlamak açısından da önemli bir durumdur [67].

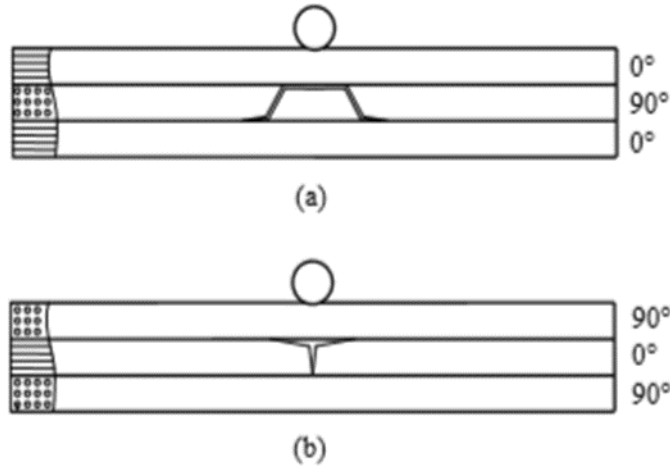


Şekil 3.7. Darbe olayı neticesinde kompozit malzemelerde oluşan hasar durumları [67].

3.7.1. Matris Hasarı

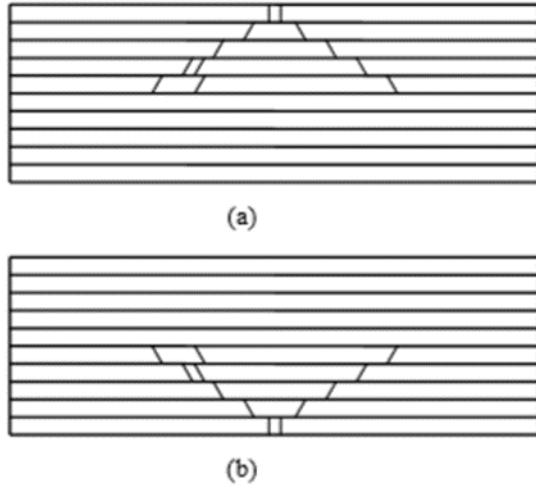
Matris hasarı, düşük hızdaki darbe maruzunda kalan kompozit malzemelerde görülmekte olan birinci hasar türüdür ve matris çatlama biçiminde gerçekleşir. Matris çatlama olayı, tek yönlü elyaf malzemeden oluşmuş tabakalarda genel olarak elyafın doğrultu yönüne paralel düzlemlerde oluşmaktadır. Darbeden sonraki durumda tahmin edilebilmesi yeterince zor ve karmaşık düzen içerisinde olan matris çatlakları bulunmaktadır. Matris çatlaklarının, tabakalı kompozit malzemede gerçekleşen darbe sonrasında, malzeme özelliklerinin değişiminde büyük etkisi olmamaktadır, bu yüzden belirlenmesi çok kritik değildir. Ancak hasar

süresinde, matris çatlaklarıyla başlamakta olup ve ardından bu çatlaklar tabakanın ara yüzeylerinde tabakanın ayrılmasına yani delaminasyona sebep olur. İki cins matris çatlama gözlenmektedir: çekme çatlakları ve kayma çatlakları (Şekil 3.8.). Düzlem içindeki normal gerilmelerin tabakanın enine kayma mukavemetini geçtiği vakit oluşan çatlaklar çekme çatlaklarıdır. Kayma çatlaklarıysa orta düzlemden belirli bir açıda bulunmaktadırlar ki bu vaziyet enine kayma gerilmelerinin bu tür çatlakların oluşum ve gelişiminde ciddi bir rolü olduğunu göstermektedir [71].



Şekil 3.8. Matris çatlakları (a) Çekme çatlağı (b) Kayma çatlağı [71].

Tabakası kalın olan kompozit malzemelerde yüksek gerilmeler sebebiyle matris çatlaklarının oluşumu, vurucu cismin vurduğu ilk katmanda oluşmaktadır. Hasar oluşumu, yukarıdan aşağı doğru, çam ağacı şeklinde oluşup ilerlemektedir (Şekil 3.9a). Tabakası ince olan kompozit malzemelerdeyse, kompozitte ki arka yüzde eğilme gerilmelerinden dolayı, en alt katmanda matris çatlamaına sebep olmaktadır. Bu durum matris çatlaklarını ve delaminasyon olayını başlatarak, çam ağacı ters çevrilmiş görüntüsü biçiminde hasar şeklini oluşturur (Şekil 3.9b) [71].



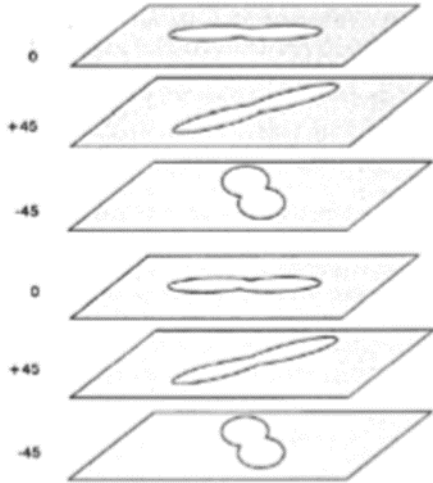
Şekil 3.9. (a) Çam ağacı şeklinde (b) Ters çevrilmiş çam ağacı şeklinde ki hasar görünüşleri [71].

Kompozit malzemede olan darbeye hasara sebebiyet veren ilk kinetik enerji, çok güçlü bir şekilde matris içindeki mekanik kabiliyetlerden etkilenmektedir, ancak temel açıdan elyaf kabiliyetlerinden bağımsız olmaktadır (örnek verilirse, tabakalandırma olmaksızın, örgü ya da örgüsüz elyaf kullanılmasından, uygulanmasından) [67]. Griffin, beş değişik elyaf malzeme için aynı matris malzemelerini kullanarak beş kompozite darbe deneylerini uygulamıştır. Deneylerin neticesinde beş kompozit numunesi için hasar başlangıcının enerjisinin değişmediği ve zedelenmenin matris-ağırlıklı geliştiğini saptamıştır. Dizilim sırasının ve elyaf takviyesinin kabiliyetlerinin hasar başlangıcındaki gereken enerji üstünde olan etkisinin ölçülemediği ise ek olarak belirtilmiştir. Hasar olayı, matris çatlağıyla başlamakta ve matris çatlağının değişik elyaf açısında ki tabakanın ara yüzlerine ulaştığında ise delaminasyon olayı başlamaktadır [72].

Genel açıdan polimer esaslı kompozitler üstünde gerçekleştirilen araştırmalar neticesinde, darbeye maruz kalmış kompozit malzemenin darbe performansı, reçine sistemindeki tokluk kabiliyetinin geliştirilme durumuna bağlıdır. Bahsedilen bu mekanik kabiliyet, malzemedeki şekil değiştirme enerjisini, kayma çatlak oluşumuna karşı göstermekte olduğu direnci ve gerilme yoğunluğunu azaltma kabiliyetini sembolize etmektedir. Yapılan deneyler aşamasında gözlemlenenlere göre, termoplastik matris kompozitler çok daha yüksek tokluk gösterdikleri saptanmıştır [73].

3.7.2. Delaminasyon

Bitişik tabakaların arasında yapışma miktarının azalmasından dolayı oluşan ve tabakadaki mukavemeti ciddi oranda azaltan hasar türü delaminasyon olarak adlandırılmaktadır. Deneysel olarak yapılan çalışmalarda delaminasyon hasarının, yalnızca değişik elyaf yönlendirme açısı üzerindeki tabakaların arasında oluştuğunu göstermektedir. İki tabaka, birbirlerine bitişik ve aynı elyaf yönlendirme açısına sahipse, bu bitişik iki tabakanın ara yüzeyinde delaminasyon hasarı oluşmamaktadır. Tabakalı kompozit malzemelerde katmanların arasındaki değişik elyaf yönlenme açılarından dolayı, bahsedilen katmanlardaki eğilme rijitlikleri değişiklik göstermektedir (Şekil 3.10.). Delaminasyon hasarının oluşmasındaki en önemli sebep; tabakaların arasındaki eğilme, rijitlik farklılığı ve eğilmeden dolayı gerçekleşen kayma gerilmeleridir. Bu konuda yapılan deneyler ve analizler, eğilme olayının enine doğrultuda dış bükey biçimde olduğu ve elyaf doğrultusunda tabakanın iç bükey eğilme olayına yatkın olduğunu gösterir. Tabakaların arasındaki eğilme rijitliğinin uyumsuzluğu ne kadar yüksek olursa delaminasyon gerçekleşme alanı da büyük olur. Ayrıca delaminasyonu etkileyen başka faktörler olarak malzeme özellikleri, sıralanma düzenleri ve tabaka kalınlığı gibi bazı etkenler bulunmaktadır [67].



Şekil 3.10. Delaminasyon alanlarındaki elyaf yönlendirme açısına göre şekiller [71].

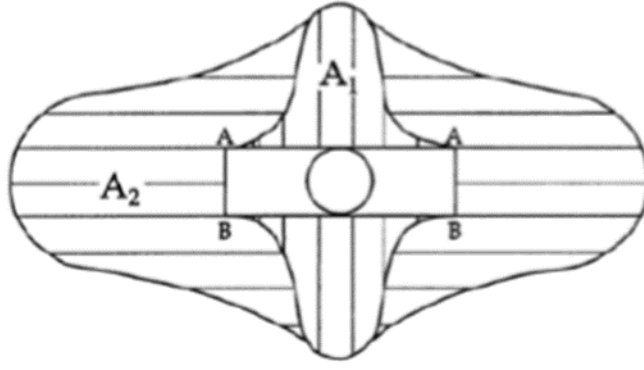
Delaminasyonun başlamasına neden olan başlangıç kinetik enerjisindeki sınır değerini analiz edip bulmak oldukça zordur ve bu sınır değerinin tespiti için bazı testler yapılmalıdır. Ayrıca, oluşabilecek delaminasyon hasarlarının şekilleri çok düzensiz biçimdedir ve bu şekillerin yönlenme biçimlerini tespit edip saptamak zordur. Matris çatlaması olayı, delaminasyonun başlangıcında gerekli bir etkidir. Matris çatlamasının ve delaminasyonun

arasında ciddi bir bağlantı vardır. Delaminasyon hasarları, tabakaların arasındaki ara yüzey bölgesinde oluşmaktadır. Enine darbeye uğrayan 0 /90 /0 açılı derecesindeki, tabakalar için delaminasyon ve matris çatlaması etkileşimi göz önünde bulundurulduğunda; üst katmanlarda bulunan eğimli çatlaklar ara yüzeyine ulaştığında durdurulur ve katmanların arasında delaminasyon biçiminde ilerleme olur. Oluşan bu çatlakların ara yüzeye geldiğinde durdurulması; elyaf yönlendirmelerinde gerçekleşen değişimden dolayıdır. Belirtilen delaminasyon, orta kısımdaki enine çatlaktan dolayı zorlanır ve düşey eğilme çatlaklarının büyümesi neticesinde ise zorlanmayan en alttaki ara yüzey delaminasyonu başlar. Kritik matris çatlakları denilen çatlaklar, delaminasyona yol gösterip eşlik eden matris çatlaklarıdır [67].

Delaminasyonun boyutunun belirlenmesi genel olarak, C-scan ultrasonik tarama cihazından ölçüm yapılan hasarlı alanın bulunmasıyla gerçekleşmektedir. Çoğunluk olarak kompozitin içerisinde hasar, birkaç ara yüzeyde meydana gelmekte ve C-scan cihazlarıysa bu hasarlı alanların tek düzleme yansıması görevini üstlenmektedirler. Tek düzleme yansıyan bu hasarlı alan kompozitin tabaka miktarından etkilenir. Bu sebep neticesinde de, her tabakanın alanındaki deneysel neticeleri, başlangıçtaki kinetik enerjiye karşı değişik çizgiler üstüne düşmektedir [71].

Tabaka dizilim açıları aynı, farklı kalınlıklara sahip karbon-elyaf takviyeli kompozitlere uygulanan darbe sonucunda oluşan delaminasyon alanının değişim miktarı, vurucu cisimde mevcut olan kinetik enerjiyle doğru orantıya sahiptir [74].

Çapraz takviye edilmiş tabakalı cam-epoksi kompozitler üstüne yapılmış kapsamlı bir çalışmada, sıralı gelişen delaminasyon hasarının oluştuğunu ve bu olayında emilen enerjinin dağılımında ciddi bir rol üstlendiğini belirlemiştir. Bu çalışma, oluşup gelişen bir şerit tarafından başlatılan sıralı bir delaminasyon hasar mekanizmasını temel olarak almaktadır. Düşük darbe hızındaki vurucu cismin, çapraz takviye edilmiş tabakalı kompozit plakaya vurmasıyla, ilk tabaka bölgesinde, tabakanın kalınlığı boyunca vurucu cismin uç çapına denk olacak biçimde iki adet şerit oluşur. Oluşan ilk şerit Şekil 3.11'de AA ve BB olarak gösterilmektedir [75].



Şekil 3.11. Sıralı delaminasyon şeritlerinin şematik gösterimi [75].

Bahsedilen şerit, alttaki ikinci tabakaya vurucu cismin numune üstüne saplanması için ya da numune üzerinden geri sekme olayı meydana gelene kadar baskılar. Belirtilen işlem art arda gelmekte olan tabakalar için de tekrarlanmakta ya da delaminasyon çatlak yayılması için gereken enerji bitene kadar tekrarlanır. Ara yüzeylerin içinde oluşan çatlakların zamanlaması, art arda gelen tabakalarda oluşan çatlakla aynı vakitte gerçekleşmektedir. Ayrıca çapraz takviye edilmiş tabakalı kompozitlerdeki yapılan bu çalışma, oluşan şerit uzunluğunu ve delaminasyon hasarının büyüklüğünü eşit bulmuştur. Şekil 3.11'de A1 alanıyla, bahsedilen bu olay gösterilmektedir. Sıralı delaminasyon olayı da ayrıyeten belirtilen örneği takip eder [76].

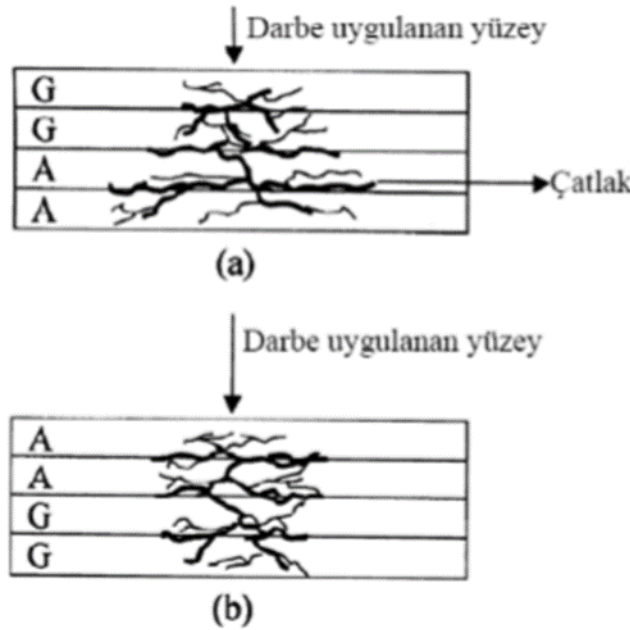
3.7.3. Elyaf Hasarı

Kompozit malzemelerde elyaf kopma hasarı, genel olarak matris çatlama hasarından ve delaminasyon hasarından daha sonra oluşup gelişmektedir. Elyaf hasarlanması, vurucu cismin batmasıyla darbe olan yüzeyde oluşabileceği gibi, yüksek eğilme gerilmelerinin sebebiyle de darbe gerçekleşmeyen yüzeyde de oluşabilir. Yapılmış olan çalışmalar, elyaf cinsinin matris çatlama ve delaminasyon hasarlarının başlangıcında etkili olmadığını kanıtlamıştır. Ancak darbe, yüksek enerji seviyelerindeyse elyaf malzemenin kabiliyetleri ve elyaf diziliminin sıralaması önemlidir [67].

Elyaf, kompozit malzemelerin üretiminde kullanılırlar ve hasar olayının kontrol edilmesinde, hasar toleransının artırılmasında ciddi bir görevde yer almaktadırlar. Örnek olarak, darbe enerjileri eşit olduğunda, kompozit malzemenin enerjiyi absorbe etme yeteneği, elyaf kırılmasının azalması ve çok yüksek artık mukavemet ile neticelenir. Bir kompozit malzemenin üretiminde, kompozit malzemenin darbelere olan direncini geliştirmek için, kırılma esnasında yüksek kırılma biçim değiştirme kabiliyetine sahip olan elyafın, tok bir reçine

sistemi ya da örgü-dikişli bir tabaka kullanarak tabakaların arasındaki düzen uyumunu sağlamak gerekir [67].

Kalın kompozit malzemelerde darbe hasarı, darbe yüzeyi üzerinde darbenin etkilediği noktaya yakın kısımlarda gerilmelerin oluşması neticesinde başlar. Belirtilen bu durum, darbe yüzeyi üzerindeki tabaka bölümünün tam olarak deformasyon olayına uğramadığını gösterir. Çünkü belirtilen deformasyonu karşılayan kısımlar, alt bölümdeki bitişik tabakaların sınırlarıdır ve alt yüzeydeki tabakalardır. Kompozit malzemelerde darbe olayı, darbe yüzeyinin altından yüzeyine doğru yayılarak ilerlemektedir. Bu sebeple aramid tabaka darbeye maruz kalmayan alt yüzeyde bulunduğu zaman, kompozit malzeme; aramid malzemeden oluşan tabakalarda deformasyon boyunca gerçekleşen darbe enerjisinin yüksek bir bölümünü emer (Şekil 3.12a). Ancak aramid malzemeden oluşan tabakalar darbenin olduğu yüzeyde bulunursa ve altında da gevrek yapıda olan cam tabakalar olursa, belirtilen cam tabakalar, aramid tabakaların arasına yayılma eğilimi olan deformasyon kısıtlayıcı bir durum gerçekleştirir ve deformasyon yayılımının önüne geçer (Şekil 3.12b) [77].



Şekil 3.12. Darbenin gerçekleştiği yüzeylere göre hasarın dağılımı, (a) Cam yüzey, (b) Aramid yüzey [77].

Elyaf takviye edilmiş kompozit malzemelerden; cam/epoksi, karbon(grafit)/epoksi ve aramid/epoksi kompozitlerin, belirtilen kaynaktan elde edilen darbe davranışlarının bazı özellikleri ve bazı bilgiler verilmektedir [76];

Bütün kompozit numunelerde, darbe etkisinden dolayı rijitlik azalması mukavemet azalmasından daha küçüktür.

Bütün kompozit malzemelerde artık mukavemet faktörleri; darbe hızı, elyaf dizilme sıralaması ve kompozit çeşididir.

Elyafların matristen ayrılma olayı, elyafların kırılma biçim değiştirmesiyle alakalıdır. Belirtilen ayrılma, elyaf-matris arasındaki tutunma mukavemeti için elyaf kırılmasının biçim değiştirme olayına bağlı olmaktadır. Üç kompozit malzemede sıralama yapılacak olur ise; cam/epoksi>aramid/epoksi>karbon(grafit)/epoksi olarak sıralanabilir.

