



**T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FİLAMAN SARIM KARBON ELYAF / EPOKSİ
BORULARIN DİNAMİK DAVRANIŞINA
KARBON NANOTÜP VE BOR NİTRÜR NANO
PARTİKÜL İLAVESİNİN ETKİSİ**

Salim Eğemen KARABULUT

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**HAZİRAN-2017
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Salim Eğemen KARABULUT tarafından hazırlanan “**FİLAMAN SARIM KARBON ELYAF / EPOKSİ BORULARIN DİNAMİK DAVRANIŞINA KARBON NANOTÜP VE BOR NİTRÜR NANO PARTİKÜL İLAVESİNİN ETKİSİ**” adlı tez çalışması 02/06/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / ~~oy~~ ~~çeliği~~ ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Ö. Sinan ŞAHİN

Danışman

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Üye

Prof. Dr. Behcet DAĞHAN

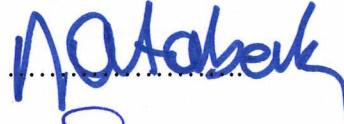
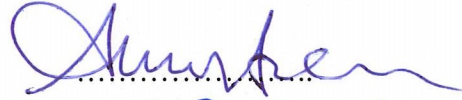
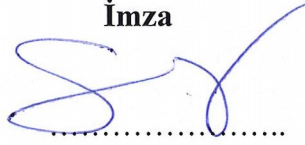
Üye

Doç. Dr. Necati ATABERK

Üye

Yrd. Doç. Dr. Memduh KARA

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.



Prof. Dr. Mustafa YILMAZ
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Selçuk Üniversitesi B.A.P. Koordinatörlüğü tarafından 13101023 nolu proje ile ve TÜBİTAK tarafından 112M145 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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



Salim Egemen KARABULUT

Tarih:02.06.2017

ÖZET

DOKTORA TEZİ

FİLAMAN SARIM KARBON ELYAF / EPOKSİ BORULARIN DİNAMİK DAVRANIŞINA KARBON NANOTÜP VE BOR NİTRÜR NANO PARTİKÜL İLAVESİNİN ETKİSİ

Salim Eğemen KARABULUT

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet AVCI

2017, 140 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ö. Sinan ŞAHİN

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Prof. Dr. Behcet DAĞHAN

Doç. Dr. Necati ATABERK

Yrd. Doç. Dr. Memduh KARA

Bu çalışmada, karbon nanotüpler (CNT) ve bor nitrür (BN) nanopartiküller katkılı epoksi/karbon elyaf takviyeli nanokompozit borular filaman sarım metoduyla üretilmiş ve iç basınç altında patlama basıncı, düşük hızlı darbe yüklerine karşı dayanımı, enerji absorpsiyon kapasitesi incelenmiş ve hasar analizi yapılmıştır. Ayrıca epoksi matris içerisine katılan CNT'lerin ve BN nanopartiküllerin epoksinin özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

Testler için dört farklı grup kompozit boru üretilmiştir. Bunlar saf epoksili, ağırlıkça %0.3 çok cidarlı karbon nanotüp (ÇCKNT) katkılı, ağırlıkça %0.5 bor nitrür nanopartikül (BNNP) katkılı ve ağırlıkça %0.5 BNNP + %0.3 ÇCKNT katkılı epoksi matrisli kompozit borulardır. Epoksi matrisin hazırlanmasında homojen dağılımın sağlanması için mekanik karıştırma ve ultrasonik problu karıştırma yöntemlerinden yararlanılmıştır. Filaman sarım işlemi 3 karbon fiber iplik kullanılarak, 72 mm iç çap, $[\pm 55^\circ]_4$ parametrelerinde gerçekleştirilmiştir. Üretim sonrası tüm kompozit borular 2 saat 80°C ve 12 saat 120°C kürleme işlemine tabi tutulmuştur. Statik patlatma ve darbe test numuneleri 30 cm boyunda olacak şekilde daire testere kullanılarak hazırlanmıştır. Statik patlatma ve darbe testleri açık uçlu şekilde test etmeyi sağlayan özel bir aparat yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Düşük hızlı darbe testleri 5 J, 10 J ve 15 J darbe enerjilerinde kompozit boruların 12 Bar iç basınçlı ve iç basınçsız durumlarında yapılmıştır. Darbe sonrası hasar bölgesinin incelenmesi için optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu görüntülerinden yararlanılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde en iyi sonuçlar BNNP ve ÇCKNT'lerin birlikte kullanıldığı nanohibrit kompozit borularda görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Bor nitrür nanopartikül, Düşük hızlı darbe, Hibrit kompozitler, Karbon nanotüp, Kompozit boru, Nanokompozitler

ABSTRACT

Ph.D. THESIS

THE EFFECT OF CARBON NANOTUBE AND BORON NITRIDE NANOPARTICLES ADDITION ON DYNAMIC BEHAVIOUR OF FILAMENT WOUND CARBON FIBER / EPOXY PIPES

Salim Eğemen KARABULUT

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Ahmet AVCI

2017, 140 Pages

Jury

Prof. Dr. Ö. Sinan ŞAHİN

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Prof. Dr. Behcet DAĞHAN

Assoc. Prof. Dr. Necati ATABERK

Asst. Prof. Memduh KARA

In this study, carbon nanotubes(CNT) and boron nitride (BN) nanoparticles doped epoxy/ carbon fiber reinforced nanocomposite pipes were produced using filament winding method and explosion pressure under internal pressure, resistance to low-velocity impact loads, energy absorption capacity were examined and damage analysis were performed. Also, the effect of CNTs and BN nanoparticles, which added to epoxy matrix, on epoxy properties were investigated.

Four different groups of composite pipes were produced for the tests. These are composite pipes consisted as matrix with neat epoxy, 0.3% wt. multiwalled carbon nanotube (MWCNT) doped epoxy, 0.5% wt. boron nitride nanoparticle (BNNP) doped epoxy and 0.5% BNNP + 0.3% MWCNT wt. doped epoxy. In the preparation of the epoxy matrix, mechanical mixing and ultrasonic probe mixing methods were utilized to achieve a homogeneous distribution. The filament winding operation was carried out with using 3 carbon fibers, 72mm internal diameter and $[\pm 55^\circ]_4$ parameters. After production, all composite pipes were cured for 2 hours at 80° C and for 12 hours at 120° C. Static Blasting and impact test specimens were prepared using circular saws to be in 30 cm length. Static blasting and impact tests were carried out with the help of a special apparatus which allows testing in open ended conditions. Low-speed impact tests were carried out at 5 J, 10 J and 15 J impact energies with 12 Bar internal pressure and without internal pressure of composite pipes. Optical microscope and scanning electron microscopy images were used for the examination of damage area after impact tests. As a result of the studies done, the best results were seen in the nano hybrid composite pipes used together with BNNP and MWCNT.

Keywords: Boron nitride nanoparticle, Carbon nanotube, Composite pipe, Hybrid composites, Low velocity impact, Nanocomposites

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının yapılmasında her türlü bilgi ve desteğini esirgemeyen, çalışmalara yönlendiren ve destekleyen değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Ahmet AVCI 'ya sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tezle ilgili çalışmalarında yönlendirmeleri, görüş ve önerileri için hocalarım Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN ve Doç. Dr. Necati ATABERK'e teşekkürlerimi sunarım.

Tezle ilgili numune üretimi ve test aşamalarında yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarım Yrd. Doç. Dr. Mürsel EKREM, Arş. Gör. Adem YAR, Arş. Gör. Okan DEMİR, Öğr. Gör. Hasan ULUS, Mak. Müh. Mehmet Taha Mirza, Mak. Müh. Orhan Erciyeş ve Mak. Yük. Müh. Tugay ÜSTÜN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Sayın hocalarım Prof. Dr. Mesut UYANER, Yrd. Doç. Dr. Lokman GEMİ, Yrd. Doç. Dr. Memduh KARA ve Yrd. Doç. Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ'ye çalışmalarındaki yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Eğitim hayatımda bu aşamalara gelmemde en büyük pay sahibi olan ve hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen değerli aileme ve desteğinden dolayı değerli eşime teşekkür ederim.


Salim Ege KARABULUT
KONYA-2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	9
3.1. Kompozit Malzemeler	9
3.1.1. Matris malzemeler	9
3.1.2. Takviye malzemeleri.....	10
3.2. Kompozit Malzeme Üretim Metotları	10
3.2.1. Filaman sarım metodu	10
3.3. Nano Teknoloji	11
3.3.1 Karbon nanotüpler	12
3.3.2 Bor nitrür nano partiküller	12
3.4. Nanokompozitler	13
3.4.1 Seramik matris nano kompozitler	14
3.4.2 Metal matris nanokompozitler	14
3.4.3 Polimer matris nanokompozitler.....	15
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	16
4.1. Bu Çalışmada Kullanılan Malzemelerin Özellikleri.....	17
4.1.1. Epoksi matris malzeme özellikleri.....	17
4.1.2. Karbon fiber takviye malzemesi özellikleri.....	18
4.1.3. Çok cidarlı karbon nanotüpler	18
4.1.4. Bor nitrür nano partiküller	19
4.2. Nano Katkılı Epoksi Matrisin Hazırlanması.....	20
4.3. Kompozit Boruların Üretim Hazırlığı.....	23
4.4. Filaman Sarım Yönetimi ile Kompozit Boruların Üretimi	25
4.5. Test Numunelerinin Hazırlanması	27
4.6. Testler ve Analizler.....	28
4.6.1. Fiber - hacim oranının belirlenmesi.....	28
4.6.2. Mekanik özelliklerin belirlenmesi	29
4.6.3. Epoksi matrisin karakterizasyon yöntemleri.....	43
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	47

5.1. Çok Cidarlı Karbon Nano Tüp ve Bor Nitrür Nano Partikül ile Katkılandırılmış Epoksi Matrislerin Mikro Analizi	47
5.1.1. SEM analizleri	47
5.1.2. FT-IR analizleri.....	48
5.1.3. Termal analizler (TGA/DSC)	49
5.2. Filaman Sarım Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Borunun Fiber - Hacim Oranının Belirlenmesi.....	51
5.3. Kompozit Boruların Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi	52
5.3.1. İç basınç ve statik patlatma testleri	52
5.3.2. Halka çekme testleri.....	57
5.3.3. Düşük hızlı darbe testleri	58
5.4 Düşük Hızlı Darbe Testleri Sonrası Hasar Bölgesinin İncelenmesi	94
5.4.1. Borunun hasar yüzeylerinin yüksek çözünürlüklü kamera ile incelenmesi..	95
5.4.2. Darbe hasarının optik mikroskop ile incelenmesi.....	97
5.4.3. Darbe hasarının SEM ile incelenmesi.....	102
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	113
6.1. Sonuçlar	113
6.2. Öneriler	117
EKLER	118
EK 1. DÜŞÜK HIZLI DARBENİN KİNETİK ANALİZİ	118
A1. Darbe Başlangıç Şartları	118
A.2 İvme Değişiminin Elde Edilmesi.....	118
A.2.1 İvmenin Δt aralığında doğrusal değişimi (1. dereceden yaklaşım).....	119
KAYNAKLAR	122
ÖZGEÇMİŞ	130

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

W_a	: Alkolde kompozitin kütlesi (g)
W_c	: Havada kompozitin kütlesi(g)
ρ_f	: Fiberin yoğunluğu (g/cm^3)
ρ_a	: Alkolün yoğunluğu (g/cm^3)
ρ_e	: Epoksinin yoğunluğu (g/cm^3)
W_f	: Fiberin kütlesi(g)
ρ_c	: Kompozitin yoğunluğu(g/cm^3)
V_c	: Fiber hacim oranı
S	: Maksimum teğetsel gerilme (MPa)
P	: Patlama basıncı (MPa)
d	: Numunenin iç ölçüsü (mm)
t	: Numunenin et kalınlığı (mm)
σ_a	: Maksimum teğetsel gerilme (MPa)
P_b	: Numunenin maksimum kopma kuvveti (N)
A_m	: Numunenin minimum kesit alanı (mm)

Kısaltmalar

BNNP	: Bor nitrür nanopartikül
ÇCKNT	: Çok cidarlı karbon nanotüp
KNT	: Karbon nanotüp
ASTM	: <i>American Society for Testing and Materials</i> (Amerikan Test ve Malzeme Derneği)
TGA	: Termal gravimetrik analiz
DSC	: Diferansiyel taramalı kalorimetri
FT-IR	: Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi
S	: Simetrik
SEM	: <i>Scanning electron microscope</i> (Taramalı elektron mikroskobu)
IR	: Infrared

1. GİRİŞ

Filaman sarım kompozit borular yüksek rijitlik, hafiflik ve dayanım başta olmak üzere birçok avantaja sahiptirler. Filaman sarım yönteminin verimliliği ve yukarıda belirtilen bazı avantajlarından dolayı filaman sarım borular basınçlı hidrojen depolanması ve/ veya basınçlı / sıvılaştırılmış doğalgaz hatlarında kullanım için iyi bir tercihtir (Takeichi ve ark., 2003, Vasiliev ve ark., 2003). Karbon fiberler yüksek dayanım ve düşük yoğunlukları nedeniyle filaman sarımda kullanılmaktadır. Genellikle filaman sarım karbon fiber / epoksi tüpler pürüzsüz yüzey sağlamaları nedeniyle düşük akışkan sürtünmesi oluştururlar. Her ne kadar karbon fiber takviyeli plastikler istenen iyi özellikler gösterebilirler de gevrek bir yapıya sahip ve çatlak başlangıcına düşük mukavemet göstermektedirler. Filaman sarım malzemelerin mekanik özellikleri literatürde yaygın olarak araştırılma konusu olmaya devam etmektedir (Rousseau ve ark., 1999, Xi ve ark., 2000, Tarakcioglu ve ark., 2001, Xia ve ark., 2001, Morozov, 2006, Samanci ve ark., 2008, Gemi ve ark., 2009, Sahin ve ark., 2009). Kapalı uçlu kompozit borular için mekanik özelliklerin genel olarak fiber özelliklerine ve sarım açısı gibi sarım parametrelerine bağlı olduğu ve optimum sarım açısının 55° derece olduğu literatürde rapor edilmektedir (Spencer S., 1978, Morozov, 2006). Filaman sarım kompozit borularda matrisin mekanik özellikleri oluşabilecek hasar sonrası daha önemli hale gelmekte, matris hasarı sızıntı yolunu oluşturmakta, delaminasyon ve son olarak fiber hasarına yol açmaktadır (Samanci ve ark., 2008, Gemi ve ark., 2009, Sahin ve ark., 2009).

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin arayüz özellikleri çoğunlukla matris özelliklerine bağlı ve genellikle sınırlı tasarım limitlerine sahiptir (de la Vega ve ark., 2011). Nano katkıların fiber takviyeli kompozit malzemelere eklenmesi mekanik özelliklerin geliştirilmesinde en etkili yöntemlerden biri olmakla beraber, yeni nesil çok ölçekli, çok eksenli de yüksek performans gösteren kompozit malzemelerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır (Chou ve ark., 2010, De Greef ve ark., 2011, Jia ve ark., 2015). Çeşitli nano katkı türlerinden biri olarak bulunan Karbon Nano Tüpler (KNT) kompozit malzeme içerisinde yüksek dayanım ve dağılım oranları ile ideal katkı malzemesi olarak değerlendirilmektedir (Schadler ve ark., 1998, de la Vega ve ark., 2011). Düzlemler arası kesme dayanımı (Garcia ve ark., 2008), kırılma tokluğu (Bekyarova ve ark., 2007, Yokozeki ve ark., 2007, Godara ve ark., 2009) ve yük transfer kabiliyeti (Thostenson ve ark., 2002) KNT ilavesi ile KNT'lerin sıyrılma, çatlak köprüleme (Thostenson ve Chou, 2003, Thostenson ve ark., 2005) gibi mekanizmaları ile geliştirilebildiği literatürde rapor

edilen sonuçlardandır. Nano malzemelerin dağılım oranları (Zhang ve ark., 2006) ve dağılım kalitesinin (Wetzel ve ark., 2006) mekanik özellikler üzerindeki etkisi hala çalışılan konular arasındadır.

Bor nitrür yüksek termal iletkenlik ve düşük elektrik iletkenliği ile dikkat çeken malzemeler arasındadır (Ishida ve Rimdusit, 1998, Zhou ve ark., 2007, Nag ve ark., 2010). Kristal hegzagonal yapısı grafitte oldukça benzer fakat tabakalanma düzeni ise farklıdır (Chiang ve Hsieh, 2006). Daha önceki çalışmalarımızda epoksi matris içesine Bor Nitrür Nanopartikül (BNNP) katkılılandırılması ile çekme dayanımının arttırılabildiği de belirlenmiştir (Ulus ve ark., 2014).

Bu çalışmada, Çok Cidarlı Karbon Nano Tüpler (ÇCKNT) ve/veya Bor Nitrür Nano Partiküller (BNNP) kullanılarak filaman sarım kompozit borularda epoksi modifikasyonu yapılması ve bu modifikasyon ile üretilen kompozit borularda darbe direnci arttırılması amaçlanmıştır.

Bu amaçla karbon fiber iplikler kullanılarak filaman sarım yöntemi ile epoksi matris kompozit borular üretilmiştir. Testler için dört farklı grup kompozit boru üretilmiştir. Bunlar saf epoksili, ağırlıkça % 0.3 çok cidarlı karbon nanotüp (ÇCKNT) katkılı, ağırlıkça % 0.5 bor nitrür nanopartikül (BNNP) katkılı ve ağırlıkça % 0.5 BNNP + % 0.3 ÇCKNT katkılı epoksiye sahip kompozit borulardır. Saf epoksili (nano katkısız) kompozit borular nano katkının etkisinin belirlenmesinde kontrol grubu olarak kullanılmıştır. Nano katkılı epoksi matrisin hazırlanmasında homojen dağılımın sağlanması için mekanik karıştırma ve ultrasonik problu karıştırma yöntemlerinden yararlanılmıştır. Filaman sarım işlemi aynı anda 3 karbon fiber iplik demeti kullanılarak, 72 mm iç çap, $[\pm 55^\circ]_4$ parametrelerinde gerçekleştirilmiştir. Üretim sonrası tüm kompozit borular 2 saat 80° C ve 12 saat 120° C kürleme işlemine tabi tutulmuştur. Üretim sonrası kompozit borular statik patlatma ve darbe testleri tabi tutulmuş, bu testlere ait numuneler ise 30 cm boyunda olacak şekilde daire testere kullanılarak kesilerek hazırlanmıştır. Statik patlatma ve darbe testleri açık uçlu şekilde test etmeyi sağlayan özel bir aparat yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Düşük hızlı darbe testleri boruların taşınması veya kullanım dışında meydana gelebilecek hasarların belirlenmesi amacıyla iç basınsız olarak, kullanım sırasında meydana gelebilecek darbe hasarlarının belirlenmesi amacıyla ise de 12 Bar iç basınç koşullarında test edilmiştir. Düşük hızlı darbe testleri ağırlık düşürme metoduyla 5J, 10 J ve 15 J darbe enerjilerinde gerçekleştirilmiştir. Darbe sırasında elektronik olarak kaydedilen veriler ile kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman, enerji-zaman grafikleri oluşturulmuş ve numunelerin darbe davranışları değerlendirilmiştir. 12 Bar iç

basınçlı koşullarda yapılan testler sırasında darbe etkisine bağlı olarak görülen iç basınç değişiklikleri ölçülerek değerlendirilmiştir. Darbe sonrası hasar bölgesinin incelenmesi için optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerinden yararlanılmıştır.

Yapılan çalışmalar neticesinde en iyi sonuçlar BNNP ve ÇCKNT'lerin birlikte kullanıldığı nanohibrit kompozit borularda görülmüştür.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kompozit malzemeler birçok mühendislik uygulamasında kullanılmaktadır. Filaman sarım kompozit borular yüksek basınç ve korozyon etkilere karşı dayanıklı malzemelerdir. Bu özelliklerinden dolayı filaman sarım fiber takviyeli epoksi borular özellikle basınçlı hava, sıvılaştırılmış petrol gazı, sıkıştırılmış doğalgaz, su ve kimyasal madde iletimini gerektiren alanlarda kullanım bulmaktadır. Birçok iletim hattında kullanılan bu malzemelerin üretim, işletme, servis ve bakım işlemleri sırasında darbeye maruz kalması muhtemeldir. Darbeye maruz kalma durumunda malzemelerin göstereceği özelliklerin belirlenmesi ve hasar boyutunun belirlenmesi oldukça önemlidir. Kompozit malzemelerde darbe davranışlarının incelenmesine yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların çoğunluğunu ise düz levhalara yapılan incelemeler oluşturmaktadır.

Alderson ve Evans (1992) $\pm 55^\circ$ cam elyaf takviyeli filaman sarım borular üzerine iki ayrı bağlanma durumuna göre statik yükleme ve düşük hızlı darbe testleri uygulamıştır. Bu bağlanma durumlarından birinde CTP numune zemin üzerinde serbest bırakılmış diğerinde ise numunenin uç kısımları yataklanmıştır. Basit bir aydınlatma tekniği kullanılarak borularda meydana gelen hasar alanının büyüklüğünü ve hasar sürecini analiz etmişlerdir. Çalışmalarında, numunede oluşan hasar sürecinin iki karakteristik kısmı olduğunu ortaya koymuşlardır. İlk olarak numuneyi bağlama durumu ne olursa olsun elastik davranışın aynı yük değerinde sona erdiğini tespit etmişlerdir. İkinci kısımda ise elastik davranış takip eden diğer hasarların (delaminasyon) gelişiminde numune bağlama durumu ve test metodunun büyük önem taşıdığını ortaya koymuşlardır.

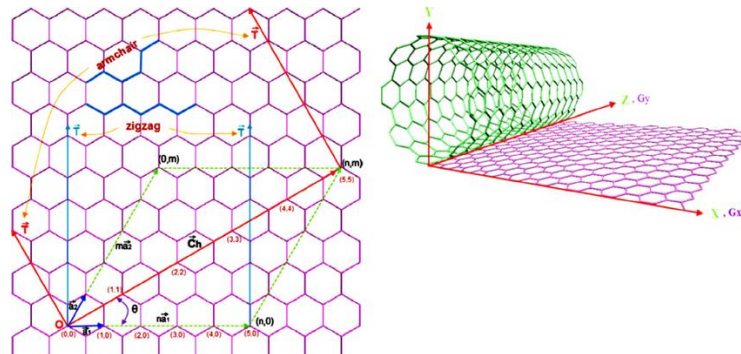
Kim ve ark. (1997) sonlu eleman (FE) analizi kullanarak kavisli, silindirik kompozit panellerin dinamik cevabına etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmaya göre az kavisli panellerin darbeye cevabı düz tabakalar gibi olmuştur ancak temas kuvveti kavisli artmasıyla artmıştır. Aynı enerji seviyesinde yapılan darbe deneyleri için kavisli numunede meydana gelen tabakalar arası ayrılma, düzlem yüzeylerden daha fazla önemlidir. Çünkü temas kuvveti ve temas süresi bu malzemelerde artmaktadır.

Gning ve ark. (2005) $(\pm 55^\circ)_{10}$ filaman sarımlı cam epoksi silindirlerde meydana gelen darbe hasarının hidrostatik basınç direncine etkisini incelemişlerdir. Kullanılan silindirlerin iç çapı 55 mm, et kalınlığı 6 mm ve uzunluğu 110 mm'dir. Öncelikle hasarsız numunelere dış basınç uygulanmış ve patlama basınçları tespit edilmiştir. Daha sonra

farklı enerji seviyelerinde hasarlandırılmış numunelere dış basınç uygulayarak numunenin patlama basıncındaki değişimler tespit edilmiştir. Numunelere dış basınç verilmesinin nedeni devam eden sualtı uygulamalarına hasar toleransı ortaya koymaktır. Darbe hasarının cam/epoksi silindirlerin patlama basıncını önemli ölçüde azalttığını göstermişlerdir. Örneğin 12 J darbe enerjisi, patlama basıncını %40 a kadar azaltmıştır.

Uyaner ve Kara (2012) birçok mühendislik uygulamalarında kullanılan filaman sarım tekniğiyle üretilmiş cam takviyeli plastik E-camı/epoksi, CTP boruların düşük hızlı darbe sonrası mukavemetini incelemişlerdir. Çalışmalarında, $(\pm 55^\circ)_5$ sarım açılı filaman sarım CTP borulara 6.350 kg kütleli 24 mm yarı küresel vurucu ile 2.0 , 3.0 ve 4.0 m/s'lik çarpma hızlarında düşük hızlı darbe testleri yapılmıştır. Ayrıca hasarlı CTP borular ASTM D 1599-99 standardına göre statik patlatma testi ile patlatılmıştır. Çalışmadan elde ettikleri sonuçlara göre, düşük hızlı darbe deneylerinde çarpma hızı arttıkça en büyük temas kuvveti, temas süresi, yer değiştirme miktarı, malzeme tarafından yutulan enerji ve numunelerde oluşan hasar miktarı artmaktadır. Ayrıca statik patlatma testi sonucunda darbe enerjisinin artmasıyla boru numunesinin patlama basıncı değerinin düştüğü tespit edilmiştir.

Polimer matrislerin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek için nano parçacıkların dolgu malzemesi olarak kullanılması ve özelleştirilmesi fikri bilim adamları tarafından sıkça araştırılmaktadır. Nanometre boyutundaki bu parçacıkların spesifik yüzey alanları oldukça büyüktür. Bu yüksek spesifik yüzey alanları nedeni ile yükün matristen nano parçacığa transferi kolaylaşacak ve sonuçta matrisin mekanik özellikleri artırılmış olacaktır. Bu yük transferini gerçekleştirmeye en uygun adaylardan biri karbon nanotüplerdir (Sanchez ve ark., 2013)



Şekil 2.1. Grafen levhanın kıvrılarak karbon nanotüpün yapısının elde edilmesi (Moghadam ve ark., 2014)

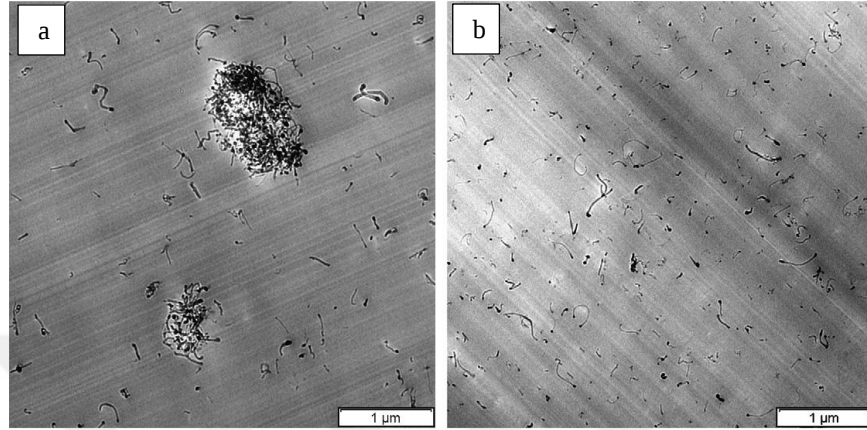
Karbon nanotüpler 1991 yılında Iijima tarafından keşfedildiğinden bu yana beklenenin de üstünde araştırmacılar tarafından ilgi görmüştür. Bu ilginin sebebi karbon nanotüplerin sahip oldukları mükemmel fiziksel ve mekanik özelliklerdir. Karbon nanotüpün yapısı, tüp haline gelecek şekilde yuvarlatılmış bir grafen levha olarak düşünülebilir (Şekil 2.1). Karbon nanotüpler hafif, dayanıklı, yüksek termal ve elektriksel iletkenliğe sahip ve boy/çap oranları büyük olan nano malzemelerdir. Karbon nanotüplerin özellikleri çaplarına, boylarına, yönlenmelerine, yüzeyel özelliklerine bağlıdır (Abbasi ve ark., 2010).

Karbon nanotüpler mükemmel mekanik özelliklere sahip olsalar da, bu özelliklerinden takviye elamanı olarak etkin bir şekilde yararlanabilmek için bazı zorlukların üstesinden gelmek gerekir. Karbon nanotüplerin polimer matris içerisinde homojen bir şekilde dağıtılması, nanotüplerin matris tarafından ıslatılabilmesi, adhezyon gibi etkenler, karbon nanotüplerin takviye elemanı olarak göstereceği performansı etkileyen en önemli konulardır (Sanchez ve ark., 2013)

Bor nitrür (BN) düşük yoğunluklu, kimyasal reaksiyonlara dirençli, yüksek erime sıcaklığına ve çok iyi termal kondüktiviteye sahip bir seramik malzemedir. Bundan dolayı BN matris malzemelerde takviye malzemesi olarak kullanılırken hem mekanik özelliklerini hem de termal kondüktivitesini artırmaktadır. BN nano malzemeler ısı iletim malzemeleri için iyi bir dolgu maddesi iken CNT ler polimerlerde elektrik iletkenliği sağlamak için kullanılırlar (Zhi ve ark., 2009).

Karbon nanotüplerin matris içerisinde homojen bir şekilde dağıtılması matris ile karbon nanotüp ağı arasında etkin olarak yük aktarımının yapılabilmesi açısından büyük önem arz etmektedir. Karbon nanotüplerin matris içerisinde iyi bir şekilde dağıtılmış olması ile ayrıca homojen gerilme dağılımı elde edilir ve gerilme konsantrasyonu oluşturan bölgelerin azalmasını sağlar (Coleman ve ark., 2006). Saf karbon nanotüpleri matris içerisinde homojen olarak dağıtmanın zorluğu, büyük yüzey alanlarından kaynaklanan van der waals kuvvetlerinin karbon nanotüpleri bir arada tutmasından ileri gelmektedir. Karbon nanotüplerin matris içerisinde kümelenmesi ve yetersiz dağılım, karbon nanotüp takviyeli kompozit malzemelerde mekanik özelliklerin iyileştirilememesi sonucunu meydana getiren en önemli etkenler olarak karşımıza çıkmaktadır (Andrews ve Weisenberger, 2004, Song ve Youn, 2005) Bu dağılım problemini çözmek için birçok fiziksel ve kimyasal yöntem geliştirilmiştir. Bunlar, ultrasonikasyon (Shaffer ve Windle, 1999) , kayma etkisi ile karıştırma, yüzey aktifleyici madde (surfaktan) kullanma (Gong ve ark., 2000) , karbon nanotüp yüzeylerinin fonksiyonelleştirilmesi (Sanchez ve ark.,

2013), plazma polimerizasyon (Shi ve ark., 2005) olarak örnek verilebilir. Karbon nanotüplerin polimerin içinde dağıtılmasında kullanılacak yöntem temel olarak kullanılan polimerin türüne ve viskozitesine bağlıdır. Karbon nanotüplerin polimer içerisindeki dağılımları taramalı elektron mikroskobu ile belirlenebilmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Polikarbonat matris içerisinde ağırlıkça 1% MWCNT dağılımı a) büyük kümelenmeler b) homojen dağılım (Pegel ve ark., 2008)

Karbon nanotüp ilavesi ile polimerin dayanımının artırılmasında bir diğer önemli faktör matris ile karbon nanotüp arasındaki yük aktarımının etkinliğidir. Matris ve karbon nanotüp arasındaki arayüzey bağlanması bu mekanizmanın etkili bir şekilde çalışması için çok önemlidir. Birçok araştırmacı karbon nanotüp ilavesi ile matrisin dayanımının beklenin altında kalmasını bu etkene bağlamıştır (Weisenberger ve ark., 2003). Karbon nanotüpler ile matris arasındaki bağlanma karbon nanotüp yüzeyinin fonksiyonelleştirilmesi ile artırılabilir. Karbon nanotüp yüzeyinin matris ile etkileşecek şekilde uygun fonksiyonel gruplar ile fonksiyonelleşmesi (Weisenberger ve ark., 2003, Chen ve ark., 2006) matris ile karbon nanotüpler arasında güçlü kimyasal bağların oluşmasını sağlar. Bu fonksiyonel gruplar matristen karbon nanotüplere yükün aktarılmasında köprü görevi görürler. Fonksiyonelleştirme ayrıca karbon nanotüplerin matris içerisinde de kolay dağılmasını sağlar. Frankland ve ark. (Frankland ve ark., 2002) moleküler dinamik simülasyonları ile karbon atomlarının 1% sinin dahi matris ile etkileşerek köprü vazifesi görmesinin toplam dayanımı arttırdığını göstermiştir. CNTler polimerlerin kırılma tokluğunu da iyileştirdiğinden çatlaklı yapıların ömrünü de artırmaktadır. CNT/epoksi nanokompozitlerin kırılma tokluğu içerisinde CNT bulunmayan epoksiye göre %139 artış göstermiştir (Ganguli ve ark., 2005)

Tabakalı kompozit malzemeler, fiber tabakalarının uygun reçineler ile birleştirilmesi sonucunda yapının tamamının yüksek dayanıma sahip olması için tasarlanabilirler. Ancak, tabakalı kompozit malzemelerin en büyük dezavantajı fiber yönünde yüksek dayanım değerleri elde edilmesine rağmen fiber takviyesine dik doğrultularda bu durumun geçerliliğini yitirmesidir. Bunun nedeni fibere dik yönlerde takviyenin olmayışıdır. Bu nedenle, matrisçe zengin ara yüzeyler kompozit malzemeler için zayıf bölgeler olup, kompozit fiber yönüne dik yönlerde kuvvetlere maruz kaldığında kolaylıkla tabakalar arası ayrılmalara olabilir. Bu nedenle, tabakalar arası dayanım kompozit malzemelerin uygulanmasında kritik tasarım faktörü olarak karşımıza çıkmaktadır. Tabakalar arası dayanımın artırılması için literatürde çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Swanson ve Smith, 1996, Byrd ve Birman, 2006). Bazı çalışmalarda üç boyutlu (3D) fiber tabakaları kullanılmıştır (Swanson ve Smith, 1996). Bazı çalışmalarda ise z pinleri kullanılarak tabakalar sabitlenmeye çalışılmıştır (Byrd ve Birman, 2006, Marasco ve ark., 2006) Tabakalar arası dayanım matris tarafından belirlenen bir mekanik özellik olduğu için (Chen ve ark., 2006), matrisin mekanik özelliklerinin karbon nanotüpler ile karıştırılarak hibrit bir yapı elde edilmesi ile iyileştirilmesi bir diğer yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır (Sanchez ve ark., 2013).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde çalışmanın kapsamını oluşturan kompozit malzemeler, filaman sarım metodu, nano teknoloji, karbon nanotüpler, bor nitrür nanopartiküller ve nanokompozitler hakkında genel bilgiler verilmiştir.

3.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, birbirinden farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin istenilen özelliklerin karşılanabilmesi için birleştirilmesi sonucu elde edilen yeni malzemelerdir. Kompozit malzemeler, bileşenleri oluşturan malzemelerin tek başına sahip olduğu istenen özelliklerin artırılması veya zayıf yönlerinin birlikte kullanımı ile giderilmesi sayesinde istenilen özelliklerin oluşturulmasını sağlar. Kompozit malzemeler ile yüksek dayanım, hafiflik, yüksek rijitlik, aşınma direnci, yüksek sıcaklık direnci, korozyon direnci, ısı ve elektrik iletkenliği veya yalıtkanlığı gibi özellikler sağlanabilmektedir.

Gerekli özelliklerin kompozit malzemeler ile elde edilebilmesi nedeni ile birçok ileri teknoloji ürün kompozit malzemelerden üretilmektedir.

Kompozit malzemeler genel olarak iki ana bileşenden oluşur. Bunlar matris adı verilen bir bağlayıcı ile takviye edici yapısal bileşenlerdir. Matris malzemeler genel olarak, bağlayıcı olarak görev yapar, takviye elemanlarını bir arada tutar ve kuvvet aktarımı sağlarlar. Matris malzemelerin genel amacı; yapıyı desteklemek ve gerilmeyi transfer etmektir. Matris malzemelerin takviye elemanlarına oranla yoğunlukları, rijitlikleri ve mukavemetleri daha düşüktür (Kara, 2012).

3.1.1. Matris malzemeler

Kompozitlerde matris malzeme, takviye elemanlarını bir arada tutmak, yükü dağıtmak ve transfer etmek, takviye elemanları çevresel etkilerden korumak amacıyla kullanılır. Matris malzemenin özelliklerine bağlı olarak oluşturulan kompozit malzemenin mekanik özellikleri de etkilenmektedir.

Kompozitlerde genel olarak üç tip matris malzeme kullanılmaktadır. Bunlar seramik, metal ve plastik (polimer) esaslı malzemelerdir. Polimer esaslı matrisler

termoset ve termoplastik matrisler olmak üzere iki genel kısma ayrılmaktadır (Chawla, 2012).