Cam/epoksi ve aramid/epoksi kompozitleri arasında, cam/epoksi kompozitin matris kırılmasının yoğunluk oranı aramid/epoksi kompozite göre daha yüksektir.

Belirtilen üç kompozit malzeme için delinme dirençleri saptanırsa; aramid/epoksi>karbon/epoksi>cam/epoksi şeklinde sıralama yapılmaktadır.

Eğer aramid/epoksi ve cam/epoksi kompozitler için darbe sonucunda meydana gelen delaminasyon boyutlarına bakacak olursak; aramid/epoksi kompozitin delaminasyon boyutu cam/epoksi kompozitinkine göre daha büyüktür.

4. METOD ve DENEYSEL ÇALIŞMA

Karbon elyaf epoksi kompozit boru ve bu kompozit malzemeye bazı nanopartikül katkıları yapılarak üretilmiş boru türleri üzerinde tekrarlı darbe deneylerini yapmış olup, tez çalışmamızda ise yaptığımız tekrarlı darbe deneyi analizlerinin neticesinde meydana gelen durumları, sonuçları, belirlenmiş bazı parametrelerin birbirleriyle ilişkilerini açıklayıp belirleyeceğiz. Yapılan tekrarlı darbe testleri iç basınçsız olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmamızda karbon elyaf epoksi kompozit boru (nano katkısız), yani saf malzeme olarak adlandırdığımız malzeme, karbon nanotüp (KNT) katkılı ve bor nitrür nanopartikül (BNNP) katkılı matrise sahip filaman sarım metoduyla üretilmiş olan karbon fiber takviyeli kompozit boruların tekrarlı darbe direnci ve nanopartikül katkısının enerji absorbe etme kabiliyetine ne gibi etki ettiği, darbe kuvvetinin zamana ve deplasmana göre değişimleri saptanacaktır.

Deneylerde kullanılan numuneler nanopartikül katkılarına göre üç grup olarak ayrılmıştır. Bunlar;

- 1- Saf (katkısız) epoksi matris / karbon fiber takviyeli kompozit boru
- 2- BNNP katkılı epoksi matris / karbon fiber takviyeli kompozit boru
- 3- KNT katkılı epoksi matris / karbon fiber takviyeli kompozit borulardır.

Deneyisel çalışma kısmında ise, bu materyallerin içerikleri, özellikleri, nano malzemelerin epoksi içerisine harmanlanarak matris malzemenin hazırlanması, kompozit

boruların üretim hazırlıkları, filaman sarım metoduyla kompozit boruların imali, kullanılan test metodu ve analizler ile birlikte bu metot ve analizlerin değerlendirme yöntemleri açıklanmıştır.

4.1. Kullanılan Materyallerin Tanımı

4.1.1. Epoksi Matrisinin Materyal Özellikleri

Tez çalışmamızda matris malzeme olarak Huntsman firmasından sağlanan Araldite MY 740 epoksi, Aradur HY918 kürleştirici ve DY062 hızlandırıcı içeren (diglisidil eter bisfenol A bazlı), üç fazlı filaman sarım reçine sistemini kullandık. Reçine sisteminin ürün verileri 25°C ortam sıcaklığındaki durumu Çizelge 4.1’de, reçine sistemindeki tavsiye edilen karışım oranları Çizelge 4.2’de, reçine sisteminin filaman sarım yöntemindeki tavsiye edilen optimum uygulama koşulları Çizelge 4.3’de, reçine sisteminin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 4.4’de ve reçine sistemi kullanım verileri Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Reçine sisteminin ürün verileri [78].

Bileşenler İlgili Standart	Viskozite (m Pa s)	Yoğunluk (g/cm ³)
Araldite M Y740	10.000-14.500	1,15-1,20
Aradur HY 918	50-80	1,18-1,24
Hızlandırıcı DY 062	10	0,88-0,92

Çizelge 4.2. Reçine sistemindeki tavsiye edilen karışım oranları [78].

Bileşenler	Karışım oranı (Kütlece)
Araldite M Y740	100
Aradur HY 918	85
Hızlandırıcı DY 062	1,3

Çizelge 4.3. Reçine sisteminin filaman sarım yöntemindeki tavsiye edilen optimum uygulama koşulları [78].

İşlem	Sıcaklık (°C)	Yöntem
Reçine sistemi uygulanması (Reçine banyosu)	35-45	Isıtma
Mandrel ön ve sarım koşulları	60-120	Isıtma
Kürleme	90-120	Mandrel döndürülerek kürlenmelidir.

Çizelge 4.4. Reçine sisteminin fiziksel ve mekanik özellikleri [78].

Fiziksel / Mekanik Özellik	Standart	Birim	Değerler
Çekme dayanımı	ISO 527	MPa	75-85
Kopma uzaması	ISO 527	%	3,0-4,0
Elastiklik modülü	ISO 527	Mpa	3200-3800

Çizelge 4.5. Reçine sistemi kullanım verileri [78].

Başlangıç Viskozitesi (mPa s) (ISO 12058)	
25 °C'de	700
60 °C'de	70
Pota Ömrü (ISO 12058)	
25 °C ve 15000mPa s	-
60 °C ve 1500mpa s	3,3sa
Jelleşme süresi (ISO 9396)	
60 °C	5,6h
80 °C	80dk
100 °C	19dk
120 °C	5dk
140 °C	3dk

4.1.2. Karbon Fiber Takviye Materyalinin Özellikleri

Tez çalışmamızda boru kompozit malzeme için, takviye malzemesi olarak kullanılan karbon fiber Dowaksa firması tarafından sağlanmıştır. Karbon fiber kodu 12K A-42 olan karbon fiber ipliklerdir. Karbon fiber ipliklerinin özellikleri Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Karbon fiber ipliklerinin özellikleri [78].

Açıklama	Standart	Birim	Değer
Çekme dayanımı	ISO 10618	MPa	4200
Çekme Modülü	ISO 10618	GPa	240
Uzama	ISO 10618	%	1,8
Yoğunluk	ISO 10119	g/cm ³	1,78
Akma	ISO 1889	g/1000m	800
Boyut tipi ve miktarı	ISO 10548	%	1,0-1,5
Bükülme	Bükülmesiz		

4.1.3. Karbon Nanotüp Nanopartiküller

Tez çalışmamızda karbon nanotüp olarak çok cidarlı karbon nanotüpler tercih edilmiştir. Bunun sebebi ise, kolay ve yaygın olarak bulunabilmesi, bor nitrür nanopartiküllerden değişik özellikler göstermesi, epoksi reçinelerin içerisine homojen şekilde dağılma eğilimleri ve iyi bir bağ oluşturmaları, geniş yüzey alanlarına sahip olmaları, tek cidarlı karbon nanotüplerden daha masrafsız olması ve mekanik özelliklerde ciddi iyileşmeler

gerçekleştirmesidir. Çok cidarlı karbon nanotüp NANOCYL firmasından alınmıştır ve mekanik, fiziksel özellikleri Çizelge 4.7.'de görülmektedir.

Çizelge 4.7. Çok cidarlı karbon nanotüplerin fiziksel ve mekanik özellikleri [78].

Açıklama	Birim	Değer
Çekme dayanımı	GPa	10-60
Elastiklik modülü	TPa	1
Uzama	%	10
Yoğunluk	g/cm ³	1,3-2
Elektrik İletkenliği	S/m	10 ⁶ -10 ⁷
Çap	nm	5-50
Uzunluk	µm	10-30

4.1.4. Bor Nitrür Nanopartiküller

Tez çalışmamızda bir başka nanopartikül katkısı olarak tercih ettiğimiz materyal, bor nitrür nanopartiküllerdir (BNNP). Şekilleri ve boyutlarının karbon nanotüplerden değişik olması sebebiyle, mekanik kabiliyetlerinin farklı olması ve farklı durumları etkilemesi sebebiyle, termal iletkenliklerinin yüksek olması ve bundan dolayı epoksi matrisinin ısıl dayanımını arttırması sebebiyle ve seramik olmaları dolayısıyla çalışmamızda kullanılmıştır. Bortek firmasından bor nitrür nanopartikül materyaller sağlanmıştır.

4.2. Kompozit Boru Üretim Yöntemi

Kompozit borularımız filaman sarım metoduyla üretilmiştir. Filaman sarım metodunu izah etmeden önce, nanopartikül içerikli epoksi matrisinin hazırlığı ve kompozit boruların üretim hazırlığıyla ilgili bilgiler tezimizde yer alacaktır.

4.2.1. Nanopartikül İçerikli Epoksi Matrisinin Hazırlığı

Literatürden elde ettiğimiz bazı bilgilerin doğrultusunda, karbon nanotüplerin ve bor nitrür nanopartiküllerin epoksi reçineye daha iyi ve homojen olarak nasıl karışabileceği yani nano katkılı epoksi matrisin kompozit boru üretiminde en iyi biçimde hazırlanıp kullanılabilmesi için bazı saptamalar incelenmiştir.

Literatürde yer alan, saptanan ve en çok tercih edilen karıştırma yöntemlerinin ultrasonik banyo, ultrasonik problu sonikatör, manyetik ve mekanik karıştırıcılar olduğu belirlenmiştir. Birçok araştırma ve uygulamada epoksi içerisinde daha iyi dağılımın

oluşabilmesi için etanol, metanol, aseton vb. kimyasalların da kullanıldığı belirlenmiştir [79-86].

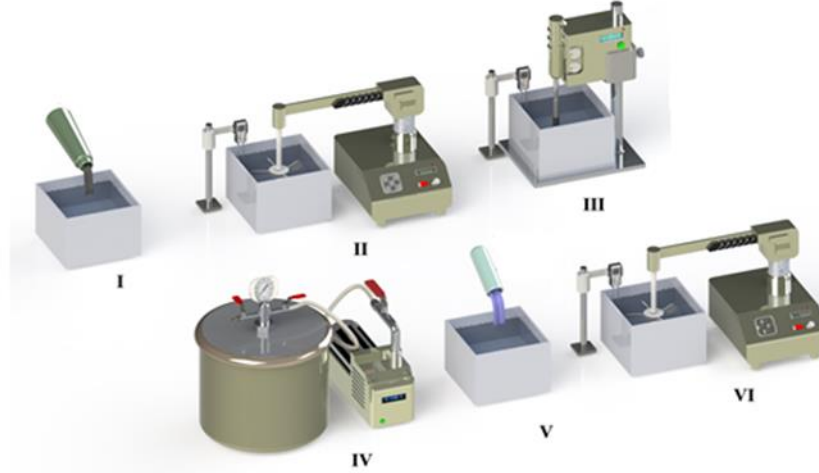
Kimyasal madde eklenmesiyle karıştırma metodu esnasında eklenen kimyasal maddenin epoksinin kürlenme mekanizmasını etkilediği saptanmıştır. Bu metotta nano malzeme, epoksinin içerisine dağıldıktan sonra, uzun bir vakit vakuma maruz bırakılarak ve fırın içerisinde bekletilerek ilave edilen kimyasalın epoksinin içerisinden giderilmesi gerekmektedir. Ancak yapılan bu işlemler, epoksi materyalinin pota ömrünü kısaltmakta, kimyasal maddenin giderilmesi esnasında nano malzemenin epoksinin içinde çökme oluşumuna ve imalat açısından duraksamalara gecikmelere sebep olmaktadır. Bu sebeplerden ötürü, nano malzemelerin epoksiyle karışımında ara kimyasal kullanmaksızın direkt olarak ultrasonik problu sonikatör ve mekanik karıştırıcıyla yapılmasına literatür verilerinde saptanmıştır.

İlk olarak tercih edilen yöntemlerden, nano materyaller mekanik karıştırıcıyla 30 dk süresince ön karışım uygulanmıştır. Ardından sonikasyon yani ultrasonik problu karıştırıcıyla karıştırma operasyonu uygulanmıştır. Ultrasonik problu karıştırıcı uygulanması esnasında, sonikasyonun uygulanma süresi ve sonikatör ucun epoksi reçinenin içerisine daldırılma miktarına bağlı olarak karbon nanotüp materyallerinin boylarının kısaldığı durumu ve karışım sıcaklığının yükselmesiyle ilgili literatürde veriler mevcuttur [87,88].

Sonikasyon süresi bu çalışmada, uygun olan 10 dk olarak seçilerek karbon nanotüplerin epoksinin içerisine denk biçimde dağıtılması için gerekli vakit sağlanmış, karbon nanotüpler materyallerinin boyutları korunmuş ve sıcaklık yükselmesi engellenip sabit tutularak, epoksi reçinesinin viskozite oranının düşmesine olanak sağlanmıştır. Sonikasyon esnasında karbon nanotüp ve epoksi karışımının sıcaklığı termometreyle ölçülüp kontrolde tutulmuştur. Mekanik karıştırma ve sonikasyon operasyonları her bir kompozit boru imalatı için ikişer kez yapılmıştır. Kompozit boruların üretimi için epoksi materyalinin hazırlanmasındaki son işlem olan sonikasyon bittiğinde, hazırlanmış olan epoksi matris karışımının sıcaklığının ortalama olarak 40°C civarlarında olduğu bulunmuş ve optimum sıcaklıklar arasında kaldığı görülmüştür (Çizelge 4.3.). Boruların imalatı esnasında tespit edilen sıcaklık, fiber ıslatma banyosu içerisindeki termostatlı ısıtma sistemi devreye sokularak stabil halde tutulmuştur. Epoksi matris karışımlarının hazırlanması esnasında kullanılan süreler, epoksi reçine materyalinin pota ömrünün sınırlarında olmasına ve sarım işlemine uygun olması için gerekli vakit kalmasına özenilmiştir (Çizelge 4.5.).

Epoksi matrisinin hazırlanma aşamaları Şekil 4.1.'de gösterilmiştir. I numaralı şekilde karbon nanotüp materyalinin epoksi matrisinin içerisine aktarılışı, II numaralı şekilde materyallerin mekanik karıştırıcıyla karıştırılması, III numaralı şekilde ultrasonik problu karıştırıcıyla karıştırma operasyonu, IV numaralı şekilde ise gazdan arındırma işlemi, V numaralı şekilde materyallerin içerisine sertleştirici madde ilave edilmesi ve VI numaralı

şekilde ise bütün materyallerin birbirlerine homojen olarak dağıtılması amacıyla yapılan mekanik karıştırıcıyla karıştırma işlemi görünmektedir.



Şekil 4.1. Epoksi matrisinin hazırlanma aşamaları [89].

4.2.2. Kompozit Boruların Üretim Hazırlığı

Filaman sarım borularda üretime başlanmadan önce, yapılan ön uygulamalar ve filaman sarım borularının optimum üretim değerleri bu aşamada belirlenmiştir. Filaman sarım boruların iç çapının ölçüsü 72 mm olarak belirlenmiş olup, bunun sebebi ise mevcut test cihazlarına uyumlu olmasının sağlanmasıdır. 4 adet 110cm uzunluğunda olan mandreller, belirtilen iç çap değerini sağlayacak şekilde filaman sarım boru üretimi için benzer özelliklerde hazırlanmıştır. Her 110 cm uzunluğundaki mandrel, 30 cm boyunda 3 adet numune sağlanabilecek kapasitededir. Numuneler mandrelden hasar almasın, kolay ayrılsın ve iç yüzey kalitesini arttırılsın diye mandrelin yüzey kısımlarına taşlama ve krom kaplama uygulanmıştır. Sarım bant genişliğini oluşturmakta olan fiber miktarının iyi belirlenmesi bazı problemlerinde önüne geçecektir. Bu problemlerden önemli olanları, karbon fiber ipliklerinin tiftiklenebilme olasılığı, epoksi reçinesinin fiber materyallerinin arasına tam olarak dağılamaması, üretim sürecinde gerçekleşebilecek bazı sorunlar ve yeterli ıslanmamadan dolayı öngörülen problemlerin kolayca saptanabilmesi için, sarım bant genişliği üç fiber (lif) olarak ayarlanmıştır. CNC kontrolündeki sarım makinesine belirlenmiş optimum sarım açısı değeri olan $55^{\circ} (\pm 4^{\circ})$

toleranslı) sarım açısı ayarlanıp uygulanmıştır. Epoksi matrisini kullanmadan önce uygulanan kuru sarım işlemiyle, sarım bantlarındaki boşluk ve örtme ayar kontrolü yapılmıştır ve makinedeki sarım ucunda mevcut olan toplama halkasının mesafesi ayarlanmıştır. Şekil 4.2’de çalışmada kullanılan kompozit boruların geometrisi, Çizelge 4.8’de ise filaman sarım boruların üretim aşamasındaki gerekli optimum parametreler verilmiştir.



Şekil 4.2. Kullanılan kompozit boruların geometrisi [89].

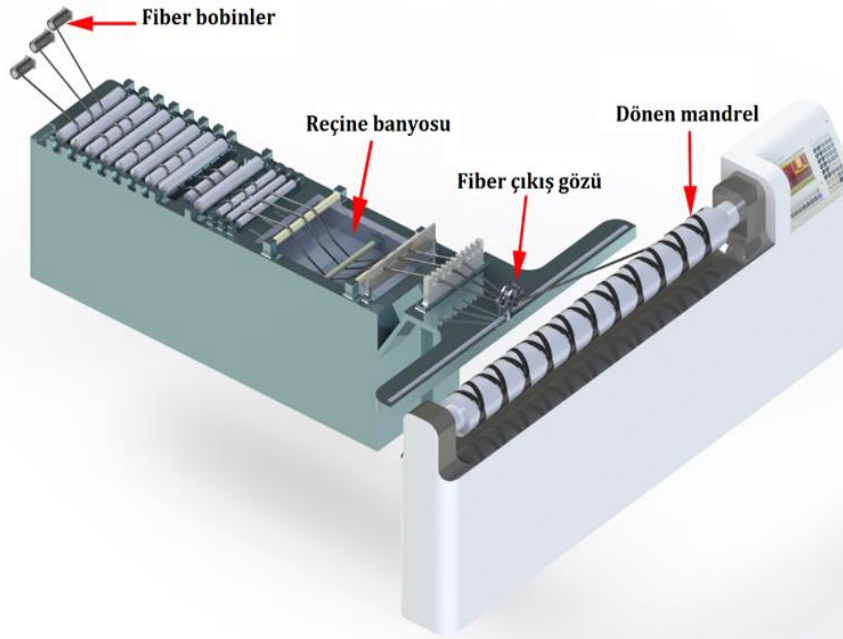
Çizelge 4.8. Sarım parametreleri [78].