3.1.2. Takviye malzemeleri

Matris malzeme içinde yer alan takviye malzemeleri kompozit yapının temel mukavemet elemanlarıdır. Düşük yoğunluklarının yanı sıra yüksek elastite modülüne ve sertliğe sahip olan elyaflar kimyasal korozyona da dirençlidir. Günümüzde kompozit yapılarda kullanılan en önemli takviye malzemeleri sürekli elyaflardır. Bu elyaflar özellikle modern kompozitlerin oluşturulmasında önemli bir yer tutarlar. Aramid, karbon, grafit, boron, silisyum karbür (SiC), alümina, cam ve polietilen malzemelerin kısa veya uzun sürekli elyaf formunda kullanıldığı ve matrisi yaklaşık % 60 hacim oranında güçlendirici işlevi olan malzemelerdir.

3.2. Kompozit Malzeme Üretim Metotları

Kompozit malzemelerin endüstriyel olarak birçok üretim metodu bulunmaktadır. Kompozit malzeme üretim metodu üretilecek malzemeyi oluşturan bileşenlerin özelliklerine, üretilecek malzemenin şekline, boyutlarına, sağlanmak istenilen özelliklere ve kullanım amaçlarına bağlı olarak seçilir. Kompozit malzemelerin havacılıktan, yapı endüstrisine, otomotivden medikal ürünlere kadar pek çok uygulama alanı vardır (Sinha ve ark., 2006).

3.2.1. Filaman sarım metodu

Filaman sarım metodu özellikle basınçlı kap, boru gibi silindirik forma sahip kompozit malzemelerin üretimi için kullanılan metotlardan biridir. Bu metot da sürekli takviye malzemesinin belirli bir hızda dönme hareketi gerçekleştiren bir kalıp üzerine sarılması sağlanır. Kuru ve ıslak olmak üzere iki farklı filaman sarım metodu uygulanmaktadır. Islak filaman sarım metodu takviye malzemesinin, matris malzemesini içeren bir ıslatma banyosundan geçirilerek kalıp üzerine sarımın gerçekleştirildiği yöntemdir. Kuru sarım metodu ise daha önceden matris malzeme emdirilerek hazırlanmış takviye elemanının kalıp üzerine sarılması ve kürlenmesi ile gerçekleştirilir. Filaman sarım metodunda üretilecek kompozit malzeme kalınlığı, istenilen kalınlığa erişilene

kadar sarım işleminin devam ettirilmesi ile sağlanır. Sarım işlemi farklı sarım açılarında gerçekleştirilebilir. Genellikle matris malzeme olarak termosetler kullanılır. Üretim işlemi sonunda kalıp kompozit malzemeden çıkarılır.

Filaman sarım metodunda her tip sürekli takviye malzemesi kullanılabilir. Bu metod ile kullanılan başlıca matrisler ise epoksi, polyester ve vinilester malzemelerdir.

Filaman sarım metodunda kullanılan üretim parametreleri üretilen kompozitin özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Filaman sarım metodu için üretim parametreleri ve etkileri şu şekildedir;

Takviye malzemesinin gerginliği: Sarımı yapılan takviye malzeme gerginleştikçe matrisin ıslatması ve takviye malzeme ile etkileşimi azalır. Bazı kısımlarda takviye malzemesinin matris ile tam temas etmemesine ve boşluk oluşmasına neden olabilir. Bu etki yük altında matris ile takviye malzemesinin bağımsız hareketine, yükün transfer edilmemesine ve takviye malzemelerinin birbiri ile sürtünmesine yol açabilir. Gerginliğin yetersiz olması ise takviyenin aşırı olarak matris ile ıslanmasına veya sarım işleminin düşük gerginlik nedeni ile düzensiz olmasına neden olacaktır.

Sarım açısı: Üretilen kompozit malzemenin hangi yönde ne tür gerilmeleri taşıyabileceğini belirler. Bu nedenle sarım açısının buna göre belirlenmesi gereklidir.

Takviye ve matris malzeme türü: takviye ve matris malzemesinin türü filaman sarımı metodunu etkileyen üretim parametrelerindendir. Takviye ve matris malzemesinin birbiri ile uyumlu olması, ara yüzey bağlantısı oluşturabilmesi ve sarım için ortam ve hazırlama koşullarının malzeme özellikleri ile uyumlu olması gerekmektedir.

Sarımda kullanılan sürekli takviye malzemesi sayısı: Takviye malzemesi sayısına bağlı olarak filaman sarım işlemi sırasında matris malzemenin takviye malzemesine nüfuzu etkilenir ve değişim gösterir. Fazla sayıda takviye malzeme kullanılırsa matrisin ıslatması zorlaşır. Bu durumda takviye malzemeler arasında sürtünme ve aşınma meydana gelir.

Kalıp dönme hızı: matrisin kalıp boyunca yoğunluğu kalıp dönme hızına bağlı merkezkaç etkisiyle belirlenir. Matrisin yoğunluğu da yine üretilen kompozit malzemenin özelliklerini etkiler.

3.3. Nano Teknoloji

Teknoloji, modern çağın gerekliliklerini karşılamak için sürekli gelişmektedir. Bu gelişmelerden biri de malzemelerin küçük boyutlu yapı birimlerinden başlayarak

kontrolüne dayalı ve malzemelerin özelliklerini iyileştirmeye yönelik olan Nanoteknoloji'dir. Nanoteknoloji nano ölçekte üretim, işleme ve karakterizasyon işlemlerini kapsar.

Malzemelerde genel olarak boyut küçülerek nano boyuta indirildiğinde malzeme özelliklerinde etkileyici değişimler gözlenir. Nano boyuttaki malzemeler hacimlerine kıyasla oldukça büyük yüzey alanlarına sahiptir. Kimyasal ve fiziksel etkileşimlerin yüzey ve yüzey özelliklerinden etkilenmesi nedeniyle nano boyuttaki bir malzeme aynı bileşime sahip olduğu daha büyük boyutlardakilerden farklı özelliklere sahip olmaktadır.

Nanoteknoloji başta biyoteknoloji, elektronik ve kompozit olmak üzere birçok alanı içerir. (Thostenson ve ark., 2001, Thostenson ve ark., 2005).

3.3.1 Karbon nanotüpler

Karbon nanotüp'ler (KNT) , grafit levhaların silindirik elde edecek şekilde yuvarlatılması olarak açıklanabilir. Grafitler yapı olarak C-C sp^2 bağlarına sahiptir. Bu bağlar en sert malzemelerden olarak bilinen elmasın sahip olduğu C-C sp^3 bağlarından daha güçlüdür. Bunun nedeni ise C-C sp^2 bağlarının boyları daha kısa olmasıdır. Ancak, grafit tabakaları arasında bulunan ve nispeten çok daha zayıf olan Van der Waals bağları, grafit tabakalarının birbirleri üzerlerinden kolaylıkla kaymasına olanak tanır. Karbon nanotüpler tek cidarlı veya çok cidarlı yapılarda bulunabilmektedir ve çok cidarlı karbon nanotüpler (ÇCKNT'ler) basitçe eş merkezli tek cidarlı karbon nanotüplerden (TCKNT'ler) oluşmaktadır (Thostenson ve ark., 2001). TCKNT'ler, ÇCKNT'lere göre daha dayanıklıdır. Çünkü sadece bir grafit tabakasının yuvarlatılması ile oluşur (Fan, 2007). ÇCKNT'ler ise iç içe geçmiş eş merkezli tüplerden oluşur ve bu tüplerin birbirleri içinden kayabilme ihtimalleri dayanımlarını düşürür (Lordi ve ark., 1999). KNT'lerin bir başka yapıda fulleren, beşgen ve altıgen oluşan, dışbükey kapalı kafes şeklindedir.

3.3.2 Bor nitrür nano partiküller

Bor nitrür bilinen en sert malzemelerden biridir. Bu özelliği bakımından yüksek hızlı kesme ve metal işleme aletlerinde kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklara ve korozyona dirençlidir. İyi bir ısı iletkenidir ve katı yağlayıcı olarak kullanılabilir.

Bu gibi özellikleri nedeniyle bor nitrür nanopartiküllerin son yıllarda polimerler içerisinde kullanımı giderek artmaktadır (Zhi ve ark., 2009).

3.4. Nanokompozitler

Nanokompozit bir tanıma göre, kompozit yapıyı oluşturan fazlardan birinin bir, iki veya üç boyutundan biri veya birkaçının 100 nanometre'den (nm) küçük olduğu ya da kompozit malzemeyi oluşturan fazlar arası nano ölçekli mesafelere sahip çok fazlı katı yapılarıdır. En geniş anlamda bu tanım gözenekli ortam, kolloidler, jeller ve kopolimerler için kullanılabilir fakat genel olarak asıl matris kütlesinde nano boyutlu yapısal ve kimyasal farklı fazların birleşimi ile açıklanır. Nanokompozitlerde mekanik, elektriksel, termal, optik ve elektrokimyasal özellikler bileşen materyallerinden belirgin farklılıklar göstermektedir (Kamigaito, 1991).

Diğer bir tanımda ise Nanokompozit, meydana geldiği malzemelerden en az birbirinin boyutlarının nanometre (10^{-9} m) ölçüsünde olması halinde bu tip kompozit malzemelere verilen adlandırmadır (Ishida ve ark., 2000). Nanokompozitler ile elde edilen yeni özellikler, son yıllarda nanokompozitler üzerinde çalışmaları hızlandırmıştır. Malzemelerin nano boyuttaki özellikleri ile aynı malzemenin makro boyuttaki özellikleri farklılık göstermektedir. Bunun başlıca nedeni ise yüksek yüzey alanı hacim oranı ile ilişkilendirilmektedir. Nanokompozitler ile alışlagelmiş kompozitlerden sağlanamayan istenilen özelliklerin sağlanması mümkün hale gelmektedir. Son yıllarda matris malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesi için matris içerisine ilave edilen nano malzemeler ile elde edilen nanokompozitler üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Mekanik açıdan, nanokompozitler takviye edici fazın yüzey alanının hacme oranla çok yüksek olması ve / veya son derece yüksek en boy oranı nedeni ile geleneksel kompozitlere göre oldukça farklıdır. Takviye edici malzeme partiküllerden, levhalardan ya da fiberlerden meydana gelebilir. Matris ile takviye fazları arasındaki ara yüzey alanı geleneksel kompozit malzemelerden çok daha büyüktür. Matris malzemesinin özellikleri takviye bölgesinin çevresini önemli ölçüde etkiler.

Takviye malzemesinin geniş yüzey alanı, düşük miktarda nano ölçekli takviyenin, kompozitin makroskobik düzeydeki özellikleri üzerinde gözlemlenebilir etkiler oluşturabileceği anlamına gelir. Örneğin karbon nanotüplerin eklenmesi elektriksel ve termal özellikleri değiştirir. Diğer nanopartikül türleri, gelişmiş optik özellikler, dielektrik özellikler, ısı direnci, sertlik, mukavemet, aşınma ve hasara karşı direnç gibi

mekanik özelliklere neden olabilir. Genel olarak, nano takviye, kompozit malzemenin üretimi sırasında matrise dağıtılır. Özellikle en boy oranı yüksek olan küresel olmayan karbon nanotüpler, nanoplakalar gibi katılan nanopartiküllerin kompoziti oluşturan diğer malzemelere kütlece oranları düşük sızma eşiğinden dolayı yüksek değerde kalabilir. Asimetrik nanopartiküllerin yönelimleri ve düzenlenmesi, arayüzeylerde termal uyumsuzluğu, kompozitin hacim başına arayüz yoğunluğu ve nanopartiküllerin tam dağılmaması termal iletkenliği önemli ölçüde etkiler (Tian ve ark., 2013).

3.4.1 Seramik matris nano kompozitler

Bu grup kompozitler ana hacim olarak seramik bileşen grupları olan oksitler, nitrürler, borürler, vb. malzemelerden oluşurlar. Çoğu durumda seramik matris kompozitler ikinci malzeme olarak genellikle metaller içerirler. İdeal olarak her iki bileşende metalik veya seramik, belirli bir nanoskobik özellikleri ortaya çıkarmak için birbirleri içerisinde çok iyi dağıtılırlar. Bu dağıtım sonucu elde edilen nanokompozitlerde, optik, elektriksel ve manyetik özelliklerin (Kruis ve ark., 1998) yanı sıra tribolojik, korozyona direnç ve diğer koruyucu özelliklerin iyileştiği görülmektedir (Zhang ve ark., 2003).

3.4.2 Metal matris nanokompozitler

Metal matris nanokompozitler aynı zamanda takviyeli metal matris kompozitler olarak da tanımlanabilir. Bu tür kompozitler sürekli ve sürekli olmayan takviyeli malzemeler olarak sınıflandırılabilir. karbon nanotüplerin yüksek çekme mukavemeti ve elektrik iletkenliğinden dolayı en önemli metal matris nanokompozitlerden biri karbon nanotüp metal matris nanokompozitlerdir. Karbon nanotüp- metal matris kompozitlerin optimal özelliklerde gerçekleştirilebilmesi için metalik matriste homojen bir şekilde nanotüp dağılımı sağlayan, ekonomik, metalik matris ile karbon nanotüpler arasında güçlü bir bağlanma sağlayan üretim metodlarının kullanılması gereklidir. Karbon nanotüp metal matris kompozitlerin yanında bor nitrür takviyeli metal matris kompozitler ve karbon nitrür metal matris kompozitler üzerinde çalışmalar devam etmektedir (Bakshi ve ark., 2010).

3.4.3 Polimer matris nanokompozitler

Bir polimer matrise uygun bir şekilde nanopartikül eklenmesi durumunda polimer matrisin özellikleri eklenen nanopartikülün doğasına ve özelliklerine göre etkili bir biçimde gelişir (Manias, 2007). Nanopartiküllerin matris içerisinde iyi dağıtımının sağlanması ve nano katkının matris malzemedan değişik ve iyi olması yüksek performanslı kompozitlerin elde edilmesinde etkilidir.

Bu nano parçacıkların düşük konsantrasyonlarda (~% 0.2 ağırlık) polimer matrisine eklenmesi, polimerik nanokompozitlerin basma ve eğilme mekanik özelliklerinde belirgin gelişmelere neden olur (Lalwani ve ark., 2013, Lalwani ve ark., 2013). Çalışmalar, mekanik takviyenin, nano mekanik morfolojiye, kusurlara, nano malzemelerin polimer matrisinde dağılımına ve polimerin çapraz bağlanma yoğunluğuna bağlı olduğunu düşündürmektedir (Gatti ve ark., 2016).

Kompozit içerisine nano dolgu maddesinin dağıtımı veya nano yapıların kontrolü matriste daha önce bulunmayan yeni fiziksel özellikler ve yeni davranışlar ortaya koyabilir. Bu, özgün matrisin doğasını etkili bir şekilde değiştirir (Manias, 2007).

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada saf epoksili (nano katkısız), çok cidarlı karbon nanotüp (ÇCKNT) katkılı, bor nitrür nanopartikül (BNNP) katkılı ve ÇCKNT+BNNP (nano hibrit) katkılı matrise sahip filaman sarım yöntemi ile üretilen karbon fiber takviyeli kompozit boruların düşük hızlı darbe direnci ve nano katkılandırmanın boruların dinamik davranışına etkisi ağırlık düşürme test metoduyla, nano katkılandırmanın malzeme mukavemetine etkisi ise darbe öncesi yapılan statik patlatma test yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Darbe testleri iç basınçsız ve 12 Bar iç basınçlı koşullarda gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan numuneler nano katkı içeriklerine göre dört gruba ayrılmıştır. Bunlar;

- 1- Saf (katkısız) epoksi matris / karbon fiber takviyeli kompozit boru
- 2- BNNP katkılı epoksi matris / karbon fiber takviyeli kompozit boru
- 3- ÇCKNT katkılı epoksi matris / karbon fiber takviyeli kompozit boru
- 4- ÇCKNT ve BNNP (nano hibrit) katkılı epoksi matris / karbon fiber takviyeli kompozit boru

Şeklindedir.

Nano katkılı ve katkısız kompozit boruların üretilmesinde daha önceki çalışmalarımız da belirlenen optimum katkı oranlarına uygun olarak nano malzemeler kullanılmıştır (Ulus ve ark., 2014). Bu oranlar aşağıdaki Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Numunelerde kullanılan nano malzeme oranları

Numuneler	Kullanılan Nano Malzeme	Nano Malzeme Oranı (Ağırlıkça)
Saf Epoksili	-	% 0
BNNP Katkılı	BNNP	% 0.5
ÇCKNT Katkılı	ÇCKNT	% 0.3
ÇCKNT+BNNP Katkılı	ÇCKNT+BNNP	% 0.3 ÇCKNT + % 0.5 BNNP

Bu bölümünde yukarıda bahsedilen numunelerin hazırlanmasında kullanılan malzemelerin özellikleri, nano malzemelerin epoksiye karıştırılarak matris malzemenin hazırlanması, kompozit boruların üretim hazırlıkları, filaman sarım yöntemi ile kompozit boruların üretimi, test numunelerinin hazırlanması aşamaları, kullanılan test metotları ve analizler ile bu metot ve analizlerin değerlendirme yöntemleri açıklanmıştır.

4.1. Bu Çalışmada Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Malzeme özellikleri detaylı olarak aşağıda belirtilen başlıklar içerisinde açıklanmıştır.

4.1.1. Epoksi matris malzeme özellikleri

Bu çalışmada matris malzeme olarak diglisidil eter bisfenol-a bazlı Huntsman firmasından sağlanan Araldite MY 740 epoksi, Aradur HY918 kürleştirici ve DY062 hızlandırıcı içeren üç fazlı filaman sarım reçine sistemi kullanılmıştır. Reçine sistemine ait ürün verileri 25°C ortam sıcaklığı için aşağıdaki Çizelge 4.2’de, Reçine sisteminin filaman sarım için tavsiye edilen uygulama koşulları Çizelge 4.3’de, Reçine sisteminin tavsiye edilen karışım oranları Çizelge 4.4’de, Reçine sisteminin kullanım verileri Çizelge 4.5’de ve Reçine sisteminin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.2. Reçine sistemi ürün verileri

Bileşenler	Viskozite (MPa s)	Yoğunluk (g/cm ³)
İlgili Standart	ISO 12058	ISO 1675
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 4.3. Reçine sisteminin filaman sarım için tavsiye edilen uygulama koşulları

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 tavsiye edilen karışım oranları

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

Çizelge 4.5. Reçine sisteminin kullanım verileri

Açıklama	Değerler
Başlangıç Viskozitesi (MPa s) (ISO 12058) 25 °C’de	700
Pota Ömrü (ISO 12058) 25 °C ve 15000 MPa s	-
60 °C ve 1500 Mpa s	3.3s
Jelleşme Süresi (ISO 9396) 60 °C	5.6s
80 °C	80dk
100 °C	19dk
120 °C	5dk
140 °C	3dk

Çizelge 4.6. Reçine sisteminin fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksek / 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

4.1.2. Karbon fiber takviye malzemesi özellikleri

Bu çalışmada takviye malzemesi olarak kullanılan karbon fiberler Dowaksa firması tarafından sağlanmış olan 12K A-42 kodlu karbon fiber ipliklerdir. Karbon fiber ipliklerin özellikleri aşağıdaki Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 Karbon fiberlerin özellikleri

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
Tex sayısı	ISO 1889	g/1000m	800
Boyut tipi ve miktarı	ISO 10548	%	1.0-1.5
Bükülme	Bükülmesiz		

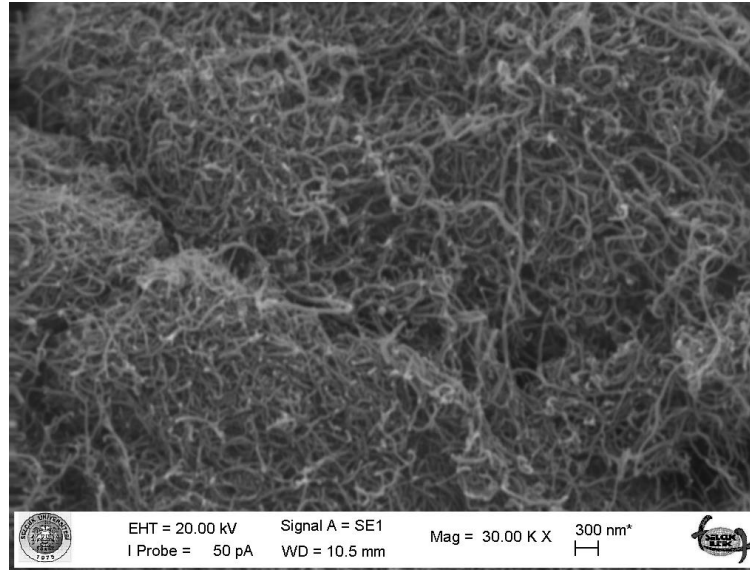
4.1.3. Çok cidarlı karbon nanotüpler

Bu çalışmada Çok Cidarlı Karbon Nanotüpler (ÇCKNT) yaygın ve kolay bulunabilmesi, boyut ve şekil özellikleri bakımından BNNP’lerden farklı özellikler göstermesi, tek cidarlı karbon nanotüplere göre düşük maliyet oluşturması, epoksi reçineler içerisinde homojen olarak dağıtılabilirliği, geniş yüzey alanına sahip olmaları, epoksi reçine ile iyi bir bağ oluşturması ve kaynak araştırması kısmında da belirtildiği gibi birçok çalışmada mekanik özelliklerde göstermiş olduğu geliştirmelerden dolayı bu

tez çalışmasında kullanılmıştır. Kullanılan ÇCKNT'ler NANOCYL firmasından tedarik edilmiştir. ÇCKNT'lerin fiziksel ve mekanik özellikleri aşağıda Çizelge 4.8. de, taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü ise Şekil 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. ÇCKNT'lerin fiziksel ve mekanik özellikleri

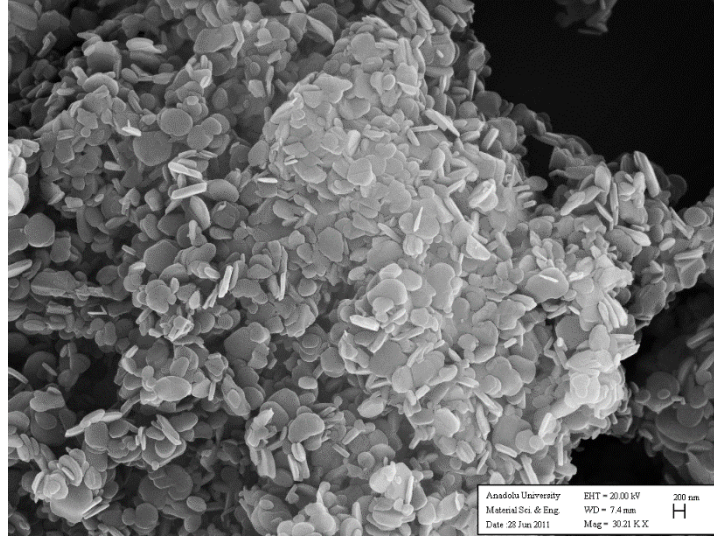
Açıklama	Birim	Değer
Çekme dayanımı	GPa	10-60
Elastiklik modülü	TPa	1
Uzama	%	10
Yoğunluk	g/cm ³	1.3-2
Elektrik iletkenliği	S/m	10 ⁶ -10 ⁷
Çap	nm	5-50
Uzunluk	µm	10-30



Şekil 4.1. ÇCKNTlerin SEM görüntüsü

4.1.4. Bor nitrür nano partiküller

Bu çalışmada bor nitrür nanopartiküller (BNNP), boyut ve şekil özellikleri bakımından karbon nanotüplerden farklı olması, bu özellikleri nedeniyle mekanik özellikleri farklı mekanizmalar ile etkileyebilmesi, seramik olmaları ve yüksek termal iletkenlik göstererek eklendikleri epoksi matrisin termal dayanımını arttırabilmeleri nedeniyle tercih edilmiştir. Kullanılan BNNP'ler Bortek firmasından tedarik edilmiştir. Boyutları yaklaşık olarak 350 nm X 225 nm X 65 nm olup, SEM görüntüsü Şekil 4.2 'de verilmiştir.



Şekil 4.2. BNNP'lerin SEM görüntüsü

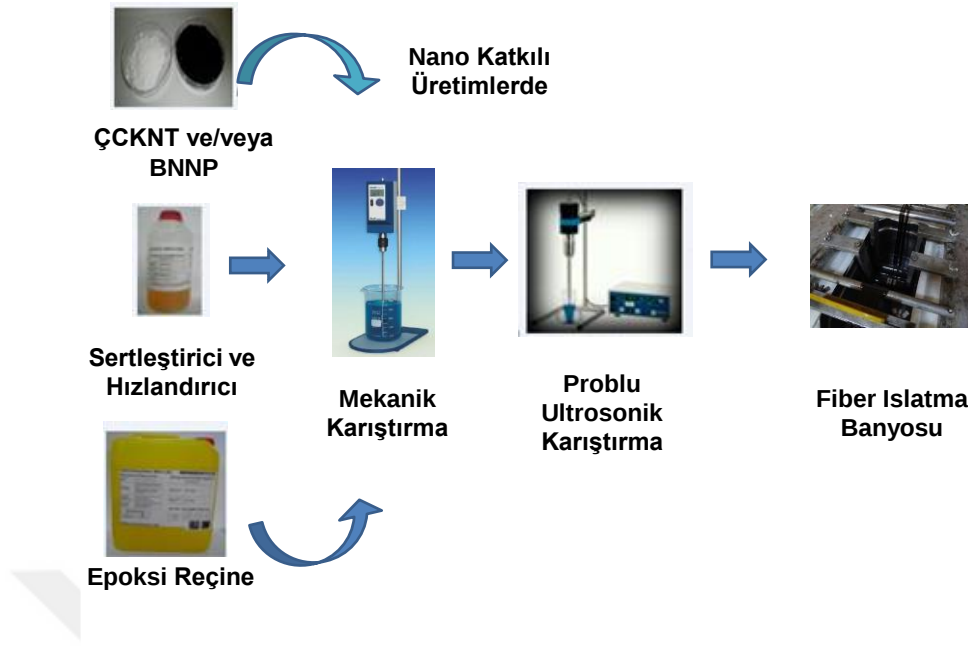
4.2. Nano Katkılı Epoksi Matrisin Hazırlanması

ÇCKNT ve BNNP'lerin epoksi reçineye en iyi şekilde karıştırılarak homojen dağılımın sağlanması ve nano katkılı epoksi matrisin en iyi şekilde hazırlanarak kompozit boru üretiminde kullanılması için literatürde bulunan çalışmalardan yararlanılmıştır.

Literatür verileri incelendiğinde en çok tercih edilen karıştırma araçlarının ultrasonik problu sonikatör, ultrasonik banyo, mekanik ve manyetik karıştırıcılar olduğu görülmektedir. Çoğu çalışmada epoksi içerisinde daha iyi dağılım elde edilebilmesi için etanol, metanol, aseton... vs kimyasalların da kullanıldığı da açıklanmıştır (Breuer ve Sundararaj, 2004, Xie ve ark., 2005, Fiedler ve ark., 2006, Moniruzzaman ve Winey, 2006, Bal ve Samal, 2007, Gibson ve ark., 2007, Spitalsky ve ark., 2009, Garg ve ark., 2011). Kimyasal eklenmesi ile karıştırmada ilave edilen kimyasalın epoksinin kürlenme mekanizmasını etkilediği ve camsı geliş sıcaklığını değiştirebildiği belirlenmiştir. Kimyasal ilavesi ile karıştırma metodunda nano malzemenin epoksi içerisinde dağılımından sonra uzun süreler vakum altında fırında bekletilerek eklenen kimyasalın uçurulması ve epoksi içerisinden uzaklaştırılması gerekmektedir. Buda epoksinin pota ömrünün kısılmasına ya da aşılmasına, üretim yönünden duraksamalara ve kimyasalın uçurulması sırasında nano malzemenin epoksi içerisinde çökelmeye başlamasına neden olmaktadır. Bu gibi nedenlerden dolayı ve literatür verilerinden yararlanılarak nano malzemelerin ara kimyasal eklenmeksizin direk olarak epoksi içerisine ilave edilerek karışımın mekanik karıştırıcı ve ultrasonik problu sonikatör ile yapılmasına karar verilmiştir.

Öncelikle nano malzemeler mekanik karıştırıcı ile 30 dk ön karışıma tabi tutulmuştur. Daha sonra ultrasonik problu karıştırıcı ile karıştırma (sonikasyon) işlemi yapılmıştır. Sonikasyon sırasında, sonikasyon süresi ve sonikatör ucun epoksi reçine içerisine ne kadar daldırıldığına bağlı olarak karbon nanotüplerin boyları kısaldığı ve karışımın sıcaklığının arttığı ile ilgili literatürde veriler bulunmaktadır (Kerr ve ark., 2011, Huang ve Terentjev, 2012). Bu çalışmada, sonikasyon süresi 10 dk seçilerek karbon nanotüplerin epoksi içerisinde etkin bir şekilde dağıtılması için yeterli süre sağlanmış, karbon nanotüplerin boyutları korunmaya çalışılmış ve sıcaklık artışı kontrol altında tutularak epoksi reçinenin viskozitesinin azalmasına imkân sağlanmıştır. Sonikasyon sırasında karışımın sıcaklığı termometre ile ölçülerek kontrol altında tutulmuştur. Mekanik karıştırma ve sonikasyon işlemleri her bir kompozit boru üretimi için iki kez tekrarlanmıştır. Kompozit boru üretimi için epoksinin hazırlanmasında son işlem olan sonikasyon tamamlandığında, hazırlanan epoksi matris karışım sıcaklığının yaklaşık olarak $40\pm3^{\circ}\text{C}$ civarına olduğu ölçülmüştür. Bu sıcaklık, seçilen epoksi reçine sisteminin Çizelge 4.3’de (Reçine sisteminin filaman sarım için tavsiye edilen uygulama koşulları) tavsiye edilen uygulama sıcaklığı değerleri arasında kalmaktadır. Boruların üretimi sırasında bu sıcaklık fiber ıslatma banyosu içerisinde bulunan termostatlı ısıtma sistemi kullanılarak sabit tutulmuştur. Epoksi matris karışımlarının hazırlanması için kullanılan sürelerin epoksi reçinenin pota ömrü içerisinde olmasına ve sarım işlemi için yeterli süre kalmasına ayrıca dikkat edilmiştir (Çizelge 4.5).

Saf epoksili (nano katkısız) kompozit borular için epoksi matris hazırlanmasında numune özelliklerinin üretim süreçlerinden etkilememesi için nano katkılı epoksi matris hazırlanması aşamaları aynen uygulanmıştır.



Şekil 4.3. Epoksi matrisin hazırlanma aşamaları

Yukarıda Şekil 4.3’de Epoksi matrisin hazırlanış aşamaları şematize edilmiştir. Buna göre;

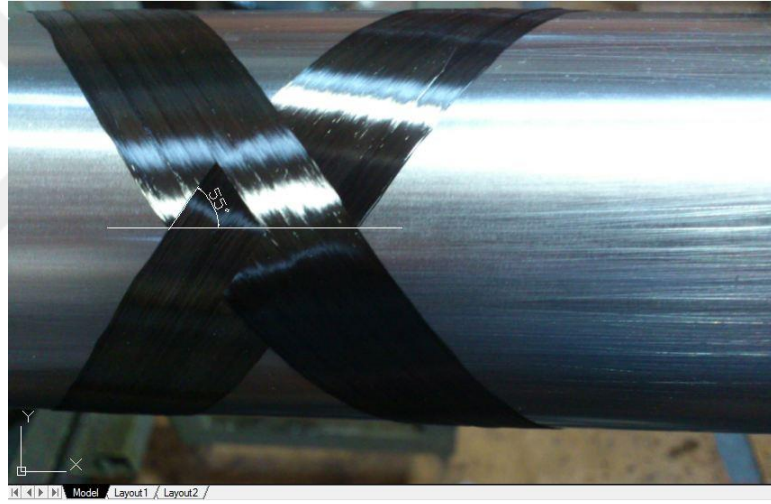
- ÇCKNT ve/veya BNNP Çizelge 4.1 (Numunelerde kullanılan nano malzeme oranları)’de belirtilen oranlarda hassas terazi ile, epoksi reçine sistemi bileşenleri Çizelge 4.4. (Reçine sisteminin tavsiye edilen karışım oranları) belirtilen değerlere göre terazi ile tartılmış,
- Epoksi reçine sistemi bileşenleri ve nano katkıları 30 dk süreyle oda sıcaklığında mekanik karıştırmaya tabi tutulmuş,
- Karışım probu ultrasonik karıştırıcı ile 10 dk’lık süre içinde aralıklarla, sıcaklığı termometre ile kontrol altında tutularak ikinci bir karıştırma işlemi yapılmış,
- Yukarıda açıklanan mekanik ve ultrasonik karışım işlemleri sırasıyla bir kez daha tekrarlanmış,
- Son olarak hazırlanan epoksi matris kompozit boru üretimde kullanılmak üzere reçine banyosuna alınarak sıcaklığı elektrikli ve termostatlı ısıtıcı ile sabit tutulmuştur.

4.3. Kompozit Boruların Üretim Hazırlığı

Filaman sarım boruların üretimine başlamadan önce yapılan ön işlemler ve filaman sarım boruların üretim parametreleri bu aşamada belirlenerek uygulamaya alınmıştır. Filaman sarım boruların iç çap ölçüsü mevcut test cihazlarına uygun olacak şekilde 72mm olarak belirlenmiştir. Bu iç çap değerini sağlayacak filaman sarım boru üretimi için günlük üretim miktarına uygun, benzer özelliklerde 4 adet 110 cm uzunluğunda (her bir mandrelden 30cm boyunda 3 adet numune hazırlayabilecek nitelikte) mandrel hazırlanmıştır. Mandrel uzunluğu filaman sarım işlemi sırasında uç kısımlarda görülebilecek düzensizlik faktörleri ön görülerek bu düzensiz olabilecek kısımların numune hazırlanması sırasında kullanılmaması için her iki uçtan 10 cm çıkarılacak şekilde belirlenmiştir. Numunelerin mandrelden hasarsız ve daha kolay ayrılmasını sağlamak ve iç yüzey kalitesini arttırılmak için mandrel yüzeylerine taşlama ve krom kaplama yapılmıştır. Sarım bant genişliğini oluşturan fiber sayısı karbon fiber ipliklerin tiftiklenme yatkınlığı, epoksi reçinenin fiberler arasına tam nüfuz edememesi ve yeterli ıslanmama gibi oluşabilecek sorunların azaltılması ve üretim esnasında oluşabilecek diğer problemlerin kolaylıkla belirlenebilmesi için üç (3) fiber olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan CNC kontrollü sarım makinası (Şekil 4.4), aynı anda 4 sarım yapabilecek kapasiteye sahip olmasına rağmen hassas üretim için her numune boru üretimi ayrı ayrı yapılmıştır. CNC kontrollü sarım makinası önceden belirlenen değer olan $\pm 55^\circ$ sarım açısına göre ayarlanmış ve $[\pm 55^\circ]_4$ sarım için gerekli parametre değerleri girilmiştir. Epoksi matris kullanılmadan yapılan kuru sarım ile sarım bantlarının örtme ve boşluk kontrolü yapılmış, makinanın sarım kafasında bulunan toplayıcı halkanın mesafesi ayarlanmıştır. Sarım açısının kontrolü Şekil 4.5 'de kuru sarım işlemi ise Şekil 4.6'de görülmektedir.



Şekil 4.4. CNC kontrollü sarım makinası



Şekil 4.5. Sarım açısı kontrolü



Şekil 4.6. Kuru sarım işlemi

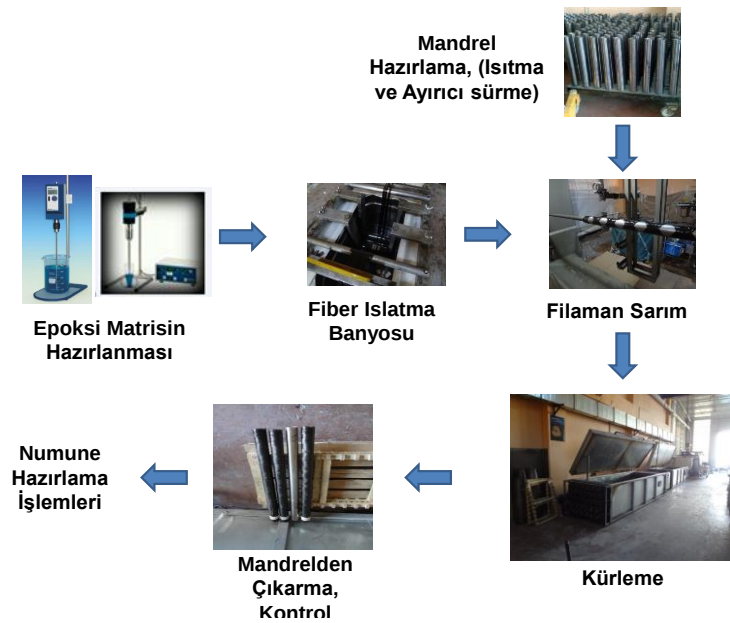
Filaman sarım boruların üretimi için kullanılan sarım parametreleri aşağıda Çizelge 4.9’de verilmiştir.

Çizelge 4.9 Sarım Parametreleri

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

4.4. Filaman Sarım Yönetimi ile Kompozit Boruların Üretimi

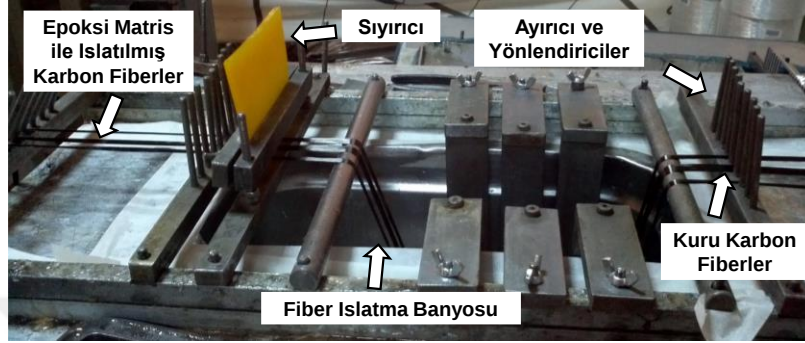
Üretimin gerçekleştirilmesin de saf epoksili, ÇCKNT katkılı, BNNP katkılı ve ÇCKNT+BNNP (nano hibrit) katkılı matrise sahip olmak üzere dört çeşit epoksi matris karbon fiber takviyeli kompozit boru üretimi yapılmıştır. Üretim gerçekleştirme işlemlerine deneme üretimleri ile başlamıştır. Önce her bir boru tipinden birer adet üretim yapıp gözle muayenesi yapılmıştır. Yapılan muayene de sorun görülmemesi üzerine üretime geçilerek testler ve analizler için gerekli numune kompozit boruların üretimi sağlanmıştır. Boru üretimde izlenen gerçekleştirme aşamaları Şekil 4.7’de görülmektedir.



Şekil 4.7. Kompozit boru üretim gerçekleştirme aşamaları

Nano katkılı kompozit boru üretimine önceki bölümlerde açıklandığı şekilde epoksi matrisin hazırlanması ile başlanmıştır. Epoksi matris hazırlanırken diğer yandan

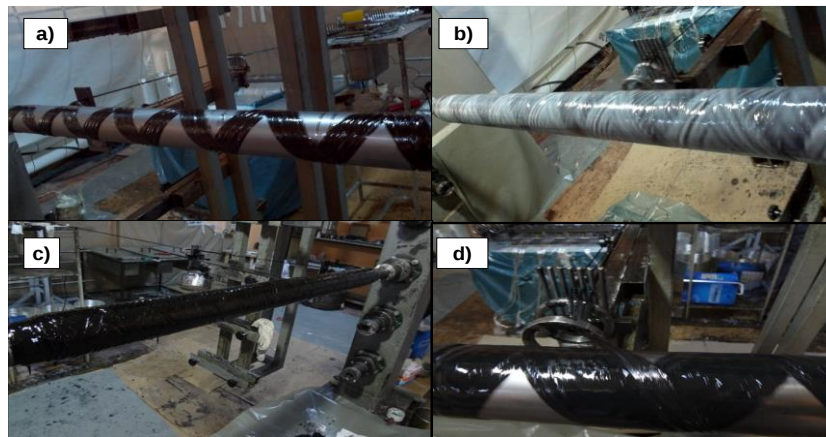
mandreller temizlenerek, Çizelge 4.3'deki reçine sisteminin filaman sarım için tavsiye edilen uygulama koşulları gereğince belirtilen sıcaklıklar arasında ısınmaları için ön ısıtma fırınına yerleştirilmiştir. Sarım makinası ve fiber ıslatma banyosu tiner ile temizlenmiş ve kurutularak sarım işlemine hazırlanmış, karbon fiber bobinleri yerleştirilerek, fiber ipliklerin gergi ve istikamet ayarlamaları yapılmıştır (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Sarım makinasının üretime hazırlanması

Gerekli ayarlama ve hazırlıkların tamamlanmasından sonra ısıtılan mandrel makinaya takılarak kalıp ayırıcı sürülme işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretim için hazırlanan epoksi matris, fiber ıslatma banyosuna dökülerek sarım işlemine hazır hale getirilmiştir. Sarım sırasında epoksi sıcaklığının düşmemesi için fiber ıslatma banyosunun ısıtıcı devresi çalıştırılarak, sıcaklığı thermostat ile kontrol edilmiştir.

CNC kontrollü sarım makinasının sarım programı çalıştırılarak daha önceden belirlenen parametrelere göre sarım işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Sarım işlemi a) Saf epoksili, b) BNNP katkılı c) ÇCKNT katkılı d) Nano hibrit (ÇCKNT+BNNP) katkılı

Sarım sırasında yönlendiriciler çevresinde biriken tiftiklenmeler sarımı ve numune kalitesini etkilemeden toplanarak uzaklaştırılmıştır. Islatma banyosu çıkışında fiber üzerinde biriken fazla epoksi sıyrıcı ile sıyrılmıştır. Sarımın tamamlanmasından sonra mandrel makinadan sökölerek kürlenme fırınına yerleştirilmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Kürlenme fırını

Kürlenme işlemi üretici verilerine uygun olarak 2 saat 80° C ve 12 saat 120° C değerlerinde mandreller döndürölerek gerçekleştirilmiştir. Yukarıda açıklanan işlemler her üretim için tekrar edilmiştir. Kürlenme işlemi sonunda borular mandrelden çıkılarak kürlenmenin ve sarımın gözle fiziksel kontrolü yapılmıştır.

4.5. Test Numunelerinin Hazırlanması

Statik patlatma ve darbe testleri için ilgili standartlara uygun numuneler dairesel testereli boru kesme tezgahı (Şekil 4.11a) kullanılarak hazırlanmıştır. Darbe sonrası hasar analizleri, halka çekme ve yakma testleri için numune hazırlamasında ise dairesel testere kullanılmıştır. Kesim yüzeyleri deneyler ve analizler öncesi zımparalanarak çapakları alınmıştır. Hazırlanan tüm numuneler etiketlenip işaretlenmiştir (Şekil 4.11b).



Şekil 4.11. Statik patlatma ve darbe testi numunelerinin hazırlanması

4.6. Testler ve Analizler

Bu kısımda üretimi gerçekleştirilen numunelere uygulanan test ve analizler ile bu test ve analizlerin değerlendirme yöntemleri alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

4.6.1. Fiber - hacim oranının belirlenmesi

Üretilen numunelerin fiber hacim oranının belirlenmesi için ASTM D-2584 standardına uygun olarak yakma metodu ve literatürde belirtilen (Broyles ve ark., 1998) yoğunluk metodu (Arşimet prensibi) yaklaşımları kullanılmıştır. ASTM D-2584 standardı özellikle cam fiberler için kabul gördüğü, numune üretiminde kullanılan epoksi reçine ve karbon fiberlerin bozunma sıcaklıklarının yakın olmasına bağlı olarak doğru değerlendirmenin zorluğu nedeniyle yoğunluk farkı metodu üzerinde durulmuştur. Deneylerde numunelere ait kütle ölçümleri hassas terazi yardımı ile sağlanmıştır. Yakma testlerinde numuneler ilgili standarda uygun olarak $565 \pm 28^\circ \text{C}$ fırın sıcaklığında reçine tamamen yanıncaya kadar bekletilmiştir. Yakma işlemi sonrası geriye kalan karbon fiber miktarı hassas terazi ile tartılarak numuneden uzaklaştırılan epoksi kütlesi belirlenmiştir. Elde edilen veriler ASTM D-2584 standardına göre değerlendirilerek;

$$V_f = (W_f / \rho_f) / (W_c / \rho_c) \quad (4.1)$$

Formülü ile fiber hacim oranı hesaplanmıştır.

Burada,

W_f : Fiberin kütlesi

W_c : Kompozitin kütlesi

ρ_f : Fiberin yoğunluğu

ρ_c : Kompozitin yoğunluğu

V_c : Fiber hacim oranıdır.

Diğer metot olan yoğunluk farkına göre fiber hacim hesaplanmasında ise, numuneler hava ve daha sonra etil alkol içerisinde kütleleri ölçülerek farklılıkları bulunmuştur. Bulunan değerler ise;

$$\rho_c = (W_c \rho_a) / (W_c - W_a) \quad (4.2)$$

$$V_c = (\rho_c - \rho_e) / (\rho_f - \rho_e) \quad (4.3)$$

Formüllerinde yerine konularak fiber hacim oranı hesaplanmıştır.

Burada,

W_a : Alkolde kompozitin kütlesi

W_c : Havada kompozitin kütlesi

ρ_f : Fiberin yoğunluğu,

ρ_a : Alkolün yoğunluğu

ρ_e : Epoksinin yoğunluğudur.

V_c : Fiber hacim oranıdır.

4.6.2. Mekanik özelliklerin belirlenmesi

Bu kısımda üretimi gerçekleştirilen nano katkılı ve katkısız kompozit boruların mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılan testler ve analizler ile bu test ve analizlerin değerlendirme yöntemleri açıklanmıştır.

4.6.2.1. İç basınç ve statik patlatma deneyleri

Üretimi yapılan saf epoksili, BNNP katkılı, ÇCKNT katkılı ve ÇCKNT+ BNNP (nano hibrit) katkılı epoksi matrise sahip karbon fiber takviyeli kompozit boruların Statik iç basınç testleri ASTM D1599-99(2005) standardı direktiflerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler sonucu elde edilen patlama basınçlarından maksimum gerilme değerleri hesaplanmıştır. Bu testler ile üretimi tamamlanmış kompozit borular üzerinde nano modifikasyonun patlama basıncı ve hasar mekanizmasına etkisi araştırılmıştır.

Açık uçlu kompozit boru numunelerde iç basınç ve patlama deneyleri için iç basıncın oluşturulmasını sağlamak amacıyla şekil 4.12’de görülen test aparatı hazırlanmıştır. Her iki kenarına sızdırmazlığı sağlamak için keçe yatağı açılmış aparat, çelik milden yapılmıştır. Ayrıca her iki ucuna vida dışı açılmıştır. Yüksek basınca dayanıklı keçeler yataklarına yerleştirilmiş ve çelik flanşlarla desteklenmiştir.



Şekil 4.12. İç basınç test aparatı

Hazırlanan aparat Şekil 4.13’de görüldüğü gibi test edilecek borunun içine monte edilmiştir. Aparatın boru içerisinde sızdırmazlığı keçeler ile sağlanması ve boru içerisinde hareket edebilmesi nedeniyle boruya iç basınç uygulandığında boru çapı artarken boru boyu serbestçe değişebilmektedir. Deneylerde kullanılan test boruları yüksek basınçlarda son hasara ulaşmaktadır. Yüksek basınçlarda oluşacak hasarın ortamda bulunanları etkilememesi ve oluşması muhtemel tehlikeleri ortadan kaldırmak amacıyla statik iç basınç testleri Şekil 4.14’de görülen koruma kabini içerisinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.13. Boruya iç basınç test aparatı montajı



Şekil 4.14. İç basınç testi koruma kabini

İç basınç testlerinde iç basıncı oluşturmak için endüstriyel tip Shell Tellus S2M 46 tip hidrolik yağ kullanılmıştır. Hidrolik yağ, test numuneleri içerisine hidrolik pompa yardımı ile basılmıştır. Deney numuneleri içerisine pompa ile yağ basılırken numunede meydana gelecek sonuç hasarının standartta belirtilen şekilde 60-70 saniye arasında gerçekleşmesine dikkat edilmiş ve yüklemenin lineer olması sağlanmıştır. Deney numunesinde oluşan sonuç hasarının belirtilen süreden önce ya da sonra gerçekleşmesi durumunda deney tekrarlanmıştır. Deney esnasında basınç artışı manometreden takip edilmiştir.

Bulunan değerler,

İç çap kontrollü borular için verilen,

$$S = P(d + t)/(2t) \quad (4.4)$$

Formülünde yerine konularak patlama basıncına karşılık gelen maksimum gerilme değeri hesaplanmıştır.

Burada,

S : Maksimum teğetsel gerilme (MPa)

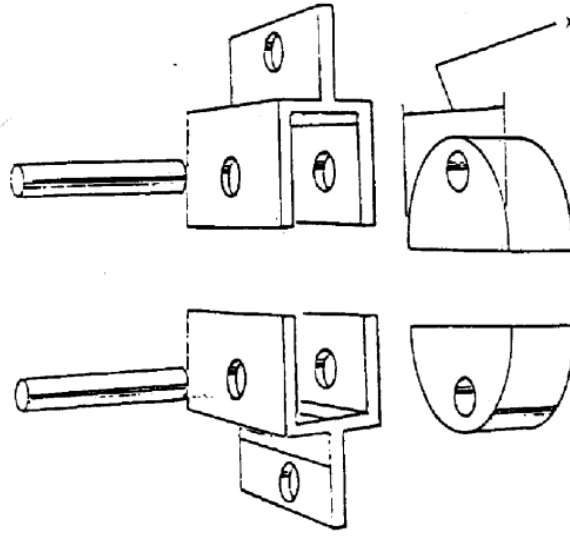
P : Patlama basıncı (MPa)

d : Numunenin iç ölçüsü (mm)

t : Numunenin et kalınlığıdır (mm).

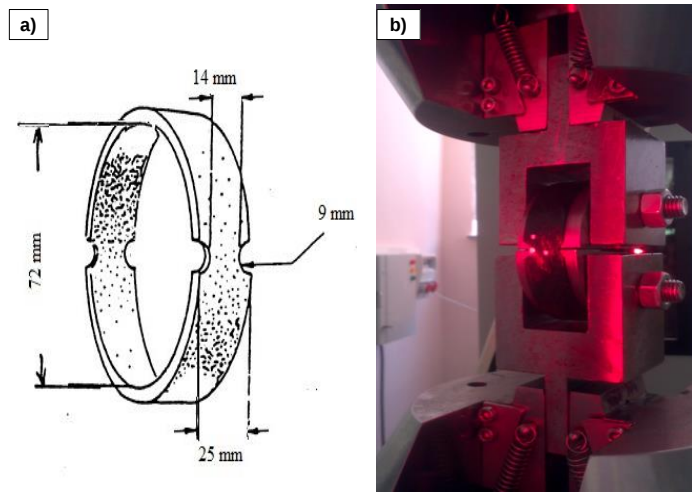
4.6.2.2. Halka çekme testleri

Üretilen numunelerin ASTM D1599-99 (2005) standardına göre statik iç basınç ve patlatma testleri sonucu hesaplanan maksimum gerilme değerleri, ASTM D2290-12 standardına uygun olarak yapılan halka çekme test değeri ile kıyaslanarak karşılaştırılmıştır. Halka çekme testlerinde kullanılan Instron test cihazında aşağıda Şekil 4.15’de verilen standarda uygun halka çekme aparatı kullanılmıştır.



Şekil 4.15. Halka çekme test aparatı (ASTM D2290)

Testlerde kullanılan numune ölçüleri ve numunelerin aparat yardımıyla test cihazına bağlanması Şekil 4.16’da görülmektedir.



Şekil 4.16. Halka çekme testi numune ölçüleri ve bağlantı şekli a)halka çekme numune ölçüleri, b)test cihazına bağlanması

Halka çekme testlerine göre maksimum gerilmeler,

$$\sigma_a = P_b / (2A_m) \quad (4.5)$$

Formülünde yerine konularak hesaplanmıştır.

Burada,

σ_a : Maksimum teğetsel gerilme (MPa)

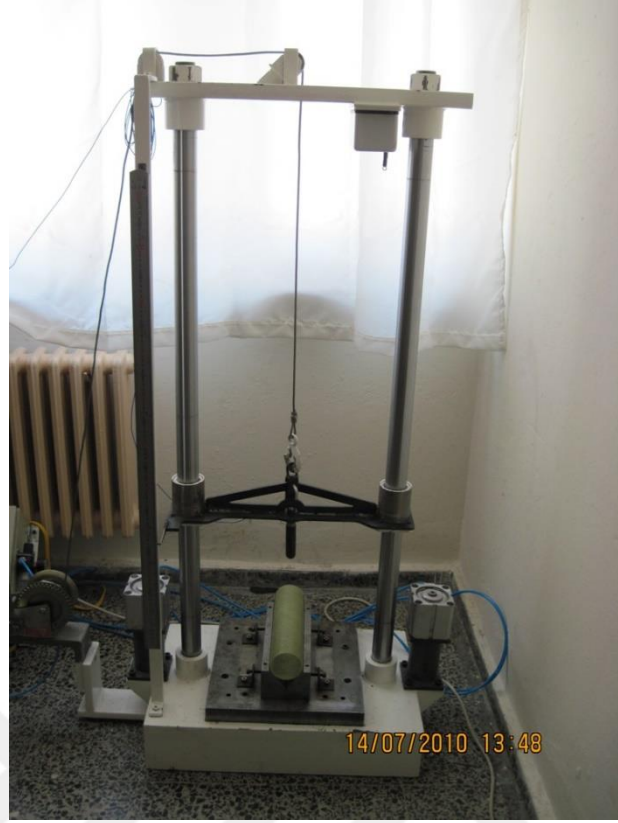
P_b : Numunenin maksimum kopma kuvveti (N)

A_m : Numunenin minimum kesit alanı (mm) dir.

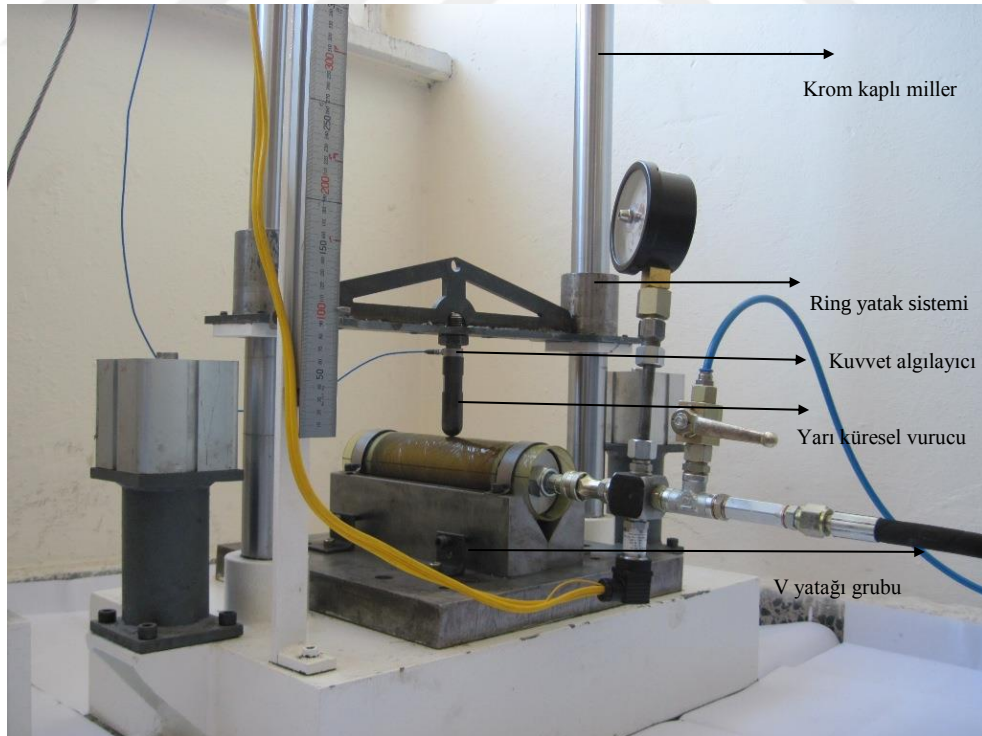
4.6.2.3. Düşük hızlı darbe deneyleri

Üretilen test numunelerin iç basınçsız ve 12 Bar iç basınç koşulları altında düşük hızlı darbe davranışlarının değerlendirilmesi için özel olarak imal edilmiş Selçuk Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Bölümü laboratuvarında bulunan düşük hızlı darbe cihazı kullanılmıştır. Ağırlık düşürme metoduna dayanan düşük hızlı darbe test cihazı Şekil 4.17’de, test cihazının kısımları ise Şekil 4.18’de görülmektedir. Düşük hızlı darbe test cihazı ile yapılan darbe testlerinde farklı iç basınç ve farklı darbe enerjileri kullanılabilir. Deney verileri elektronik olarak cihazdan alınıp, bilgisayar ortamında kayıt edilmektedir.

Kompozit boru numunelerinin düşük hızlı darbe testleri tüm numuneler için 5, 10 ve 15 J olmak üzere 3 farklı enerji seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Darbe enerji seviyeleri test cihazında vurucu kütlelerinin sabit olması nedeni ile boru üst yüzeyine göre vurucu ucunun serbest düşü yüksekliğinin değiştirilmesi ile ayarlanmıştır. Darbe testleri 5, 10 ve 15 J enerji seviyelerinde, 12 Bar iç basınçlı ve iç basınçsız koşullarda tüm numuneler için üç (3) kez tekrarlanmıştır. Kullanılan test cihazına ait vurucu ve kuvvet algılayıcı özellikleri, kompozit boru yataklama ve iç basınçlandırma ekipmanları, elektronik veri toplama ve kayıt sistemi ve darbe davranışının belirlenmesinde kullanılan analizler ve değerlendirme metotları alt başlıklar halinde açıklanmıştır.



Şekil 4.17. Düşük hızlı darbe test cihazı (Kara, 2012)



Şekil 4.18. Düşük hızlı darbe test cihazı kısımları (Kara, 2012)

4.6.2.3.1 Vurucu ve kuvvet algılayıcı özellikleri

Kompozit boru numunelerinin ağırlık düşürme metodu ile düşük hızlı darbe deneylerinde ölçülen veri hassasiyeti arttırmak ve vurucu kütesinin en az sürtünmeyle serbest düşmesini sağlamak amacıyla darbe test cihazında ring yataklamalı bağlantı elemanları ve krom kaplı miller bulunmaktadır. Vurucu yukarıdaki Şekil 4.18’de de görüldüğü gibi, çelik miller üzerinde hareket eden karşılıklı iki rulmanlı yatakla cihaza monte edilmiştir. Testlerde kullanılan vurucunun kütlesi, bağlı olduğu yatak ve diğer bağlantı parçaları ile birlikte 6.35 kg dır. Vurucu uç geometrisi yarı küresel bir yapıya sahip olup çapı 24 mm dir.

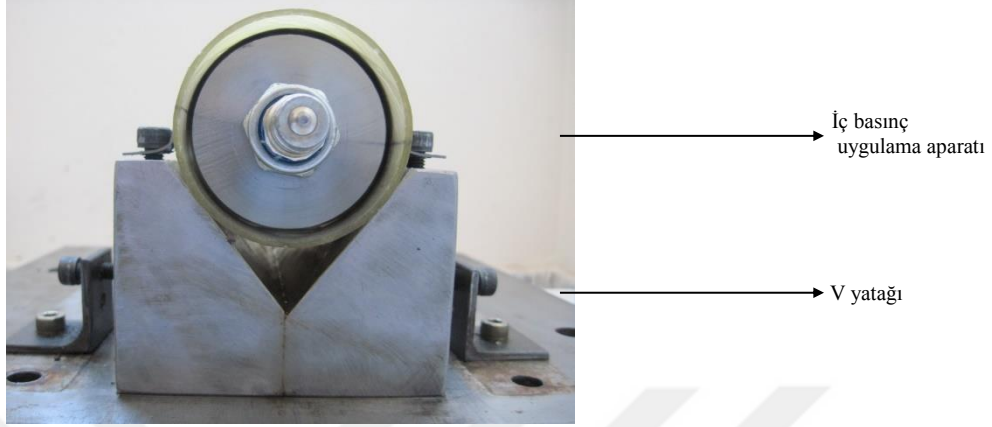
Düşük hızlı darbe testlerinde kuvvet algılayıcı olarak PCB Quartz ICP Force Sensor (M202B04) kullanılmıştır. Kuvvet algılayıcı sensorun ölçüm kapasitesi 22.6 kN’dur. Kuvvet algılayıcı sensor yarı küresel uçlu vurucu ile vurucu yataklama parçaları arasına monte edilmiştir. Kuvvet algılayıcı sensordan alınan kuvvet verileri, düşük gürültülü koaksiyal kablo yardımı ile elektronik kontrol ünitesine buradan da verilerin kaydedildiği bilgisayara iletilmektedir. Elde edilen tüm veriler dijital olarak bilgisayar ortamında kaydedilmiştir.

4.6.2.3.2 Kompozit boru yataklama ve iç basınç uygulama ekipmanları

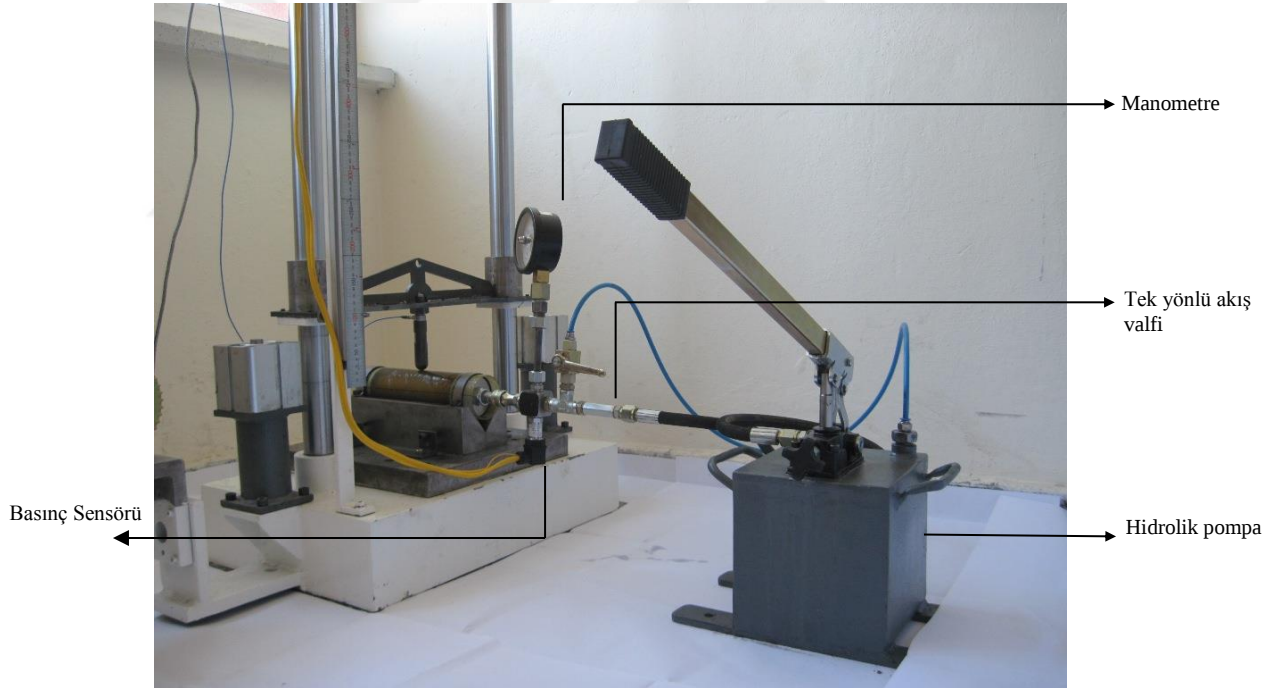
Düşük hızlı darbe deneyleri için kompozit boru numuneleri Şekil 4.19’da görüldüğü gibi V yatağı üzerine yerleştirilmiştir.

İç basınç koşulları altında darbe testi uygulanan numuneler için iç basınçlandırma ekipmanları aşağıdaki Şekil 4.20’te gösterilmiştir. Açık uçlu test numunelerinin iç basınçlandırılması için kullanılan özel aparat bölüm 4.6.2.1’de açıklanmıştır. Yapılan darbe testlerinde hidrolik pompa ile yağ basılarak kompozit boruların iç basınç koşulları sağlanmıştır. İç basınçlı koşullarda yapılan darbe testleri, ANSI/AWWA C950 standardında tanımlanan değerlerden biri olan 12 Bar iç basınç değerinde gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında uygulanan iç basınç değeri bağlantı hattı üzerinde 10 Bar taksimatlı maksimum 600 Bar ölçüm yapılabilen manometreden ve basınç sensorun den ölçülmüştür. Basınç sensorundan gelen veri sinyalleri sinyal şartlandırıcıdan bağlantı konektörüne buradan da verilerin kaydedildiği bilgisayara iletilmektedir. Basınç sensörü, 12 Bar iç basınçlı durumda yapılan düşük hızlı darbe testleri esnasında kompozit boru test numunelerinde meydana gelen basınç değişimlerini

kaydetmek amacıyla da kullanılmıştır. Düşük hızlı darbe etkisiyle numunelerde oluşacak basınç değişimleri ölçümünün doğruluğunu arttırmak için tek yönlü akış valfi (çek valf) kullanılmıştır (Şekil 4.20).



Şekil 4.19. V yatak üzerine yerleştirilmiş numune (Kara, 2012).

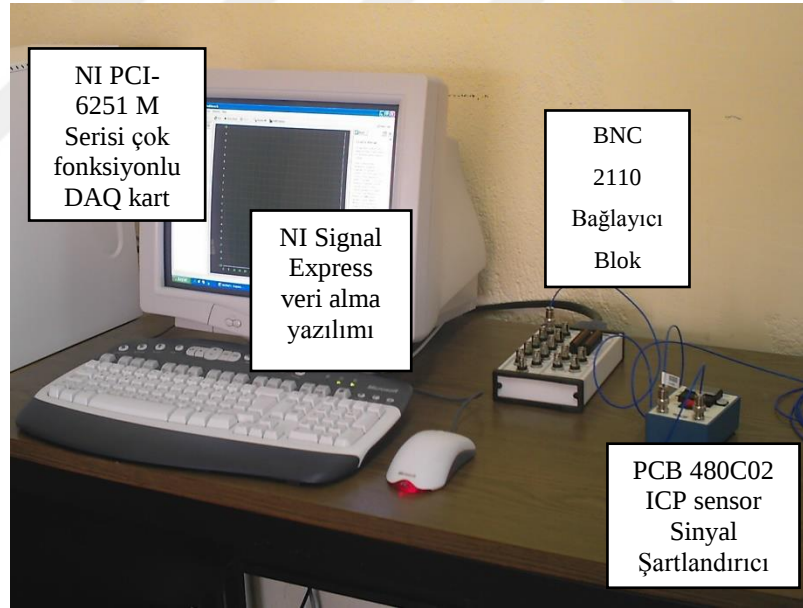


Şekil 4.20. İç basınç uygulama ekipmanları (Kara, 2012).

4.6.2.3.3 Elektronik veri toplama ve kayıt sistemi

Düşük hızlı darbe testlerinde, kuvvet algılayıcı sensorlardan alınan elektronik sinyalin bilgisayar tarafından algılanarak kaydedilmesini sağlamak amacıyla sinyal değerini yükselten bir sinyal şartlandırıcı kullanılmıştır. Sinyal şartlandırıcı olarak,

kuvvet algılayıcı sensörlere ve bilgisayar sistemine uygun olan PCB 480C02 ICP model sinyal şartlandırıcı kullanılmıştır. Kuvvet algılayıcı sensörler ile sinyal şartlandırıcı arasındaki bağlantılarda PCB 003C30 düşük gürültülü koaksiyal kablolar kullanılmıştır. Kablo kuvvet algılayıcıdan gelen sinyalin, özelliğini kaybetmeden iletilmesini sağlamaktadır. Kuvvet sensörü ve basınç sensorundan gelen sinyalin sinyal şartlandırıcıda yükseltilmesinden sonra DAQ karta (veri toplama kartı) iletilebilmesi için BNC bağlayıcı blok (konektör) kullanılmıştır. Darbe test cihazı verilerinin işlenmesi için kullanılan masaüstü bilgisayar ana kartı üzerinde bulunan DAQ kartı ile sensörlerden gelen sinyal algılanıp işlenmiştir. DAQ kartı olarak NI PCI-6251 M model çok işlevli kart kullanılmıştır. DAQ kartı aynı anda birbirinden farklı birçok sinyali alıp işleyebilmektedir. Sensörlerden alınan sinyaller NI Signal Express yazılımı işlenmiş, veriler toplanarak yazılım üzerinden zamana göre kuvvetin değişim grafiği elde edilmiştir. Şekil 4.21’de elektronik veri toplama ve kayıt sistemi görülmektedir.



Şekil 4.21. Elektronik veri toplama ve kayıt sistemi

4.6.2.3.4 Numunelerin darbe davranışlarının belirlenmesi

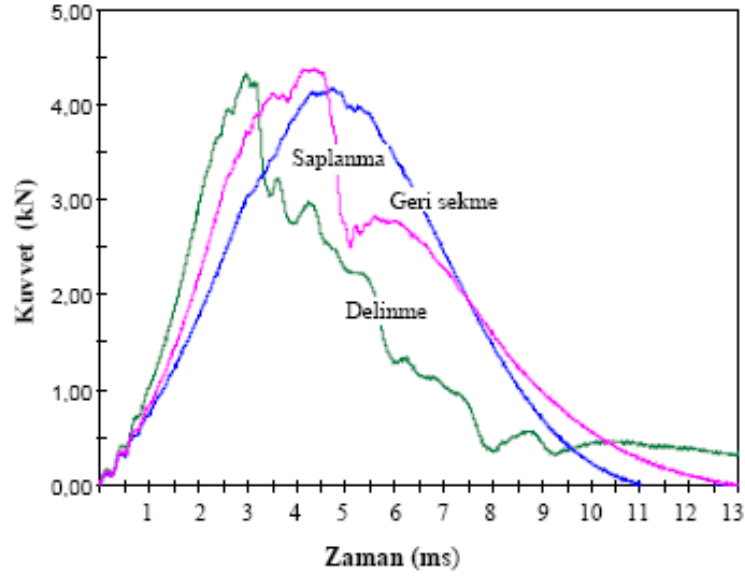
Düşük hızlı darbe deneyleri ile kompozit boru numunelerin iç basınçsız ve 12 Bar iç basınçlı koşullarda, 5, 10 ve 15 J darbe enerjileri durumunda, darbe davranışlarına ilişkin sayısal verileri elde edilmiştir. Elde edilen verilerden kuvvet-zaman ($F-t$), kuvvet-

deplasman ($F-d$), darbe enerjisi-zaman ($E-t$), iç basınç değişimi-zaman ($P-t$) grafikleri elde edilmiştir. Bu grafikler, numunelerin darbe davranışına ait vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi, vurucu ucunun numuneye saplanması ve vurucunun numuneyi delip geçmesi gibi durumlara ve ilk önemli hasar oluşumunun meydana geldiği kuvvet, hasar oluşumu, maksimum darbe kuvveti, deplasman miktarı ve geri sekme için geri verilen enerji miktarları gibi bilgiler sağlamaktadır. Yukarıda bahsedilen grafiklerin değerlendirilmesi ile ilgili açıklamalar başlıklar halinde verilmiştir.

4.6.2.3.5 Darbe kuvvetinin zamana bağlı değişimi

Darbe test cihazında bulunan kuvvet sensorundan alınan elektronik veriler ile test edilen numunelere ait kuvvet-zaman ($F-t$) grafikleri hazırlanmıştır. Hazırlanan grafiklerin değerlendirilmesi ve yorumlanması için literatürden yararlanılmıştır.

Üç farklı numuneye ait vurucunun geri sekmesi, vurucunun numuneye saplanması ve vurucunun numuneyi delip geçmesi gibi durumları gösteren kuvvet-zaman ($F-t$) grafiği eğrileri Şekil 4.22’de görülmektedir. Malzeme bütünlüğünü koruduğu ve geri sekmenin gerçekleştiği numunelere ait kuvvet-zaman grafikleri Şekil 4.22’de görüldüğü üzere parabolik kapalı bir eğri oluşturmaktadır. Uygulanan darbe enerjisine bağlı olarak meydana gelen darbe kuvveti de artmaktadır. Kuvvet-zaman grafiklerinde yükleme kısmındaki eğrinin eğimi temas rijitliği olarak adlandırılır ve malzeme özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Saplanma ve delinme meydana gelen testlere ait kuvvet-zaman eğrilerinde görüldüğü gibi maksimum kuvvet değerinde çok fazla fark oluşumu görülmemektedir. Delinmenin meydana geldiği numuneye ait eğride kuvvet ani düşüşler göstererek sıfıra değerine inmesi beklenirken, şekil 4.22’de de görüldüğü gibi vurucu ile test numunesi arasında meydana gelen sürtünme nedeni ile yükten boşalma kısmında eğrinin ucu yatay eksene paralel hale gelmektedir. (Sayer ve ark., 2009).



Şekil 4.22. Kuvvetin zamana bağlı değişimi (F-t) grafiği eğrileri (Sayer ve ark., 2009)

4.6.2.3.6 Darbe kuvvetinin deplasmana bağlı değişimi

Kuvvet-deplasman (yer değiştirme veya çökme) ($F-d$) grafikleri kompozit malzemelerin darbe davranışlarını belirlemede kullanılan grafiklerden bir tanesidir.