Parametre Türü	Değer
Bant Genişliğini Oluşturan fiber Sayısı	3
Sarım Sayısı	4s
Sarım Açısı	$\pm 55^\circ$
Mandrel Uzunluğu	110cm
Numune Uzunluğu	30cm
Numune İç Çapı	72mm
Tek Sarımdan Elde Edilen Numune Sayısı	3

4.2.3. Filaman Sarım Metoduyla Kompozit Boru Üretimi

Filaman sarım metoduyla kompozit boru üretimi esnasında saf epoksili, çok cidarlı karbon nanotüp katkılı ve bor nitrür nanopartikül katkılı matrisine sahip, üç değişik çeşitli epoksi matrisine sahip karbon fiber takviye edilmiş kompozit boru imalatı yapılmıştır. Öncelikle, deneme amaçlı her bir boru cinsinden birer tane deneme üretimi yapılmış olup, gözle bakılıp herhangi bir problemi olup oluşup oluşmadığı muayene edilmiştir. Üretimin neticesinde herhangi bir problem gerçekleşmemesi üzerine, üzerinde analizler yapacağımız kompozit numune boruların üretimi yapılmıştır. Nanopartikül takviyeli kompozit borunun üretimine öncelikli olarak epoksi matrisinin hazırlanmasıyla başlanmıştır. Epoksi matris hazırlanma aşamasındayken, diğer taraftan mandreller temizlenerek, reçine sisteminin filaman sarım uygulaması esnasında optimum işlem ve uygulama şartlarına göre (Çizelge 4.3.) belirlenen sıcaklıklar arasında ön

ısıtma fırını içerisine konumlandırılmıştır. Tiner ile sarım makinesi ve fiber ıslatma banyosu temizlenmiştir ve kurutma işlemi yapılarak sarım işlemi için hazırlanmıştır. Fiber ipliklerin gerginliği ve yönleri ayarlanmış olup, karbon fiber bobinleri konumlandırılmıştır. Gereken ayarların yapılmasından sonra ısıtılan mandrel makineye yerleştirilerek kalıp ayırıcı sürülme operasyonu yapılmıştır. Üretim yapılması için hazırlanmış epoksi matrisi, fiber ıslatma banyosuna dökülmüştür ve sarım operasyonu için hazır hale getirilmiştir. Sarım esnasında epoksi matrisinde sıcaklık düşüşü olmaması için fiber ıslatma banyosundaki ısıtıcı devresi çalıştırılmış olup, sıcaklık kontrolü termostatla yapılmıştır. CNC kontrollü makinede gerekli sarım işlemi, belirlenmiş olan en uygun parametrelere göre yapılmış olup, sarım işlemi esnasında yönlendiricilerin etrafında oluşan tiftiklenmeler uzaklaştırılmıştır. Son işlem olarak kürlleme operasyonu mandreller döndürülerek, üretici verilerine optimum olacak şekilde 2 saat 80°C ve 12 saat 120°C değerlerinde yapılmıştır. Yukarıda açıklanan işlemler her üretim için tekrar edilmiştir. Kürlleme operasyonu bittikten sonra borulardaki kürlleme işleminin ve sarımın göz ile fiziksel olarak kontrolü yapılmıştır. Şekil 4.3'te örnek bir filaman sarım işlemi gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Filaman sarım işlemi [89].

4.3. Tekrarlı Darbe Olayı

Darbe testleri bilindiği üzere malzemelerin özelliğini saptamamıza yardımcı olan, hızlı yüklemelerin uygulanıp, kırılan malzemenin enerji emme kabiliyetini ve diğer özelliklerini bulabilmemize yarayan bir uygulamadır. Teorik ve pratik olarak ise tekrarlı darbe olayı yüksek

hızda ya da düşük hızda olmak üzere, malzeme üzerine defalarca olacak şekilde ağırlığın, kuvvetin veya yükün vurması neticesinde gerçekleşen bir olaydır. Olası bir doğa olayında araçların üzerine çarpan ya da bir uçağın uçarken havada maruz kalabileceği dolu çarpması olayı, bakım-onarım esnasında gelebilecek tekrarlı çarpmalar, malzemenin olası bir yere düşme anında sekip bir daha çarpmaya maruz kalması basitçe verilebilecek tekrarlı darbe olaylarıdır. Yaptığımız bu çalışmada tekrarlı darbenin malzeme üzerindeki parametreleri nasıl etkilediği yorumlayıp hasar analizini yapacağız. Literatürdeki çalışmalardan bazıları tekrarlı darbe olayını açıklamakta bize yardımcı olacaktır.

Hosur ve arkadaşları (2003); pratikte bir yapının birden çok darbeye maruz kalmasının mümkün olduğunu belirtmişlerdir. Cam/epoksi katmanlı laminatların, karbon/epoksi kompozitlere göre daha sert olduğunu söylemişlerdir. Bu sebepten dolayı dikişli ve dikişsiz katmanların hasar direncini, tekrarlı darbe yüklemelerini değerlendirmek amacıyla çalışmalarını genişletmişlerdir. Yaptıkları çalışmada her bir yapıdan üç örnek alınmış olup, 10 ile 50 J arasında darbe enerjisine maruz bırakılıp 40 kere uygulanmıştır. Çıkdıkları tabloda çoklu darbe yüklemeleriyle matrisi test etmişlerdir. Yapılan her beş darbe vuruşundan sonra C-tarama ultrasonik yöntemiyle hasar büyümesini değerlendirmişlerdir. 10, 30 ve 50 J enerji seviyelerinde 25,4 mm ve 12,7 mm dikişli örnekler ve dikişsiz numunenin tipik darbe cevabını göstermişlerdir. Tekrarlanan darbe yüklemesi altında tüm katmanlar 30 J'ye kadar olan enerjide, 40 defa olmak üzere tekrarlanan yüklemeyi sürdürdüklerini belirtmişlerdir. 40 ve 50 J enerji seviyesinde dikişsiz katmanlar, dikişli katmanlara oranla tekrarlanan darbeyi çok daha az sürdürmüştür. Bu enerji seviyelerinde 25,4 mm dikişli katmanlar, 12,7 mm dikişli katmanlara kıyasla daha fazla darbe koruyabilir. Düşük enerji seviyelerinde pik noktası, darbe yükünün sayılarıyla önemli ölçüde değişmez. Fakat 40 ve 50 J gibi yüksek enerji seviyelerinde belirli bir darbe yüklemesinden sonra pik noktasında ani bir düşüş yaşandığını neticelendirmişlerdir. Emilen enerjinin de darbelerin sayısına göre benzer bir yatkinlik gösterdiğini söylemişlerdir. Hasar alanının darbenin sayısı ile birlikte arttığını fakat belli darbelerden sonra bu hasar alanlarının önemli ölçüde artmadığını gözlemlemişlerdir [90].

Yapılan bir başka çalışmada ise; de Morais ve arkadaşları (2005) aramid, karbon ve cam fiber, kumaş/epoksi reçine-matris kompozitleriyle düşük hızlı tekrarlı darbe analizleri yapmışlardır. Yaptıkları çalışmalarda karbon kompozitleri 3, 4 ve 6 katmanlı olarak üretilmiş olup, cam ve aramid kompozitler 6, 8 ve 10 katmanlı olarak üretilmişlerdir. Fabrikasyon olan bu malzemelerin otoklavın içinde vakumlanarak üretildiklerini belirtmişlerdir. Cam, karbon ve aramid kompozitlerinin düşük enerjiyle tekrarlı darbe direnç çeşitliliği, katman kalınlığının işlevi olarak çarpmayı yapan cismin enerjisine bağlıdır. 3,7 J'nin altındaki enerjiler için darbe etkisinin altındaki enine kesit katman noktasının darbe direnci ve katman kalınlığı arasındaki ilişkiye bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir. Bundan dolayı bütün deneysel çalışmaların tek bir

noktaya çıktığını, yani fiber takviyesine bakılmaksızın düşük enerjili tekrarlı darbe direncinin sadece katman kalınlığıyla arttığını belirtmişlerdir. Bu çalışmalarında yüksek enerji seviyesi için analiz yaptıklarını, katman kalınlığının tekrarlı darbe direncini artırdığını ayrıca kullanılan fibere de bağlı olduğunu ve fiberlerin alansal dağılımına bağlı olduğunu söylemişlerdir. Cam kompozitlerin daha iyi performansının, cam fiberlerin yüksek kapsama alanına sebep olan aramid ve karbon fiberlerle arasındaki ince ilişkisine yormuşlardır. Çalışmalarında başarısız olmuş kompozitlerin, makroskopik görünümünün analiz edilen enerji seviyelerinin ikisine de niteliksel olarak eşit olduğunu bulmuşlardır. Bölgesel matris ezilmesinin ve çentikleycinin altındaki fiber kesiminin bir sonucu olarak ön yüz tepe noktasında kırılma gözlemişlerdir. Hasarın arka yüzünde kumaş üzerindeki fiberlerin yönünü takip eden karakteristik çatlak örneklerinin yer aldığını belirtmişlerdir. Bu katmanların arka yüzünde meydana gelen ana hasarı fiber deformasyon ve kopma olarak saptamışlardır [91].

4.4. Darbe Kuvvetinin ve Bazı Parametrelerin Birbirleriyle Olan İlişkisi

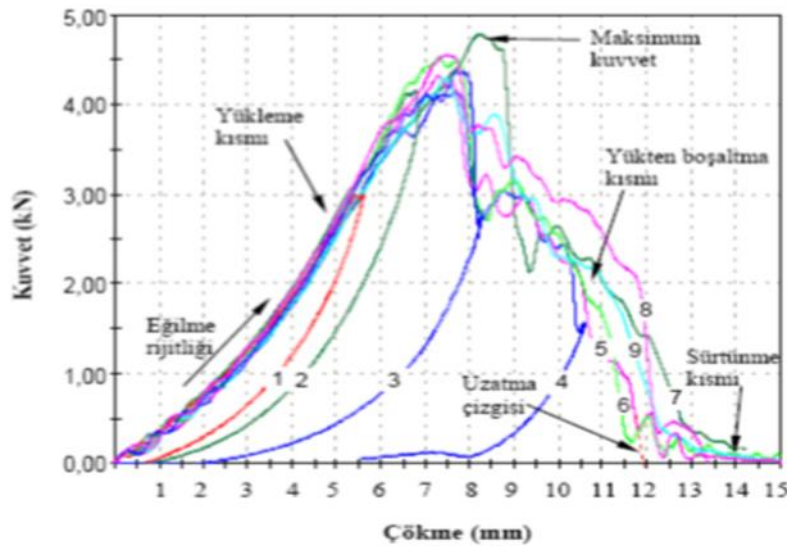
4.4.1. Darbe Kuvvetinin Yer değiştirmeye (Deplasman) Göre (F-s) Değişim Grafiği

Kompozit malzemelerde darbe davranışlarının belirlenmesinde kullanılan ve yaygın olan grafiklerden birisi Kuvvet-yer değiştirme (çökme ya da deplasman) (F-s) grafikleridir. Tez çalışmamızda, karbon epoksi, karbon epoksi + bor nitrür ve karbon epoksi + karbon nanotüp numune malzemelerinin, uygulanan darbe kuvvetine bağlı oluşturduğu deplasman ya da çökme durumlarını grafiklerde inceleyeceğiz. Şekil 4.4'te, uygulanan kuvvetin deplasmana karşı olan değişimini belirten örnek bir F-s grafiği gösterilmektedir. Grafik üzerinde verilmiş olan her bir eğri genel olarak üç aşamada incelenmektedir. Bu aşamalar; yükleme kısmı, maksimum kuvvet ve yükten boşaltma aşamaları olarak düzenli şekilde sıralanabilir. Bahsedilen aşamalar grafik üzerinde şu şekilde tanımlanabilir.

Kuvvet-yer değiştirme grafiğindeki eğriler üzerinde; kuvvet başlangıç değeri olan sıfırdan (0), kuvvetin artış göstererek maksimum seviyeye geldiği bölüme kadar olan eğri, yükleme kısmı ismini alır. Kuvvetin ulaştığı maksimum seviyeden, minimum sıfır (0) değerine kadar tekrar düştüğü bölümse yükten boşaltma aşaması olarak isimlendirilmektedir. Kuvvet-yer değiştirme grafiklerindeki kuvvet yükleme aşamasındaki eğim, numunenin oluşan darbe yüküne karşı tepki gösterdiği direnci belirtmektedir ve eğilme rijitliği ismini almaktadır.

Kuvvet-yer değiştirme grafikleri darbe testlerinde genel olarak kapalı tip ve açık tip eğri olmak üzere iki çeşitten oluşmaktadır. Kapalı tip eğri grafikleri, darbe testi sırasında vurucu olan cismin numuneye temasından sonra numunenin yüzey kısmından geriye sekmesinden dolayı oluşmakta olan eğrilerdir. Bu cinsteki eğriye sahip olan test numunelerinde, darbe

sırasında vurucu cismin içerisinde bulundurduğu enerji, numunenin düzenini bozacak derecede değildir, uygulanmış olan darbe enerjisinin bir miktarı ise numunedeki hasar oluşumları gibi durumlar neticesinde absorbe edilmekte ve absorbe edilmeyen kalan diğer enerjiye vurucu cismin geriye sekmesi için sarfedilmektedir. Şekil 4.4'te gözükmekte olan ilk üç eğri, kapalı tip eğri olduğu gözükmektedir. Yükleme aşaması kısmında darbe enerjisi miktarının maksimum seviyeye yaklaştığı yerlerde oluşan titreşim durumları darbe etkisiyle oluşan titreşimler ve numune üzerinde oluşan hasar durumlarıyla bağdaştırılır. Darbe enerjisi miktarı yükseltildiği zaman, geriye sekme oranı azalmaktadır. Bundan dolayı kapalı tip eğri genişlemekte ve yer değiştirmenin değeri artmaktadır. Kısacası numune üzerindeki hasar oluşumu ve hasar oluşumundan dolayı harcanmakta olan enerji miktarı artar. Kuvvet-yer değiştirme eğrilerinde eğrinin altında kalmakta olan alan, darbe esnasında numunedeki gelişen hasarı oluşturmak için harcanmış olan enerji miktarını belirtmektedir. Şekil 4.4'te görülen 4 numaralı eğri, kapalı tip eğridir ancak kapalı tip eğri durumundan açık tip eğriye geçiş noktasında konumlanmaktadır. Kapalı tip eğriden açık tip eğriye geçiş için belirtilen nokta kritik seviye olarak adlandırılabilir. Belirtilen kritik seviyenin üstünde darbe enerjisi artırılırsa, eğri tipi kapalıdan açık tip eğri durumuna geçiş yapar. Açık tip kuvvet-yer değiştirme eğrisi ise, darbe hasarının malzemenin durumunu bozacak biçimde yüksek olduğunu ve darbe olayını gerçekleştiren vurucu cismin malzeme üzerine saplanması veya delmesiyle açıklanmaktadır. Bu durumun oluşmasından sonra ise malzeme üzerine saplanmış vurucu cisim artık numunenin yüzeyinden geriye sekme durumunu yapamaz. Şekil 4.4'te 5 numaralı eğriye bakıldığında açık tip eğri olduğunu, numune üzerinde saplanma veya delinmenin gerçekleştiğini söylemek mümkündür.

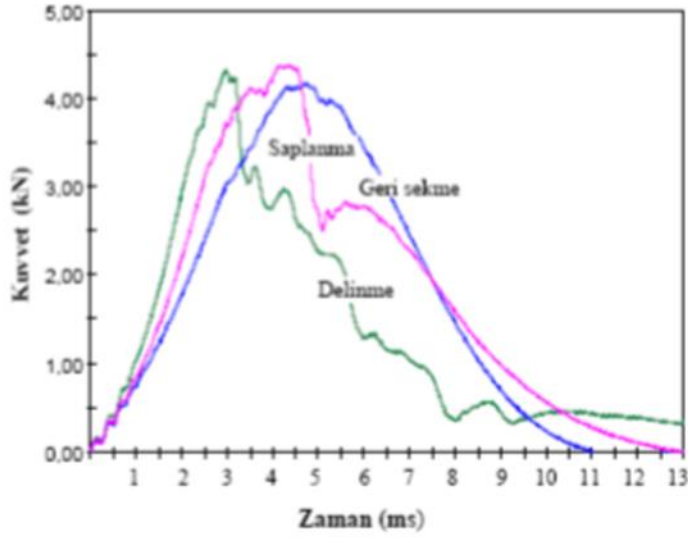


Şekil 4.4. Kuvvet-yer değiştirme (F-s) grafiği ve eğrileri [92].

Darbe enerjisi, vurucu cismin saplanma enerjisi miktarından çok fazla arttırılması sonucunda vurucu cisim malzeme kalınlığı yönünde olacak şekilde malzemeyi deler. Şekil 4.4'te gözüken kuvvet-yer değiştirme eğrilerinden 6, 7, 8 ve 9 numaraları, vurucu cismin delinme meydana getirdiği numunelere aittir. Numune ve vurucu cisim arasında oluşan sürtünme, eğrilerin yükten boşalma aşamasının sonunda, yatay eksenin sağ tarafında bitişmiş olan bölümlerle ifade edilmektedir. Darbe enerjisi ne kadar arttırılmış olursa olsun kompozit numunelerin daha fazla darbe enerjisi absorbe edemeyeceği, ulaşılan darbe enerjisi sebebiyle oluşan delinmeyle açıklanabilir [67,92].

4.4.2. Darbe Kuvvetinin Zamana Göre (F-t) Değişim Grafiği

Üç değişik numuneye ait olan, vurucu cismin geriye sekmesi, vurucu cismin numune üzerine saplanması ve vurucu cismin numuneyi delmesi durumlarını bize gösteren kuvvet-zaman (F-t) grafik eğrileri Şekil 4.5'te görülmektedir. Malzeme bütünlük durumunun korunduğu ve geriye sekmenin olduğu numunelere ait kuvvet-zaman grafik eğrileri parabolik şekilli kapalı bir eğri oluşturmaktadır ve Şekil 4.5'te görülmektedir. Tatbik edilen darbe enerjisi sonucunda, darbe kuvveti de yükselmektedir. Kuvvet-zaman grafiklerindeki yükleme aşamasındaki eğri eğimi temas rijitliği olarak adlandırılır ve bu özellik malzemenin kabiliyetine göre değişmektedir. Saplanma ve delinme oluşan uygulamalara ait kuvvet-zaman eğrilerinde gözüktüğü gibi maksimum kuvvet değerinde fazla fark meydana gelmemektedir. Delinmenin olduğu numunede bulunan eğri üzerinde kuvvette ani şekilde düşüşler göstermesi ve sıfır değerine düşmesi beklenirken, Şekil 4.5'te gözüktüğü gibi vurucu cisimle test numunesinin arasında gelişen sürtünme sebebiyle yükten boşalma aşamasında eğri uç kısmı yatay eksene paralel durumda olmaktadır [92].



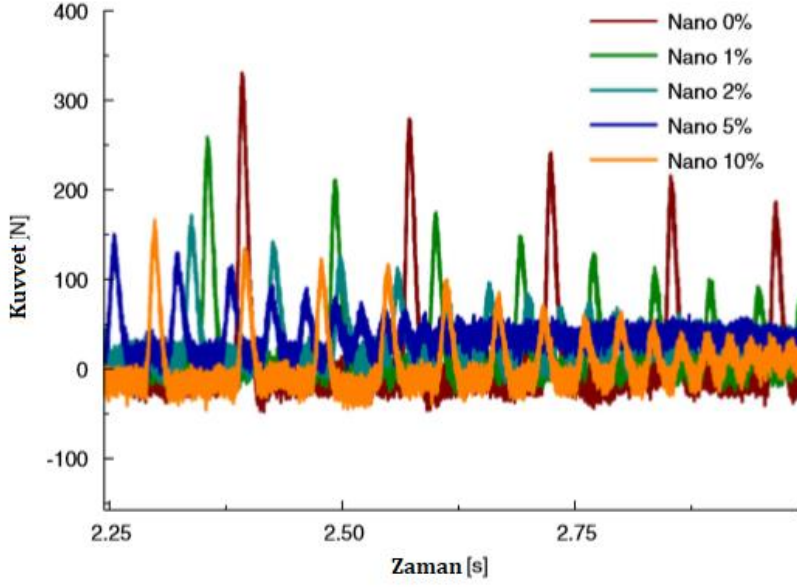
Şekil 4.5. Kuvvetin zamana bağlı değişimi (F-t) grafik eğrileri [92].