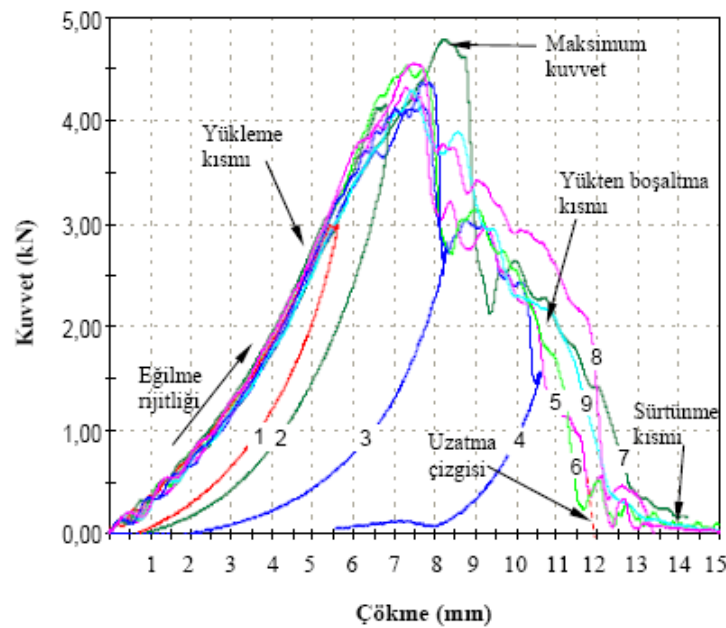
Şekil 4.23'de kuvvetin deplasmana karşı değişimini gösteren bir $F-d$ grafiği görülmektedir. Grafikte verilen her bir eğri genel olarak üç kısımda incelenir. Bunlar;

- Yükleme,
 - Maksimum kuvvet,
 - Yükten boşaltma
- kısımlarıdır.

Kuvvet-deplasman grafiğine ait eğrilerde kuvvetin başlangıç değeri olan sıfır (0) dan artarak maksimum değerine ulaştığı yere kadar olan kısım yükleme kısmı olarak isimlendirilir. Kuvvetin maksimum değerinden tekrar minimum sıfır (0) değerine kadar düştüğü kısım ise yükten boşalma kısmı olarak adlandırılır. Kuvvet deplasman grafiklerinde kuvvetin yükleme kısmındaki eğimi, darbe yüküne karşı numunenin göstermiş olduğu direnç belirtir ve bundan dolayı eğilme rijitliği olarak adlandırılır.

Darbe testlerinde kuvvet-deplasman grafikleri genel olarak iki farklı tipe ayrılır. Bu grafikler kapalı tip ve açık tip eğri grafikleri olarak isimlendirilir. Kapalı tip eğri grafikleri, darbe testleri esnasında vurucunun numuneye temas etmesinden sonra numune yüzeyinden geri sekmesiyle oluşan eğrilerdir. Bu tip eğriye sahip test numunelerinde

darbe esnasında vurucunun sahip olduğu enerji numunenin bütünlüğünü bozacak seviyede olmayıp, uygulanan darbe enerjisinin bir kısmı numune tarafından hasar oluşumu gibi etkilerle yutulmakta, yutulmayan diğer kısım enerji ise vurucunun geri sekmesi için harcanmaktadır. Aşağıdaki şekil 4.23’de görülen ilk 3 eğrinin kapalı tip olduğu görülmektedir. Yükleme kısmında darbe enerjisinin maksimum değerine yaklaştığı bölümlerde meydana gelen titreşimler darbe etkisi ile meydana gelen titreşimler ve numunede meydana gelen hasar oluşumları ile ilişkilendirilir. Darbe enerjisi arttırıldığında, geri sekme kısmı azalırken kapalı tip eğri genişler ve deplasman değeri artar. Yani numunede hasar oluşumu ve buna bağlı olarak harcanan enerji miktarı artar. Kuvvet-deplasman eğrilerinde eğri altında kalan alan darbe sırasında numunede oluşan hasar için harcanan enerji miktarını göstermektedir. Şekil 4.23’de görülen 4 nolu eğri, kapalı tip bir eğri olmasına rağmen kapalı tip eğriden açık tip eğriye geçiş noktasında bulunmaktadır. Darbe enerjisinin bulunduğu bu kritik seviyeden daha da arttırılmasıyla eğri tipi değişerek kapalı tipten açık tip eğriye dönüşür. Kuvvet-deplasman eğrisinin açık tip bir eğri olması darbe hasarının malzeme bütünlüğünü bozacak nitelikte yüksek olduğu ve darbeyi oluşturan vurucunun malzemeye saplanması ya da delmesi ile açıklanır. Buna göre malzemeye saplanan vurucu numune kalınlığı boyunca aşağı doğru hareket eder ve artık numune yüzeyinden geri sekme meydana gelmez. Şekil 4.23 de 5 nolu eğri incelendiğinde açık tip bir eğri olduğu ve numunede saplanma ya da delinme meydana geldiği söylenebilir.



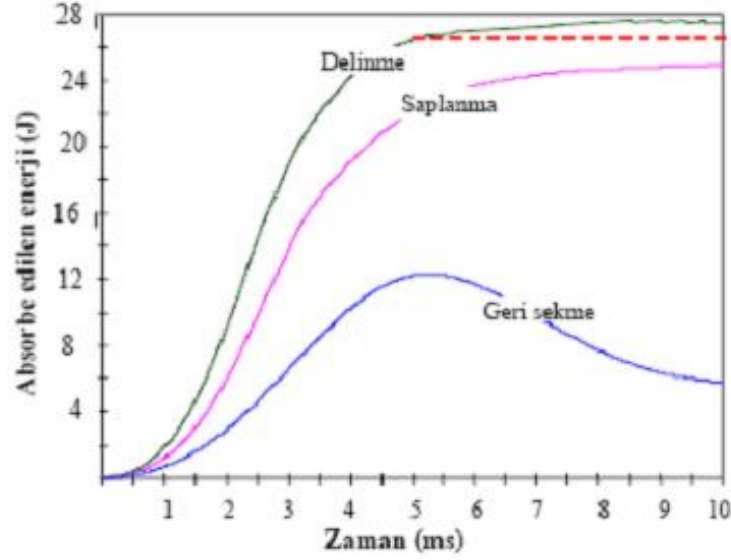
Şekil 4.23. Kuvvet-deplasman (F-d) grafiği eğrileri (Sayer ve ark., 2009)

Darbe enerjisinin, vurucunun saplanma enerji seviyesinden daha fazla arttırılması durumunda vurucu malzeme kalınlığı boyunca hareket ederek, malzemeyi deler. Şekil 4.23’de verilen kuvvet-deplasman eğrilerinden 6, 7, 8 ve 9, vurucu tarafından delinmenin meydana geldiği numunelere aittir. Eğrilerin yükten boşalma kısımları sonunda yatay eksenin sağına doğru kapanan kısım numune ve vurucu arasında oluşan sürtünme kısmını ifade etmektedir. Ulaşılan bu darbe enerjisinde meydana gelen delinme nedeni ile darbe enerjisi ne kadar arttırılırsa arttırılsın kompozit numunelerin daha fazla darbe enerjisi yutamayacağı görülmektedir (Sayer ve ark., 2009, Kara, 2012).

4.6.2.3.7. Darbe enerjisinin zamana bağlı değişimi

Darbe enerjisi-zaman (E-t) grafiği özellikle yaşanan enerji kaybının deney numunelerinin hasar mekanizmaları için harcanması nedeniyle hasar miktarının belirlenmesi amacıyla oldukça önemlidir.

Darbe sırasında numune tarafından harcanan enerji kuvvet-deplasman (F-d) eğrisi altında kalan alanın hesaplanması ile belirlenmektedir. Deney sırasında darbe oluşumu için sisteme verilen enerji (ağırlığın belirli bir yükseklikten serbest bırakılması ile oluşturulan enerji) ile deney sonunda belirlenen enerji değerinin kıyaslanması ile sisteme geri sekme enerjisi olarak verilen enerji miktarı bulunur. Deney başlangıcındaki enerji miktarı ile deney sonunda hesaplanan enerji miktarı arasındaki farkın büyüklüğü numune üzerinde oluşan hasarın artışı ile ilişkilidir. Bu nedenle zamana bağlı olarak enerji değişiminin ölçülmesi numunelerin kıyaslanarak değerlendirilebilmesine olanak sağlamaktadır.



Şekil 4.24. Darbe enerjisi-zaman (F-t) grafiği eğrileri (Sayer ve ark., 2009)

Şekil 4.24'de geri sekme, vurucunun numuneye saplanması ve numunenin darbe enerjisi ile delinmesine ait enerji-zaman eğrileri görülmektedir. Kuvvet-zaman ve kuvvet-deplasman eğrilerinde olduğu gibi enerji-zaman grafiklerinde de darbe enerjinin minimum değerinden maksimum değerine kadar olan kısım yükleme kısmı olarak adlandırılır. Geri sekmenin meydana geldiği darbe testi numunelerine ait eğrilerde darbe enerjisinin maksimum değerine ulaştıktan sonra bir miktar azaldığı görülmektedir. Bu eğrilerde maksimum enerji değeri ile son durumdaki enerji değeri arasındaki fark geri sekme enerjisi olarak adlandırılır ve vurucunun geri sekmesi için harcanır. Testin son durumunda elde edilen değer test boyunca numunede oluşan hasar nedeni ile absorbe edilen enerji miktarını göstermektedir. Darbe enerjisi-zaman grafiklerinde yükleme kısmından sonra darbe enerjisinin azalmaması veya sabit kalması verilen tüm enerjinin malzemede hasar oluşumu için absorbe edildiğini yani geri sekmenin gerçekleşmediği göstermektedir. Vurucunun numuneye saplanması durumunda darbe enerjisi-zaman eğrinin son kısmı Şekil 4.24'de de görüldüğü gibi yatay olarak devam eder. Vurucunun numuneyi delip geçmesi durumunda, darbe cihazının yazılımı tarafından ölçülen absorbe edilen enerji miktarına sürtünme enerjisinin de eklenmesi nedeni ile eğrinin yukarı doğru yönlendiği görülür. Bu durumda absorbe edilen enerji kesikli çizgi ile gösterilen değere yakın gerçekleşmektedir. (Sayer ve ark., 2009, Kara, 2012)

4.6.2.3.8. İç basıncın zaman bağılı değişimi

İç basınçlandırılmış numunelerin darbe testleri sırasında vurucunun numuneye teması ile meydana gelen iç basınç artışının değerlendirmesinde iç basınç değişimi-zaman grafiklerinden elde edilen veriler kullanılmıştır. Darbe esnasında basınç artışı, vurucunun darbe etkisiyle numuneye teması ile başlayarak darbe kuvvetinin yükleme kısmı boyunca numunede meydana gelen çökme etkisine bağlı olarak iç hacminin azalması ile ilgili bir parametre olması nedeniyle numunelerin çökme miktarlarının belirlenerek kıyaslanmasına olanak sağlamaktadır. Darbe testleri sonucunda elde edilen iç basınç değişimi-zaman grafikleri verileri değerlendirilerek birbiri arasında kıyaslanmıştır. Değerlendirmenin daha kolay yapılabilmesi için darbe esnasında test numunelerinde ölçülen maksimum iç basınç değerleri belirlenerek sütun grafik halinde verilmiştir.

4.6.3. Epoksi matrisin karakterizasyon yöntemleri

Bu tez çalışmasında kullanılan epoksi matris karakterizasyon yöntemleri aşağıda başlıklar içerisinde detaylı olarak açıklanmıştır.

4.6.3.1 Fourier dönüşümlü infrared (FT-IR) spektroskopisi

Işık dalga boyunun 0,75 μm ile 1000 μm arasında kalan bölgeye infrared (IR) bölgesi adı verilmektedir. IR ışının malzeme tarafından soğurulması moleküler seviyede atomlar arası bağların titreşim, dönme ve bunun sonucu olarak da belirli frekans değerlerinde karakteristik sinyallerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle malzemelere ait moleküler yapıların karakteristiğinin belirlenmesinde Fourier dönüşümlü infrared (Fourier Transform Infrared) spektroskopisi (FT-IR) tekniği önemli bir yer oluşturmaktadır.

Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi temel olarak kızılötesi ışığın incelenen malzeme tarafından soğurulmasına esasına dayanmaktadır. Soğurulma, moleküllerdeki bağların titreşimi ve dönüşleri için gerekli miktarını karşılar ve bu sayede herhangi bir bileşiğin yapısı, yapıdaki bağların durumu, bağlanma yerleri hakkında bilgi sahibi olunmasını sağlar.

Test numunelerine ait FT-IR analizlerinde Bruker-Vertex 70 FT-IR spektrofotometresi kullanılmıştır. FT-IR analizleri için saf epoksi (nano katkısız), BNNP katkılı, ÇCKNT katkılı ve ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matris malzemeden numuneler alınarak 500-4000cm⁻¹ ölçüm aralığında incelenmiştir.

4.6.3.2 Termal Analizler (TGA/DSC)

Bu çalışmada yapılan termal gravimetrik analizler ile kompozit boru üretiminde kullanılan saf epoksi (nano katkısız), BNNP, ÇCKNT ve ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matris malzemelerin termal özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen veriler kendi aralarında kıyaslanarak, nano modifikasyonun epoksi matrisin termal özelliklerine etkisi açıklanmıştır.

Test numunelerinin termal analizleri için TGA (termal gravimetrik analiz) ve DSC (Diferansiyel Taramalı Kalorimetre) yöntemlerinden yararlanılmıştır. İnert ortam içerisinde gerçekleştirilen analizlerde sıcaklık artışının malzeme yapısına etkisi bu analizler ile değerlendirilmiştir. TGA analizi sırasında numune kütlesinin azalışı sıcaklık ve zamana bağlı olarak ölçülmüş, sıcaklığın malzeme kaybına (polimer bozunmasına) etkisi belirlenmiştir. Camsı geçiş sıcaklığının belirlenmesi amacıyla da DSC analizinden yararlanılmıştır.

Termo gravimetrik analizler, belirlenen bir sıcaklık artış hızına bağlı olarak, inert atmosfer ortamında numune kütlesinin çok hassas bir terazi ile zamana bağlı olarak ölçülmesine dayanmaktadır.

Numunelerin termal gravimetrik analizleri 0.02 µg ve 0.1 °C hassasiyetli SETARAM termogravimetrik analizler ile azot ortamında 10 °C/dak. Sıcaklık artış hızı ve 650 °C maksimum sıcaklık parametrelerinde, DSC analizleri ise Mettler Toledo TGA/DSC cihazında, gerçekleştirilmiştir.

4.6.3.3 Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Görüntü Analizi

Nano malzemelerin epoksi reçine içerisinde dağılımlarının incelenmesi, test numunelerinin hasar incelemeleri ve nano malzemelerin hasar davranışına etkisinin belirlenmesi için yapılan çalışmalarda ZEISS Evo LS10 cihazı kullanılarak SEM görüntülemeleri yapılmıştır. Nano malzemelerin epoksi reçine içerisindeki dağılımlarının incelenmesi için numuneler boru üretimi sırasında alınmıştır. Boru üretimi için hazırlanan

epoksi karışımlarından bir miktar filaman sarım öncesi fiber ıslatma banyosundan küçük kaplara alınmış daha sonra bu kaplardaki epoksi kürlemeye bırakılmıştır. Kürleme işlemi tamamlanan epoksi numuneler kaplardan çıkarılarak (Şekil 4.25) SEM numune boyutlarına getirilmek üzere küçük boyutlarda parçalara kesilmiştir. Son olarak kesilen parçalar SEM cihazında görüntüleme için kullanılmıştır. Hasar incelemeleri ve nano malzemelerin hasar davranışa etkisinin belirlenmesi için yapılan SEM görüntülemeleri için numuneler ise hasar bölgesinden kesilerek çıkarılmıştır. Numunelerin yüzeylerinin, daha iyi görüntülenebilmesi için 5-8nm kalınlığında altın kaplama yapılmıştır.



Şekil 4.25. Epoksi matristen SEM numunesi hazırlanması

4.6.3.4 Optik Mikroskopla Hasar Analizi

Test numunelerinin darbe sonrası makro hasar analizlerinin yapılmasında optik mikroskoptan yararlanılmıştır. Optik mikroskop incelemeleri için darbe hasarı bölgesinden dairesel testere ile numuneler kesilerek çıkarılmıştır. Çıkarılan numunelerin incelemeye tabi tutulacak yüzeyleri daha iyi görüntüleme sağlanabilmesi için METKON marka zımpara ve parlatma cihazı (Şekil 4.26) yardımı ile zımparalanıp, parlatılmıştır.

Numunelerin mikro hasar incelemesi için KOZO USB mikroskop kamera (Şekil 4.27) kullanılmıştır.



Şekil 4.26. Zımpara ve parlatma cihazı



Şekil 4.27. Mikro hasarın incelenmesinde kullanılan KOZO USB mikroskop kamera

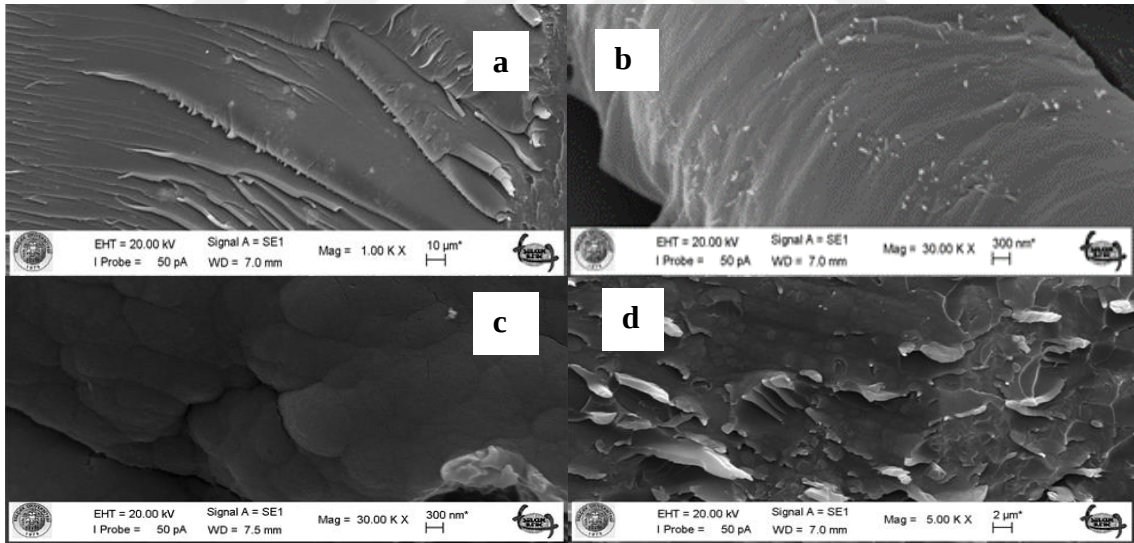
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. Çok Cidarlı Karbon Nano Tüp ve Bor Nitrür Nano Partikül ile Katkılandırılmış Epoksi Matrislerin Mikro Analizi

Bu çalışmada boruların üretimde kullanılan epoksi matrisin ÇCKNT, BNNP ve ÇCKNT+BNNP modifikasyonları için epoksi matrise ilave edilen nano malzemelerin epoksi reçine içerisindeki dağılımları, bağ ve yapısal durumları SEM, FT-IR ve TGA/DSC analizleri kullanılarak karakterize edilmiştir.

5.1.1. SEM analizleri

Test numunelerinin üretimi sırasında filaman sarım işlemi yapılmadan önce hazırlanan epoksi matris malzemeden numuneler alınarak SEM analizleri yapılmıştır. Bu numunelere ait SEM görüntüleri aşağıdaki Şekil 5.1’de görülmektedir.

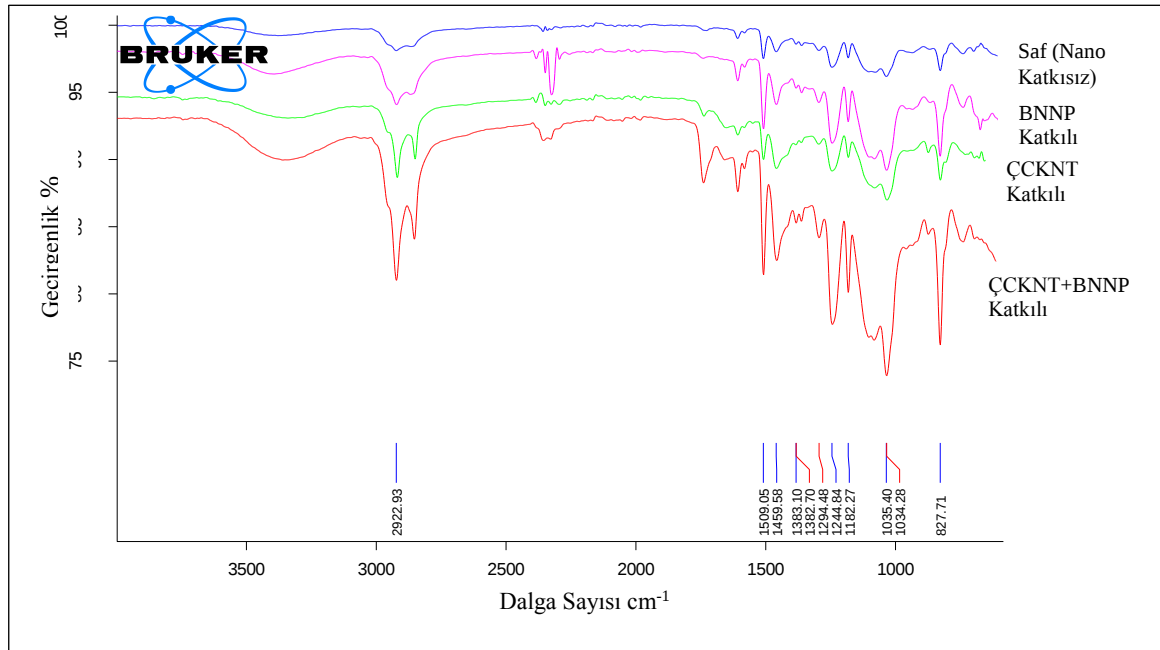


Şekil 5.1 SEM analizleri a) Saf epoksili, b) ÇCKNT katkılı, c) BNNP katkılı, d) ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matris numune

Şekil 5.1 incelendiğinde b, c ve d nolu numunelerde epoksi matris içerisinde nano malzemelerin genel olarak homojen dağıldığı görülmektedir. BNNP içeren numunelerde ise kısmen topaklanmalara da rastlanmıştır.

5.1.2. FT-IR analizleri

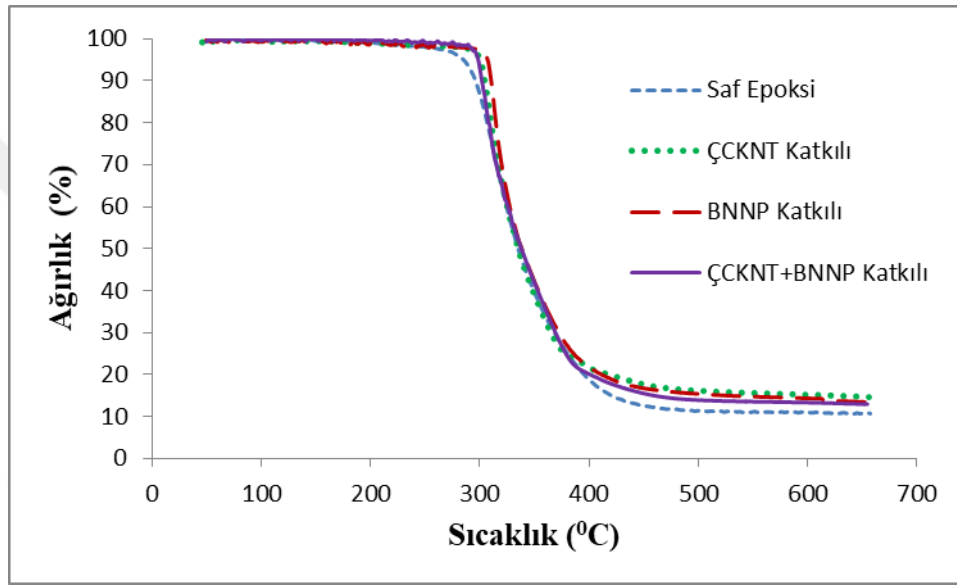
Şekil 5.2’de üretimi yapılan epoksi matris numunelerine ait FT-IR spekturumu verilmiştir. Grafik incelendiğinde saf ve nano katkılı numunelerin genellikle aynı dalga numaralarında pik verdiği ve piklerde herhangi bir kayma olmadığı görülmektedir. Fonsiyonel bölge $4000-1500\text{ cm}^{-1}$ ve Parmak izi bölgesi olarak adlandırılan $1500 - 800\text{ cm}^{-1}$ aralığında da numunelerin pik yerlerinin değişmediği görülmektedir. Piklerin yalnızca şiddetleri farklılık göstermektedir. Epoksi grubunun üç tane karakteristik piki vardır (828 cm^{-1} , 1036 cm^{-1} , 1245 cm^{-1}) (Abdalla ve ark., 2008) bu pikler parmak izi bölgesi olarak adlandırılan $1500-800\text{ cm}^{-1}$ aralığında yer almaktadır. Grafikte $3500 - 3000\text{ cm}^{-1}$ bölgesindeki geniş pik fenol halkasının radikal O-H bağları gerilme titreşimleri ile tanımlanır. $3000-2500\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki pikler metilen halkasının C-H bağı ile ilişkilendirilmektedir. $2500 - 2000\text{ cm}^{-1}$ aralığındaki pikler $\text{C}\equiv\text{C}$ bağı göstermektedir. 1608 , 1509 ve 1459 cm^{-1} pikler aromatik halkadaki C-C bağlarını göstermektedir. 827 cm^{-1} ’deki pik aromatik hidrojenlerdeki eğilme titreşimini tanımlar. 1245 ve 1036 cm^{-1} ’deki pikler sırasıyla alkilaril eter simetrik bağ gerilmesi ve dialkil eter titreşim gerilmesini göstermektedir (Fraga ve ark., 2008). Piklerin yerlerinin değişmemesi kimyasal bağların eklenen nano katkılardan yapısal olarak etkilenmediğini ve yeni tür bağların oluşmadığını, pik şiddetlerinin artması ise benzer yapıda bağ sayılarının nano katkılarla artırıldığını göstermektedir.



Şekil 5.2. Epoksi matris numunelere ait FT-IR spektrumları

5.1.3. Termal analizler (TGA/DSC)

Test numunelerinin termal gravimetrik analizleri $0.02 \mu\text{g}$ ve 0.1°C hassasiyetli SETARAM termogravimetrik analizler ile, Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) analizleri ise Mettler Toledo TGA/DSC 3+ cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Saf epoksi, BNNP, ÇCKNT, ve ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matrise sahip numunelerin TGA verileri $10^\circ\text{C}/\text{dak.}$ sıcaklık artış hızıyla ölçülerek aşağıda Şekil 5.3'te verilen TGA eğrileri elde edilmiştir.



Şekil 5.3. Epoksi matris numunelere ait TGA eğrileri

Şekil 5.3 incelendiğinde BNNP, ÇCKNT ve ÇCKNT+BNNP katkı durumunda epoksi matrisin bozunmaya başlama sıcaklığının saf epoksili duruma göre arttığı görülmektedir. Yine grafikten bozunma sonunda kalan malzeme oranlarının saf epoksili numuneye göre nano modifiyeli numunelerde artış gösterdiği görülmektedir. Bu sonuçlar nano katkılandırma ile termal stabilitenin artırıldığını işaret etmektedir. TGA analizi neticesinde %1, %10, %50 ve %100'lük kütle bozunmasına karşılık gelen karakteristik verilerin sayısal değerleri ve DSC analizi ile elde edilen camsı geçiş sıcaklıkları Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Termal Analiz Sonuçları (TGA/DSC)

Numune Özellikleri	Kütle Kaybı				Camsı Geçiş
	Sıcaklıkları (°C)				Sıcaklığı (°C)
	T _{1%}	T _{10%}	T _{50%}	T _{max}	T _g
Saf Epoksi (Nano Katkısız)	207	296	335	657	82.63
ÇCKNT Katkılı Epoksi	237	304	335	656	86.71
BNNP Katkılı Epoksi	238	310	338	656	86.92
ÇCKNT+BNNP Katkılı Epoksi	251	301	338	654	86.87

Nano katkılı ve katkısız epoksi matris numunelerin ilk bozunmaya başlayarak %1’lik kütle kaybına karşılık gelen bozunma sıcaklıkları Çizelge 5.1’de T_{1%} sütununda görülmektedir. İlk bozunmanın meydana geldiği sıcaklıklar saf epoksili numune için 207°C, ÇCKNT katkılı numune için 237° C, BNNP katkılı numune için 238° C ve ÇCKNT+BNNP katkılı numune için 251° C olarak ölçülmüştür. Nano katkılandırmanın epoksi matrisin ilk bozunmaya başladığı sıcaklığı ciddi bir biçimde etkilediği görülmektedir. Bozunmaya başlama sıcaklığı artışı minimum % 14.49 ile ÇCKNT katkılı numunede görülürken, % 21.25 ile en büyük artış ÇCKNT+BNNP katkılı numunede görülmüştür.

Çizelge 5.1’de %10’luk kütle bozunmasına karşılık gelen T_{10%} değerinde epoksi matrisin nano malzemeler ile katkılandırması sonucunda arttığı görülmektedir. %50 ve %100 kütle bozunmasının yaşandığı sıcaklıkların ise nano katkılandırmadan çok az etkilendiği belirlenmiştir. TGA analizlerinin 10 °C/dak.’lık sıcaklık artış hızına bağlı olarak yapıldığı düşünüldüğünde nano katkılı epoksi matrise sahip numunelerin bozunmaya başlaması ve tamamen bozunması için saf epoksili duruma göre daha uzun süre yüksek sıcaklığa maruz kalması gerektiği sonucuna da ulaşılabilmektedir. İlk bozunmaya başlama sıcaklığı aşıldıktan sonra ise %50 ve %100 kütle bozunmasına karşılık gelen sıcaklıkların oldukça yakın olması nedeniyle nano katkılandırmanın bu aşamalarda bozunma hızına etkilediği söylenebilir.

Yine ilk bozunmaya başlama sıcaklıkları, termal yönden incelendiğinde ÇCKNT ve BNNP’lerin bir arada kullanılması ile elde edilen etkileşimlerin ÇCKNT ve BNNP’lerin ayrı ayrı epoksi matris içinde kullanıldığı durumlara göre termal kararlılığı arttırabileceği şeklinde yorumlamak mümkündür.

Çizelge 5.1’de numuneler için, ani mukavemet düşüşünün yaşandığı sıcaklık olarak tanımlanan camsı geçiş sıcaklıkları T_g ile belirtilmektedir. Camsı geçiş sıcaklığının

termogravimetrik analiz sonuçlarında da görüldüğü gibi nano katkılandırmadan etkilendiği ve en azdan başlayarak en yüksek değere doğru sırasıyla saf epoksili, ÇCKNT katkılı, ÇCKNT+BNNP katkılı ve BNNP katkılı numunelerde görüldüğü belirlenmiştir. Camsı geçiş sıcaklıklarının saf epoksili duruma göre nano katkılandırma ile artırılmasında FT-IR analizlerinde açıklanan ÇCKNT ve/veya BNNP'lerin kullanımı ile epoksi matriste meydana gelen kimyasal bağ sayısının artması ve bu bağları koparmak içinde daha fazla enerji harcanması gerektiği ve nano katkılandırmada kullanılan ÇCKNT ve BNNP'lerin geniş yüzey alanına sahip olmaları nedeni ile daha iyi ısı transferi sağlayarak numuneler içerisinde sıcaklık etkisini daha iyi transfer edebilmeleri etkili olduğu düşünülmektedir.

5.2. Filaman Sarım Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Borunun Fiber - Hacim Oranının Belirlenmesi

Deneylerde kullanılan $[\pm 55^\circ]_4$ sarım parametrelerine sahip karbon fiber takviyeli kompozit boruların elyaf hacim oranını belirlemek amacı ile ASTM D2584 standardına göre yakma testi ve arşimet prensibine bağlı olan yoğunluk farkı metotları kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Yakma deneyi sonucunda numunelere ait fiber hacim oranı $V_c = 0.53$ olarak bulunmuştur. Yakma testi standartta belirtildiği gibi daha çok cam elyaf içeren numuneler için geçerli olması nedeniyle literatürde bulunan diğer bir metot yoğunluk farkı metodu kullanılarak da fiber hacim oranı hesaplaması yapılmıştır. Yoğunluk farkı metoduna göre fiber hacim oranı $V_c = 0.55$ olarak bulunmuştur. Yakma testi ile yoğunluk farkı testi sonuçlarının kıyaslanmasında elde edilen düşük oranlı farklı sonucun numunelerin yakılması sırasında karbon fiberlerin sıcaklıktan etkilenerek kütle kaybına uğraması yada ölçüm hassasiyetlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yakma testi sonrası epoksi matrisin tamamen uzaklaştırılarak yalnızca karbon fiberlerin kaldığı son durumdan bir kesit aşağıda Şekil 5.4'de görülmektedir. Şekil 5.4 incelendiğinde yakma testi sırasında karbon fiberlerin etkilenmediği, yapısal olarak bütünlüğünü koruduğu görülmektedir.

Her iki metotla yapılan fiber-hacim oranının belirlenmesi işlemlerinde, nano katkılı ve nano katkısız numunelerde benzer fiber hacim oranları elde edilmiştir. Burada elde edilen bu sonucun nedeni olarak üretim metotlarının ve koşulların birebir aynı olması ve nano katkının kütle hacim oranını değiştirebilecek miktarlardan çok düşük oranda kullanılması gösterilebilir.



Şekil 5.4. Yakma testi sonrası karbon fiber takviye malzemesi

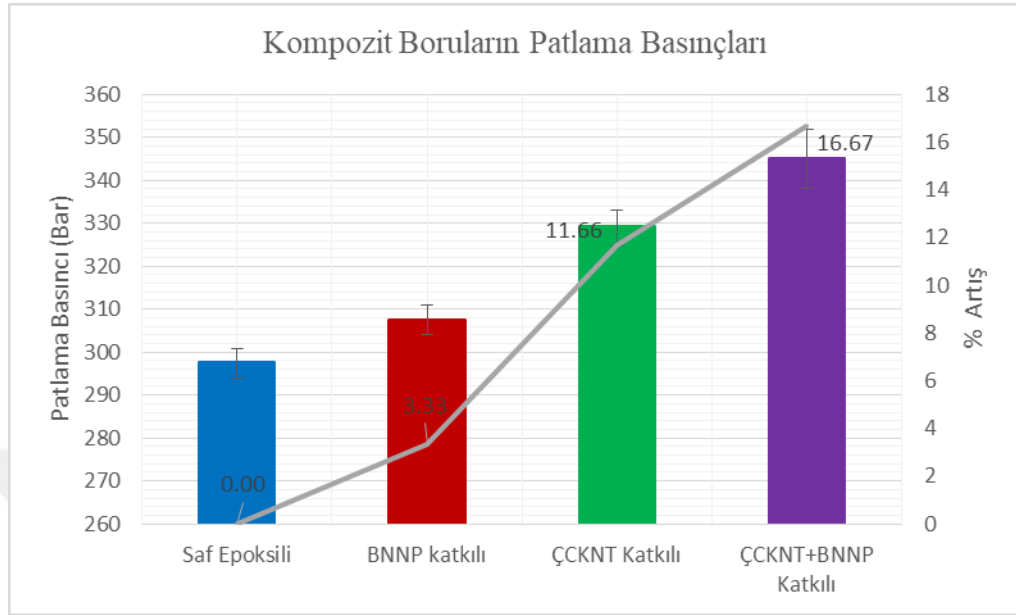
5.3. Kompozit Boruların Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Bu çalışmada üretimi yapılan saf epoksili, BNNP katkılı, ÇCKNT katkılı ve ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matrise sahip kompozit boru numunelerinin testler sonucu belirlenen mekanik özellikleri bu bölümde açıklanmıştır.