Bizde yaptığımız bu tez çalışmamızda, karbon epoksi, karbon epoksi + bor nitrür ve karbon epoksi + karbon nanotüp numune malzemelerinin, uygulanan darbe kuvvetlerinin zamana göre değişimi, tekrarlanan darbe kuvvetlerinin zamana bağlı olarak numunelerin absorbe kabiliyetlerini inceleyip F-t değişim grafiklerini yorumlayacağız.

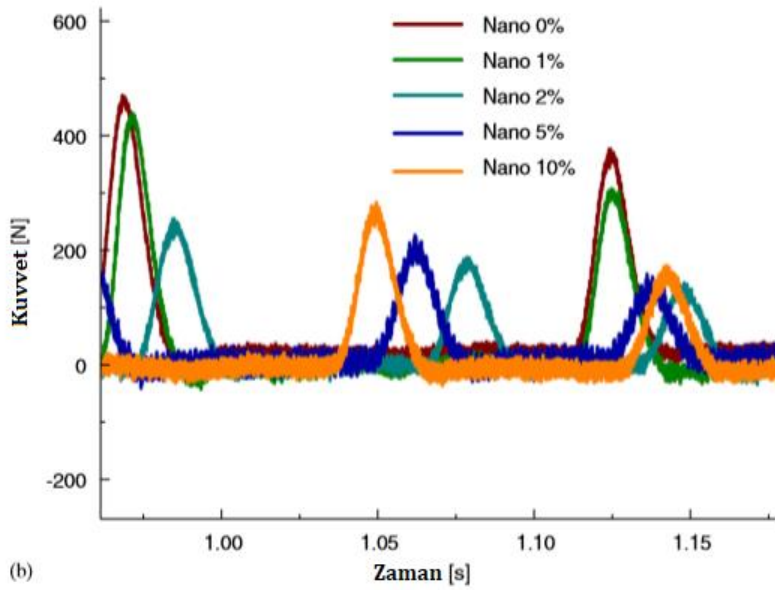
4.4.3. Tekrarlı Darbede Kuvvetin Zamana göre (F-t) Değişim Grafiği

Yapmış olduğumuz tez çalışmamızda karbon nanotüp ve bor nitrür nanopartikül malzeme takviye edilmiş karbon elyaf epoksi borulara uygulanan tekrarlı darbelerin bazı parametreler üzerine etkilerini grafikler üzerinde inceleyip analiz edeceğiz. Bu inceleme ve analiz öncesinde, tekrarlı darbelerin grafiklerine örnek teşkil etmesi açısından Avila ve arkadaşlarının [93] tekrarlı darbelere ait olan grafikleri incelenmiştir. İncelenen çalışmada 150 mm uzunluğunda, 2,4 mm kalınlığında tabaka halinde nanokil katkılı S2 cam/epoksi malzemesini kullanmışlardır. Dört enerji seviyesinde (20, 40, 60, 80 Joule) darbeleri, nanokil oranı yüzde (%) ağırlık olarak 0, 1, 2, 5, 10 içeren numunelere uygulamışlardır. Ancak tekrarlı darbe, 40 J, 60 J ve 80 J enerjilerinde uygulanmış olup grafiklerini çıkarmışlardır. Ek olarak; uygulanan darbe kuvveti ister düşük ister yüksek hızda olsun, fiberler ve matris gibi her bileşenin hasar toleransı için anahtar konunun, kompozit yapının dizaynı olduğunu belirtmişlerdir.

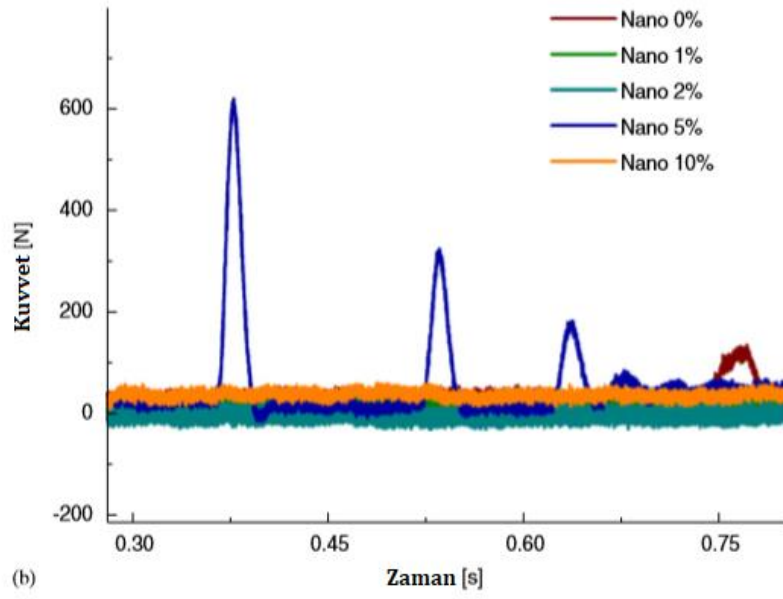
Şekil 4.6.'da 40 Joule ile yapılan tekrarlı darbe analiz grafiği, Şekil 4.7.'de 60 Joule ile yapılan tekrarlı darbe analiz grafiği, Şekil 4.8.'de 80 Joule ile yapılan tekrarlı darbe analiz grafiği gösterilmektedir. Grafik çizgileri sönüm farklılıklarını göstermektedir.



Şekil 4.6. Tekrarlı darbenin 40 Joule enerji yükleme zamanına göre grafiği [93].



Şekil 4.7. Tekrarlı darbenin 60 Joule enerji yükleme zamanına göre grafiği [93].

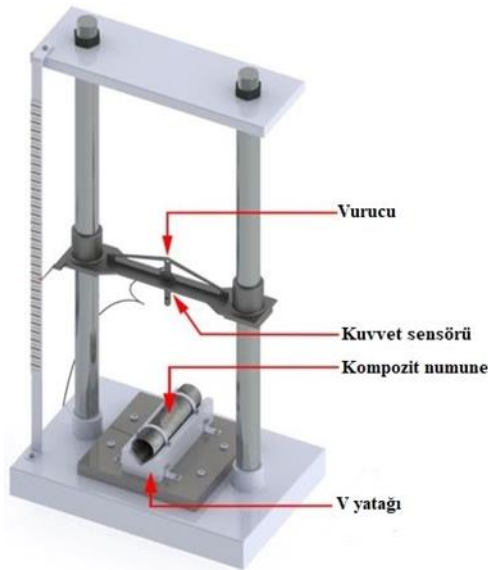


Şekil 4.8. Tekrarlı darbenin 80 Joule enerji yükleme zamanına göre grafiği [93].

5.BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Darbe Testleri

Nanopartikül takviyeli ve takviyesiz karbon elyaf epoksi boru numunelerin darbeye karşı dinamik cevaplarını ve hasar davranışlarını bulabilmek için değişik enerji seviyelerinde deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde yapılan darbe türü, düşük hızlı darbe testidir. Deneylerde kullanılan darbe test düzeneği Şekil 5.1.'de gösterilmiştir [89]. 10 J, 15 J ve 20 J enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe testi gerçekleştirilmiş olup, alınan veriler bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Yapılan deneylerde ilk darbe verileri ve tekrarlı darbe verileri alınmış olup, bu veriler neticesinde temas kuvvetinin zamana, temas kuvvetinin yer değiştirmeye (deplasman) olan etkisi ve enerji-zaman değişimi gibi diğer parametrelerin birbirleriyle olan durumlarına ulaşılmıştır. Kullanılan vurucu cisim, yarı küresel uca sahiptir ve 6,35 kg ağırlıktadır. İç basınçsız ve oda sıcaklığı değerlerinde olmak üzere, vurucu cismin yaptığı darbeler numunelerin tam orta noktasına serbest düşüş yapacak şekilde bırakılmış, uygulanmıştır. Vurucu cisim tutulmamıştır. Numuneler maruz kaldığı darbe enerjisini absorbe edene kadar, bir diğer deyişle vurucu cisim durana kadar, vurucu cisim her bir numunenin üzerinde, tekrarlı şekilde düşük hızda darbelemeye devam etmiştir. Her numune cinsi için üç kere tekrar edilecek biçimde düşük hızda darbe testi gerçekleştirilmiştir. Ulaşılan deney verilerinin içerisinde, aynı tür numune gruplarında ortaya çıkan sonuçların birbirlerine çok yakın olduğu saptanmıştır. Bu sebepten dolayı, iyi bir analiz yapabilmek için grafikleri oluştururken deney sonuçlarından en uygun olan bir tanesi seçilmiştir.



Şekil 5.1. Darbe test düzeneği [89].

5.1.1. Temas Kuvvetinin Zamana Bağlı Değişimi

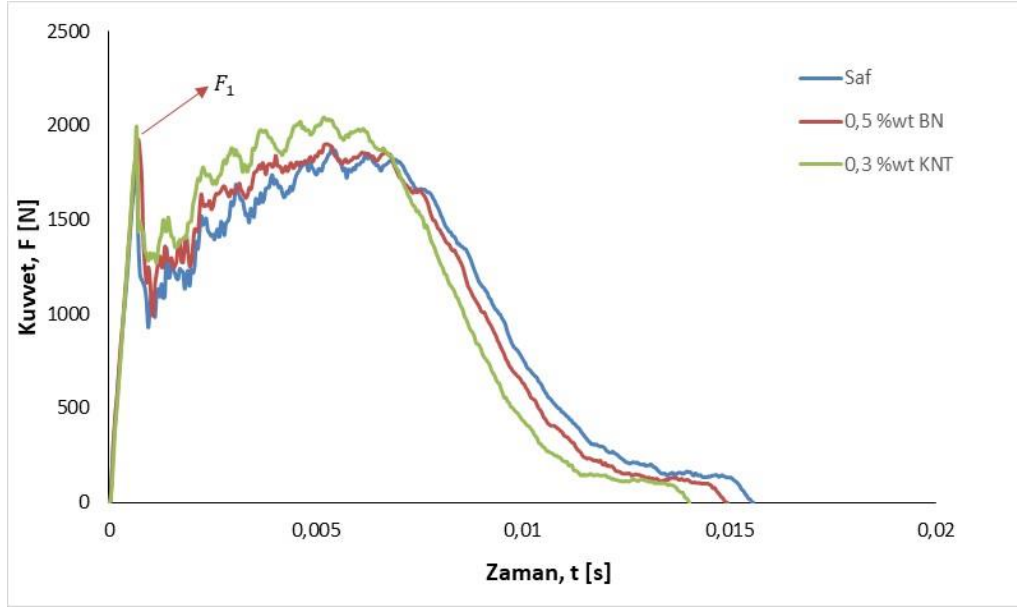
Saf karbon elyaf epoksi ve nanopartikül katkısı yapılmış karbon elyaf epoksi boru numunelerinin, düşük hızdaki darbe uygulamalarına karşı hasar davranışlarının ve dinamik cevaplarının saptanabilmesi için, kuvvet-zaman grafikleri çok önemlidir. 10 J, 15 J ve 20 J'lük çarpma darbe enerjilerine göre, ilk darbe esnasında gelişen, oluşabilecek hasar türlerini ve numunelerin durumlarını, tekrarlı darbe olayının numune üzerinde oluşturduğu dinamik cevapları, elde edilen verilerle oluşturulan kuvvet-zaman grafikleri üzerinde analiz edilmiştir. Ayrıca kuvvet zaman grafikleri, BN ve KNT nano malzeme ilavesinin, karbon elyaf epoksi boruların karakteristikleri üzerindeki etkilerini saptanmasına katkı sağlamıştır. Numuneler üzerine kuvvetin temas ettiği anda, malzeme üzerinde gözle görülür ya da görülmez hasar mekanizmaları meydana gelmeye başlayacaktır. Numune üzerinde delinme, saplanma gibi gözle görülen hasar durumları söz konusu değil ise, kuvvet-zaman grafiklerinde kuvvetin artan kısmındaki salınımlar numuneler üzerindeki hasarları göstermektedir. Enerji yutma kabiliyeti en yüksek olan numune, kuvvet ekseninde en kısa sürede sifıra ulaşmış olan numune olacaktır. Böylelikle hangi malzeme içeriğinin enerji yutma kabiliyetine olumlu katkı sağlayacağı belirlenmiş olacaktır.

5.1.1.1. İlk Darbe İçin Temas Kuvvetinin Zamana Bağlı Değişimi

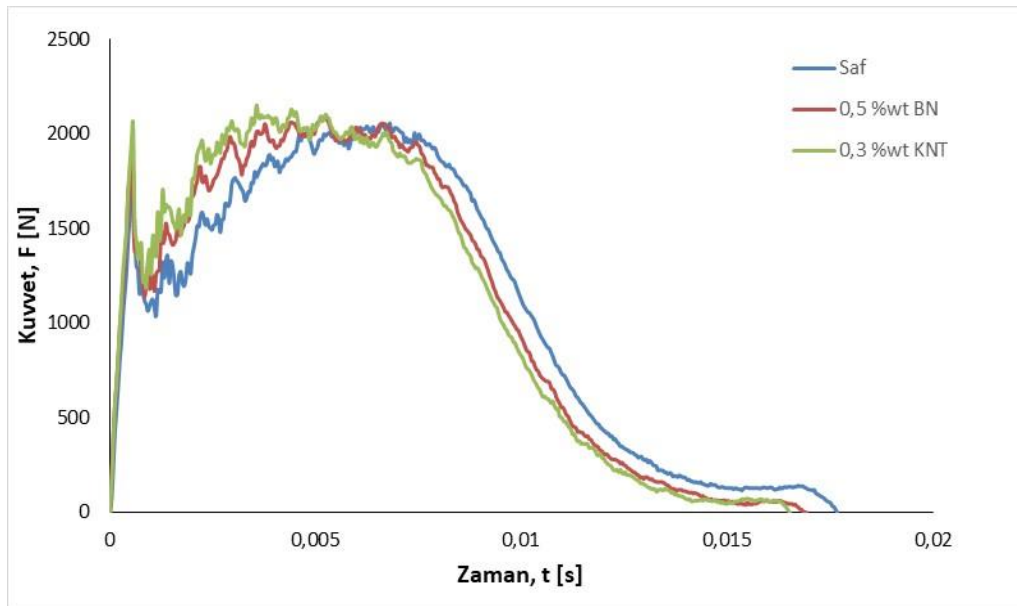
Düşük hızlı darbeye maruz kalan malzemelerde çarpma hızı ve çarpma enerjisi ile malzemede oluşan hasar arasında ilişki kurabilmek için numunenin ilk darbeye vermiş olduğu cevap önemlidir ve her zaman kritik olmuştur. Ayrıca herhangi bir darbe durumunda ilk darbe esnasında, çarpma etkisinin olduğu nokta üzerinde saplanma ya da delinme olması ve çarpma etkisinin etrafındaki bölgelerde de ciddi sorunların teşkil etmesi, ilk darbe olayının önemli olduğunu açıklamaktadır. İlk darbenin malzeme ya da sistem üzerinde kalıcı hasarlar bırakmaması için gerekli önlemler alınmalıdır. Bu önlemler içinde kuvvet-zaman grafiklerinden yola çıkarak bazı analizler, çıkarımlar yapmak hasar konusunun çözümü için yararlı olacaktır. Bölüm 3.7.'de darbe sonucunda oluşan hasar durumları incelendi. Bu hasar durumları başlıca olarak matris hasarı, delaminasyon ve elyaf hasarlarıydı. Belirtilen hasar durumları ilk darbe esnasında malzeme üzerinde oluşmaya başlamaktadır. Bu hasarların ne derecede oluştuğu, darbe kuvvetine, darbe enerjisine ve malzemelerin türüne bağlı olmaktadır.

10 J enerji seviyesi için Şekil 5.2, 15 J enerji seviyesi için Şekil 5.3. ve 20 J enerji seviyesi için Şekil 5.4.'te; saf, %0,3 ağırlık oranında KNT ve %0,5 ağırlık oranında BN takviye edilmiş boruların ilk darbe gerçekleştiğinde elde edilen kuvvet-zaman değişimleri verilmiştir.

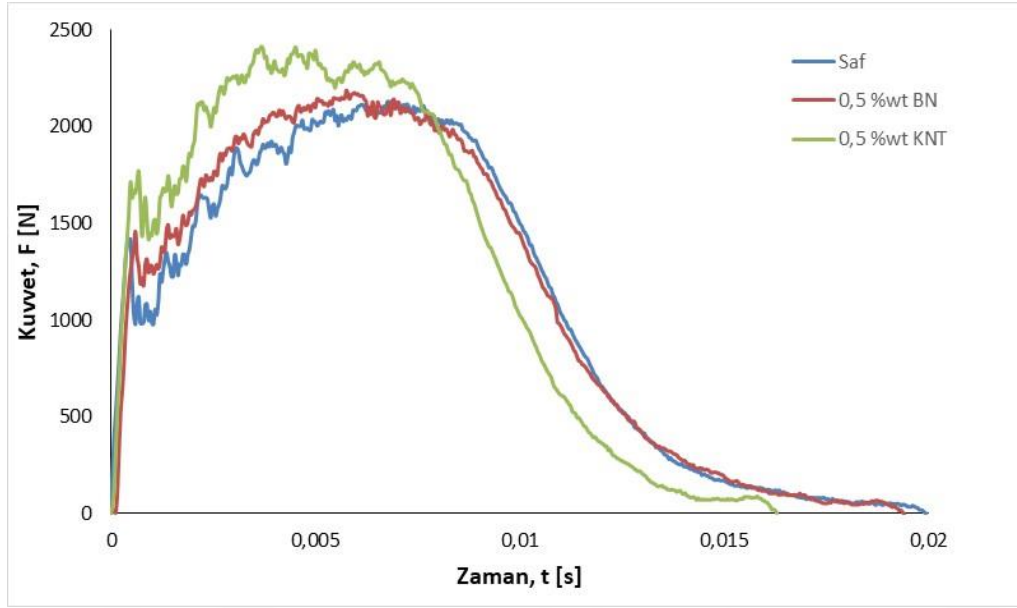
Kuvvet zaman eğrisinde kuvvet hızla artarken belirli bir değere ulaştığında aniden düşmektedir. Bu değer Şekil 5.2.'de, 10 J enerji seviyesinde ilk darbe kuvvet-zaman grafiğinde F_1 olarak gösterilmiştir. F_1 kuvveti fiziksel olarak hasar başlangıcını temsil etmez. Çünkü darbe esnasında kritik olmayan matris çatlağı ve küçük delaminasyonlar daha düşük kuvvet değerinde oluşmuş olabilir. F_1 kuvveti numunenin rijitlik karakteristiğindeki değişimin başlangıç değerini ifade eder [94].



Şekil 5.2. 10 J enerji seviyesinde ilk darbe kuvvet-zaman (F-t) grafiği.



Şekil 5.3. 15 J enerji seviyesinde ilk darbe kuvvet-zaman (F-t) grafiği.



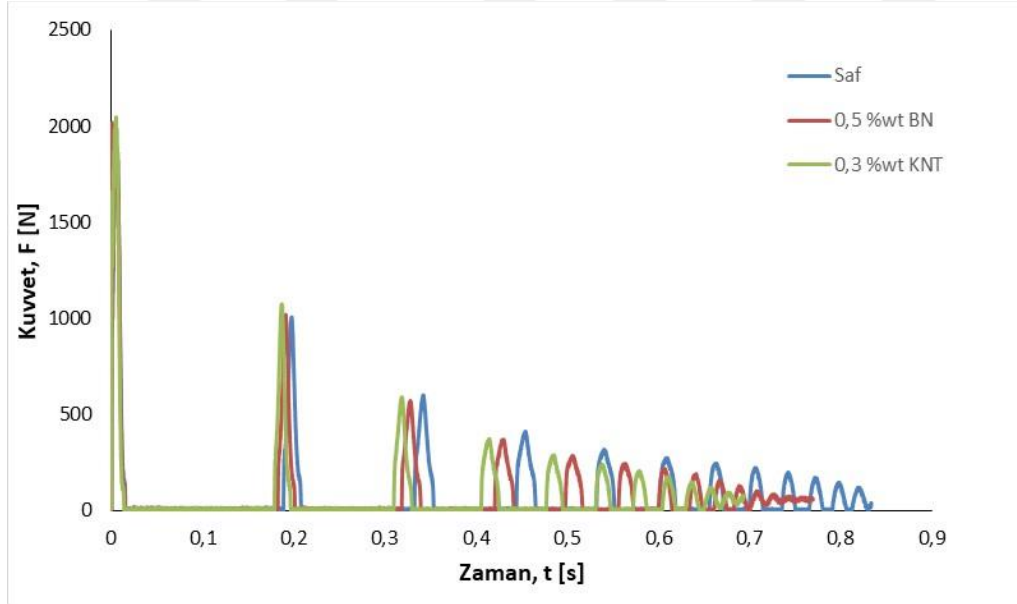
Şekil 5.4. 20 J enerji seviyesinde ilk darbe kuvvet-zaman (F-t) grafiği.

İlk darbenin 10, 15, 20 Joule'lük kuvvet-zaman değişimleri incelendiğinde; Belirlenip uygulanmış olan üç enerji seviyesinde de kompozit numunelere nanopartikül ilave edilmesiyle birlikte en büyük temas kuvveti değerinin arttığı görülmektedir. Bu artış KNT takviye edilmiş boruda daha yüksek oranda gerçekleşmiştir. Ayrıca ilk darbenin tüm enerji seviyesindeki deneylerinde nanopartikül takviye edilmiş numunelerinde en büyük temas kuvvetine ulaşma süresi daha düşük olmuştur. Bu durum nanopartikül ilavesinin numune rijitliğini arttırdığına işaret etmektedir. KNT takviye edilmiş numunelerde rijitlik artışı daha fazla olmuştur. BN katkılı numunelerin saf numunelerden çok daha rijit olduğu saptanmıştır. Nanopartikül takviyeli kompozit numunelerin F_1 değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Kuvvet-zaman eğrisinde, kuvvetin artan kısmındaki salınımlar numunelerdeki hasara işaret etmektedir. Enerji seviyesi arttıkça, kuvvetin artan kısmındaki salınımların şiddeti doğru orantılı olarak artmıştır. Bunun anlamı ise, uygulanan enerji şiddeti arttıkça, meydana gelen hasar miktarı da artmıştır.

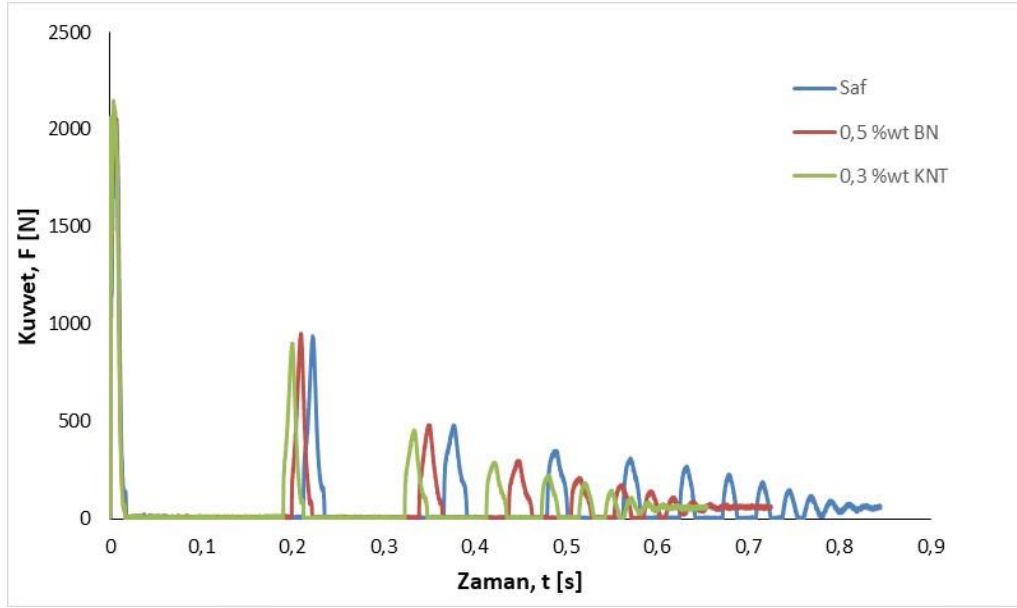
Tek darbeye gerçekleşen düşük hızlı darbe testinden elde edilen grafikler, enerji absorbe kabiliyeti konusu hakkında önemli katkı sağlamışlardır. Ulaşılan veriler neticesinde tekrarlı darbenin darbe sönümlenme kabiliyetiyle ilgili kritik öngörülerin saptanmasına neden olmuştur. Şekil 5.2. , Şekil 5.3. ve Şekil 5.4. ilk darbe grafiklerinde görüldüğü üzere, darbe sönümlenme zamanları birbirlerine çok yakın olmasına rağmen, ilk darbeyi en çabuk sönümleyen numune, KNT içerikli numune olmuştur. BN ise Saf numuneye göre daha çabuk darbe sönümlemesi yapmıştır.

5.1.1.2. Tekrarlı Darbe İçin Temas Kuvvetinin Zamana Bağlı Değişimi

Hangi sebeple olursa olsun tekrarlı darbenin meydana gelmesi, malzemeler üzerinde çeşitli hasarlar oluşturur ve tekrarlandığı için hasarı büyütür. Boru tipi malzemelerde de bu durum geçerlidir. Bu sebeplerden dolayı, tekrarlı darbe olayının saptanması ve analizi çok önemlidir. Yapılan tez çalışmasında tekrarlı darbeye alakalı gerekli durumlar incelenmiştir. 10 J enerji seviyesi için Şekil 5.5. , 15 J enerji seviyesi için Şekil 5.6. ve 20 J enerji seviyesi için Şekil 5.7.'de; saf, %0,3 ağırlık oranında KNT ve %0,5 ağırlık oranında BN takviye edilmiş boruların tekrarlı darbe gerçekleştiğinde elde edilen kuvvet-zaman değişimleri verilmiştir. Vurucu kütle deney numunesi üzerinde serbest düşmeye bırakılmış ve duruncaya kadar tüm veriler kaydedilmiştir. Her bir numunenin darbe enerji seviyesi ve bağlama koşulları aynı olmasına rağmen darbeyi sönümleme durumları farklılık göstermiştir.

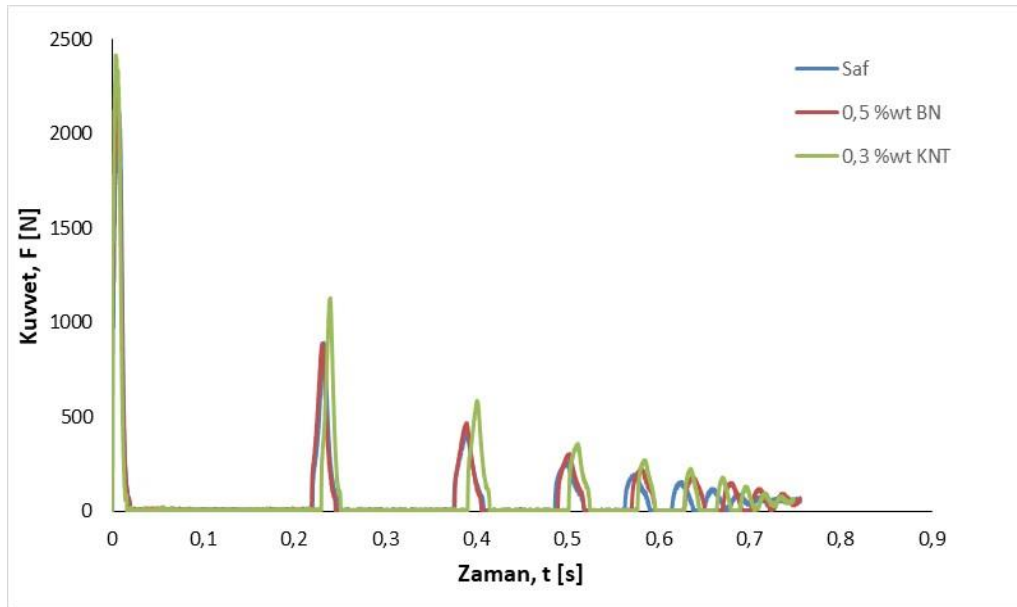


Şekil 5.5. 10 J enerji seviyesinde tekrarlı darbe kuvvet-zaman (F-t) grafiği.



Şekil 5.6. 15 J enerji seviyesinde tekrarlı darbe kuvvet-zaman (F-t) grafiği.

10 J ve 15 J için yapılan tekrarlı darbe deneylerinden elde edilen verilerde, numunelere nanopartikül ilave edilmesiyle darbeyi sönümleme kabiliyetinin arttığı grafikten açıkça görülmektedir. Epoksi içerisine nanopartikül takviyesi numunelerin rijitliğinde artış meydana getirmiştir. Numunelerin rijitliğinde meydana gelen artışa rağmen enerji yutma kabiliyeti arttığı için darbeyi sönümlemesi daha kısa sürede gerçekleşmiştir. KNT ilave edilmiş numunelerin saf ve BN takviyeli numunelere göre daha fazla darbe sönümlendiği grafikten anlaşılmaktadır.



Şekil 5.7. 20 J enerji seviyesinde tekrarlı darbe kuvvet-zaman (F-t) grafiği.

20 J'de yapılan tekrarlı darbe deneyinde ise farklı bir durum ortaya çıkmıştır. Epoksi içerisine nanopartikül takviyesinin numunelerdeki rijitlik artışına sebep olma durumu değişmemiştir. Fakat BN ve saf numunelerin enerji yutma kapasitesi KNT'den üstün gibi görülmektedir. Bu durum şöyle açıklanabilir. Darbe enerjisi 20 Joule gibi yüksek enerji seviyesine ulaşınca, saf numunede meydana gelen hasar arttığından dolayı darbe sönümleme süresi daha kısa olmuştur. Bundan dolayı saf numunede tekrarlı darbe sayısı grafik üzerinde daha az görülmektedir. Saf numunede enerjinin geri sekme durumu az olmuştur. Uygulanan darbe enerjisi miktarı saf numune tarafından yüksek miktarda absorbe ediliyor gibi görünse de, bu yüksek miktardaki enerji, hasar oluşumunda rol almıştır.

20 Joule darbe enerjisinde BN ve KNT numunelerin enerji yutma kapasiteleri birbirine yakındır ve hasar oranları saf numuneye göre daha düşük olduğu için tekrarlı darbenin sekmesi daha fazla olmuştur. Yani nano katkılı numunelerde hasar oranı daha düşüktür, düşük hasara rağmen enerji yutma kapasitesi iyi bir düzeydedir ve darbe enerjisini vurucunun numune yüzeyinde geri sekmesiyle harcamışlardır.

5.1.1.3. Nanopartikül Takviyesinin Temas Kuvveti Zaman Değişimine Etkisi

Tüm enerji seviyelerinde yapılan düşük hızda tek ve tekrarlı darbe testleri neticesinde, nanopartikül takviye edilmiş numunelerde en büyük temas kuvvetine ulaşma süresi daha düşük olmuştur. Nanopartikül ilave edilmiş numunelerde, en büyük temas kuvvetine ulaşma süresi kısa olduğundan dolayı, rijitliğin de arttığı belirlenmiştir. 10, 15 ve 20 Joule'de ki temas kuvveti zaman grafiklerinde, saf numunelere BN ve KNT nanopartikülleri eklendikçe rijitliğin de arttığı gözlemlenmiştir.

10, 15 ve 20 Joule'de yapılan düşük hızlı darbe deneylerinde ilk darbe uygulamasında elde edilen veriler doğrultusunda nanopartikül katkısının numuneler üzerinde enerji yutma kapasitesini arttırdığı görülmektedir.

Tekrarlı darbenin analizinde ise, 10 ve 15 Joule enerji seviye uygulamasında, boru numunelerine nanopartikül katkısı enerji yutma kabiliyetini artırmıştır. Nano katkılı numuneler tekrarlanan darbe enerjisini saf numuneye göre daha kısa sürede sönümlemiştir. En iyi performansı KNT katkılı numune göstermiştir.

20 Joule enerji seviyesinde uygulanan tekrarlı darbeye ise durum daha değişik bir haldedir. Tekrarlı darbeleri en kısıda sönümleyen numune saf numune gibi görülmektedir. Ancak 20 Joule yüksek darbe enerjisinde, saf numune yutmuş olduğu enerjinin büyük bir kısmını hasar oluşumuna harcamıştır. Hasar artışından dolayı vurucunun geri sekme enerjisi düşüktür, grafikte saf numune tekrarlı darbe sayısı azdır. Nano katkılı numunelerde hasar oranı düşük olarak gözlemlenmiştir ve enerji yutma kapasitesi daha iyi seviyededir. İlaveten 20

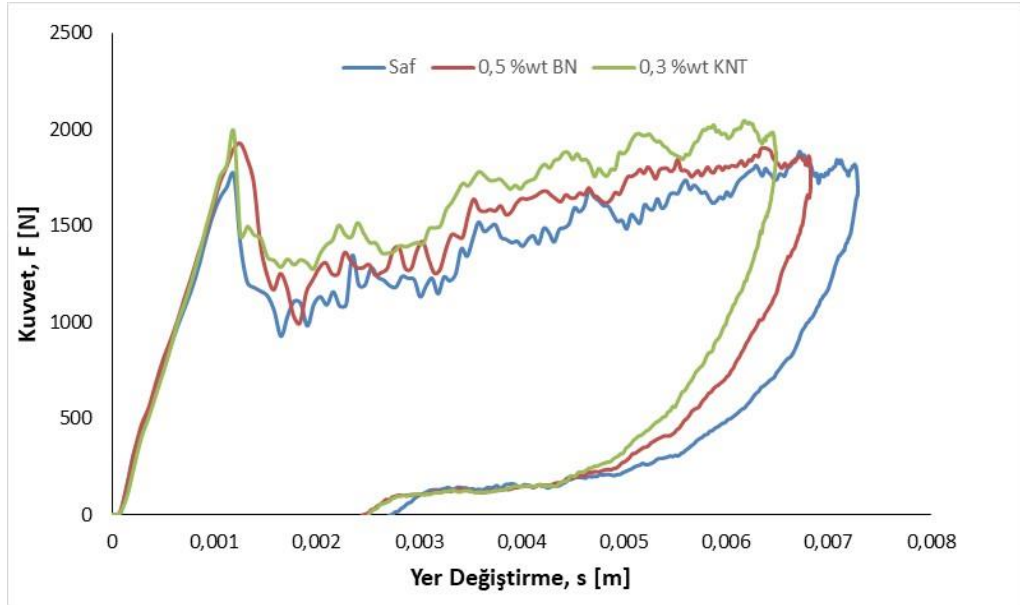
Joule'de nano katkılı numuneler saf numuneye göre yutmuş oldukları enerjinin daha büyük bir bölümünü vurucunun geri sekmesi için harcamışlardır.

5.1.2. Temas Kuvveti Yer Değiştirme (Deplasman) Değişimi

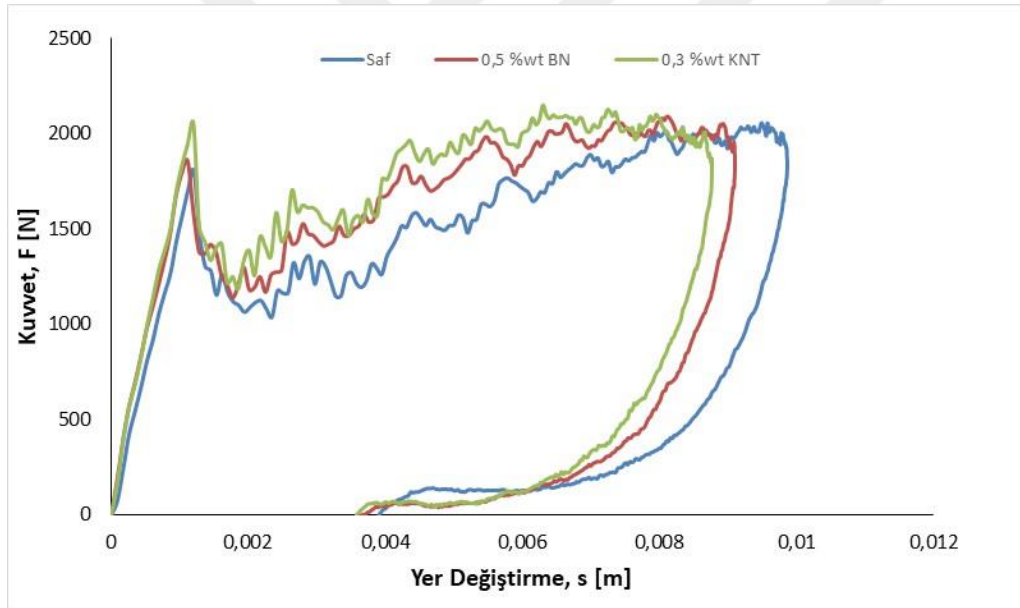
10, 15 ve 20 Joule enerji seviyesinde yapılan düşük hızlı darbe testleri neticesinde, nano katkılı ve nano katkısız saf karbon elyaf epoksi boru numuneleri üzerinde oluşan çökmenin, yer değiştirmenin ya da deplasman olarak adlandırılan durumun analizi yapılmıştır. Darbeye maruz kalan numuneler üzerinde meydana gelen hasar seviyelerini belirlemede, yer değiştirme durumunun tespitinin bize oldukça yararlı olacağı anlaşılmıştır. İç basınçsız ve oda sıcaklığında gerçekleşen testin verileri elektronik ortamda depolanmıştır. Nanopartikül katkısının numuneler üzerindeki yer değiştirme durumuna etkileri incelenmiştir.