5.3.1. İç basınç ve statik patlatma testleri

İç basınç ve statik patlatma testleri ASTM D1599-99 standardına uygun olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında lineer basınç artışı sağlanmış, testin standartta belirtildiği gibi 60-70 sn arasında tamamlanmasına dikkat edilmiştir. Testler sırasında maksimum gerilme değerine ulaştığında boruların tamamında patlama şeklinde ani sonuç hasarı meydana gelmiştir. İç basınç ve statik patlatma testlerine göre elde edilen patlama basınçları grafik halinde Şekil 5.5’de verilmiştir. Şekildeki grafik incelendiğinde en düşük patlama basıncının yaklaşık olarak 300 Bar değerinde saf epoksili yani nano katkısız numuneden elde edildiği görülmektedir. Epoksi matrisin ÇCKNT ve/veya BNNP ile katkılanırılmasının ise kompozit boru numunelerin patlama basıncını arttırdığı açıkça görülmektedir. Statik patlama basınçlarının BNNP katkılı epoksi matrise sahip kompozit borularda 310 Bar, ÇCKNT katkılı epoksi matrise sahip kompozit borularda 335 Bar, ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matrise sahip kompozit borularda 350 Bar değere kadar arttığı görülmektedir. ÇCKNT ve BNNP’lerin kütlece çok düşük oranlarda kullanılmasına rağmen her iki nano malzemenin hibritlenerek beraber kullanıldığı

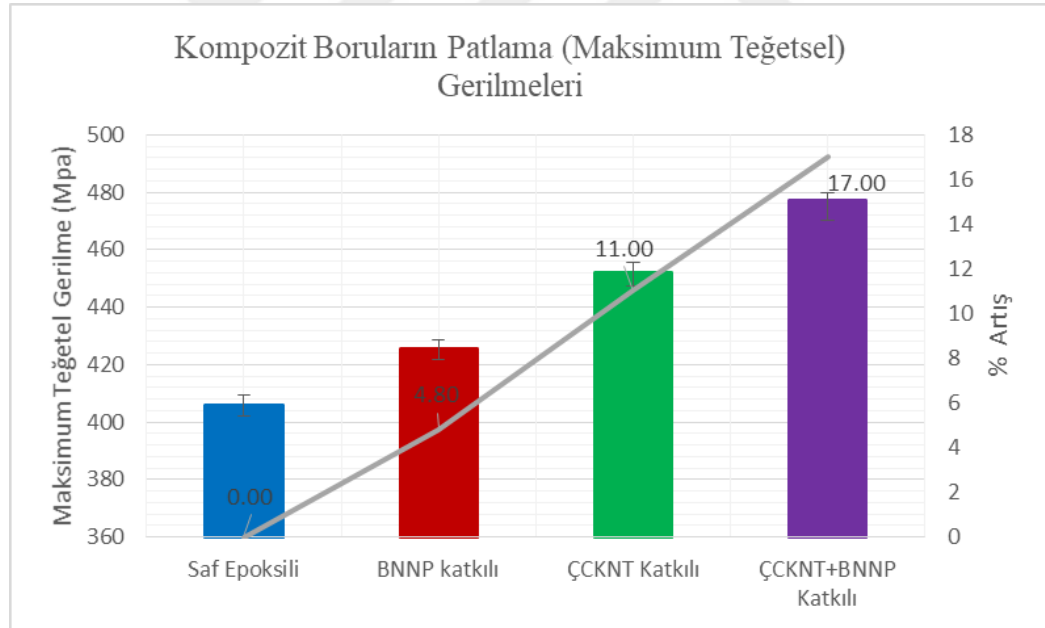
numunelerde, saf epoksili matrise sahip borulara göre % 16.67 lik bir patlama basıncı artışı elde edilmiştir. Bu sonuç aşağıdaki Şekil 5.5 de görülmektedir.



Şekil 5.5. Kompozit boruların patlama basınçları

Statik iç basınç testlerinde patlama basınçlarının yanında testleri yapılan kompozit boruların patlama anındaki gerilmeleri (maksimum teğetsel gerilme) de ASTM D1599-99 standardı uyarınca hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar şekil 5.6’da belirtilmiştir. Yapılan gerilme analizleri sonucunda en düşük patlama gerilmesinin saf epoksili matrise sahip kompozit boru numunede 410 Mpa değerinde meydana geldiği, diğer sonuçların ise patlama basıncı değerlerinde ölçülen sıraya uygun olarak artarak en düşük değerden en yükseğe doğru BNNP katkılı, ÇCKNT katkılı ve ÇCKNT+BNNP katkılı numunede görülmektedir. BNNP katkılı epoksi matrise sahip kompozit boru numunede % 4.8, ÇCKNT katkılı epoksi matrise sahip kompozit boru numunede %11 ve ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matrise sahip kompozit boru numunede %17’lik artış sağlandığı hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlar daha önceki çalışmalarımız ile tutarlılık göstermektedir (Ulus ve ark., 2016, Ustun ve ark., 2016). Kompozit borularda kullanılan epoksi matrisin ÇCKNT ve BNNP’lerin karakteristik özelliklerine bağlı olarak farklı değerlerde etkilendiği ve modifiye edildiği buna bağlı olarak nano katkılı kompozit borularda farklı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Kompozit boru üretimi için hazırlanan epoksi matris içerisinde ÇCKNT’lerin ve BNNP’lerin ayrı ayrı kullanıldıkları ÇCKNT katkılı ve BNNP katkılı kompozit boru numunelerde, ÇCKNT’lerin BNNP’lere

oranla epoksi matris içerisinde düşük miktarda kullanılmalarına rağmen daha yüksek maksimum gerilme değeri sağladığı belirlenmiştir. Bu sonuç nano katkıların fiziksel özelliklerinin matris malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir (Li ve ark., 2013). ÇCKNT katkılı epoksi matris içeren numunelerin BNNP katkılı numunelere oranla daha iyi mekanik özellikler göstermesi ÇCKNT'lerin BNNP'lerden daha iyi mekanik özellikler göstermesi ile ilişkilendirilebilir (Verma ve ark., 2007, Li ve ark., 2013). Epoksi matrisin modifikasyonunda kullanılan nano malzemelerin morfolojik yapılarının ÇCKNT'ler de görülen köprüleme ve sıyrılma, BNNP'lerde ise görülen çatlak engelleme, çatlak yönü değiştirme, çatlak çatallaşması ve mikro çatlak oluşumu gibi mekanizmalarla tokluğunu etkilemesi neticesinde statik patlatma test sonuçlarında farklılıklar ortaya çıkmıştır (Ulus ve ark., 2014). Ancak ÇCKNT ve BNNP'lerin beraber kullanıldığı numunelerde en yüksek gerilme değeri elde edilmiştir. Bu sonuç her iki nano katkı malzemesinin kullanıldığı numunelerde etkili bir biçimde dağıtılan nano katkıların sinerjik etkisinin rolü olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.6. Kompozit boruların patlama (maksimum teğetsel) gerilmeleri

Statik iç basınç testlerinde kullanılan numunelerde oluşan iç basınç testi hasarları şekil 5.7 ve 5.8'de görülmektedir. Nano katkılı ve nano katkısız epoksi matrise sahip kompozit borularda genel olarak benzer hasar davranışları görülmüştür. İç basınç nedeniyle oluşan gerilme, borunun bütünlüğünü koruduğu maksimum gerilme değerini aştığında borunun orta kısmından başlayan sızıntı bölgesinde meydana gelen fiber

kopmasına bağılı olarak ani hasar hızla gelişmiş ve numunelerde patlama meydana gelmiştir. Su jeti oluşumuna ise rastlanmamıştır. İç basınç etkisi ile borunun orta kısmına yakın bir kısımda şekil değişimlerinin yoğun olması nedeniyle ilk patlama hasarı bu bölgede oluşmuş daha sonra ani bir şekilde yanlara doğru fiber kırılmasına izleyen yarıma meydana gelmiştir. Karbon fiberin yapısal olarak siyah renge sahip olması nedeniyle hasarın ilk aşamalarını gözlemlenmek oldukça kısıtlı kalmaktadır. Fakat borularda hasar sonrası sızıntı bölgesi merkezli çatlaklar ve radyal yönde çatlak birleşimi açıkça görülmektedir (Şekil 5.7).

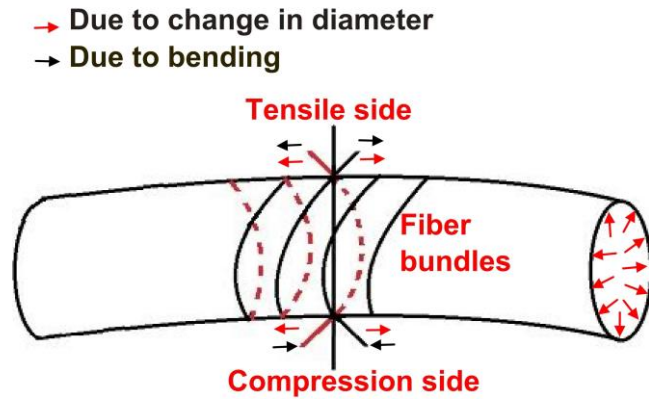


Şekil 5.7. Numunelerde görülen iç basınç testi hasarı



Şekil 5.8. Numunelerde görülen iç basınç testi hasarı ve eğilme

Statik patlatma testleri sonucunda hasarlı numuneler üzerinde birçok gözlem yapılmıştır. Numunelerde karakteristik olarak boru ve fiber eksenine boyunca kararsız çatlak oluşumu görülmüştür. Görülen bu karakteristik çatlak başlangıç davranışının iç basınç nedeniyle borunun morfolojik ve boyutsal değişimine bağlı olduğu değerlendirilmiştir. İç basınç artışı nedeniyle boru çapı artmış ve borunun uç kısımlarında meydana gelen şişe ağzı etkisi nedeniyle eğilme meydana gelmiştir (Şekil 5.8). Eğilmenin doğası gereği boru kesitinde aksial çekme ve basma bölgeleri oluşmuş ve farklı gerilme durumları ortaya çıkmıştır (Xia ve ark., 2001, Natsuki ve ark., 2003). Eğilmenin hasar mekanizmasında baskın olduğu filaman sarım kompozit boruların özellikleri sarım açıları ile kontrol edilebilmektedir. Sarım açısının $\pm 55^\circ$ olduğu borularda uygulanan iç basınç nedeniyle oluşan eğilmelerde çekme bölgesinden kayma veya enine hasar oluşumu gözlemlenirken basma bölgesinde bükülme ortaya çıkmaktadır (Şekil 5.9.) (Natsuki ve ark., 2003).



Şekil 5.9. Statik iç basınç testlerinde sarım açısına bağlı olarak gelişen kompozit boru hasarı (Ustun ve ark., 2016)

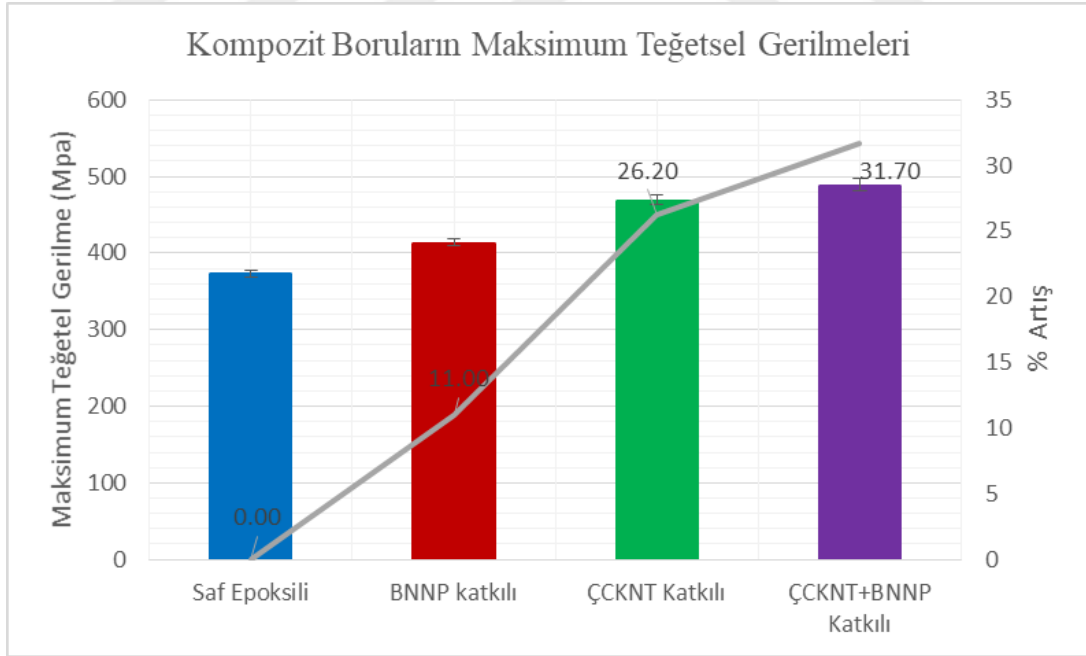
Yapılan çalışmalarda borularda oluşan hasarın çekme bölgesinin iç kısımda matris kırılmasına bağlı olarak sızıntı bölgesinden başlamış ve radyal olarak dış yüzeye boyunca ilerlediği belirlenmiştir.

Nano katkıların arayüz bağlantısı iyileştirmesi, çatlak oluşumu engelleme gibi çeşitli mekanizmalarla kompozit malzemelerde enerji absorpsiyon özelliklerini iyileştirdiği bilinmektedir (Liu ve Wagner, 2005, Vlasveld ve ark., 2005, Han ve Cho, 2006, Sun ve ark., 2009, Ulus ve ark., 2014, Ustun ve ark., 2016). Nano malzemeler çatlak ilerlemesini engelleme bilmekte ve /veya yönünü değiştirebilmektedir (Sun ve ark., 2009).

Uygulanan yüksek iç basıncın etkisiyle boru kesitinde çap artışı ve eğilmeye bağlı olarak deformasyonlar ortaya çıkarmaktadır. Dahası boru kesitindeki çap artışı fiber demetlerindeki kayma gerilmesine bağlı olarak epoksi-fiber ayrılmasına neden olmaktadır. Çalışmalarda kullanılan ÇCKNT ve BNNP katkılı epoksi matris kompozit boruların daha yüksek iç basınç değerlerinde hasar görmesi epoksi matrisin kayma gerilmesi ve epoksi matris-fiber arayüz bağlantısının iyileştirilmesini sağladığı görülmektedir. Bu sonuç ÇCKNT ve/veya BNNP katkılı numunelerde daha az kayma gerilmesine bağlı hasarın oluşumunun görülmesi ile de ilişkilendirilebilmektedir.

5.3.2. Halka çekme testleri

Üretimi yapılan numunelerin maksimum teğetsel gerilme değerleri ASTM D2290-12 standardına göre yapılan halka çekme testleri ile de değerlendirilmiştir. Halka çekme testleri sonucu elde edilen maksimum teğetsel gerilme değerleri ve saf epoksili matrise sahip kompozit borulara göre diğer numunelerde görülen maksimum teğetsel gerilme % artış miktarları Şekil 5.10'da belirtilmiştir.

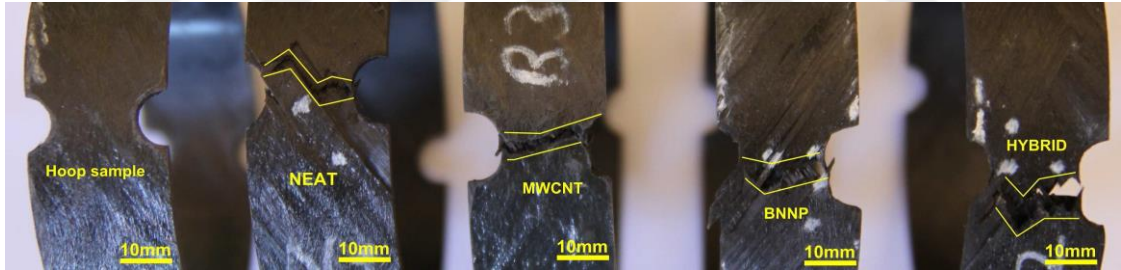


Şekil 5.10. Kompozit boruların maksimum teğetsel gerilmeleri

Testler sonucu saf epoksili numunelerde 377 MPa maksimum gerilme değeri elde edilmiştir. Maksimum gerilmelerde saf epoksili kompozit borulara oranla en azdan başlayarak sırasıyla BNNP katkılı epoksi matris kompozit boru numunelerde %11,

ÇCKNT katkılı epoksi matris kompozit boru numunelerde %26.2 , ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matris kompozit boru numunelerde %31.7 artış belirlenmiştir. Elde edilen veriler statik patlatma testi sonuçları ile benzerlik göstermektedir.

Halka çekme testleri sonucu numunelerde görülen hasarlar aşağıda Şekil 5.11’de görülmektedir. Halka çekme testi numunelerinde statik patlatma testlerinde görülen benzer hasar davranışlarına rastlanmıştır. Saf epoksili (nano katkısız) kompozit boru numunede hasar kenarlardan başlayarak halkanın aksiyal doğrultusu boyunca ilerlemiştir. Fakat artan yük ile çatlak fiber doğrultusunda ilerlemiş ve ani fiber kırılması ile son hasar oluşumu meydana gelmiştir. Bu sonuç fiber-matris arayüz bağlantısının saf epoksili (nano katkısız) kompozit boru numunelerde zayıf olduğunu göstermektedir. Diğer yandan ÇCKNT, BNNP, ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matris kompozit boru numunelerde yoğun fiber kırılması ve halka eksenine paralel çatlak oluşumu ile hasar meydana geldiği belirlenmiştir. Çatlak oluşumu ve sonuç hasarının meydana gelme şekli bakımından incelendiğinde nano katkılandırmanın tüm numunelerde fiber-matris arayüz bağlantısını güçlendirdiği anlaşılmaktadır. Halka çekme testlerinden elde edilen bu sonuçlar ayrıca makale olarak literatürde yayınlanmıştır (Ustun ve ark., 2016).

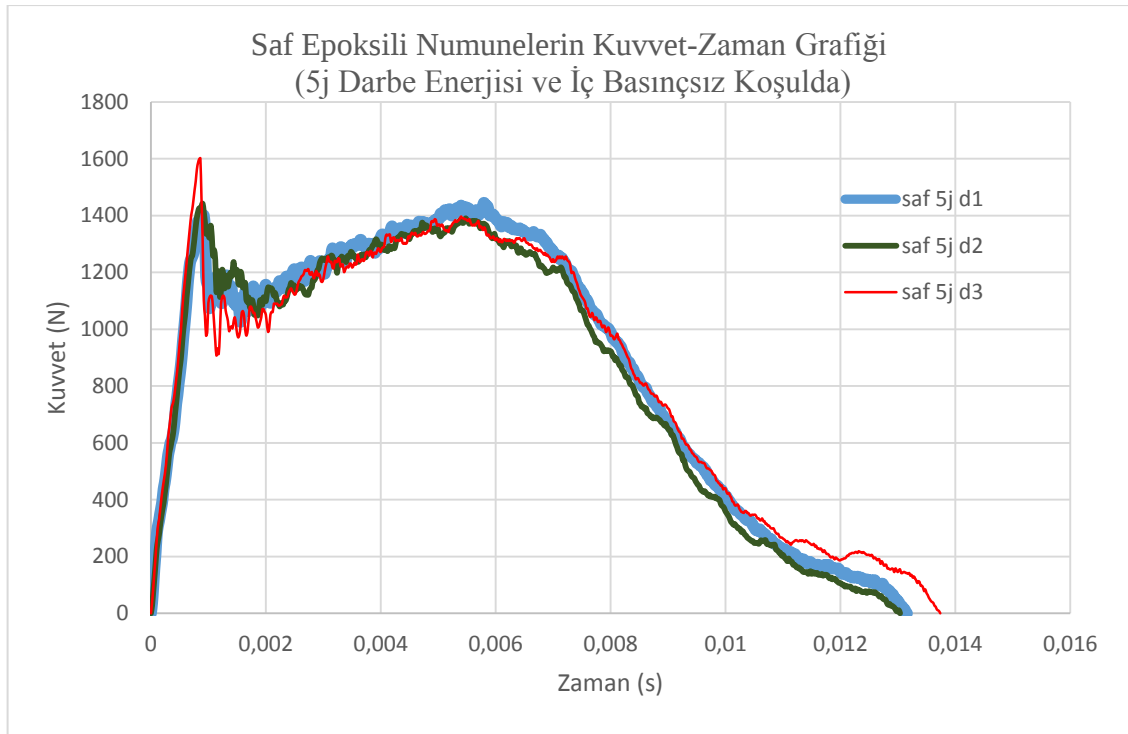


Şekil 5.11. Halka çekme testi sonucu numunelerde görülen hasarlar (Ustun ve ark., 2016)

5.3.3. Düşük hızlı darbe testleri

Bu tez çalışmasında kullanılmak üzere üretimi yapılan kompozit boru numunelerin darbe davranışlarının belirlenmesi için ağırlık düşürme test metodu ile farklı enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe testleri uygulanmıştır. Darbe deneyleri 5 J, 10 J ve 15 J enerji seviyelerinde düşük hızlarda gerçekleştirilmiştir. V yatağı kullanılarak sabitlenen numuneler iç basınçsız ve 12 Bar iç basınçlı koşullarda test edilmiştir. Darbe deneylerinde 6.35 kg ağırlığa sahip yarı küresel uçlu vurucu kullanılmış ve darbeler numunelerin orta noktasına uygulanmıştır. Darbe sonrası hasar mekanizmalarının doğru olarak belirlenebilmesi için ilk darbe sonrası vurucunun numunelere tekrar teması ve

vurması engellenmiştir. Deneyler sırasında elde edilen veriler deneysel çalışma kısmında açıklandığı gibi bilgisayar ortamında kayıt altına alınmıştır. Düşük hızlı darbe testleri her numune türü için üç kez tekrarlanacak şekilde yapılmıştır. Elde edilen sonuçların aynı numune grubu için çok benzer sonuçlar vermesi nedeni ile elde edilen sonuçlardan bir tanesi kullanılarak grafikler oluşturulmuştur. Nano katkısız (saf epoksili) kompozit boru numuneye ait 5 J enerji seviyesinde iç basınçsız olarak yapılan testlere ait kuvvet-zaman grafiği örnek olarak Şekil 5.12’de verilmiştir. Şekil 5.12’de de görüldüğü gibi test sonuçları birbirine oldukça yakındır.



Şekil 5.12. Saf epoksili (nano katkısız) numunelere ait 5 J iç basınçsız darbe deneyleri kuvvet-zaman grafiği

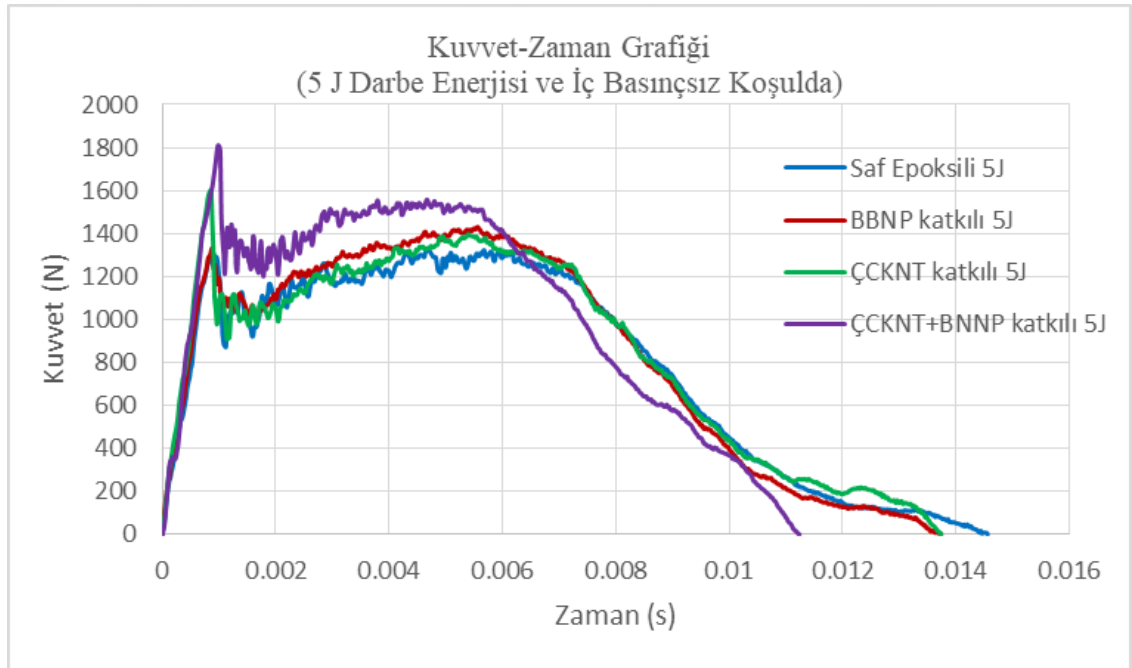
5.3.3.1. Darbe kuvvetinin zamana bağlı değişimi (F-t)

Düşük hızlı darbe yükü koşullarında, vurucu ile numune arasındaki temas süresi göreceli olarak değişmektedir. Zamana bağlı olarak kuvvet değişimi hasar oluşumu ve gelişmesi hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır (Davies ve ark., 1994, Davies ve Zhang, 1995, Zhang, 1998, Schoeppner ve Abrate, 2000, Belingardi ve Vadori, 2002, Shyr ve Pan, 2003). Birçok araştırmacı darbe testlerinde, kuvvetin zamana göre değişimini yapısal cevabın kıyaslanarak değerlendirilmesinde kullanmışlardır. Literatürde belirtildiği gibi kuvvetin ilk düşüşü, Hertzian hasarı veya önemli hasar olarak tanımlanır

ve matris çatlaması, fiber kırılması, lokal delinme ve çukurlaşma gibi hasar başlangıçlarının göstergesi olarak kabul edilir(Alderson ve Evans, 1992, Davies ve ark., 1996, Matemilola ve Stronge, 1997, Hirai ve ark., 1998, Zhang, 1998, Zhou, 1998, Schoeppner ve Abrate, 2000, Belingardi ve Vadori, 2002, Cartie ve Irving, 2002). Davies ve Zhang ilk hasar eşiğinin muhtemel delaminasyon hasar başlangıcı ile ilgili olduğunu değerlendirmişlerdir (Davies ve Zhang, 1995). Belingardi ve Vadori ise kuvvet değişiminde iki eşik değeri olduğunu belirlemişlerdir. Birincisi ilk kuvvet düşüşünün olduğu ilk malzeme hasarı ve ikincisi maksimum yük değerinde meydana gelen ilk tabaka hasarıdır (Belingardi ve Vadori, 2002). Aşağıda Şekil 5.13’de 5 J enerji seviyesinde iç basınçsız koşullarda yapılmış olan saf epoksili (nano katkısız), BNNP katkılı, ÇCKNT katkılı ve ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matrise sahip kompozit boru numunelerin darbe test sonuçları görülmektedir. Yukarıda belirtilen açıklamalara göre şekil 5.13’deki grafik incelendiğinde ilk hasar oluşumları farklı kuvvet değerlerinde başlasa da test edilen tüm numunelerin düşük hızlı darbe testlerinde benzer karakteristik özellikler sergilediği ve benzer hasar mekanizmalarına sahip oldukları kuvvet zaman grafiklerinin benzerliklerinden anlaşılmaktadır. Test edilen numunelerin hiçbirinde delinme, saplanma gibi hasarlar gözlemlenmemiştir. Kuvvet-zaman grafiğinin kapalı eğri özelliği göstermesi de bu sonucu doğrulamaktadır. Hertzian hasarının (ilk önemli hasarın) oluşumu sırasıyla saf epoksili (Nano Katkısız), BNNP katkılı, ÇCKNT katkılı ve son olarak ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matrise sahip kompozit boru numunelerinde görülmüştür. Test edilen numunelerde Hertzian hasarında olduğu gibi ani ve şiddetli ikinci bir kuvvet düşüşüne rastlanmamıştır.

Hertzian hasarında olduğu gibi, kuvvet-zaman grafiğinde pikler veya titreşimler şeklinde görülen kuvvet düşüşleri, numunelerde oluşan hasarlar ile ilişkilendirilebilmektedir. Şekil 5.13 incelendiğinde ilk görülen önemli hasar sonrası tüm numunelerde, özellikle maksimum kuvvet değeri oluşuncaya kadar titreşimler olduğu görülmektedir. Piklerin şiddeti ilk önemli hasar oluşumu sonrası azalmaya başlayarak maksimum kuvvetin sağlanmasından (kuvvet-zaman grafiklerinde yükleme kısmı son bulduğunda) sonra minimum seviyeye indiği hatta sonlandığı görülmektedir. Numunelerde görülen bu pikler veya titreşimler, oluşan matris hasarları (matris çatlaması, kırılması), fiber matris arayüzey ayrılması ve delaminasyon hasarları hatta fiber kopması gibi hasar mekanizmaları ile ilişkilendirilebilir. Şekil 5.13’de dikkat edilirse titreşim oluşumları sürecinde kuvvet artışı son bulmamakta, oluşan titreşimlere karşılık kuvvette yükleme kısmında belirli bir hızda artmaktadır. Kuvvetin artış

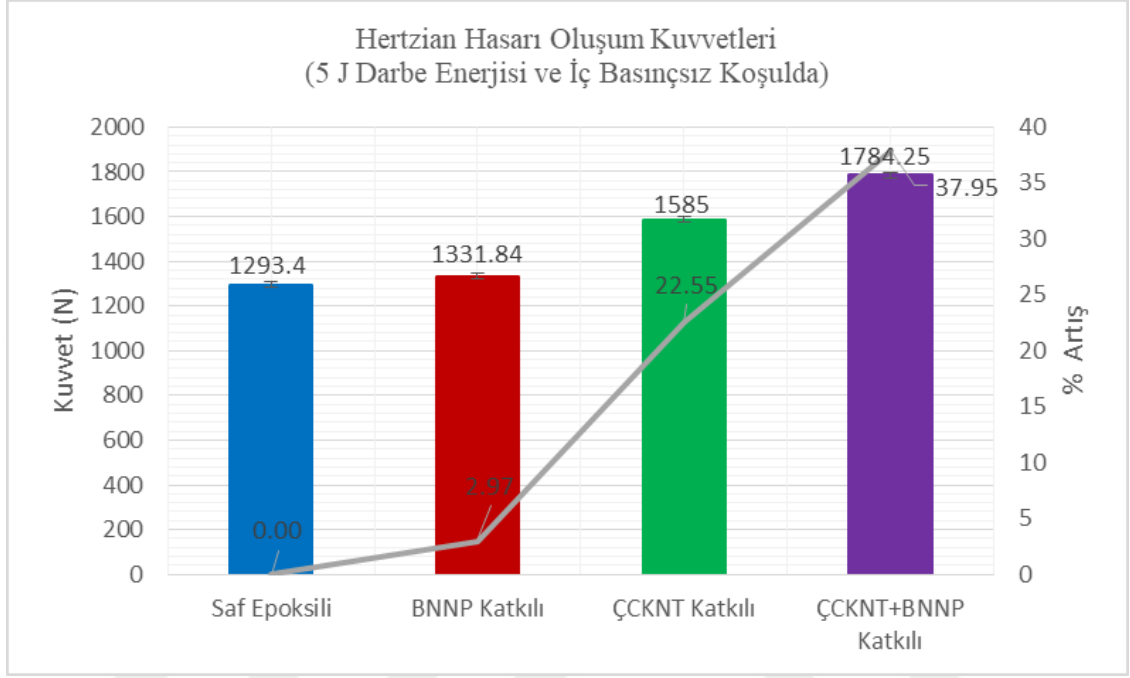
göstermesi de numunelerin malzeme bütünlüğünün titreşimlerle belli eden hasarına karşı numune bütünlüğünün korunduğunu göstermektedir. Bu sonuç numune bütünlüğünü bozabilecek ya da ani kuvvet boşalmasına neden olabilecek fiber kopması gibi hasarların meydana gelmediğini ve oluşan hasarlarında malzeme bütünlüğünü bozacak boyutlarda olmadığını göstermektedir. Her ne kadar numuneye uygulanan darbe enerjisi değişse de darbe enerjisi absorpsiyon hızı, BBNP, ÇCKNT ve ÇCKNT+BNNP ile katkılандırılmış epoksi matrise sahip kompozit boru numunelerde katkısız saf epoksili kompozit boru numuneye göre arttığı kuvvet-zaman grafiklerinde vurucunun numuneye temasının son bularak kuvvetin sıfırlandığı zaman eksenı değeri nin daha düşük olması ile anlaşılmaktadır.



Şekil 5.13. Tüm numune gruplarına ait kuvvet-zaman grafiği (5 J darbe enerjisi ve iç basınçsız koşulda yapılan testler)

Kuvvet zaman grafiğinde maksimum kuvvet oluşuncaya kadar görülen yükleme bölgesinde grafiğin ilk eğiminin değişimine kadar olan kısım elastik deformasyon bölgesi olarak adlandırılır ve bu kısma kadar darbe enerjisi elastik şekil değişimi ve sürtünmeler için harcanır, eğim değişiminin gözlenmesi malzemenin rijitliğinin aşılmasından dolayı plastik deformasyonların başlaması ile ilişkilendirilir. (Ulus ve ark., 2016). Şekil 5.13 incelendiğinde nano katkılı epoksi matrise sahip kompozit boru numunelerde hasar meydana gelerek kuvvet düşüşünün gözlemlendiği kuvvet değerlerinin saf epoksili matrise sahip kompozit boru numuneye oranla daha yüksek kuvvet değerlerinde meydana

gelmesinden dolayı elastik bölgenin ve buna bağlı olarak malzeme rijitliğinin saf epoksili matrise sahip kompozit boru numuneye kıyasla arttırılmış olduğunu göstermektedir. İlk önemli hasar oluşumunun (Hertzian hasarının) gözlemlendiği kuvvet değerleri ve saf epoksili numuneye oranla % artış miktarları grafik halinde Şekil 5.14’de verilmiştir.

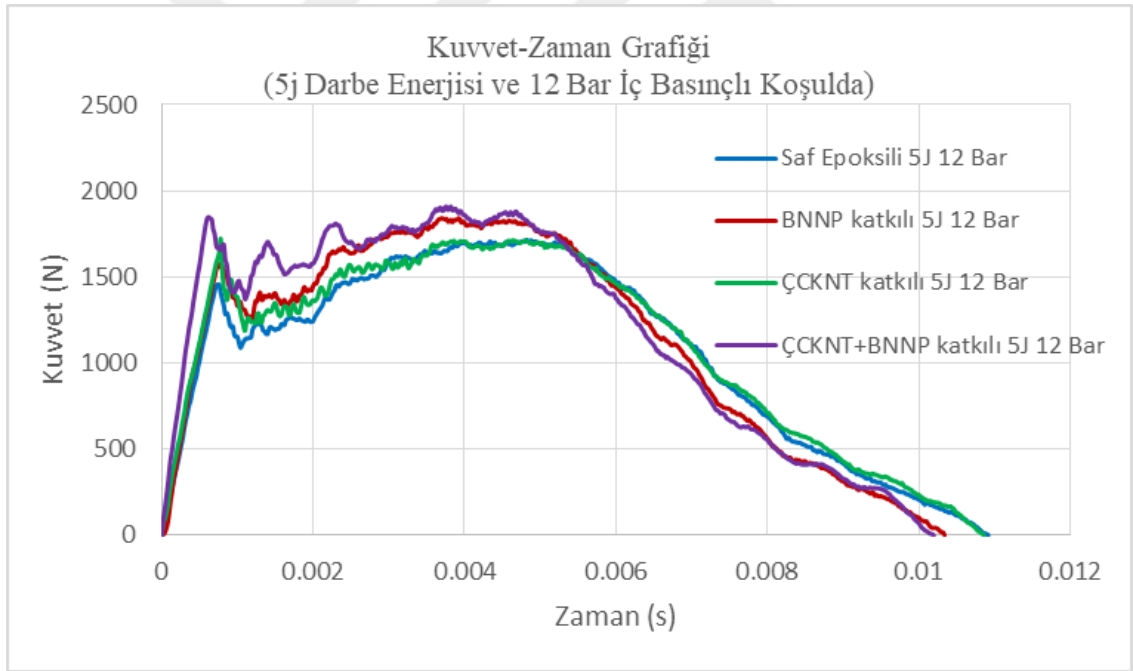


Şekil 5.14. Hertzian hasarı oluşum kuvvetleri grafiği (5J enerji ile iç basınçsız koşulda yapılan test sonuçları)

Şekil 5.14’deki grafik incelendiğinde hertzian hasarı olarak adlandırılan ilk önemli hasar oluşumunun gözlemlendiği kuvvet değerlerinde BNNP ve ÇCKNT katkılı epoksi matrise sahip kompozit boru numunelerde Saf epoksili olan nano katkısız epoksi matris kompozit boru numuneye sırasıyla oranla %2.97 ve %22.54’lük artışlar görülmüştür. Fakat ÇCKNT+BNNP içeren kompozit boru numunede ise BNNP ile ÇCKNT’lerin ayrı ayrı kullanıldıkları numunelerden daha farklı olarak %37.95 lük bir artış gözlemlenmiştir. Bu sonuç ÇCKNT’lerin BNNP’ler ile birlikte kullanılması halinde diğer çalışmalarımızda da belirlendiği gibi ÇCKNT ile BNNP’ler arasında oluşan sinerjetik etkiyle ilişkilendirilebilir (Ulus ve ark., 2014, Ulus ve ark., 2016, Ustun ve ark., 2016).

Aşağıda Şekil 5.15’de 12 Bar iç basınç ile basınçlandırılmış borulara ait 5 J darbe enerjisi ile yapılan darbe deneyleri kuvvet-zaman grafiği görülmektedir. Kompozit boru test numunelerinin 12 Bar basınç değerinde basınçlandırıldıklarında, iç basınçsız koşullarda yapılan darbe testlerine ait kuvvet zaman grafiklerine oranla karakteristik

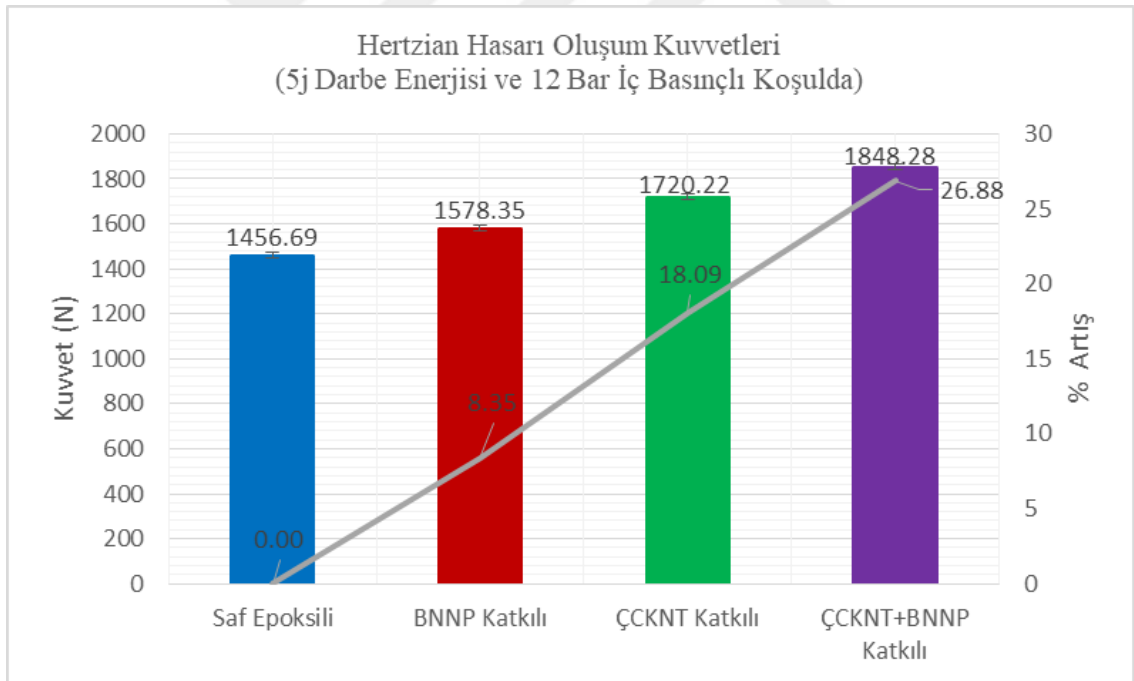
olarak çok fazla farklılaşmadığı, 12 Bar iç basınçlı koşulda da iç basınçsız koşulda kuvvet-zaman grafiklerinin yükleme kısmında görülen sadece bir önemli kuvvet düşüşünün belirlendiği görülmektedir. Bu ilk ve önemli kuvvet düşüşünün görüldüğü Hertzian hasarının meydana geldiği kuvvet değeri iç basınçsız koşullardaki test sonuçlarından biraz farklılaşarak tüm numuneler için 12 Bar iç basınçlı durumda bir miktar arttığı belirlenmiştir. İç basıncın saf epoksili kompozit boru numuneleri, nano katkılı numunelere oranla daha fazla olumlu olarak etkilediği ve hasar oluşumunu azalttığı görülmüştür. Numunelerin darbe enerjisi absorpsiyon hızları da artış göstermiş en hızlı enerji absorpsiyonu ÇCKNT+BNNP katkılı numunede görülmüştür. Kuvvet-zaman eğrilerinin yükleme bölgesindeki eğimi ile belirlenen temas rijitliğinin genel olarak saf epoksili numuneler ile ÇCKNT ve BNNP katkılı numunelerde yakın değerde olduğu görülmektedir. ÇCKNT+BNNP katkılı numunelerde ise temas rijitliğinin diğer numunelere kıyasla arttırılmış olduğu görülmektedir.



Şekil 5.15. Tüm numune gruplarına ait kuvvet-zaman grafiği (5J darbe enerjisi ve 12 Bar iç basınçlı koşulda yapılan testler)

Şekil 5.16 incelendiğinde 12 Bar iç basınç koşulunda Hertzian hasarı olarak adlandırılan ilk hasar oluşumunun gözlemlendiği kuvvet değerlerinde BNNP, ÇCKNT, BNNP ve ÇCKNT katkılı numunelerde saf epoksili olan nano katkısız numuneye göre sırasıyla oranla %8.35, %18.09 ve %26.88'lik artışlar görülmüştür. Şekil 5.15 ve Şekil 5.16 verileri birlikte değerlendirildiğinde saf epoksili matrise sahip numunede, 5 J darbe

enerjisinde yapılan testlerde, 12 Bar iç basınçlı durumda Hertzian hasarının meydana geldiği kuvvet değerinin iç basınçsız duruma göre %12.62'lik bir artış gösterdiği belirlenmiştir. Hertzian hasar kuvvetinin iç basınçsız ve 12 Bar iç basınçlı her iki koşul için en yüksek değerine sahip ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matrise sahip kompozit boru numunede ise Hertzian hasar kuvvetinde 12 Bar iç basınç koşulunda iç basınçsız duruma göre %3.58'lik artış meydana geldiği görülmüştür. Sonuçlar değerlendirildiğinde 12 Bar iç basınçlı koşulda iç basınçsız duruma göre saf epoksili matrise sahip kompozit boru numunelerde Hertzian hasarı oluşum kuvvetinde yüzdesel olarak daha fazla artış meydana geldiği belirlenmiştir. Bu sonuç iç basınçlandırmanın Hertzian hasarı oluşumu kuvvetinin arttırılmasında saf epoksili numunede daha etkili olduğunu göstermektedir. Diğer bir deyişle saf epoksili numunenin nano katkılı numunelere oranla şekil değişimine daha hassas olduğu, iç basınçlandırma ile şekil değişiminin kısıtlanmasının saf epoksili numunede rijitliği ve hasar oluşum için gerekli olan kuvveti daha fazla arttırıldığı belirlenmiştir.



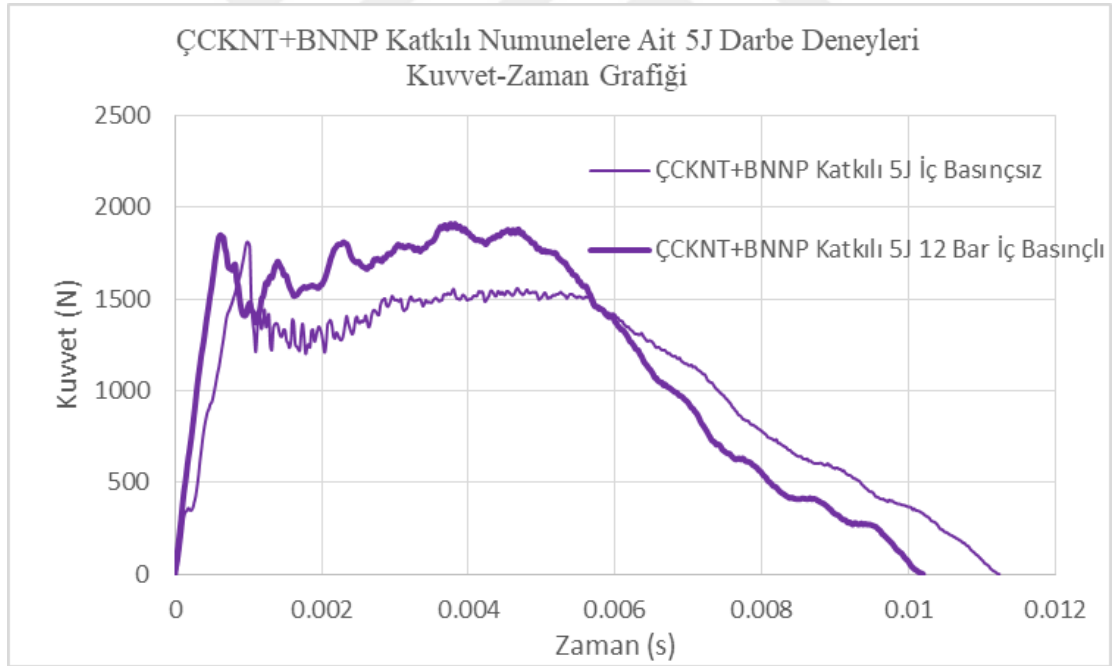
Şekil 5.16. Hertzian hasarı oluşum kuvvetleri grafiği (5 J darbe enerjili ve 12 Bar iç basınçlı koşulda)

Şekil 5.17'de iç basınçsız ve 12 Bar iç basınçlı koşullarda darbe davranışının nasıl etkilendiğinin kıyaslanarak belirlenmesi için her iki durumda da 5 J enerji seviyesinde test edilen ÇCKNT+BNNP katkılı numuneye ait kuvvet-zaman grafiği eğrileri

görülmektedir. Grafikler kıyaslandığında 12 Bar iç basınçlı durumda, iç basınçsız duruma göre;

- İlk önemli hasar oluşumunun görüldüğü Hertzian hasar kuvvetinin artış gösterdiği, malzeme rijitliği ve elastik hasar bölgesinin arttığı ve buna bağlı olarak aynı oranda hasar oluşumu için daha fazla darbe enerjisi gerektiği,
- İlk hasar sonrası oluşan pik şiddetlerinin ve titreşimlerin genliğinin arttığı dolayısıyla hasar mekanizmalarının artmış olabileceği,
- Kuvvetin maksimuma ulaşma (yükleme bölgesinin) süresinin kısaldığı, grafiğin tepe noktasının sola kaydığı ve grafiğin toplam süresi ile ilişkili olan darbe enerjisinin sönümlenme süresinin azaldığı yani darbe enerjisi absorpsiyon hızının arttığı,
- Temas rijitliğinin iç basınçlandırma ile arttığı belirlenmiştir.

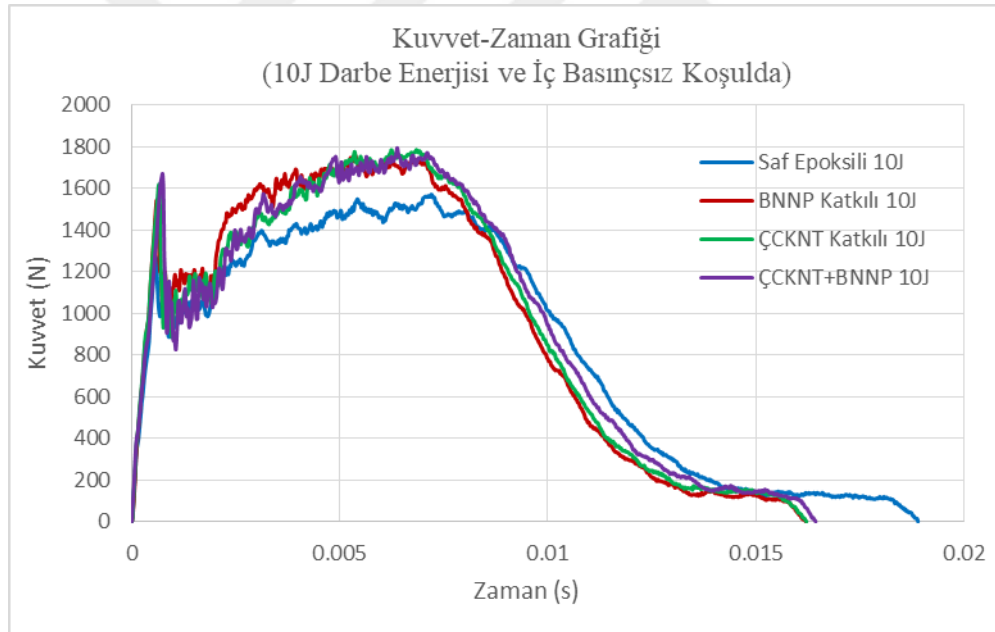
Diğer saf epoksili, BNNP katkılı ve ÇCKNT katkılı darbe testi numuneleri içinde yukarıda açıklanan benzer sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.17. ÇCKNT+BNNP katkılı numunelere ait 5 J darbe deneyleri kuvvet-zaman grafiği (iç basınçsız ve 12 Bar iç basınçlı)

Şekil 5.18’de nano katkılı ve katkısız tüm numuneler için 10 J darbe enerjisi ile iç basınçsız koşulda gerçekleştirilen darbe deneylerine ait kuvvet-zaman grafiği eğrileri görülmektedir. Grafik incelendiğinde saf epoksili numune ile diğer nano katkılı

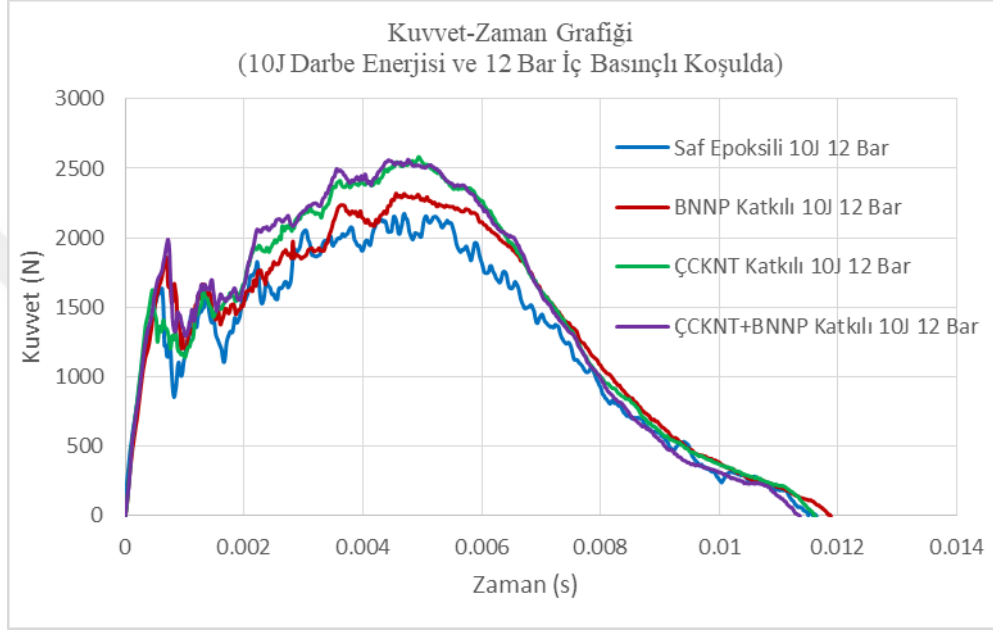
numunelere ait eğrilerin karakteristik olarak farklılaştığı görülmektedir. BNNP katkılı, ÇCKNT katkılı ve ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matris kompozit boru numunelerine ait eğriler genel olarak birbirine benzer sonuçlar göstermektedir. Numunelerin tamamında benzer temas rijitliğine rastlanmıştır. İlk önemli hasar oluşumu ise sırasıyla saf epoksili, BNNP katkılı, ÇCKNT katkılı ve son olarak ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matrise sahip kompozit borularda görülmüştür. Numunelerde görülen maksimum kuvvet değerleri de yine ayrı sıralama ile oluşmuştur. Kuvvet – zaman eğrilerine göre kuvvetin yükten boşalma kısmında sıfır değerine inmesi için en fazla süre saf epoksili matrise sahip numunede görülmüş olup, darbe enerjisi absorpsiyon hızı en düşük olarak bu tip numunede gerçekleştiği görülmektedir. Elde edilen eğrilerin tamamının kapalı tip olması nedeniyle 10 J darbe enerji seviyesi ve iç basınçsız koşul içinde numunelerin tamamında yapısal bütünlüğün korunduğu ve numunelerin tamamında vurucunun geri sekmesinin gerçekleştiği, delinme ve saplanma hasarının ise oluşmadığı belirlenmektedir.



Şekil 5.18. 10 J darbe deneyleri kuvvet-zaman grafiği (iç basınçsız koşulda)

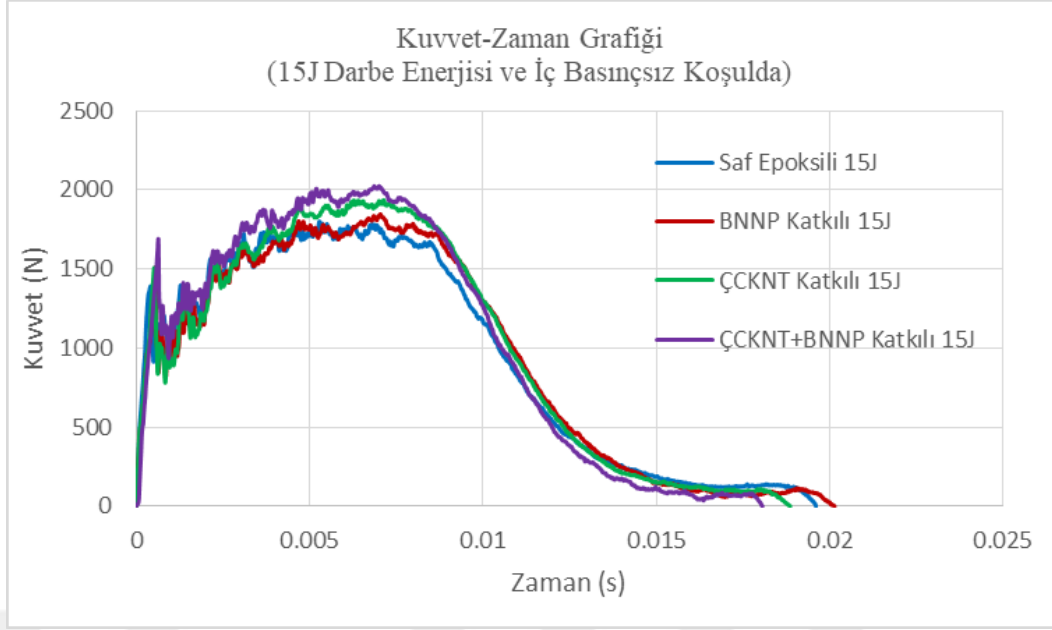
Şekil 5.19’da bulunan grafikte nano katkılı ve nano katkısız numunelere ait 10 J darbe enerjisi ve 12 Bar iç basınç koşullarında yapılan deneylere ait kuvvet-zaman eğrileri görülmektedir. Numunelerin temas rijitliklerinin benzer özellikler gösterdiği ve kuvvetin sıfır değerine indiği sürenin tüm numuneler için oldukça yakın değerlere sahip olduğu görülmektedir. İlk önemli hasar (Hertzian hasarı değeri) ve yükleme kısmının sonlandığı maksimum kuvvet değeri en düşükten başlayarak yine saf epoksili, BNNP katkılı,

ÇCKNT katkılı ve ÇCKNT+BNNP katkılı numunelerde belirlenmektedir. Saf epoksili numuneye ait kuvvet-zaman eğrisinde nano katkılı numunelere oranla daha fazla piklerin olduğu ve titreşimlerin şiddetinin arttığı görülmektedir. Piklerin oluşması ve titreşimlerin şiddetinin artması meydana gelen hasarlar ile ilişkili olduğundan saf epoksili matrise sahip numunelerde daha fazla iç hasarın meydana geldiği nano katkılıdırmanın ise iç hasar oluşumunu azalttığı sonucu ortaya çıkmaktadır.



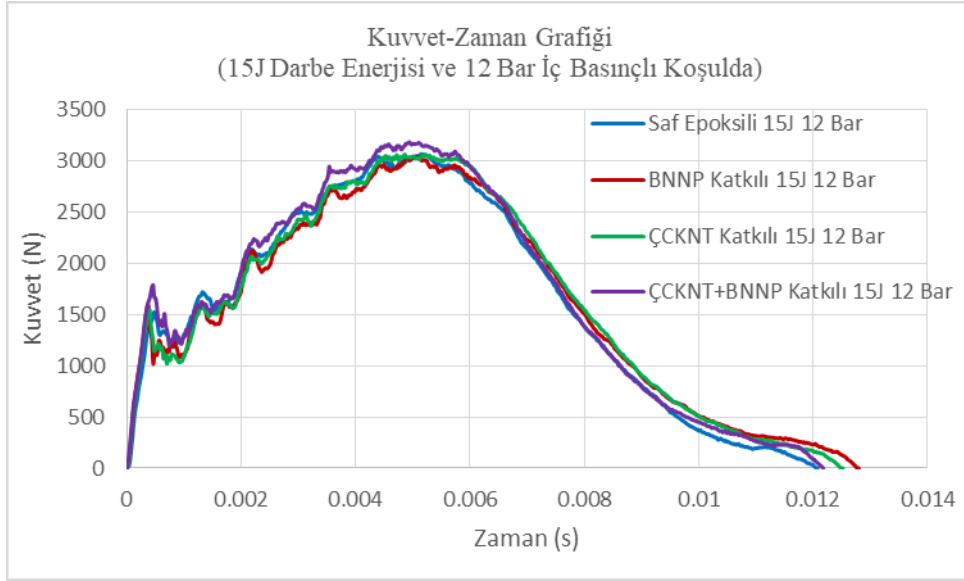
Şekil 5.19. 10 J darbe deneyleri kuvvet-zaman grafiği (12 Bar iç basınçlı koşulda)

Şekil 5.20’de bulunan grafikte nano katkılı ve nano katkısız numunelere ait 15 J darbe enerjisi ve iç basınçsız koşulda yapılan deneylere ait kuvvet-zaman eğrileri görülmektedir. Kuvvet-zaman eğrilerine göre tüm numunelerin karakteristik olarak benzer özellikler gösterdiği belirlenmektedir. Tüm numunelerde benzer temas rijitlikleri elde edilmiş olup, ilk önemli hasar (Hertzian hasarı) oluşum kuvvet değeri ÇCKNT+BNNP katkılı matrise sahip kompozit boru numunede görülmüştür.



Şekil 5.20. 15 J darbe deneyleri kuvvet-zaman grafiği (iç basınçsız koşullarda)

Şekil 5.21’de bulunan grafikte nano katkılı ve nano katkısız numunelere ait 15 J darbe enerjisi ve 12 Bar iç basınçlı koşulda yapılan deneylere ait kuvvet-zaman eğrileri görülmektedir. Grafik incelendiğinde tüm numune eğrilerinin benzer karakteristik özellikler gösterdiği görülmektedir. İç basınçlandırma koşulları ve artan darbe kuvveti, saf epoksili numunede görülen kuvvet-zaman eğrileri ile de belirlenen darbe davranışlarını nano katkılı numunelere ait darbe davranışlarına yaklaştırmıştır. İlk önemli hasar oluşum kuvvet değeri ve kuvvet yükleme kısmının sonlandığı maksimum kuvvet değeri sıralaması tüm numuneler için değişmemiş olup en düşükten büyüğe doğru yine saf epoksili, BNNP katkılı, ÇCKNT katkılı ve ÇCKNT+BNNP katkılı şeklinde gerçekleşmiştir.



Şekil 5.21. 15 J darbe deneyleri kuvvet-zaman grafiği (12 Bar iç basınç koşulunda)

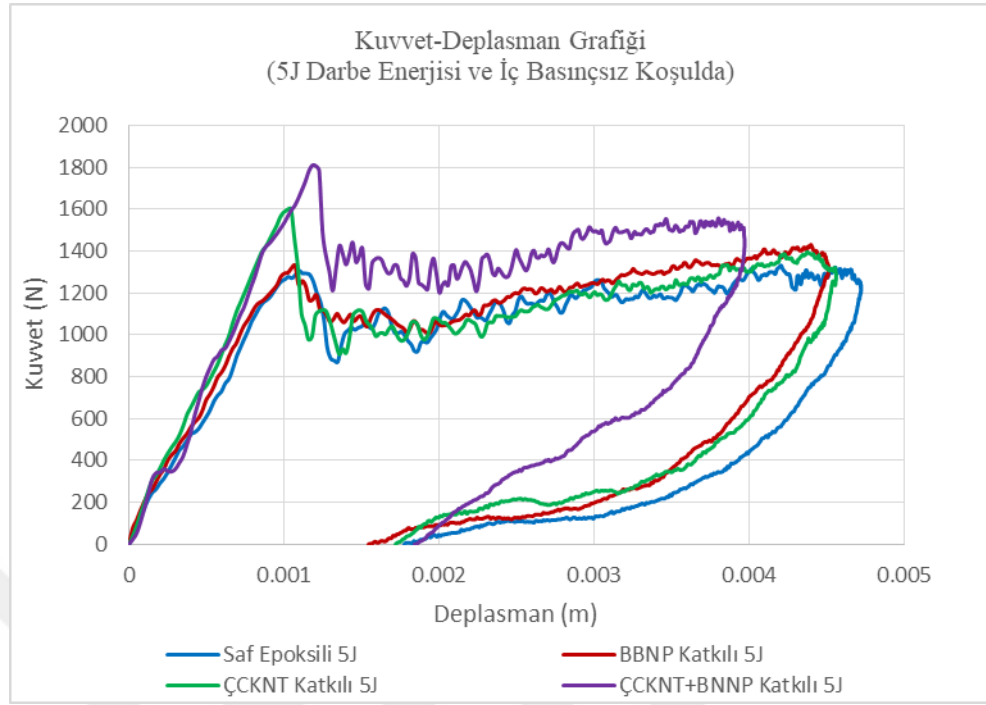
Yukarıdaki Şekil 5.13, Şekil 5.15, Şekil 5.18, Şekil 5.19, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21 de 5, 10 ve 15 J darbe enerjileri için iç basınçsız ve 12 Bar iç basınçlı koşullarda yapılan testlere ait kuvvet-zaman grafikleri verilmiştir. Grafikler bir bütün olarak incelendiğinde;

- Grafiklerin tamamında benzer özelliklerin gözlemlendiği,
- Geri sekme tipi grafik oluşumu görüldüğü ve vurucunun saplanma ya da delme hasarı oluşturmadığı,
- Hertzian hasarı olarak isimlendirilen ilk önemli hasarın ve kuvvet düşüşünün numunelerin tamamında görüldüğü, yükleme bölgesinde ikinci önemli hasar bölgesinin ise gözlemlenmediği,
- İlk hasar sonrası maksimum kuvvete erişilinceye kadar matris hasarı göstergesi olan titreşimlerin oluştuğu,
- İç basınçlı durumlarda yapılan testlerde darbe kuvvetin sönümlenme sürelerinin kısaldığı buna bağlı olarak enerji absorpsiyon hızlarının arttığı,
- İç basınçlı durumlarda yine iç basınçsız testlere göre maksimum kuvvetin oluştuğu tepe noktasına daha kısa sürede erişildiği,
- İç basınçlı durumlarda yapılan testlerde, iç basınçsız duruma göre numunelerin temas rijitliklerinin artış gösterdiği,
- Aynı enerji seviyesinde yapılan testler için 12 Bar iç basınçlı durumda Hertzian hasarının meydana geldiği kuvvet değerlerinin iç basınçsız duruma göre arttığı, belirlenmiştir.

5.3.3.2. Kuvvet deplasman grafiklerinin değerlendirilmesi

Kuvvet deplasman grafikleri genel olarak malzeme üzerinde darbe kuvvetinin etkisinin arttığı yükleme artma ve azaldığı yükten boşalma kısımlarına sahiptir. Kuvvet deplasman grafiğinde yükleme artma kısmında görülen eğrinin eğimi eğilme rijitliği olarak tanımlanmaktadır (Ulus ve ark., 2016). Yükleme kısmında görülen eğim değişimi malzemede hasar oluşumu ve plastik hasar bölgesine geçiş ile ilişkilendirilebilir. Kuvvet deplasman grafiklerinde ayrıca eğrinin türüne, açık yada kapalı olmasına göre darbe esnasında malzemenin gördüğü hasar hakkında bilgi edinilebilir. Eğrinin açık olması delinme ile ilişkilendirilirken kapalı eğrinin genişliğinin artması ise hasarlanma hakkında bilgiler sağlar. Kuvvet deplasman grafiği altında kalan alanlar ise absorbe edilen enerji miktarını belirler(Sayer ve ark., 2009).

Aşağıdaki Şekil 5.22’de 5 J enerji seviyesinde yapılan iç basınçsız deneylerde kullanılan numunelere ait kuvvet deplasman eğrileri görülmektedir. Şekil 5.22 incelendiğinde test numunelerine ait grafiklerin tamamının kapalı tip olduğu yani numunelerde herhangi bir saplanma veya delinme hasarının oluşmadığı belirlenmektedir. Numunelerde belirli bir değere erişilinceye kadar lineer kuvvet artışının olduğu görülmektedir. Bu eşik değer kuvvet zaman grafiklerinde de açıklandığı gibi Hertzian hasarının (ilk önemli hasar) meydana geldiği noktayı işaret etmektedir. Bu kuvvet değerine kadar malzemede elastik şekil değişimleri oluşmaktadır. Bu noktadan sonra ise belirli bir kuvvet düşüşü ve bunu takip eden ve yükten boşalma kısmına kadar süren, grafikte pikler ve titreşimlerin görüldüğü farklı bir eğime sahip ikinci bir kısım görülmektedir. Bu kısımda oluşan pikler ve titreşimler oluşan matris hasarı, fiber matris arayüzey ayrılması ve delaminasyonlar gibi eşitli hasar mekanizmaları ile ilişkilendirilmektedir. Grafik verileri incelendiğinde BNNP ile epoksi matrisin katkılandırılmasının eğilme rijitliğinde çok fazla etkili olmadığı ve saf (nano katkısız) numuneye benzer davranış sergilediği, fakat ÇCKNT ve ÇCKNT+BNNP içeren numunelerde eğilme rijitliklerinde artış olduğu görülmektedir. Kuvvet-deplasman eğrileri altında kalan alanın numunede iç hasar oluşumu sırasında harcanan enerji miktarına eşit olması nedeniyle, malzeme hasarının ÇCKNT+BNNP içeren numunede en az meydana geldiği belirlenmektedir. Darbe hasarı mekanizmalarında özellikle matris hasarının etkili olduğu düşünüldüğünde nano katkılı numunelerde sağlanan matris modifikasyonunun darbe özelliklerini iyileştirdiği sonucuna ulaşılmaktadır.

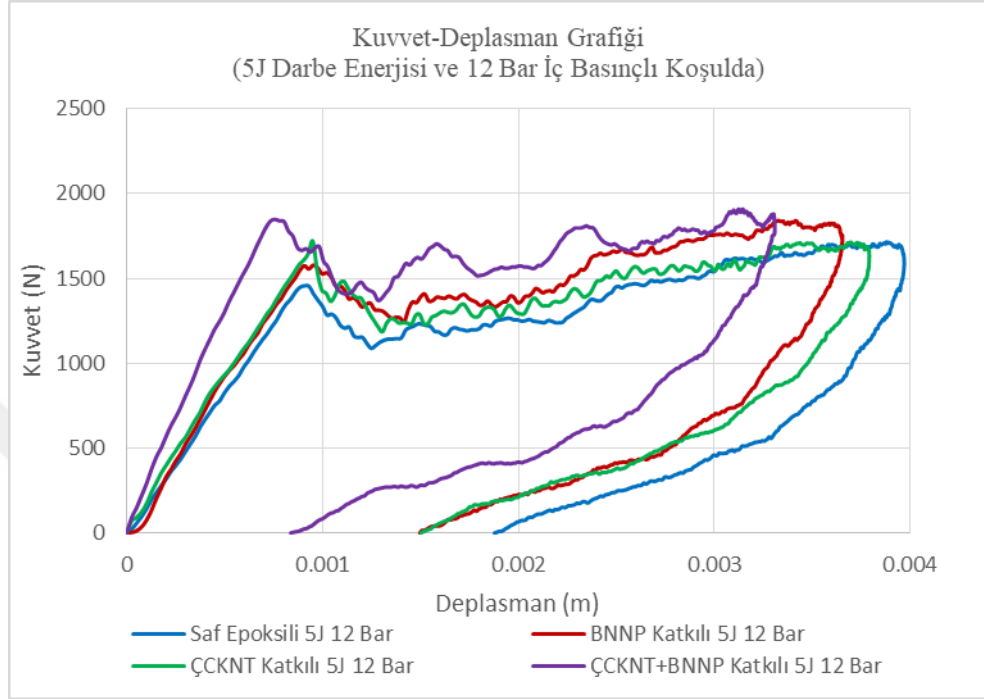


Şekil 5.22. 5 J darbe deneyleri kuvvet-deplasman grafiği (iç basınsız koşullarda)

Şekil 5.23’de 5 J enerji seviyesinde 12 Bar iç basınç koşullarında yapılan deneylere ait kuvvet - deplasman grafiği verilmektedir. Şekil 5.23’de numunelerin eğilme rijitlikleri değerlendirildiğinde saf epoksili numunede en düşük eğilme rijitliği belirlenirken, BBNP katkılı ve ÇCKNT katkılı numunelerde benzer eğilme rijitliklerine, ÇCKNT+BNNP katkılı matrise sahip kompozit boru numunede ise en yüksek eğilme rijitliğine rastlanmıştır. Bu sonuç nano katkılandırma ile eğilme rijitliğinde artış sağlandığını ve ÇCKNT ile BBNP arasında etkileşimlerin oluştuğunu, ÇCKNT ve BBNP’lerin bir arada kullanılmaları durumunda eğilme rijitliğini daha fazla arttırdıkları belirlenmiştir. İlk önemli hasar (Hertzian hasarı) sonrası oluşan pik şiddetlerinin en yüksek değerleri ÇCKNT+BNNP katkılı numunede görülürken, oluşan titreşimlerin genliği en fazla saf epoksili matrise sahip kompozit boru numunede görülmüştür. Hasar oluşumu için harcanan enerji miktarları kıyaslandığında en yüksek harcanan enerji değeri saf epoksili numune görülmektedir. Nano katkılandırma ile harcanan enerji miktarı azalmakta ve en az harcanan enerji değeri ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matrise sahip kompozit boru numunede görülmektedir. Yine benzer sıralama ile en yüksek deplasman değeri saf epoksili matrise sahip kompozit boru numunede görülmektedir.

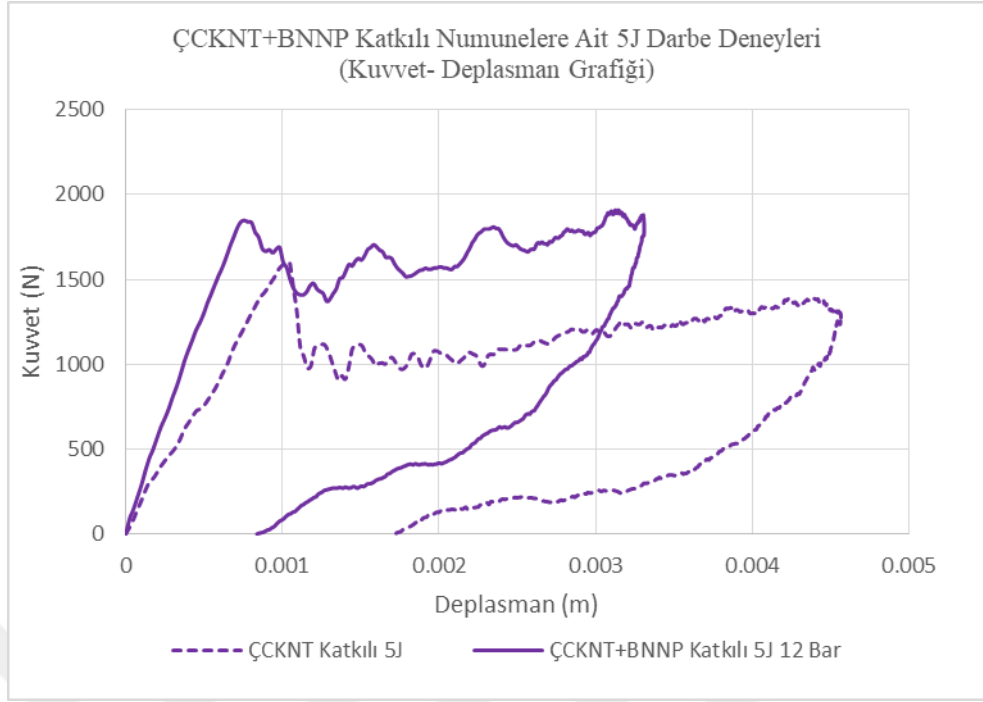
Şekil 5.23’de verilen 12 Bar iç basınç altında yapılan deneylere ait grafik temel özellikleri bakımından iç basınsız duruma benzerlik göstermektedir. En önemli farklılık

ise numunelerin eğilme rijitliklerinin atarak daha rijit davranış sergilemesi, maksimum deplasman değerlerinin iç basınçsız duruma göre daha düşük seviyelerde olması, numune tarafından absorbe edilen enerjinin azalması ve maksimum darbe kuvvetinin artmasıdır.