Kuvvet yer değiştirme eğrileri darbe olayında darbe davranışlarını belirlemek için incelenen grafiklerdendir. Bu grafikler artan darbe enerjisi yüklemesinde, kuvvetin yer değiştirme değişimini gösteren grafiklerdir. Her eğrinin temel aşamaları mevcuttur. Bu aşamalar; yükleme esnasında artma kısmına, ulaşılan en büyük kuvvet değerine ve yükten boşaltma esnasında azalma kısmına sahiptir. Kuvvet yer değiştirme eğrilerinde darbe yüklemesinde, yükleme artma kısmında numunenin göstermiş olduğu bir direnç mevcuttur. Bu direnç eğilme rijitliği olarak isimlendirilmektedir. Numunelerdeki hasarın meydana gelişi ve plastik hasar bölgesine geçiş durumu yükleme bölümünde gözükken eğim değişimiyle bağlantılıdır. Açık veya kapalı olmak üzere iki çeşit kuvvet yer değiştirme grafikleri bulunmaktadır. Bu grafikler darbe enerjisinin artışıyla meydana gelir. Kuvvet yer değiştirme eğrisi açık grafikse delinme veya saplanma durumu gerçekleşmiştir. Vurucu cisim numuneye çarptıktan sonra, numune yüzeyinde geri sekiyorsa bu tip eğrilere kapalı tip eğriler denilmektedir. Bu durum tatbik edilen darbe enerjisinin birçoğunu numunenin yuttuğunu, yutulamayan kısmınınsa vurucunun geri sekmesi için kullanıldığını açıklamaktadır. Kapalı eğride ki genişliğin artmasıysa meydana gelen yer değiştirme değişimi saptanabilir. Absorbe edilen enerji miktarının belirlenmesi kuvvet yer değiştirme grafiklerinden de mümkündür. Grafiğin alt kısmında kalan alanlar absorbe edilen enerji düzeyini belirlemektedir [92].

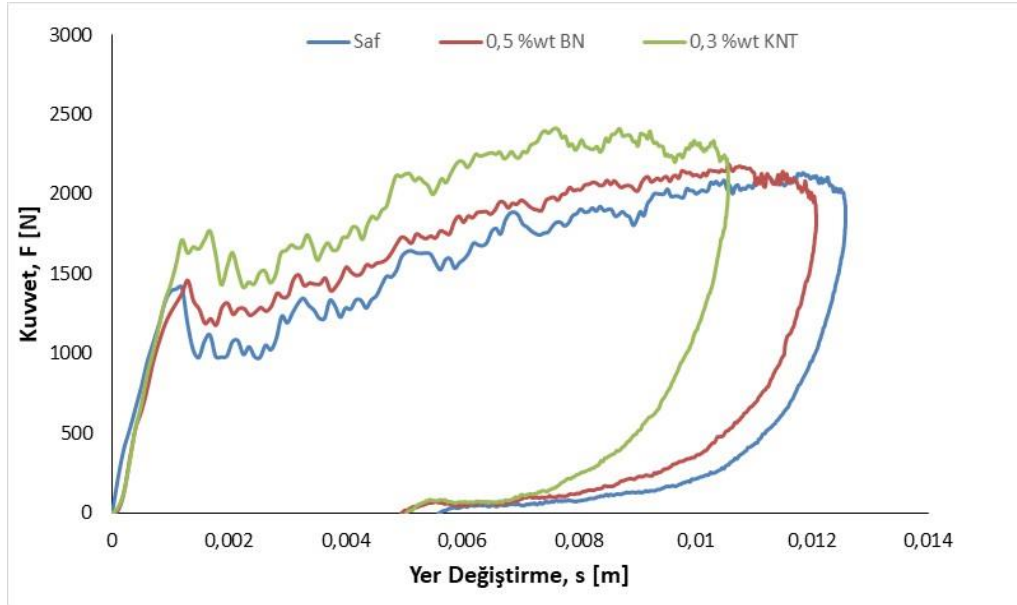
10 J enerji seviyesi için Şekil 5.8. , 15 J enerji seviyesi için Şekil 5.9. ve 20 J enerji seviyesi için Şekil 5.10.'da; saf, %0,3 ağırlık oranında KNT ve %0,5 ağırlık oranında BN takviye edilmiş boruların düşük hızda darbe testi gerçekleştirildiğinde elde edilen temas kuvveti-yer değiştirme değişimleri verilmiştir.



Şekil 5.8. 10 J enerji seviyesinde temas kuvveti-yer değiştirme (F-s) grafiği.



Şekil 5.9. 15 J enerji seviyesinde temas kuvveti-yer değiştirme (F-s) grafiği.



Şekil 5.10. 20 J enerji seviyesinde temas kuvveti-yer değiştirme (F-s) grafiği.

Elde edilen kuvvet yer değiştirme grafiklerinin kapalı tip olduğu açıkça görülmektedir. Çünkü deney esnasında numuneler üzerinde hiçbir delinme ve saplanma durumları oluşmamıştır. Uygulanan darbe enerji seviyesi arttıkça bütün numunelerin çökmesi, yer değiştirmesi doğru orantılı olarak artmıştır. 10, 15 ve 20 Joule enerji seviyelerindeki grafik genişliklerine bakılarak en çok yer değiştirmeye uğrayan numunenin saf numune olduğu görülmektedir. Çünkü tüm enerji seviyelerinde en geniş grafik saf numuneye aittir. Dolayısıyla en çok yer değiştirmeye, çökmeye maruz kalan numune saf numune olmuştur.

10, 15 ve 20 Joule enerji seviyelerinde oluşturulan grafiklerde, BN ve KNT içerikli numuneler arasında, grafik genişliği daha fazla yani en çok yer değiştirmeye uğrayan BN içerikli numuneler olmuştur. KNT katkılı numuneler BN'ye göre daha az çökmeye uğramıştır.

5.1.2.1. Nanopartikül Takviyesinin Temas Kuvveti Yer Değiştirme Değişimine Etkisi

Karbon elyaf epoksi numunelere nanopartikül katkısı yapıldıkça, katkılı numunelerin rijitliğinin artmasına rağmen, enerji yutma kabiliyetleri artmıştır. Numunelerin enerji yutma kabiliyetleri arttıkça, yer değiştirme değişimleri de pozitif olarak etkilenmiştir. Yani, BN ve KNT katkılı numuneler darbeye maruz kalınca, saf numuneye göre daha az çökmeye maruz kalmışlardır. Bu durum, nanopartikül takviyesinin malzeme kabiliyetlerini geliştirdiğinin göstergesi olmuştur. Olası gerçekleşecek darbe durumlarında malzeme üzerindeki hasarın, çökme-yer değiştirme durumunun, nanopartikül katkılı borularda daha az olacağı saptanmıştır.

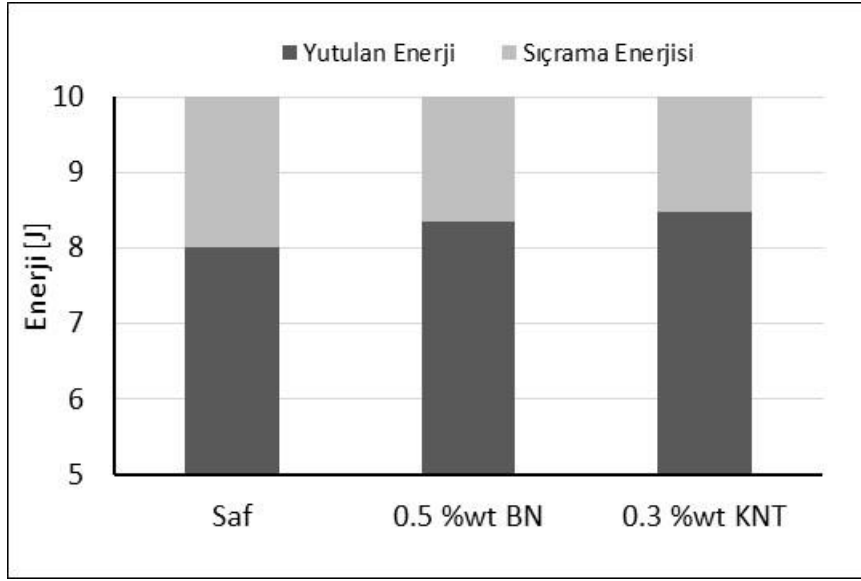
5.1.3. Düşük Hızlı Tekrarlı Darbede Enerji Dağılımı ve Hasar Bölgeleri

5.1.3.1. Nanopartikül Takviyesinin Enerji Yutma Kapasitesine Etkisi

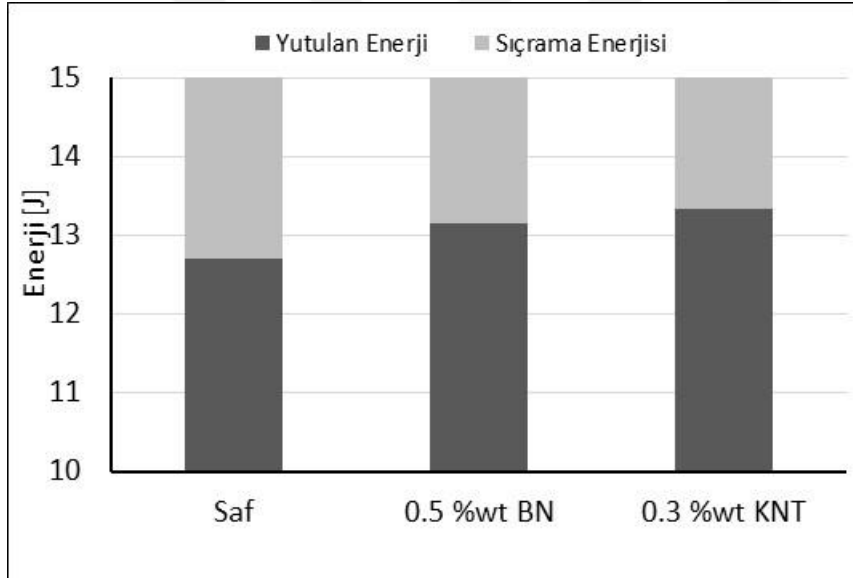
Darbe olayının meydana gelmesi için, vurucu cisimde belli bir seviyede enerjinin mevcut olması ve bu enerjinin malzeme üzerinde kullanılması gerekmektedir. Belirtilen bu darbe enerjisi sadece malzeme üzerinde hasar oluşumunda harcanmamaktadır. Düşük hızlı darbe olayında vurucu cisim belli bir potansiyel enerjiye sahiptir. Vurucu cisim serbest düşme yapmadan önce, serbest düşme yaparken ve darbe olayını gerçekleştirirken sahip olduğu darbe enerjisini bazı mekanizmalara harcamaktadır. Bu mekanizmalar şunlardır. Sıçrama enerjisi, kuvvet algılayıcıda tüketilen enerji, vurucuda harcanan enerji, mesnet sisteminde harcanan elastik enerji, bağlama noktasında kayma enerjisi ve parçaya aktarılan enerjisidir (Parçada harcanan elastik enerji + Hasar enerjisi). Vurucu cisim Ç4140 malzemesinden yapılmıştır ve 63 Rc sertlik seviyesindedir. Vurucunun elastik şekil değiştirme oranı test numunesine göre daha düşük olduğu için burada harcanan enerji ihmal edilmiştir. Ayrıca bağlama aparatı ve alt tabla düzeneği de test numunesine oranla ağır ve rijit olduğundan dolayı, elastik deformasyona harcanan enerji seviyesi numune üzerine harcanan enerjiye oranla çok azdır ve bu yüzden ihmal edilmiştir. Test numunesi, bağlama aparatına sıkı bir şekilde bağlanmıştır. Böylelikle numunenin kayma ihtimalinin önüne geçilmiştir. Vurucu cismin hareketinin sağlandığı ray ve lineer yatak sistemi 0.001 mm hassasiyet ile işlemektedir. Bu yüzden yatakta gerçekleşen sürtünme kayıpları dikkate alınmamıştır. Çok düşük ve önemsiz enerjiler göz ardı edildikten sonra toplam enerji iki şekilde incelenmektedir. Bunlar numuneye aktarılan enerji ve sıçrama enerjisidir. Numuneye aktarılan enerji, şekil değiştirme enerjisi ve hasar enerjisi olarak tüketilmektedir [36].

Yapılan analizler neticesinde, temas kuvveti yer değiştirme grafiklerinin altında kalan alanın, numune üzerindeki yutulan enerjiyi yani numune üzerinde yapılan işi verdiği belirtilmiştir. Tespit edilen numuneye aktarılan enerji ve sıçrama enerjisi, temas kuvveti yer değiştirme grafiklerinden yola çıkılarak belirlenmiştir.

10 J enerji seviyesi için Şekil 5.11, 15 J enerji seviyesi için Şekil 5.12. ve 20 J enerji seviyesi için Şekil 5.13.'te; saf, %0,3 ağırlık oranında KNT ve %0,5 ağırlık oranında BN takviye edilmiş boruların düşük hızda darbe testi gerçekleştirildiğinde elde edilen enerji dağılım grafikleri verilmiştir.



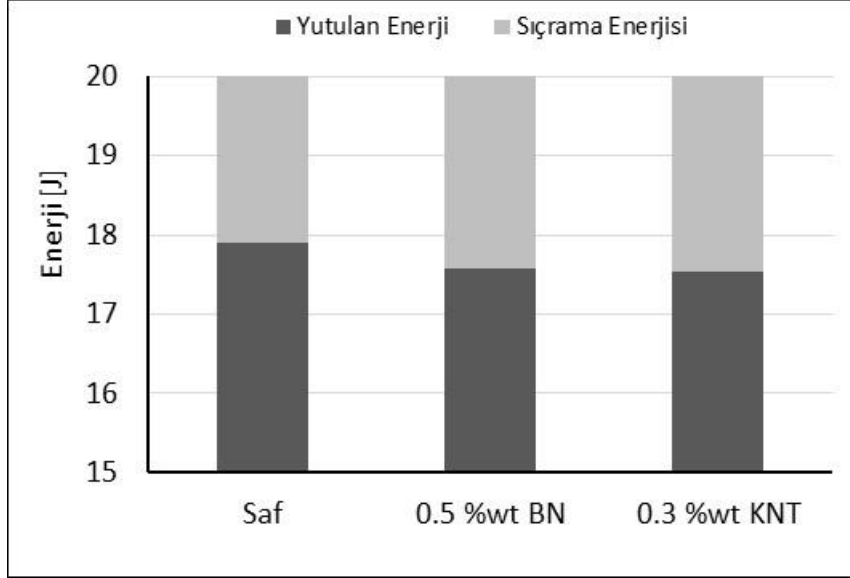
Şekil 5.11. 10 J darbe enerjisi seviyesinde enerji dağılımı grafiği.



Şekil 5.12. 15 J darbe enerjisi seviyesinde enerji dağılımı grafiği.

KNT içerikli numuneler 10 J darbe enerjisinde, 8,47685 J, 15 J darbe enerjisinde ise 13,3279868 J enerji yutmuştur. BN içerikli numuneler 10 J darbe enerjisinde, 8,33911 J, 15 J darbe enerjisinde ise 13,143564 J enerji yutmuştur. Saf karbon elyaf epoksi numuneler ise, 10 J darbe enerjisinde, 8,00036 J, 15 J darbe enerjisinde ise 12,699746 J enerji yutmuştur. Bu verilerden elde edilen sonuçlara göre; 10 ve 15 Joule enerji seviyelerinde karbon nanotüp nanopartikül içeren numunelerin enerji yutma kapasitesi, bor nitrür nanopartikülleri içeren numunelere ve saf numunelere göre daha yüksek olarak belirlenmiştir. Bor nitrür nanopartikül içerikli numunelerin enerji yutma kapasiteleri ise saf numuneye oranla daha yüksek olarak belirlenmiştir.

Sıçrama enerjisi ise yutma enerjisiyle bağlantılıdır. Darbenin toplam enerjisinin bir kısmı, malzeme tarafından yutulur. Yutulan enerjinin ardından kalan enerji miktarı ise vurucu cismin sıçrama enerjisi olarak harcanır. Saf numunelerde sıçrama enerjisi, nanopartikül katkılı numunelere oranla daha yüksek olmuştur. Bunun sebebi ise saf numunelerin enerji yutma kapasitesinin nanopartiküllü numunelerden daha düşük olmasıdır.



Şekil 5.13. 20 J darbe enerjisi seviyesinde enerji dağılımı grafiği.

20 Joule darbe enerji seviyesinde; KNT içerikli numune 17,526028 J, BN içerikli numune 17,571847 J ve saf numune 17,890225 J enerji yutmuştur. KNT ve BN numunelerinin enerji yutma kapasiteleri birbirlerine yakın görülmektedir. KNT ve BN nanopartikül katkılı numunelerin darbe yutma özellikleri 20 J darbe enerjisinde benzer çıkmıştır. 20 J darbe enerjisinde saf numunenin enerji yutma kapasitesi nanopartikül katkılı numunelerden daha fazla çıkmıştır. Bunun nedeni ise; 20 J'lük darbe enerjisine maruz kalan saf numune, bu enerjiyi hasar oluşumuna harcamıştır. Numune üzerinde geri dönüşü olmayan ciddi hasarlar meydana gelmiştir. Hasar oluşumu yüksek olduğundan dolayı, saf numunenin 20 Joule'de yüksek enerji yutma özelliğinin anlamı kalmamaktadır.

20 Joule darbe enerjisinde sıçrama enerjisi ise BN ve KNT nano katkılı numunelerde daha fazla çıkmıştır. Hasar oluşumundan dolayı saf numunenin sıçrama enerjisi, nano katkılı numunelere oranla daha az görülmektedir.

Numune cinsi ve numunenin maruz kaldığı darbe enerjisi seviyesine göre bazı değerler saptanmıştır. Bu değerler; darbe hızı, maksimum temas kuvveti, temas süresi, en büyük deplasman değeri, impuls kuvveti ve absorbe edilen enerji miktarlarıdır. Tekrarlı darbe deneylerinden elde edilen bazı değerler Çizelge 5.1.'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1. Tekrarlı darbe deneylerinden elde edilen değerler.