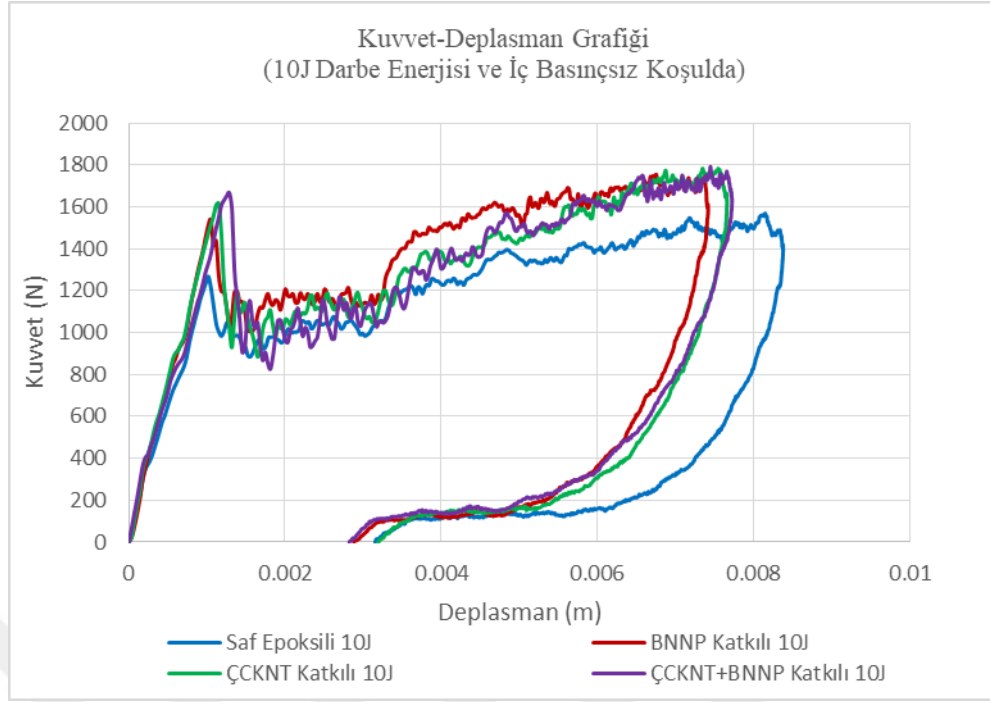
Şekil 5.23. 5 J darbe deneyleri kuvvet-deplasman grafiği (12 Bar iç basınç koşullarında)

Şekil 5.24’de 12 Bar iç basınç ve iç basınçsız durumda numunelerin basınçlandırma koşulundan nasıl etkilendiğinin daha net şekilde anlaşılması için 5 J darbe enerjisi ile 12 Bar iç basınçlı ve iç basınçsız durumda test edilen ÇCKNT+BNNP katkılı numuneye ait kuvvet-deplasman grafiği eğrileri verilmiştir. Şekil 5.24 incelendiğinde eğrilerin ilk kısmının eğimi ile belirlenen eğilme rijitliğinin ve ilk önemli hasar (Hertzian hasarı) oluşum kuvvetinin 12 Bar iç basınçlandırma ile arttığı görülmektedir. Yine 12 Bar iç basınçlandırma ile deplasman miktarı ve eğri altında kalan alanın azaldığı görülmektedir. Bu sonuç 12 Bar iç basınçlandırma ile malzemenin darbe direncinin arttığını ve daha az hasar oluşumu meydana geldiğini göstermektedir.



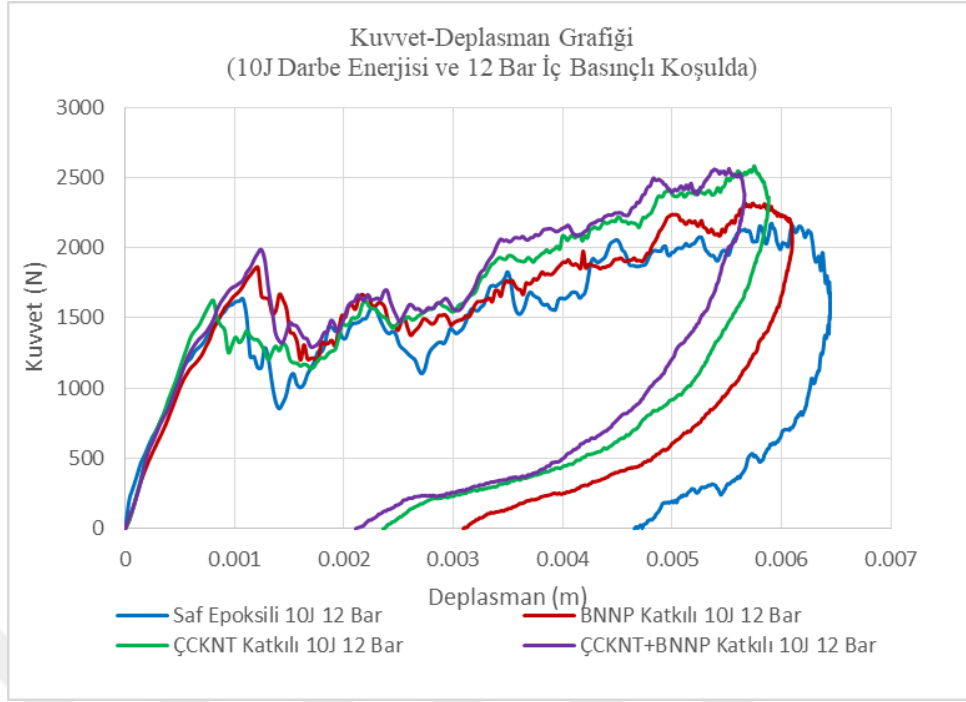
Şekil 5.24. ÇCKNT+BNNP katkılı numunelere ait 5 J darbe deneyleri kuvvet-deplasman grafiği (iç basınçsız ve 12 Bar İç Basıncılı koşulda)

Şekil 5.25’de 10 J darbe enerjisi ile iç basınçsız koşulda yapılan deneylere ait kuvvet-deplasman grafiği görülmektedir. Grafikte verilen eğriler incelendiğinde eğilme rijitliklerinin 10 J darbe enerjisi ile yapılan testlerde benzer sonuçlar verdiği ve hepsinin de kapalı tip eğri oluşturduğu görülmektedir. Numunelerin hiçbirinde saplanma ya da delinme hasarı yoktur. Hertzian hasarı oluşum kuvvetinin ise en düşük saf epoksili matrise sahip kompozit boru numunede, en yüksek değerinin ise ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matrise sahip kompozit boru numunede görüldüğü belirlenmiştir. Hertzian hasarı sonrası numunelerin tamamında önemli kuvvet düşüşünün yaşandığı bu noktadan sonra ise kuvvetin yükleme bölgesi sonuna kadar tüm numuneler için belirli bir hızda arttığı görülmektedir. Kuvvetin yükleme bölgesi sonuna kadar artışı sırasında pikler ve titreşimler şekilde kendini gösteren hasar oluşumlarının meydana geldiği görülmektedir. En yüksek deplasman değerine ise saf epoksili matrise sahip kompozit boru numunede rastlanmıştır.



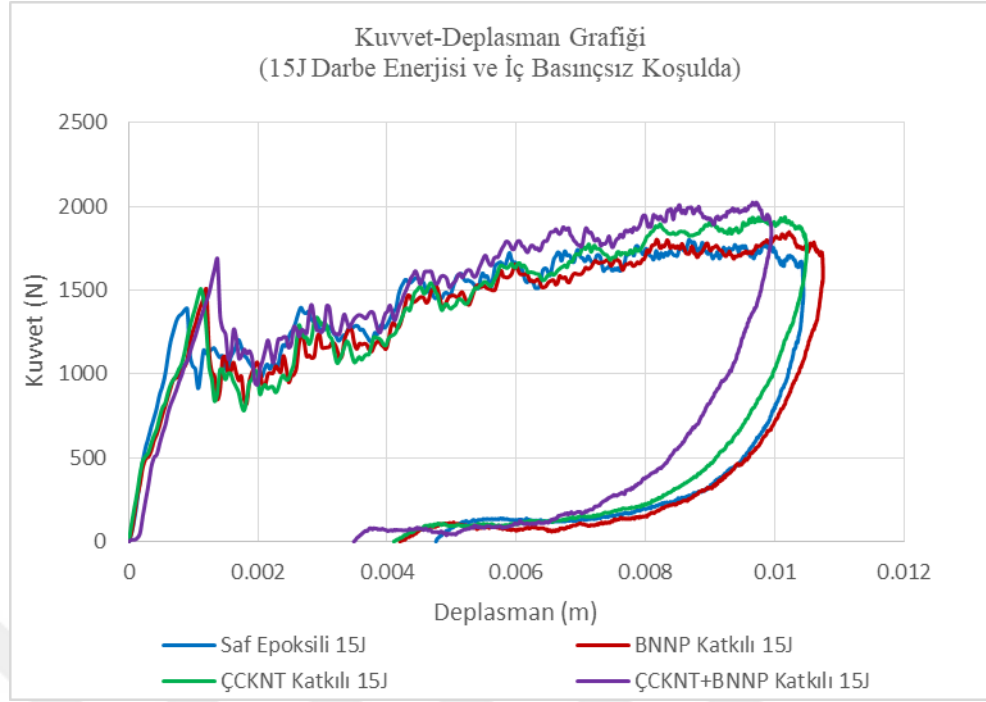
Şekil 5.25. 10 J darbe deneyleri kuvvet-deplasman grafiği (iç basınçsız koşulda)

Şekil 5.26’da 10 J darbe enerjisi ve 12 Bar iç basınçlı koşulda yapılan deneylere ait kuvvet-deplasman grafiği görülmektedir. Grafik incelendiğinde en yüksek deplasman değerinin saf epoksili numunede meydana geldiği görülmektedir. Nano katkılandırma ile deplasman değeri azalmaktadır. En düşük deplasman değeri ise ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matrise sahip kompozit boru numunede belirlenmiştir. Eğilme rijitlikleri numuneler için çok fazla değişiklik göstermemekte olup, Hertzian hasarı oluşum kuvveti ise en yüksek ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matris kompozit boru numunede görülmüştür. Saf epoksili matrise sahip kompozit boru numuneye ait kuvvet-deplasman grafiği eğrisinde nano katkılı numunelere oranla daha yüksek pik şiddetleri belirlenmiştir. Bu sonuçta saf epoksili matrise sahip kompozit boru numunede diğer numunelere oranla daha fazla hasar oluşumu meydana geldiğini göstermektedir.



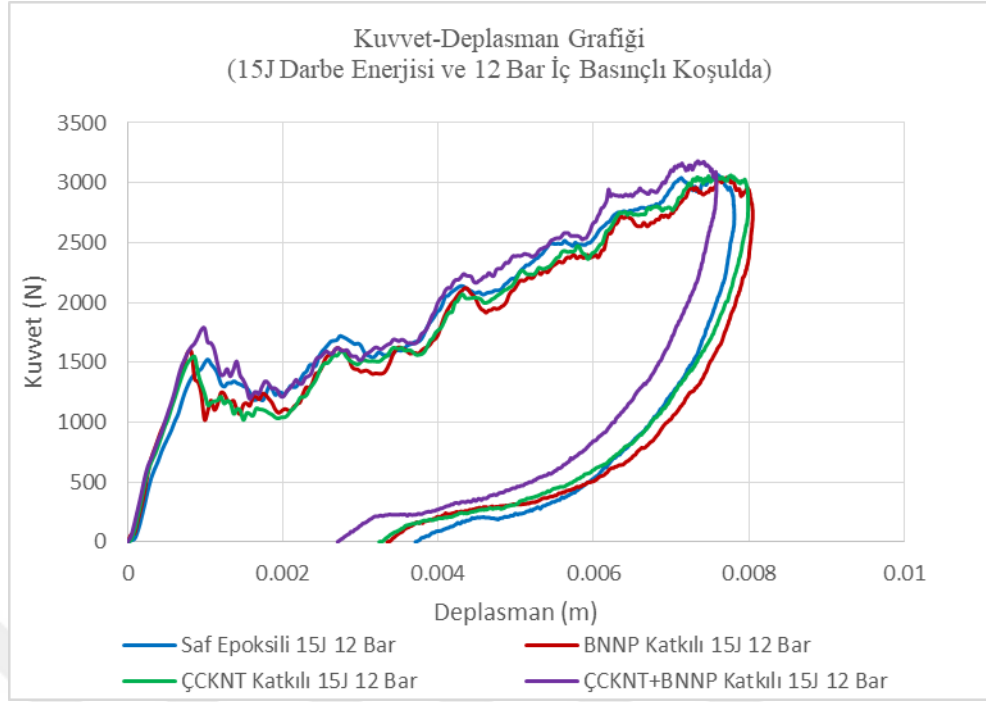
Şekil 5.26. 10 J darbe deneyleri kuvvet-deplasman grafiği (12 Bar iç basınçlı koşulda)

Şekil 5.27’de 15 J darbe enerjisi ile iç basınçsız koşulda yapılan deneylere ait kuvvet-deplasman grafiği görülmektedir. 15 J darbe enerjisi ile yapılan bu testlerde numunelerin kuvvet – deplasman eğrilerinin genel olarak benzer karakteristikler gösterdiği belirlenmiştir. Eğilme rijitlikleri tüm numuneler için oldukça yakın sonuçlar vermekte olup, ilk önemli hasar olan Hertzian hasar oluşum kuvvetinin en yüksek değerine ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matrise sahip kompozit boru numunede rastlanmıştır. En yüksek deplasman değeri ise saf epoksili matrise sahip kompozit boru numunede belirlenmiştir. Eğrilerde görülen pikler ise benzer karakteristikler göstermektedir.



Şekil 5.27. 15 J darbe deneyleri kuvvet-deplasman grafiği (iç basınçsız koşulda)

Şekil 5.28’da 10 J darbe enerjisi ve 12 Bar iç basınçlı koşulda yapılan deneylere ait kuvvet-deplasman grafiği görülmektedir. Grafikler incelendiğinde tüm numuneler için elde edilen kuvvet-deplasman eğrilerinin benzer karakteristik gösterdiği görülmektedir. En yüksek Hertzian hasarı oluşum kuvveti ve yükleme bölgesi maksimum kuvvet değeri ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matris kompozit boru numunede görülürken, maksimum deplasman değeri ise saf epoksili matrise sahip kompozit boru numunede görülmüştür.



Şekil 5.28. 15 J darbe deneyleri kuvvet-deplasman grafiği (12 Bar iç basınçlı koşulda)

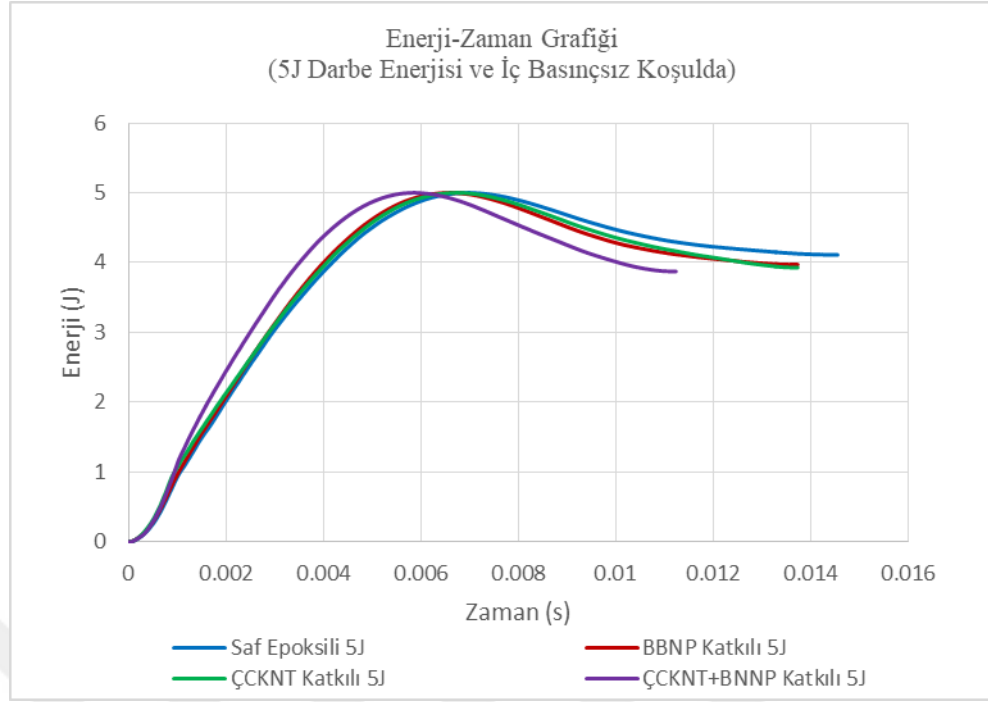
Yukarıdaki Şekil 5.22, Şekil 5.23, Şekil 5.24, Şekil 5.25, Şekil 5.26, Şekil 5.27 ve Şekil 5.28 de 5, 10 ve 15 J darbe enerjileri için iç basınçsız ve 12 Bar iç basınçlı koşullarda yapılan deneylere ait kuvvet-deplasman grafikleri kendi aralarında incelendiğinde, grafiklere göre;

- Tüm numunelerin yapılan testler sırasında ve tüm enerji seviyelerinde yapısal bütünlüğünü koruduğu, delinme ve saplanma olmadığı,
- Tüm deneylerde ilk önemli hasar bölgesi olan Hertzian hasarı oluşumu ve bu hasar oluşumu sonrası meydana gelen matris hasarlarını belirten pikler ve titreşimlerin oluştuğu,
- Yapılan her deney numunesinin kendi içerisinde benzer özellikler gösterdiği,
- Nano katkılandırma ile ilk hasar oluşum kuvvetinin arttırdığı,
- İç basınçlandırma ile deplasman miktarlarının azaldığı, yükleme bölgesi maksimum kuvvet değerinin arttığı, buna bağlı olarak da malzeme rijitliğinin arttığı belirlenmiştir.

5.3.3.3. Enerji zaman grafiklerinin değerlendirilmesi

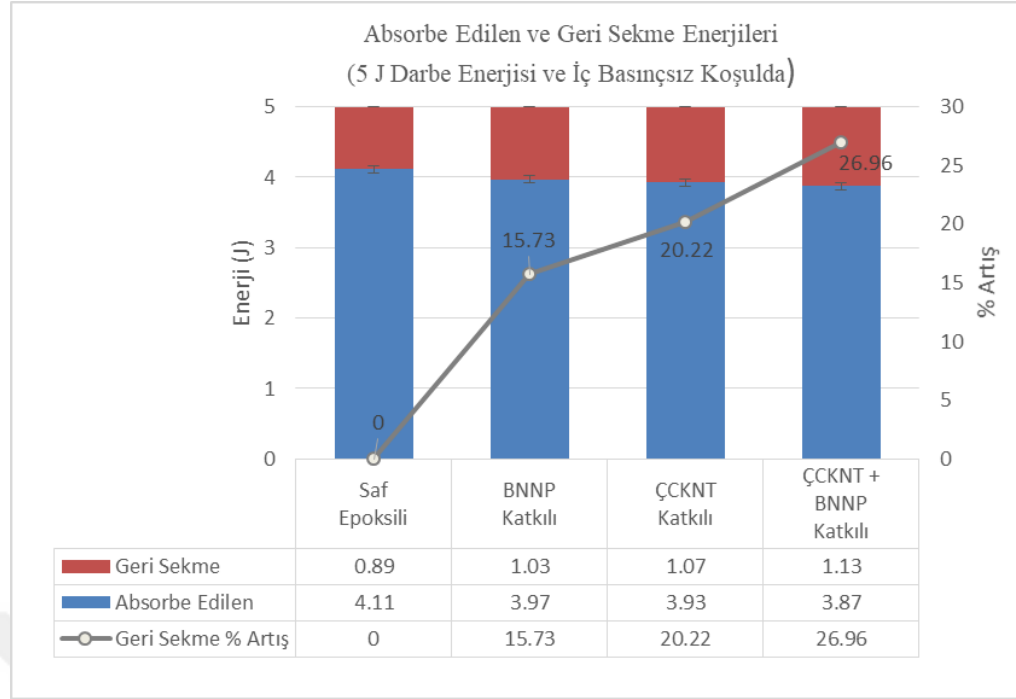
Enerji zaman grafikleri darbenin malzeme üzerindeki etkisinin belirlenmesi için kullanılan grafiklerden biridir. Enerji zaman grafikleri ile malzeme de darbe sırasında hasar oluşumu ve diğer kayıplar için kullanılan enerji ile vurucunun geri sekmesi için harcanan enerji miktarları belirlenebilmektedir.

Şekil 5.29'da kompozit boru numunelere ait 5 J darbe enerjisi ve iç basınçsız koşulda yapılan darbe deneylerine ait enerji - zaman grafiği görülmektedir. Grafik incelendiğinde tüm numuneler için darbe enerjisinin yükleme kısmında yani kuvvetin maksimum değerine ulaşıncaya kadar vurucunun teması ile numune üzerinde doğrusal bir artış gösterdiği görülmektedir. Kuvvet artışını gösteren doğrunun eğimi numunelerin rijitliği ile ilişkili olup kuvvet deplasman eğrilerindeki açıklanan sonuçlar ile örtüşmektedir. ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matrise sahip kompozit boru numunelerde en yüksek rijitlik değerinin olduğu belirlenmektedir. Kuvvet değerinin maksimum değerine ulaşmasından sonra yükten boşalma yani vurucunun geri sekmesi meydana gelmektedir. Yükleme kısmının maksimum değerine ulaştığında numunelerin hiç birinde grafik sonlanmamış yani delinme ya da saplanma meydana gelmemiş numunelerin tamamında vurucunun geri sekmesi meydana gelmiştir. Vurucunun numuneye teması ile aktarılan darbe enerjisinin malzeme içerisinde meydana gelen hasarlar tarafından harcanan (absorbe edilen) miktarı, enerji zaman grafiğinde belirlenen maksimum enerji seviyesinden geri sekme enerjisinin çıkarılması ile elde edilmektedir. Aşağıdaki grafik bu yönüyle incelendiğinde en fazla geri sekme enerjisinin ÇCKNT+BNNP katkılı numunede meydana geldiği görülmektedir. Buradan en az hasarın ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matrise sahip kompozit borularda meydana geldiği belirlenmektedir.



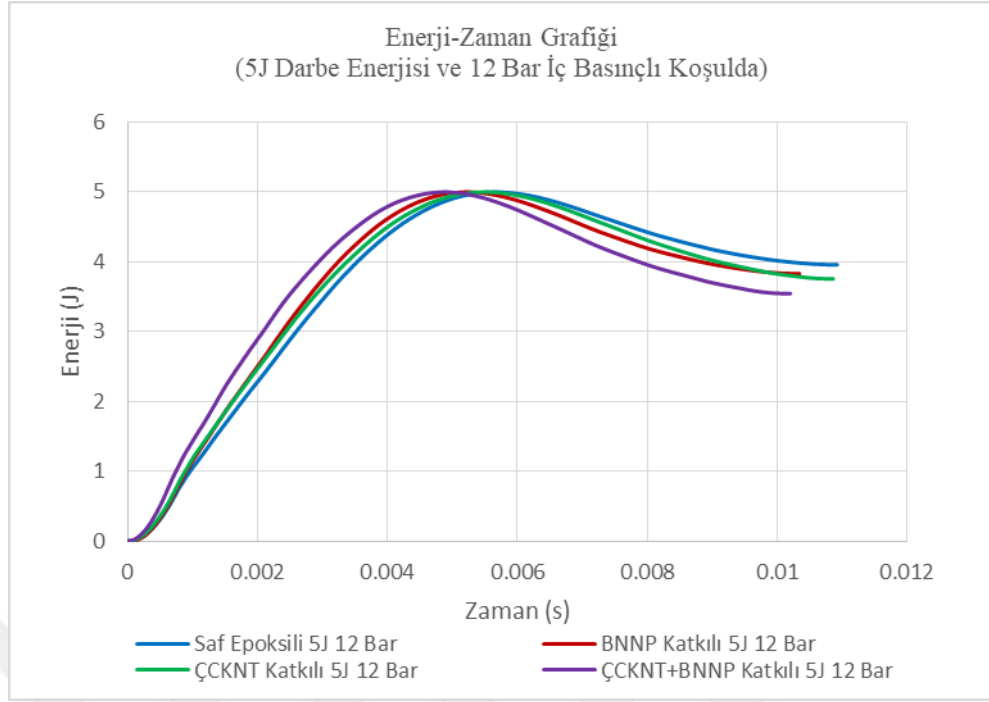
Şekil 5.29. 5 J darbe deneyleri enerji-zaman grafiği (iç basınçsız koşulda)

Şekil 5.30'da 5 J darbe enerjisi ve iç basınçsız koşulda test numuneleri tarafından absorbe edilen ve geri sekme enerjileri grafikleri görülmektedir. Şekil 5.30'daki grafik incelendiğinde saf epoksili numunede 4.11 J değerinde enerjinin numune tarafından absorbe edildiği 0.89 J ise geri sekme için harcadığı görülmektedir. Saf epoksili numune bu değerleri ile en fazla enerji absorbe eden numune durumundadır. Saf epoksi matrisli kompozit boru numuneyi sırasıyla 3.97 J değeri ile BBNP katkılı, 3.93 J değeri ÇCKNT katkılı ve 3.87 J değeri ile ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matrisli kompozit boru numune takip etmektedir. Saf epoksili numuneye oranla geri sekme enerjilerinde BBNP katkılı numunede % 15.73, ÇCKNT katkılı numunede %20.22 ve ÇCKNT+BNNP katkılı numunede %26.96 artış belirlenmiştir. Bu sonuç epoksi matrisin ÇCKNT ve / veya BBNP ile katkılandırılmasının darbe hasarı oluşumunu azalttığı ve geri sekme enerjisini arttırdığını göstermektedir. Diğer bir değişle aynı oranda hasar oluşturabilmek için daha fazla darbe enerjisi oluşturulması gerekli olup bu istenen bir sonuçtur.



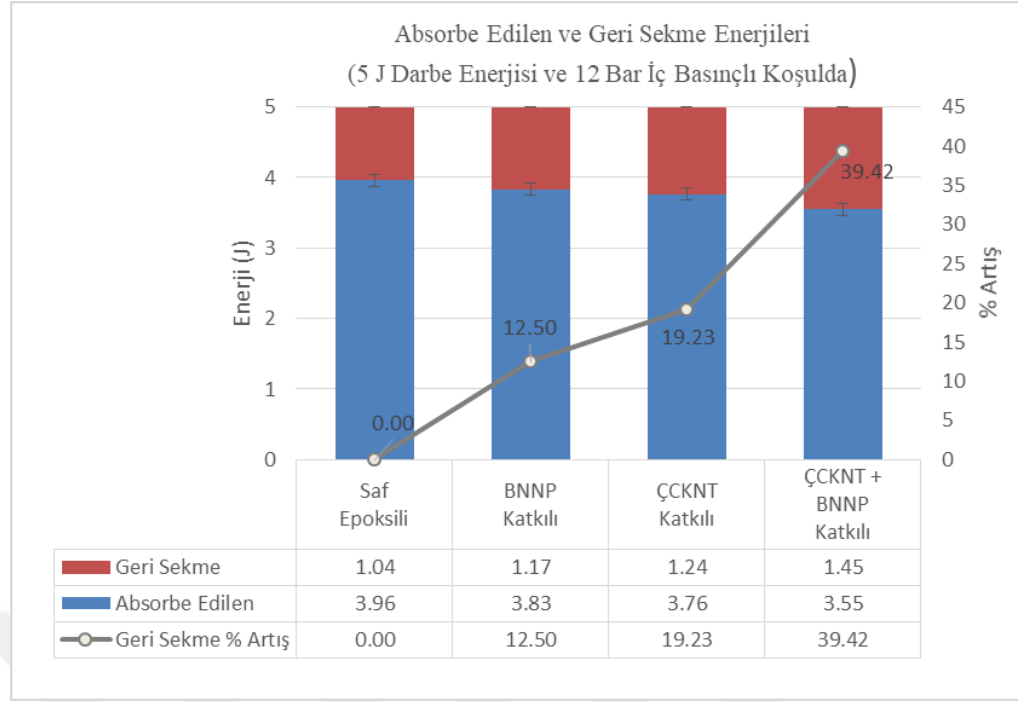
Şekil 5.30. 5 J darbe deneyleri absorbe edilen ve geri sekme enerjileri (iç basınçsız koşulda)

Şekil 5.31’de 5 J darbe enerjisi ve 12 Bar iç basınçlı koşulda yapılan darbe deneyleri sonucu elde edilen enerji – zaman grafiği görülmektedir. Şekil 5.31’deki grafik incelendiğinde 12 Bar iç basınçlı durumda da iç basınçsız duruma benzer karakteristikte enerji – zaman eğrilerinin oluştuğu görülmektedir. Vurucunun numunelere temasından geri sekmenin başlangıcına kadar doğrusal kuvvet artışı tüm numuneler için görülmektedir.



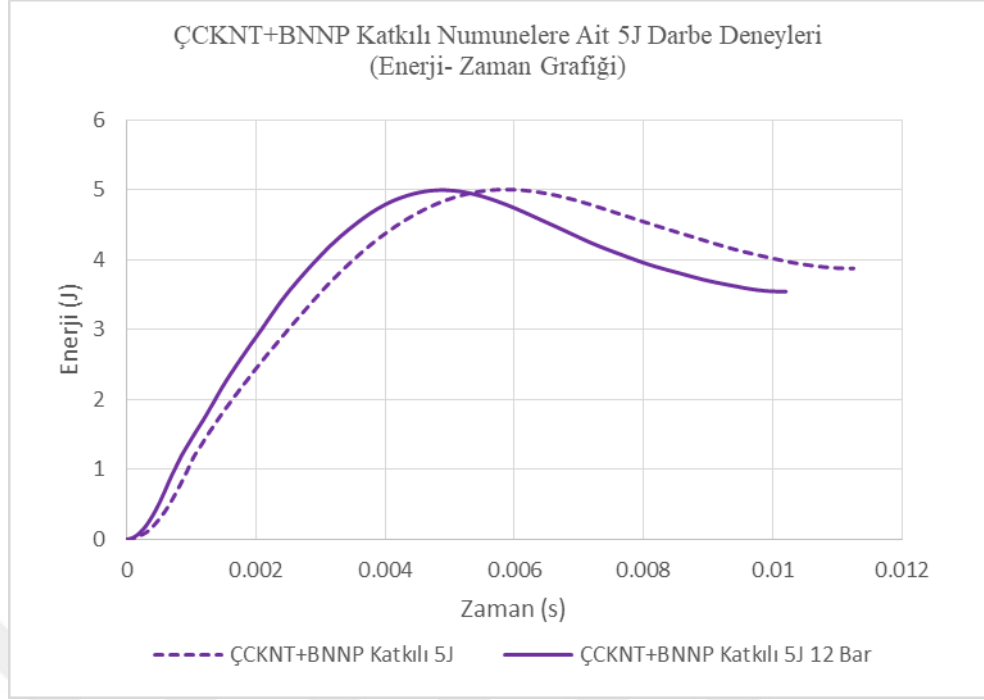
Şekil 5.31. 5 J darbe deneyleri enerji-zaman grafiği (12 Bar)

Şekil 5.32 incelendiğinde 12 bar iç basınçlı durumda yapılan 5 J darbe enerjili deneylerde 3.96 J enerjinin saf epoksili kompozit boru numunede absorbe edilirken 1.04 J lük geri sekmenin meydana geldiği görülmektedir. BNNP katkılı numunede 1.17 J, ÇCKNT katkılı numunede 1.24 J ve ÇCKNT+BNNP katkılı numunede 1.45 J geri sekme enerjisinin meydana geldiği görülmektedir. Saf epoksili numuneye % oranla geri sekme enerjilerindeki artış ise %12.5 ile BNNP katkılı, % 19.23 ile ÇCKNT katkılı ve %39.42 ile ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matrise sahip kompozit boru numunede belirlenmiştir. Şekil 5.30’da verilen veriler şekil 5.31 ile kıyaslandığında 12 Bar iç basınçlı durumda iç basınçsız duruma göre numuneler tarafından absorbe edilen enerjilerin azalarak geri sekme enerjilerinin arttığı görülmektedir. Bu sonuç iç basınçlı durumda numunelerin darbe enerjisine karşı daha mukavemetli davranarak daha az hasar oluşumu meydana gelmesi ile ilişkilendirilmektedir.



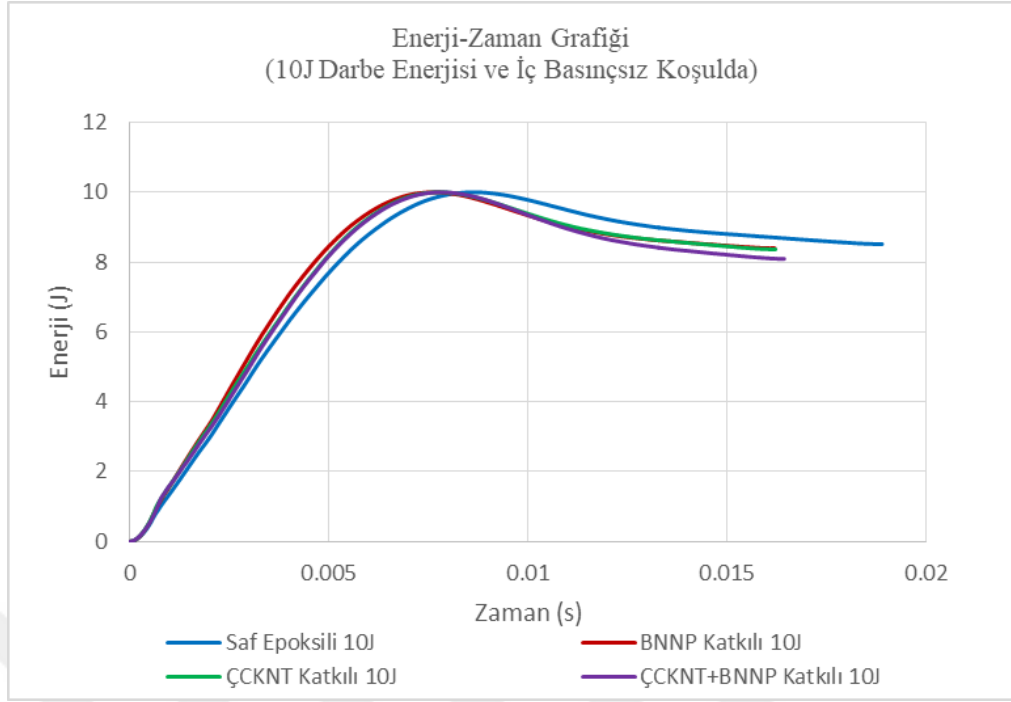
Şekil 5.32. 5 J darbe deneyleri absorbe edilen ve geri sekme enerjileri (12 Bar iç basınçlı koşullarda)

Şekil 5.33’de 12 Bar İç basınçlı ve iç basınçsız durumda numunede enerji değişiminin nasıl etkilendiğinin daha belirgin şekilde açıklanabilmesi için ÇCKNT+BNNP katkılı numuneye ait enerji zaman grafikleri görülmektedir. Şekil 5.33 incelendiğinde vurucunun teması ile numuneye enerji aktarımının olduğu yükleme bölgesindeki eğrinin eğiminin 12 Bar iç basınçlı durumda iç basınçsız duruma göre arttığı dolayısıyla numunenin darbeye karşı daha rijit davrandığı görülmektedir. 12 Bar iç basınçlı durumda kuvvetin maksimum değerine ulaşma süresi ve numuneye aktarılan darbe enerjisinin vurucuya tekrar aktarılacak geri sekmenin tamamlanma süresinin iç basınçsız duruma göre kısaldığı da görülmektedir. 12 Bar iç basınçlı durumda geri sekme enerjisi miktarı da iç basınçsız duruma göre artış göstermiştir. Tüm bu değişimler göz önünde bulundurulduğunda 12 Bar iç basınçlı durumda numunede hasar oluşumu için daha az enerji harcandığı, iç basınçlandırmanın darbe direncini ise arttırdığı görülmektedir.