Numune cinsi	Darbe enerjisi (J)	Darbe Hızı (m/s)	Maksimum temas kuvveti (N)	Temas süresi (ms)	En büyük deplasman değeri (mm)	İmpuls kuvveti (N.s)	Absorbe edilen enerji (J)
Karbon elyaf epoksi (Saf)	10	1,7748	1889	15,6	2,698	16,11797	8,00036
	15	2,1736	2056	17,68	3,9001	19,088983	12,699746
	20	2,5098	2136	19,92	5,592	21,113083	17,890225
BN	10	1,7748	1928	14,96	2,4397	16,000282	8,33911
	15	2,1736	2091	16,92	3,6509	18,658479	13,143564
	20	2,5098	2187	19,4	4,8915	21,489963	17,571847
KNT	10	1,7748	2046	14,04	2,5029	15,811616	8,47685
	15	2,1736	2149	16,52	3,5759	18,546790	13,3279868
	20	2,5098	2418	16,28	5,0405	21,310753	17,526028

5.1.3.2. Tekrarlı Darbe Sonucunda Meydana Gelen Hasar Bölgelerinin Analizi

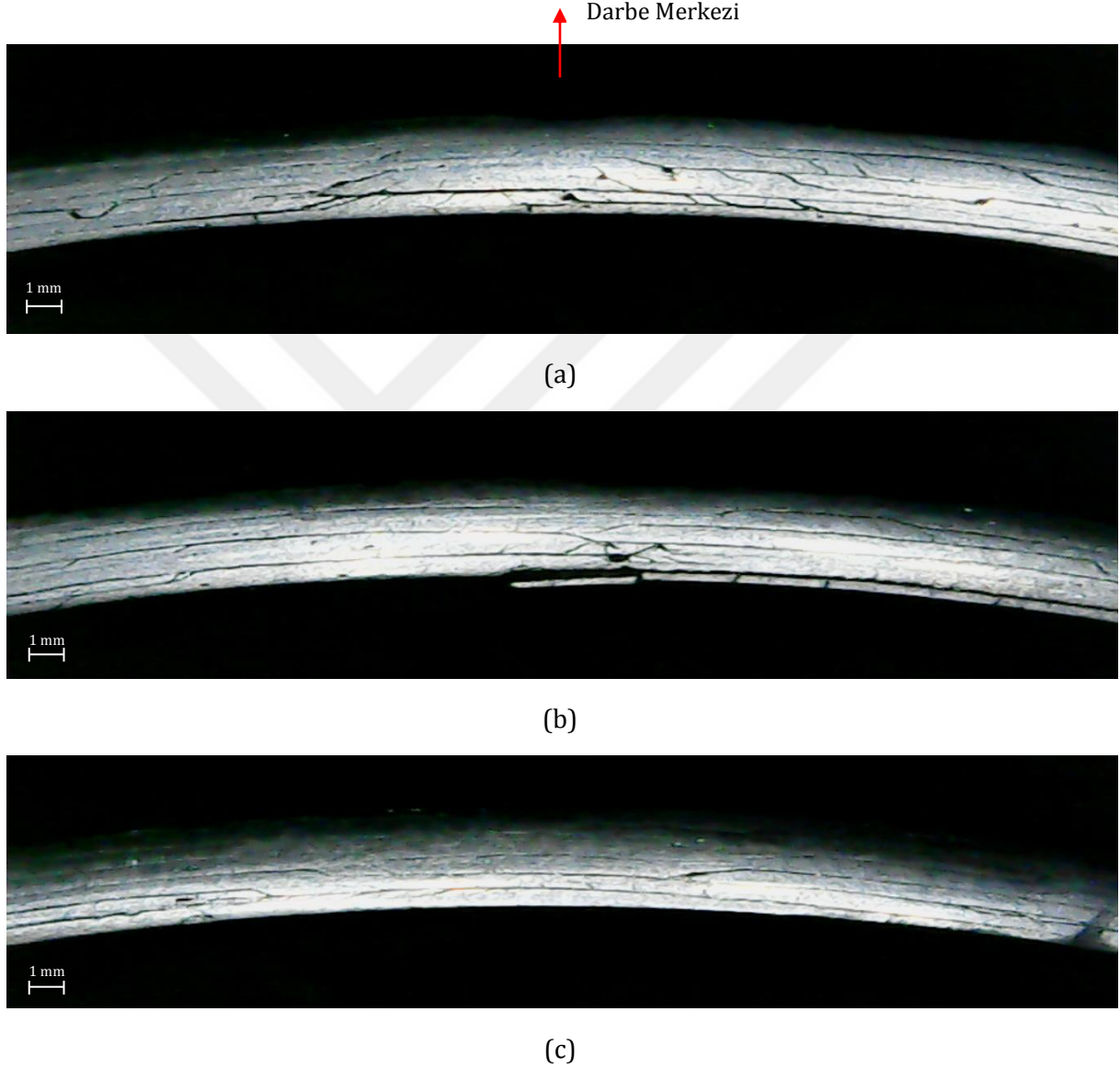
Nanopartikül katkılı (BN ve KNT) ve katkısız saf Karbon Elyaf Epoksi Kompozit borularına, 10 J, 15 J ve 20 J'de tekrarlı darbe uygulanmıştır. Tekrarlı darbeler neticesinde numuneler üzerinde hasarlar meydana gelmiştir. Hasarların saptanabilmesi için numuneler hazırlanmıştır.

Mikroskop altında, numune boyut oranları aynı olacak şekilde fotoğraflanması yapılmıştır. Fotoğraflama işlemi yapılırken, numuneler üzerindeki ışık oranları, yönleri stabildir. Enine hasar bölgelerinin mikroskop merceğine uzaklığı hep sabit olarak tutulmuştur.

Şekil 5.14. , 5.15. ve 5.16.'da saf karbon elyaf epoksi, BN nano katkılı ve KNT nano katkılı karbon elyaf epoksi boruların enine kesit hasar bölgeleri görülmektedir. Tekrarlı darbe enerjileri sırasıyla; 10 J, 15 J ve 20 J olarak uygulanmıştır. Darbe enerjilerinin artmasıyla birlikte, hasar oranlarının ve hasar bölge alanlarının artıp genişlediği, net bir şekilde görülmektedir.

10 J enerji seviyesinde uygulanan tekrarlı darbe neticesinde, numuneler üzerinde gözle görülür derecede hasarlar meydana gelmiştir. Meydana gelen hasarlar mikroskop ile gözlemlenmiştir. Nanopartikül katkısı, numuneler üzerindeki darbe direncini artırmıştır. Saf

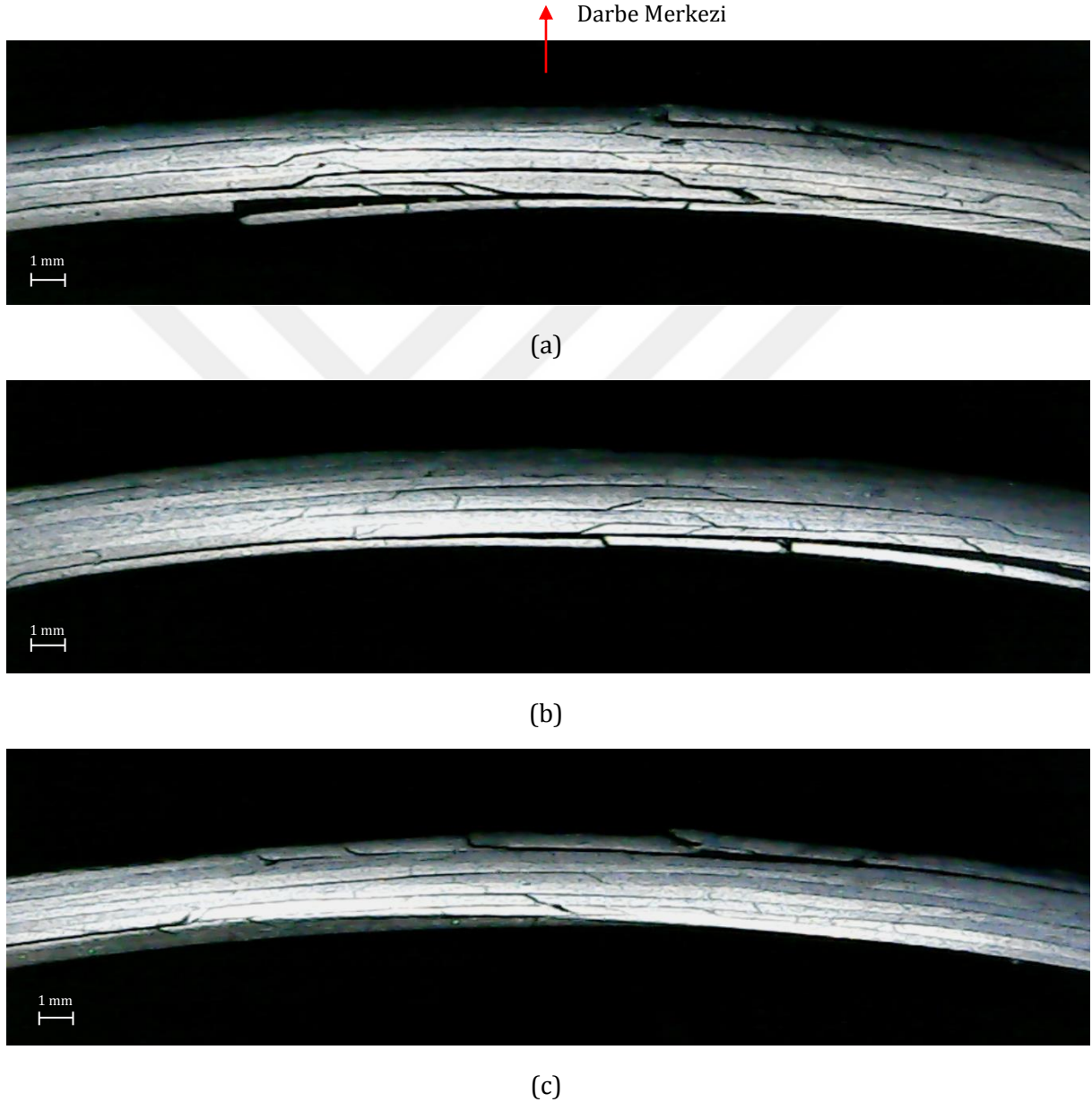
numunede, 10 J darbe enerji seviyesinde, nano katkıli numunelere oranla daha fazla hasar meydana gelmiştir. Matris çatlakları ve delaminasyonlar Şekil 5.14. (a)'da açıkça görülmektedir. Katkı yapılan nanopartikül malzemeleri arasında kıyaslama yapılırsa; BN katkıli numune kesitinde oluşan tabakalar arası ayrılma ve radyal çatlak hasarları, KNT katkıli numune kesitinde oluşan hasara göre daha fazladır. Şekil 5.14. (b) ve Şekil 5.14. (c)'de aralarındaki fark görülmektedir.



Şekil 5.14. 10 J Darbe enerji seviyesi için a) Saf b) 0.5 %wt BN ve c) 0.3 %wt KNT katkıli numunelerin hasarlı kesit görüntüleri.

15 J tekrarlı darbe enerjisine maruz bırakılan numunelerin, enine kesit hasar bölgelerinin mikroskop görüntüleri incelendiği zaman, numunelerde meydana gelen radyal çatlakların ve delaminasyonların 10 J enerji seviyesine göre arttığı belirlenmiştir. Mikroskop altında bütün delaminasyonlar ve matris çatlakları net bir şekilde görülmektedir. 15 J darbe

enerjisinde, meydana gelen en fazla hasar saf numunededir, Şekil 5.15. (a)'da görülmektedir. BN ve KNT nanopartikül katkı numuneler, saf numuneye oranla 15 J tekrarlı darbe enerji seviyesinde daha iyi performans göstermiştir. Hasar oranları daha düşüktür. Nano parçacık katkısı meydana gelen hasar oranını düşürmüştür. KNT katkı numuneler ise, BN katkı numunelere göre daha az hasar alarak daha iyi bir performans göstermiştir. Şekil 5.15. (b) ve Şekil 5.15. (c)'de aralarındaki fark görülmektedir.

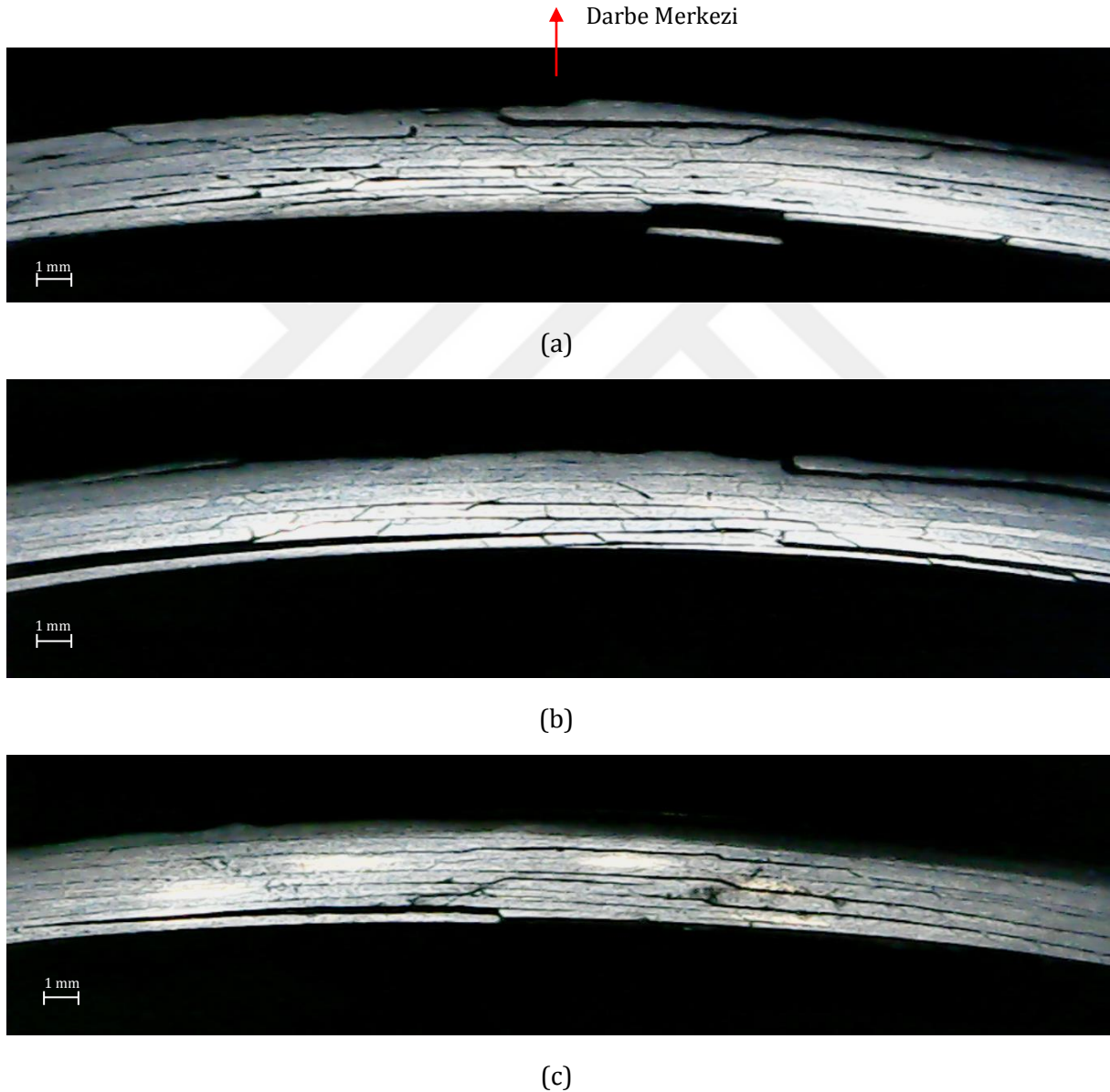


Şekil 5.15. 15 J Darbe enerji seviyesi için a) Saf b) 0.5 %wt BN ve c) 0.3 %wt KNT katkı numunelerin hasarlı kesit görüntüleri.

20 J enerji seviyesinde gerçekleştirilen tekrarlı darbe sonrasında numuneler üzerinde oluşan hasar miktarının arttığı görülmektedir. Tabakalar arası ayrılmalar, radyal çatlaklar net

bir biçimde Şekil 5.16.'da görülmektedir. 20 J darbe enerjisinde kesit üzerinde en çok hasar oluşan numune saf numunedir. Şekil 5.16. (a)'da net şekilde belli olmaktadır. Nanopartikül katkı numunelerde ise, malzeme üzerinde BN'ye oranla daha az hasar gelişen ve iyi performans gösteren numune KNT olmuştur. Şekil 5.16. (b) ve Şekil 5.16. (c)'de meydana gelen hasarlar net şekilde belli olmaktadır.

Kompozit malzemelere KNT ve BN gibi nanopartiküllerin ilave edilmesi, elyaf matris ara yüzey bağını güçlendirdiği ve kırılma tokluğunu arttırdığı belirlenmiştir [89] . Uygulanan tüm darbe enerji seviyelerinde, malzemelerin cinsi ne olursa olsun numunelerin üzerinde vurucu cisim saplanması ve delinme gibi durumlarla karşılaşılmasıdır.



Şekil 5.16. 20 J Darbe enerji seviyesi için a) Saf b) 0.5 %wt BN ve c) 0.3 %wt KNT katkı numunelerin hasarlı kesit görüntüleri.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

10 J, 15 J ve 20 J enerji seviyelerindeki ilk darbe esnasında nanopartikül takviye edilmiş numunelerde en büyük temas kuvvetine ulaşma süresi daha düşük olmuştur. Bu durum nanopartikül ilavesinin numune rijitliğini arttırdığına işaret etmektedir.

Malzemelerde ilk darbe esnasında, çarpma yerine vurucu saplanması ya da malzeme delinmesi gibi durumlar çok kritik olmuştur. 10 J, 15 J ve 20 J'lik ilk darbe vuruşu esnasında, saf karbon elyaf epoksi, KNT katkılı ve BN katkılı karbon elyaf epoksi borular üzerinde, saplanma veya delinme olmamıştır.

Nanopartikül katılmış numuneler, tekrarlı darbe enerjilerini daha yüksek oranda absorbe etmiştir ve geri kalan enerjiyi sıçrama enerjisi olarak harcamıştır. Bu aşamalarda yutulan enerji, beklenenin altında hasar oluşturarak nanopartikül malzemelerin olumlu katkıda bulunduğunu göstermiştir. Nanopartikül katkısı yapılmış numunelerde enerji yutma kapasiteleri iyi bir düzeye yükselmiştir.

Nanopartikül katkısı numunelerde enerji yutma kapasitesini artırdığından, numunelerin yer değiştirme (çökme) değişimleri azalmıştır. Yani BN ve KNT katkısı yapılan numuneler daha az çökmeye maruz kalmışlardır.

10 J, 15 J ve 20 J enerji seviyelerindeki tekrarlı darbe uygulanması neticesinde; nanopartikül eklenmiş numunelerde oluşan hasarlar saf karbon elyaf epoksiye göre daha düşüktür. KNT katkılı numuneler ise BN katkılı numunelere göre daha az hasar görüp daha iyi performans göstermiştir. Sonuç olarak nanopartikül katkısı hasar miktarını azaltmıştır.

KAYNAKLAR

- [1]. Takeichi, N., Senoh, H., Yokota, T., Tsuruta, H., Hamada, K., Takeshita, H. T., ... & Kuriyama, N. (2003). "Hybrid hydrogen storage vessel", a novel high-pressure hydrogen storage vessel combined with hydrogen storage material. *International Journal of Hydrogen Energy*, 28(10), 1121-1129.
- [2]. Vasiliev, V. V., Krikanov, A. A., & Razin, A. F. (2003). New generation of filament-wound composite pressure vessels for commercial applications. *Composite structures*, 62(3-4), 449-459.
- [3]. Rousseau, J., Perreux, D., & Verdiere, N. (1999). The influence of winding patterns on the damage behaviour of filament-wound pipes. *Composites Science and Technology*, 59(9), 1439-1449.
- [4]. Xi, W., Yin, S., Guo, S., & Lai, H. (2000). Stainless steel lined composite steel pipe prepared by centrifugal-SHS process. *Journal of materials science*, 35(1), 45-48.
- [5]. Tarakcioglu, N., Akdemir, A., & Avci, A. (2001). Strength of filament wound GRP pipes with surface crack. *Composites Part B: Engineering*, 32(2), 131-138.
- [6]. Xia, M., Takayanagi, H., & Kemmochi, K. (2001). Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under internal pressure. *Composite Structures*, 53(4), 483-491.
- [7]. Morozov, E. V. (2006). The effect of filament-winding mosaic patterns on the strength of thin-walled composite shells. *Composite structures*, 76(1-2), 123-129.
- [8]. Samanci, A., Avci, A., Tarakcioglu, N., & Şahin, Ö. S. (2008). Fatigue crack growth of filament wound GRP pipes with a surface crack under cyclic internal pressure. *Journal of materials science*, 43(16), 5569-5573.
- [9]. Gemi, L., Tarakçıoğlu, N., Akdemir, A., & Şahin, Ö. S. (2009). Progressive fatigue failure behavior of glass/epoxy (± 75) 2 filament-wound pipes under pure internal pressure. *Materials & Design*, 30(10), 4293-4298.
- [10]. Sahin, Ö. S., Akdemir, A., Avci, A., & Gemi, L. (2009). Fatigue crack growth behavior of filament wound composite pipes in corrosive environment. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28(24), 2957-2970.
- [11]. Spencer, B., & Hull, D. (1978). Effect of winding angle on the failure of filament wound pipe. *Composites*, 9(4), 263-271.
- [12]. Morozov, E. V. (2006). The effect of filament-winding mosaic patterns on the strength of thin-walled composite shells. *Composite structures*, 76(1-2), 123-129.
- [13]. De la Vega, A., Kinloch, I. A., Young, R. J., Bauhofer, W., & Schulte, K. (2011). Simultaneous global and local strain sensing in SWCNT-epoxy composites by Raman and impedance spectroscopy. *Composites Science and Technology*, 71(2), 160-166.
- [14]. Chou, T. W., Gao, L., Thostenson, E. T., Zhang, Z., & Byun, J. H. (2010). An assessment of the science and technology of carbon nanotube-based fibers and composites. *Composites Science and Technology*, 70(1), 1-19.
- [15]. De Greef, N., Gorbatikh, L., Lomov, S. V., & Verpoest, I. (2011). Damage development in woven carbon fiber/epoxy composites modified with carbon nanotubes under tension in the bias direction. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(11), 1635-1644.
- [16]. Jia, X., Zhu, J., Li, W., Chen, X., & Yang, X. (2015). Compressive and tensile response of CFRP cylinders induced by multi-walled carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 110, 35-44.
- [17]. Schadler, L. S., Giannaris, S. A., & Ajayan, P. M. (1998). Load transfer in carbon nanotube epoxy composites. *Applied physics letters*, 73(26), 3842-3844.
- [18]. Ulus, H., Üstün, T., Eskizeybek, V., Şahin, Ö. S., Avci, A., & Ekrem, M. (2014). Boron nitride-MWCNT/epoxy hybrid nanocomposites: Preparation and mechanical properties. *Applied Surface Science*, 318, 37-42.
- [19]. Alderson, K. L., & Evans, K. E. (1992). Failure mechanisms during the transverse loading of filament-wound pipes under static and low velocity impact conditions. *Composites*, 23(3), 167-173.

- [20]. Kim, S. J., Goo, N. S., & Kim, T. W. (1997). The effect of curvature on the dynamic response and impact-induced damage in composite laminates. *Composites Science and Technology*, 57(7), 763-773.
- [21]. Gning, P. B., Tarfaoui, M., Collombet, F., & Davies, P. (2005). Prediction of damage in composite cylinders after impact. *Journal of composite materials*, 39(10), 917-928.
- [22]. Uyaner, M., & Kara, M. (2012). Experimental study of the impact behavior of laminated composites stricken by sharp impactors.
- [23]. Sánchez, M., Campo, M., Jiménez-Suárez, A., & Ureña, A. (2013). Effect of the carbon nanotube functionalization on flexural properties of multiscale carbon fiber/epoxy composites manufactured by VARIM. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 1613-1619.
- [24]. Abbasi, S., Carreau, P. J., & Derdouri, A. (2010). Flow induced orientation of multiwalled carbon nanotubes in polycarbonate nanocomposites: Rheology, conductivity and mechanical properties. *Polymer*, 51(4), 922-935.
- [25]. Zhi, C., Bando, Y., Terao, T., Tang, C., Kuwahara, H., & Golberg, D. (2009). Towards thermoconductive, electrically insulating polymeric composites with boron nitride nanotubes as fillers. *Advanced Functional Materials*, 19(12), 1857-1862.
- [26]. Coleman, J. N., Khan, U., & Gun'ko, Y. K. (2006). Mechanical reinforcement of polymers using carbon nanotubes. *Advanced materials*, 18(6), 689-706.
- [27]. Andrews, R., & Weisenberger, M. C. (2004). Carbon nanotube polymer composites. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 8(1), 31-37.
- [28]. Song, Y. S., & Youn, J. R. (2005). Influence of dispersion states of carbon nanotubes on physical properties of epoxy nanocomposites. *Carbon*, 43(7), 1378-1385.
- [29]. Shaffer, M. S., & Windle, A. H. (1999). Fabrication and characterization of carbon nanotube/poly (vinyl alcohol) composites. *Advanced materials*, 11(11), 937-941.
- [30]. Gong, X., Liu, J., Baskaran, S., Voise, R. D., & Young, J. S. (2000). Surfactant-assisted processing of carbon nanotube/polymer composites. *Chemistry of materials*, 12(4), 1049-1052.
- [31]. Shi, D., He, P., Lian, J., Chaud, X., Bud'ko, S. L., Beaugnon, E., ... & Tournier, R. (2005). Magnetic alignment of carbon nanofibers in polymer composites and anisotropy of mechanical properties. *Journal of Applied Physics*, 97(6), 064312.
- [32]. Weisenberger, M. C., Grulke, E. A., Jacques, D., Rantell, A. T., & Andrews, R. (2003). Enhanced mechanical properties of polyacrylonitrile/multiwall carbon nanotube composite fibers. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 3(6), 535-539.
- [33]. Chen, J., Ramasubramaniam, R., Xue, C., & Liu, H. A. I. Y. I. N. G. (2006). A Versatile, Molecular Engineering Approach to Simultaneously Enhanced, Multifunctional Carbon-Nanotube-Polymer Composites. *Advanced Functional Materials*, 16(1), 114-119.
- [34]. Frankland, S. J. V., Caglar, A., Brenner, D. W., & Griebel, M. (2002). Molecular simulation of the influence of chemical cross-links on the shear strength of carbon nanotube-polymer interfaces. *The Journal of Physical Chemistry B*, 106(12), 3046-3048.
- [35]. Ganguli, S., Aglan, H., & Dean, D. (2005). Microstructural origin of strength and toughness of epoxy nanocomposites. *Journal of Elastomers & Plastics*, 37(1), 19-35.
- [36]. Kara, M. (2006). Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozitlerin dinamik cevabı (Doctoral dissertation, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [37]. Sinha, P. K. (2006). Composite materials and structures. Composite Centre of Excellence, AR&DB, Department of Aerospace Engineering IIT Kharagpur.
- [38]. Thostenson, E. T., Ren, Z., & Chou, T. W. (2001). Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review. *Composites science and technology*, 61(13), 1899-1912.
- [39]. Thostenson, E. T., Li, C., & Chou, T. W. (2005). Nanocomposites in context. *Composites Science and Technology*, 65(3-4), 491-516.
- [40]. Fan, Z. (2007). Flow and rheology of multi-walled carbon nanotubes thermoset resin suspensions in processing of glass fiber composites. University of Delaware.
- [41]. Lordi, V., Ma, S. X. C., & Yao, N. (1999). Towards probing pentagons on carbon nanotube tips. *Surface science*, 421(1-2), L150-L155.

- [42]. Graham, A. P., Duesberg, G. S., Hoenlein, W., Kreupl, F., Liebau, M., Martin, R., ... & Unger, E. (2005). How do carbon nanotubes fit into the semiconductor roadmap?. *Applied Physics A*, 80(6), 1141-1151.
- [43]. Ebbesen, T. W., & Ajayan, P. M. (1992). Large-scale synthesis of carbon nanotubes. *Nature*, 358(6383), 220.
- [44]. Collins, P. G., & Avouris, P. (2000). Nanotubes for Electronics—Scientific American. San Francisco: Nature Publishing Group, 283(6), 62-69.
- [45]. Eskizeybek, V. (2012). Yüzeylerine kimyasal olarak karbon nanotüpler bağlanmış örgü cam fiber/epoksi nanokompozitlerin üretimi ve tabakalar arası kırılma davranışının incelenmesi (Doctoral dissertation, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [46]. Guo, T., Nikolaev, P., Thess, A., Colbert, D. T., & Smalley, R. E. (1995). Catalytic growth of single-walled nanotubes by laser vaporization. *Chemical physics letters*, 243(1-2), 49-54.
- [47]. Pinilla, J. L., Moliner, R., Suelves, I., Lázaro, M. J., Echegoyen, Y., & Palacios, J. M. (2007). Production of hydrogen and carbon nanofibers by thermal decomposition of methane using metal catalysts in a fluidized bed reactor. *International journal of hydrogen energy*, 32(18), 4821-4829.
- [48]. Njuguna, J., Pielichowski, K., & Alcock, J. R. (2007). Epoxy-based fibre reinforced nanocomposites. *Advanced Engineering Materials*, 9(10), 835-847.
- [49]. Olek, M., Kempa, K., Jurga, S., & Giersig, M. (2005). Nanomechanical properties of silica-coated multiwall carbon nanotubes poly (methyl methacrylate) composites. *Langmuir*, 21(7), 3146-3152.
- [50]. Loiseau, A., Willaime, F., Demoncy, N., Schramchenko, N., Hug, G., Colliex, C., & Pascard, H. (1998). Boron nitride nanotubes. *Carbon*, 36(5-6), 743-752.
- [51]. Karabulut, S. E. (2009). Bor karbür nanopartiküllerin ve karbon nanotüplerin sentezlenmesi ve karakterizasyonu (Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [52]. Kamigaito, O. (1991). What can be improved by nanometer composites?. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 38(3), 315-321.
- [53]. Ishida, H., & Rimdusit, S. (1998). Very high thermal conductivity obtained by boron nitride-filled polybenzoxazine. *Thermochimica Acta*, 320(1-2), 177-186.
- [54]. Kruis, F. E., Fissan, H., & Peled, A. (1998). Synthesis of nanoparticles in the gas phase for electronic, optical and magnetic applications—a review. *Journal of Aerosol Science*, 29(5-6), 511-535.
- [55]. Zhang, S., Sun, D., Fu, Y., & Du, H. (2003). Recent advances of superhard nanocomposite coatings: a review. *Surface and Coatings Technology*, 167(2-3), 113-119.
- [56]. Bakshi, S. R., Lahiri, D., & Agarwal, A. (2010). Carbon nanotube reinforced metal matrix composites—a review. *International materials reviews*, 55(1), 41-64.
- [57]. Manias, E. (2007). Nanocomposites: Stiffer by design. *Nature Materials*, 6(1), 9.
- [58]. Lalwani, G., Henslee, A. M., Farshid, B., Lin, L., Kasper, F. K., Qin, Y. X., ... & Sitharaman, B. (2013). Two-dimensional nanostructure-reinforced biodegradable polymeric nanocomposites for bone tissue engineering. *Biomacromolecules*, 14(3), 900-909.
- [59]. Lalwani, G., Henslee, A. M., Farshid, B., Parmar, P., Lin, L., Qin, Y. X., ... & Sitharaman, B. (2013). Tungsten disulfide nanotubes reinforced biodegradable polymers for bone tissue engineering. *Acta biomaterialia*, 9(9), 8365-8373.
- [60]. Gatti, T., Vicentini, N., Mba, M., & Menna, E. (2016). Organic Functionalized Carbon Nanostructures for Functional Polymer-Based Nanocomposites. *European Journal of Organic Chemistry*, 2016(6), 1071-1090.
- [61]. Lin, J., Wu, J., Yang, Z., & Pu, M. (2001). Synthesis and properties of poly (acrylic acid)/mica superabsorbent nanocomposite. *Macromolecular Rapid Communications*, 22(6), 422-424.
- [62]. Porter, D., Metcalfe, E., & Thomas, M. J. K. (2000). Nanocomposite fire retardants—a review. *Fire and Materials*, 24(1), 45-52.
- [63]. Chen, B. K., Su, C. T., Tseng, M. C., & Tsay, S. Y. (2006). Preparation of polyetherimide nanocomposites with improved thermal, mechanical and dielectric properties. *Polymer Bulletin*, 57(5), 671-681.

- [64]. Qian, J., He, P., & Nie, K. (2004). Nonisothermal crystallization of PP/nano-SiO₂ composites. *Journal of applied polymer science*, 91(2), 1013-1019.
- [65]. Cho, J., Joshi, M. S., & Sun, C. T. (2006). Effect of inclusion size on mechanical properties of polymeric composites with micro and nano particles. *Composites Science and Technology*, 66(13), 1941-1952.
- [66]. Chen, N., Wan, C., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2004). Effect of nano-CaCO₃ on mechanical properties of PVC and PVC/Blendex blend. *Polymer Testing*, 23(2), 169-174.
- [67]. Kara, M. (2012). Düşük hızlı darbe sonrası yama ile tamir edilmiş filaman sarım CTP boruların iç basınç altındaki hasar davranışı (Doctoral dissertation, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [68]. Ceyhan, V., & Turan, M. (2003). Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı. *Mühendis ve Makine*, 516, 35-41.
- [69]. Aktas, M. (2007). Temperature effect on impact behavior of laminated composite plates. Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylül University for the Degree of Doctoral of Philosophy in Mechanical Engineering.
- [70]. Herup, E. J. (1996). Low-velocity impact on composite sandwich plates (No. AFIT/DS/ENY/96-11). AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSON AFB OH.
- [71]. Abrate, S. (1998). Low-velocity impact damage. *Impact on Composite Structures*, Cambridge University Press, 1998pp, 135-160.
- [72]. Griffin, C. F. (1987). Damage tolerance of toughened resin graphite composites. In *Toughened composites*. ASTM International.
- [73]. Dorey, G., Bishop, S. M., & Curtis, P. T. (1985). On the impact performance of carbon fibre laminates with epoxy and PEEK matrices. *Composites Science and Technology*, 23(3), 221-237.
- [74]. Cantwell, W. J. (1988). The influence of target geometry on the high velocity impact response of CFRP. *Composite Structures*, 10(3), 247-265.
- [75]. Malvern, L. E., Sun, C. T., & Liu, D. (1987). Damage in composite laminates from central impacts at subperforation speeds. *Recent trends in aeroelasticity, structures, and structural dynamics*, 298-312.
- [76]. Sierakowski, R. L., & Chaturvedi, S. K. (1997). Dynamic loading and characterization of fiber-reinforced composites. *Dynamic Loading and Characterization of Fiber-Reinforced Composites*, by Robert L. Sierakowski, Shive K. Chaturvedi, pp. 252. ISBN 0-471-13824-X. Wiley-VCH, February 1997., 252.
- [77]. Park, R., & Jang, J. (2001). Impact behavior of aramid fiber/glass fiber hybrid composites: the effect of stacking sequence. *Polymer composites*, 22(1), 80-89.
- [78]. Karabulut, S. E. (2017). Karbon nanotüplerin ve bor nitrür nanopartiküllerin flaman sarım karbon elyaf takviyeli-epoksi nanokompozit borularda düşük hızlı darbe yükü altında enerji absorpsiyon kapasitesine etkisi (Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [79]. Breuer, O., & Sundararaj, U. (2004). Big returns from small fibers: a review of polymer/carbon nanotube composites. *Polymer composites*, 25(6), 630-645.
- [80]. Xie, X. L., Mai, Y. W., & Zhou, X. P. (2005). Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: a review. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 49(4), 89-112.
- [81]. Fiedler, B., Gojny, F. H., Wichmann, M. H., Nolte, M. C., & Schulte, K. (2006). Fundamental aspects of nano-reinforced composites. *Composites science and technology*, 66(16), 3115-3125.
- [82]. Moniruzzaman, M., & Winey, K. I. (2006). Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes. *Macromolecules*, 39(16), 5194-5205.
- [83]. Bal, S., & Samal, S. S. (2007). Carbon nanotube reinforced polymer composites—a state of the art. *Bulletin of Materials Science*, 30(4), 379.
- [84]. Gibson, R. F., Ayorinde, E. O., & Wen, Y. F. (2007). Vibrations of carbon nanotubes and their composites: a review. *Composites science and technology*, 67(1), 1-28.
- [85]. Špitalský, Z., Matějka, L., Šlouf, M., Konyushenko, E. N., Kovářová, J., Zemek, J., & Kotek, J. (2009). Modification of carbon nanotubes and its effect on properties of carbon nanotube/epoxy nanocomposites. *Polymer Composites*, 30(10), 1378-1387.

- [86]. Garg, P., Singh, B. P., Kumar, G., Gupta, T., Pandey, I., Seth, R. K., ... & Mathur, R. B. (2011). Effect of dispersion conditions on the mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes based epoxy resin composites. *Journal of Polymer Research*, 18(6), 1397-1407.
- [87]. Kerr, C. J., Huang, Y. Y., Marshall, J. E., & Terentjev, E. M. (2011). Effect of filament aspect ratio on the dielectric response of multiwalled carbon nanotube composites. *Journal of Applied Physics*, 109(9), 094109.
- [88]. Huang, Y. Y., & Terentjev, E. M. (2012). Dispersion of carbon nanotubes: mixing, sonication, stabilization, and composite properties. *Polymers*, 4(1), 275-295.
- [89]. Kara, M., Kırıcı, M., Tatar, A. C., & Avcı, A. (2018). Impact behavior of carbon fiber/epoxy composite tubes reinforced with multi-walled carbon nanotubes at cryogenic environment. *Composites Part B: Engineering*, 145, 145-154.
- [90]. Hosur, M. V., Karim, M. R., & Jeelani, S. (2003). Experimental investigations on the response of stitched/unstitched woven S2-glass/SC15 epoxy composites under single and repeated low velocity impact loading. *Composite structures*, 61(1-2), 89-102.
- [91]. De Moraes, W. A., Monteiro, S. N., & d'Almeida, J. R. M. (2005). Effect of the laminate thickness on the composite strength to repeated low energy impacts. *Composite structures*, 70(2), 223-228.
- [92]. Sayer, M., Bektaş, N. B., Sayman, O., & Topçu, M. (2009). An experimental investigation on the impact behaviour of glass/epoxy and hybrid composite plates. *Advanced Composites Letters*, 18(4), 096369350901800401.
- [93]. Avila, A. F., Soares, M. I., & Neto, A. S. (2007). A study on nanostructured laminated plates behavior under low-velocity impact loadings. *International journal of impact engineering*, 34(1), 28-41.
- [94]. ASTM D7136/D7136M-15. (2015). Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Anıl Erdağ Nomer

Doğum Tarihi : 01.01.1994

E-mail : erdagnomer@hotmail.com

Öğrenim Durumu :

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lisans	Makine Mühendisliği	İskenderun Teknik Üniversitesi	2011-2015
Yüksek Lisans	Makine Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2015-2019

ESERLER (Makaleler ve Bildiriler)

1. Nomer A.E., Kara, M., Avcı, A., “Karbon Elyaf Epoksi Kompozit Boruların Tekrarlı Darbeye Bağlı Enerji Yutma Kapasitesine Nanopartikül Takviyesinin Etkisi” 3rd International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2018), Çukurova University, 24-26 Oct. 2018, Adana / TURKEY