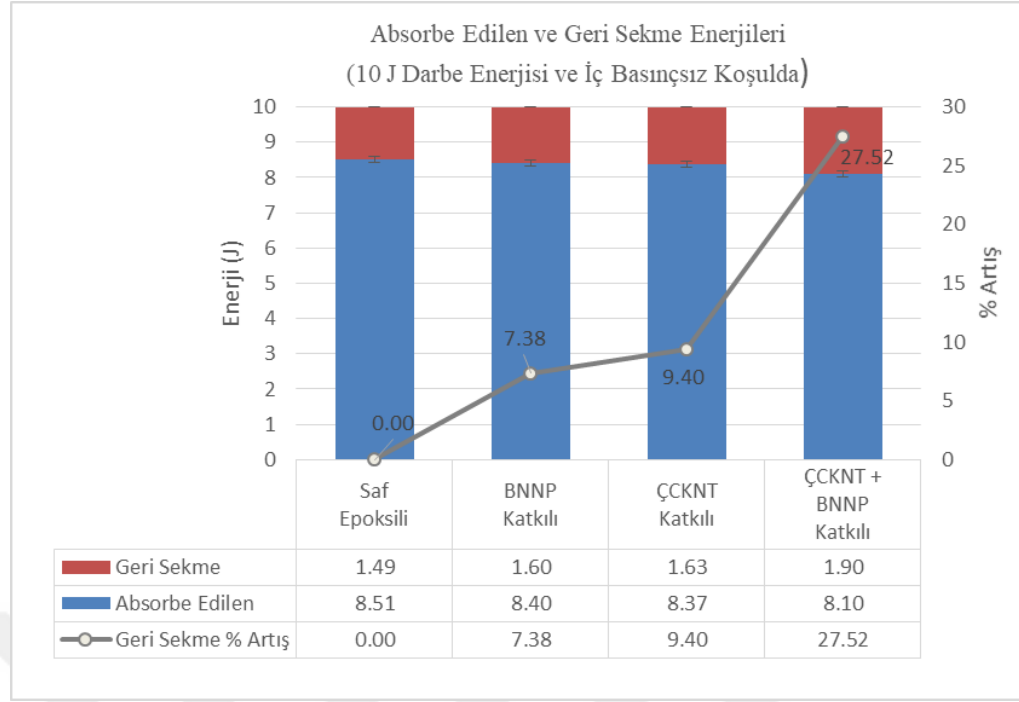
Şekil 5.33. ÇCKNT+BNNP katkılı numunelere ait 5 J darbe deneyleri enerji-zaman grafiği (iç basınçsız ve 12 Bar iç basınçlı koşulda)

Şekil 5.34’de tüm numunelere ait 10 J enerji ve iç basınçsız olarak yapılan darbe testlerine ait enerji zaman grafikleri görülmektedir. Şekil 5.34 incelendiğinde BNNP katkılı, ÇCKNT katkılı ve ÇCKNT+BNNP katkılı numune eğrilerinin yükleme kısmının eğiminin saf epoksili matrise sahip kompozit boru numuneye oranla fazla olduğu ve maksimum değerlerine saf epoksili numuneden önce ulaştığı görülmektedir. Aynı şekilde geri sekme enerjileri de saf epoksili matrise sahip kompozit boru numuneden daha önce son bulmuştur. Bu yönüyle incelendiğinde nano katkılı kompozit boru numunelerde rijitliğin artarken darbe enerjisi absorpsiyon hızının attığı belirlenmektedir.



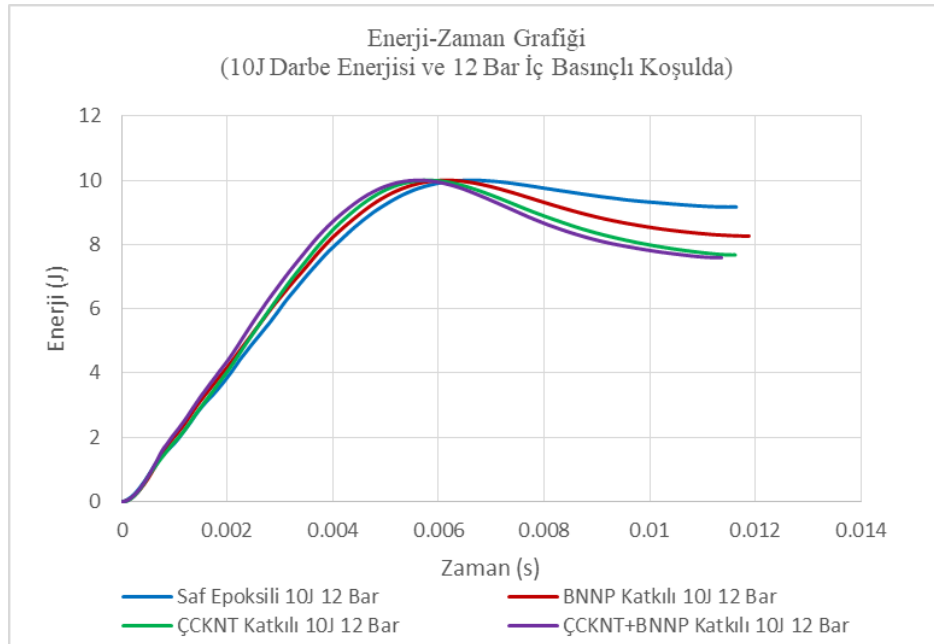
Şekil 5.34. 10 J darbe deneyleri enerji-zaman grafiği (iç basınçsız koşulda)

Şekil 5.35'deki veriler incelendiğinde 10 J darbe enerjisi ve iç basınçsız koşulda yapılan deneylerde saf epoksili matrise sahip kompozit boru numune tarafından 8.51 J enerji hasar oluşumu için absorbe edilirken 1.49 J geri sekme enerjisi olarak harcanmıştır. Geri sekme enerjileri diğer numuneler için BNNP katkılı numunede 1.6 J, ÇCKNT katkılı numunede 1.63 J ve ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matrise sahip kompozit boru numunede 1.9 J olarak ölçülmüştür. Geri sekme enerjileri Şekil 5.30'da verilen değerler ile kıyaslandığında 5 J darbe enerjisinde iç basınçsız koşulda ÇCKNT+BNNP katkılı numunede vurucu tarafından iletilen enerjinin % 22.6 sı geri sekme için harcanırken 10 J darbe enerjisi ve iç basınçsız durumda bu değer % 19'a düşmektedir. Artan darbe enerjisi ile oluşan iç hasar miktarının ve bu hasar oluşumu için absorbe edilen enerji miktarının artması ve geri sekme enerjisinin ise azalması beklenen bir sonuçtur. Saf epoksili numuneye göre kıyaslandığında ise geri sekme enerjilerinde nano katkılı numunelerde artış olduğu tespit edilmektedir. Bu sonuç epoksi matrisin katkılandırılmasında kullanılan ÇCKNT ve/veya BNNP'lerin kompozit boru numunelerin darbe direncini arttırarak hasar oluşumunu saf epoksili numunelere oranla azaltması ve geri sekme enerjisini arttırması ile ilişkilendirilmektedir.



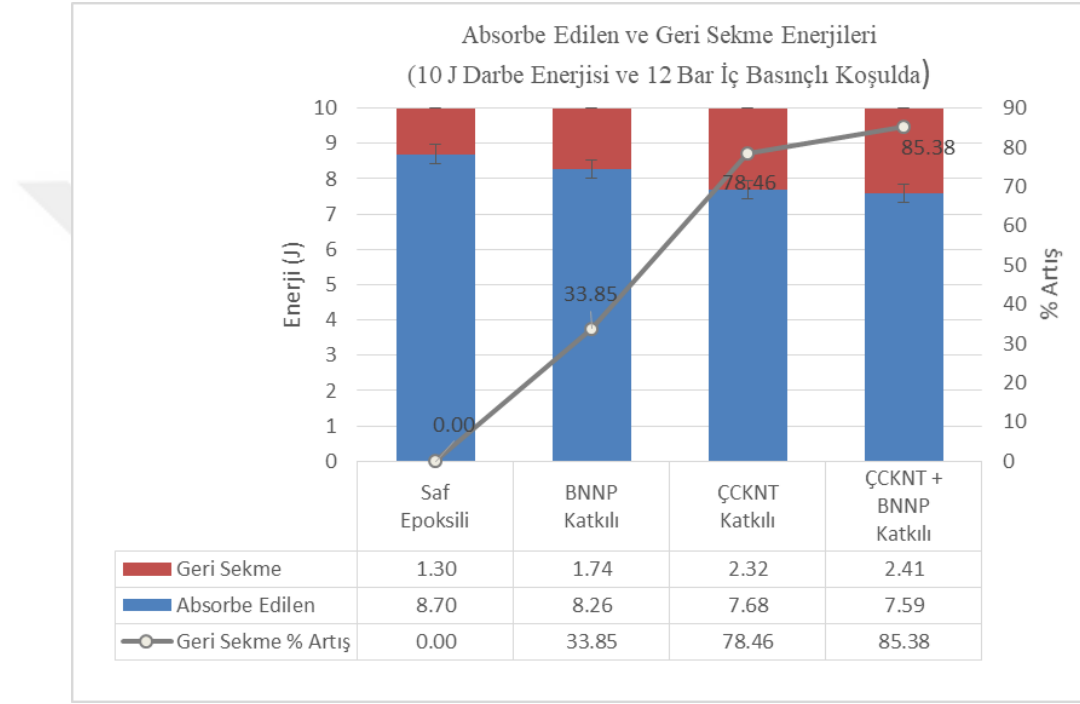
Şekil 5.35. 10 J darbe deneyleri absorbe edilen ve geri sekme enerjileri (İç basınçsız koşulda)

Şekil 5.36’da tüm numunelere ait 10 J darbe enerji ile 12 Bar iç basınçlı koşulda yapılan deneyler sonucu elde edilen enerji zaman grafikleri görülmektedir. Şekil 5.36’daki grafik incelendiğinde saf epoksili duruma göre BNNP, ÇCKNT ve ÇCKNT+BNNP katkılı numunelerde absorbe edilen enerjinin azalarak, geri sekme enerjisinin belirgin olarak artış gösterdiği görülmektedir.



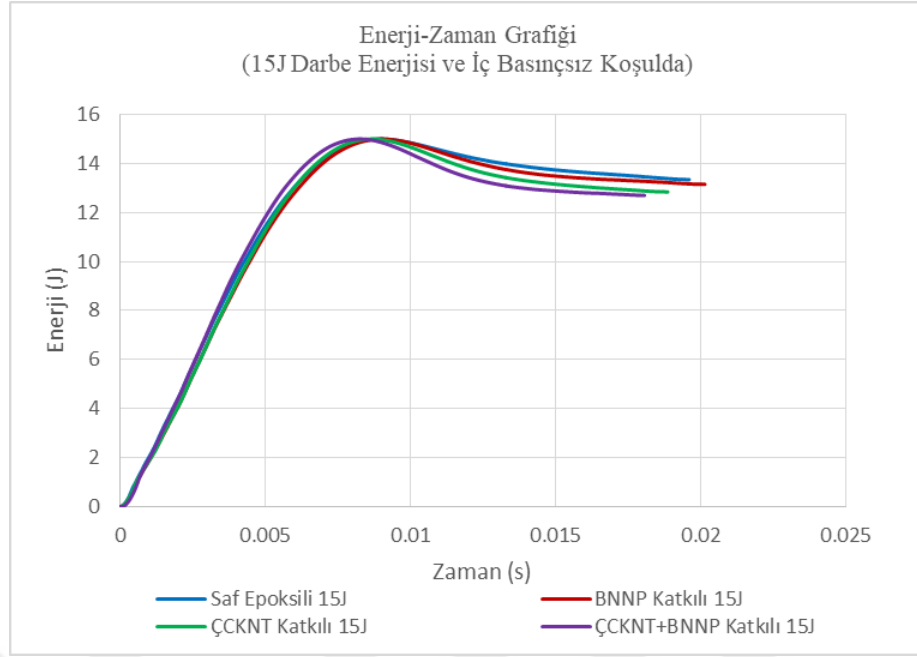
Şekil 5.36. 10 J darbe deneyleri enerji-zaman grafiği (12 Bar iç basınçlı koşulda)

Şekil 5.37'deki veriler incelendiğinde 10 J darbe enerjisi ve 12 Bar iç basınçlı koşulda yapılan deneylerde saf epoksili matrise sahip kompozit boru numune tarafından 8.70 J enerji hasar oluşumu için absorbe edilirken 1.30 J geri sekme enerjisi olarak vurucuya geri aktarılmıştır. BNNP katkılı numunede saf epoksili numuneye oranla %33.85, ÇCKNT katkılı numunede %78.46 ve ÇCKNT+BNNP katkılı numunede %85.38 geri sekme enerjisi artışı görülmüştür.



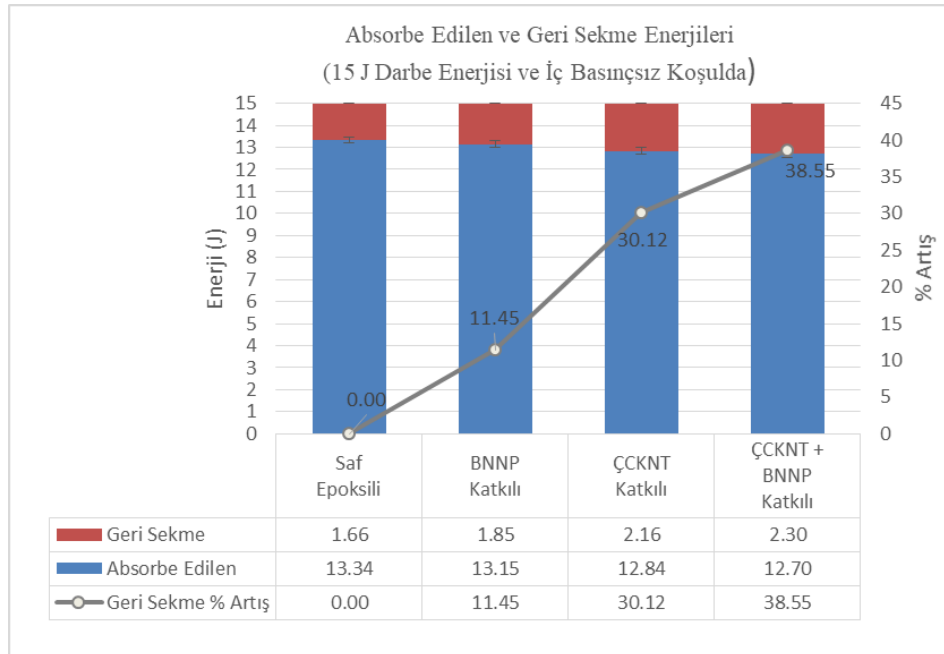
Şekil 5.37. 10 J darbe deneyleri absorbe edilen ve geri sekme enerjileri (12 Bar iç basınçlı koşullarda)

Şekil 5.38 15 J darbe enerjisi ve iç basınçsız koşulda yapılan darbe deneylerine ait enerji zaman grafiği görülmektedir. Şekil 5.38 incelendiğinde absorbe edilen ve geri sekme enerjisi olarak vurucuya geri aktarılan enerjilerin büyüklüklerine göre sıralamasında diğer enerji seviyelerinde yapılan deneylere benzer sonuçlar elde edilmiş olup absorbe edilen enerji en büyükten küçüğe doğru saf epoksili, BNNP katkılı, ÇCKNT katkılı ve ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matrise sahip kompozit boru şeklindedir.



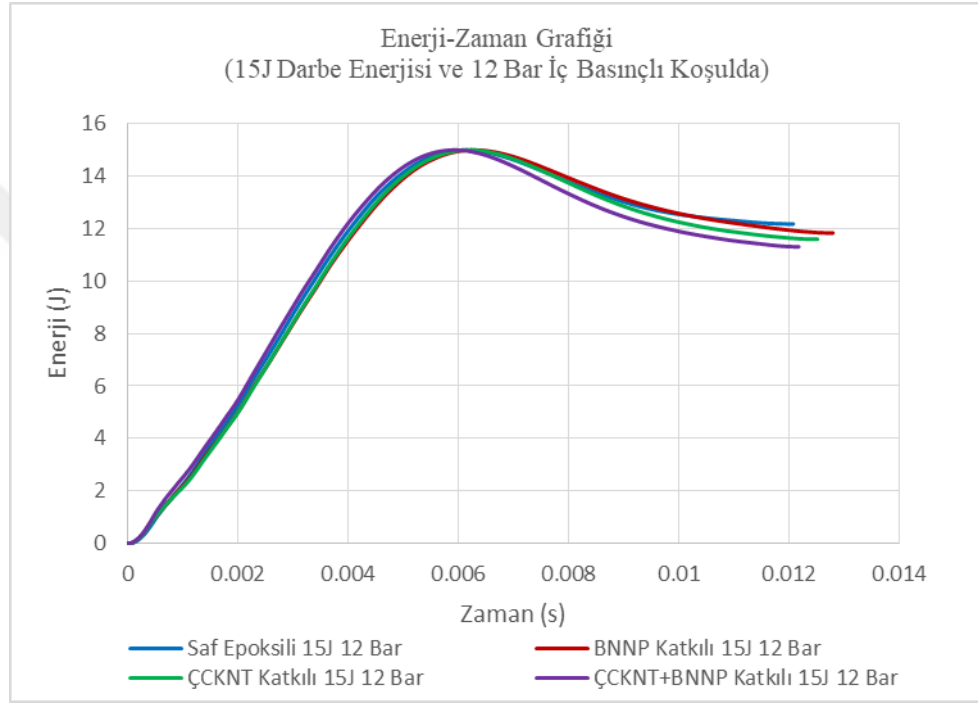
Şekil 5.38. 15 J darbe deneyleri enerji-zaman grafiği (iç basınçsız koşulda)

Şekil 5.39'daki veriler incelendiğinde 15 J darbe enerjisi ve iç basınçsız koşulda yapılan deneylerde saf epoksili matrise sahip kompozit boru numune tarafından 13.34 J enerji hasar oluşumu için absorbe edilirken 1.66 J geri sekme enerjisi vurucuya geri aktarılmıştır. BNNP katkılı numunede saf epoksili numuneye oranla %11.45, ÇCKNT katkılı numunede %30.12 ve ÇCKNT+BNNP katkılı numunede %38.55 geri sekme enerjisi artışı görülmüştür.



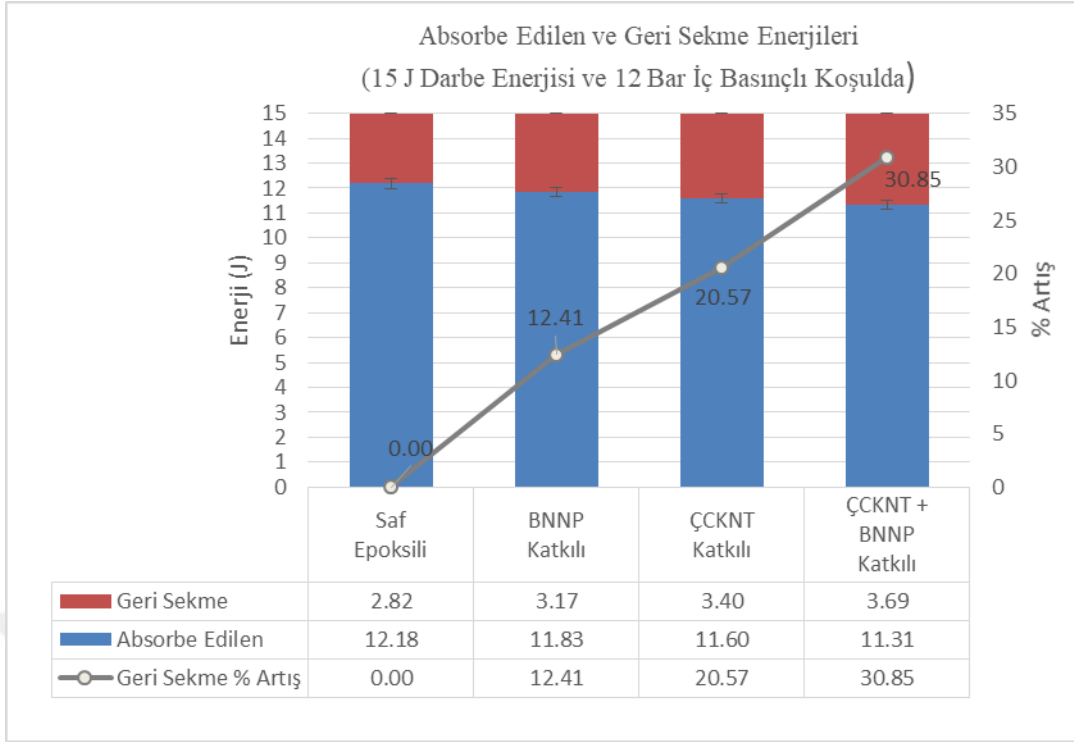
Şekil 5.39. 15 J darbe deneyleri absorbe edilen ve geri sekme enerjileri (iç basınçsız koşulda)

Şekil 5.40 15 J darbe enerjisi ve 12 Bar iç basınçlı koşulda yapılan darbe deneylerine ait enerji zaman grafiği görülmektedir. Şekil 5.38 incelendiğinde numunelere ait eğrilerde diğer enerji seviyeleri için yapılan deneylere benzer sonuçların elde edildiği sadece absorbe edilen ve vurucuya geri aktarılan geri sekme enerji değerlerinde değişimler meydana geldiği belirlenmektedir. Eğriler diğer enerji seviyeleri ile aynı temel karakteristikleri özellikleri göstermektedir.



Şekil 5.40. Tüm numunelere ait 15 J darbe deneyleri enerji-zaman grafiği (12 Bar iç basınçlı koşulda)

Şekil 5.41'deki veriler incelendiğinde 15 J darbe enerjisi ve 12 Bar iç basınçlı koşulda yapılan deneylerde saf epoksili matrise sahip kompozit boru numune tarafından 12.28 J enerji hasar oluşumu için absorbe edilirken 2.82 J geri sekme enerjisi olarak vurucuya geri aktarılmıştır. BNNP katkılı numunede saf epoksili numuneye oranla %12.41, ÇCKNT katkılı numunede %20.57 ve ÇCKNT+BNNP katkılı numunede %30.85 geri sekme enerjisi artışı görülmüştür. Şekil 5.39 ile kıyaslandığında 15 J enerji seviyesinde 12 Bar iç basınçlı yapılan deneylerde iç basınçsız duruma göre daha az enerji absorpsiyonu görülürken, vurucuya aktarılan geri sekme enerjisinde de tüm numunelerde artış görülmektedir.



Şekil 5.41. 15 J darbe deneyleri absorbe edilen ve geri sekme enerjileri (12 Bar İç basınçlı koşullarda)

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen enerji zaman grafikleri Şekil 5.29-5.41 bir bütün olarak incelendiğinde;

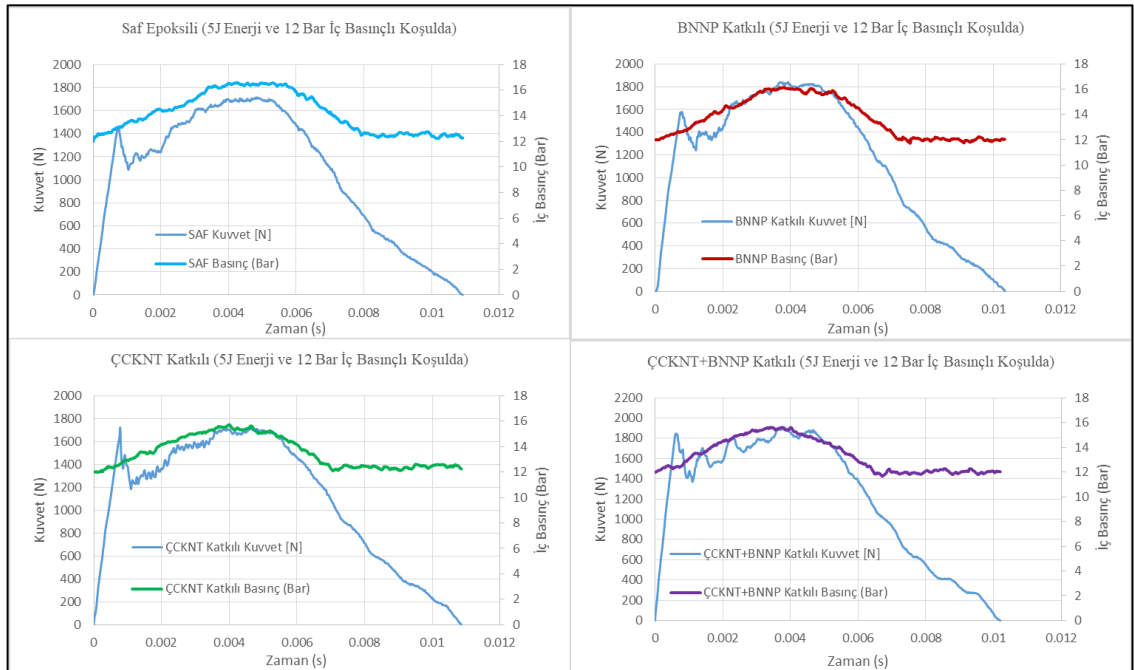
- Vurucunun numuneye aktarmış olduğu darbe enerjisinin, maksimum seviyeye ulaşınca kadar doğrusal olarak arttığı ve bu artış sırasında malzeme rijitliklerinden etkilenecek farklı eğim açıların sahip oldukları,
- Maksimum enerji seviyesine ulaştıktan sonra darbe enerjisinin bir kısmı numunede hasar oluşumu sırasında absorbe edildiği bir kısmının ise vurucuya geri sekme enerjisi olarak aktarıldığı,
- Maksimum numuneye aktarılan darbe enerjisi ile absorbe edilen enerji arasındaki farkın (maksimum geri sekme enerjisi) en fazla nano katkılı numunelerde meydana geldiği,
- Geri sekme enerjisinin olmadığı numuneye bulunmadığı, bu nedenle numunelerin tamamında delinme ya da saplanma hasarının oluşmadığı,
- Aynı enerji seviyelerinde yapılan 12 Bar iç basınçlı ve iç basınçsız durumlardaki deneylerden elde edilen enerji grafiklerinde karakteristik olarak farklılık bulunmayıp, absorbe edilen enerji miktarının 12 Bar iç basınçlı olduğu durumlarda daha az geri sekme enerjilerinin ise daha fazla olduğu belirlenmiştir.

- Grafiklere göre en az enerji absorpsiyon ederek en az hasara uğradığı belirlenen numuneler en fazla hasardan en az hasara doğru sırasıyla Saf, BNNP, ÇCKNT ve ÇCKNT+BNNP katkılı numuneler şeklindedir. Bu sonuç kullanılan nano katkıları ile üretilen numunelerin darbe direncini arttırdığını göstermektedir.

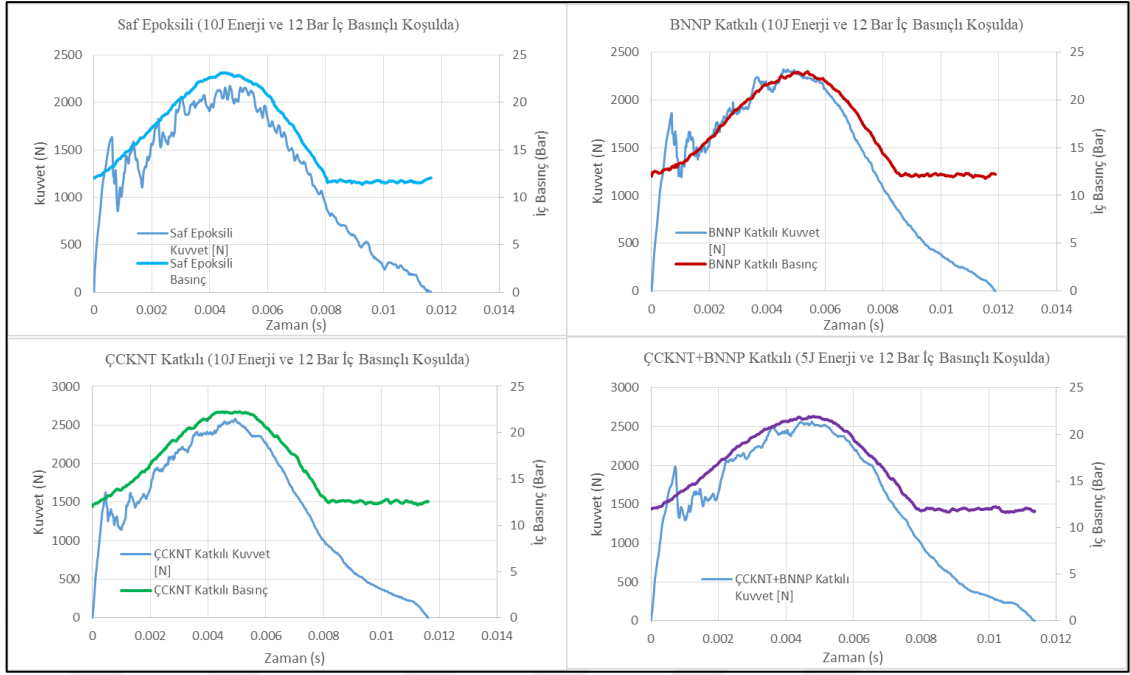
Ayrıca 12 Bar iç basınçlı koşullarda yapılan testlerde darbe enerjisinden bağımsız olarak tüm numunelerde iç basınçsız duruma göre daha az darbe enerjisi absorpsiyonu ve daha fazla geri sekme enerjisi meydana geldiği belirlenmiştir. Bu sonuç diğer grafiklerin incelenmesi ile de uyum sağlamakta olup iç basınçlandırmanın numunelerin darbe enerjisine karşı daha rijit davranmasına neden olduğu belirlenmiştir.

5.3.3.4. Darbe esnasında görülen iç basınç değişimlerinin değerlendirilmesi

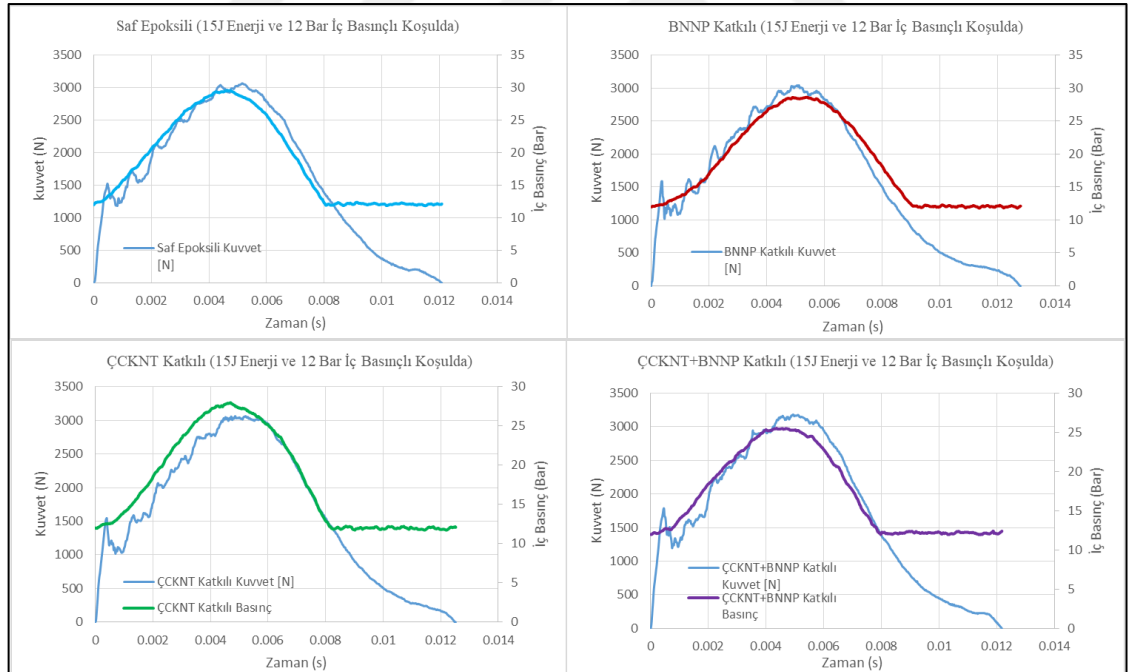
İç basınçlı koşullarda gerçekleştirilen darbe deneyleri süresi boyunca numunelerde görülen iç basınç değişimleri ölçülerek kayıt edilmiş ve her numune için 5,10 ve 15 J darbe enerjileri için elde edilen iç basınç değişimi – zaman grafikleri aşağıda Şekil 5.42, 5.43 ve 5.44’de verilmiştir.



Şekil 5.42. 12 Bar iç basınç altında 5 J enerji ile yapılan darbe deneyleri iç basınç değişimi-zaman grafikleri



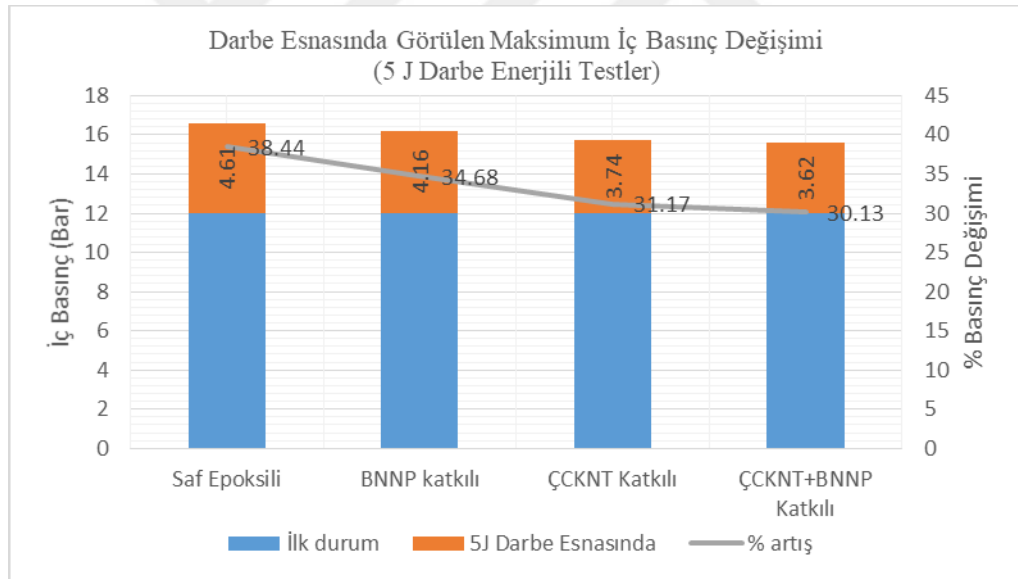
Şekil 5.43. 12 Bar iç basınç altında 10 J enerji ile yapılan darbe deneyleri iç basınç değişimi-zaman grafikleri



Şekil 5.44. 12 Bar iç basınç altında 15 J enerji ile yapılan darbe deneyleri iç basınç değişimi-zaman grafikleri

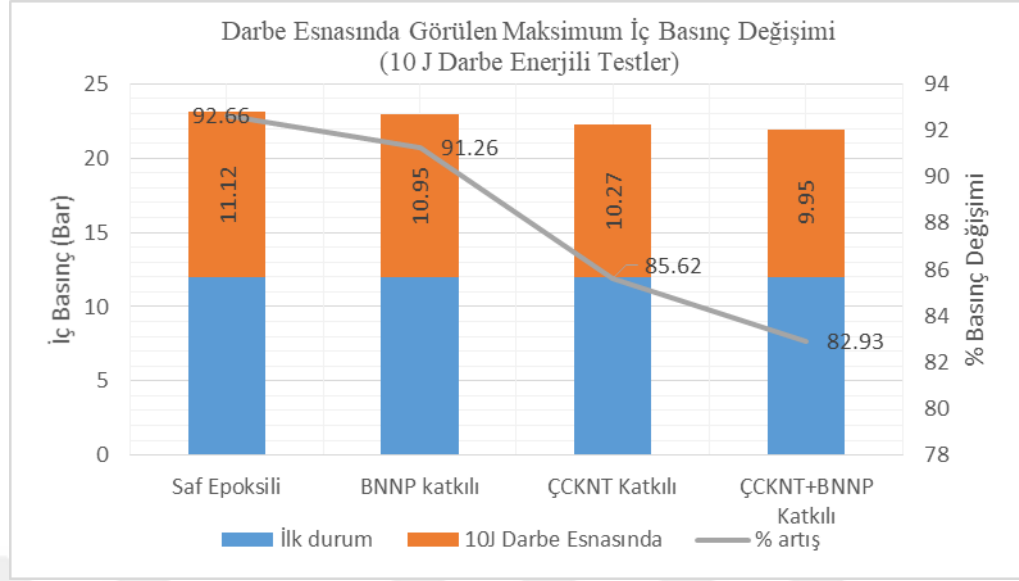
Yukarıdaki Şekil 5.42, Şekil 5.43 ve Şekil 5.44 incelendiğinde numunelerin tamamında çan eğrisine benzer iç basınç artışlarının meydana geldiği, yükleme bölgesini oluşturan vurucunun numuneye temasından maksimum darbe kuvveti elde edilen

yükleme bölgesi sonuna kadar 12 Barlık iç basınçtan lineer artış gösteren bir iç basınç değişimi görülmektedir. Vurucunun numuneye teması yani darbe kuvveti ile meydana gelen iç basınç değişimi numunelerin ani iç hacminin azalması ve şok etkisi ile ilişkilidir. Numunelerde iç basınç oluşturmak için kullanılan hidrolik yağın sıkıştırılamaz olması darbe sırasında numunenin iç hacminin azalması ile basınç artışını meydana getirmektedir. Darbe kuvvetinin maksimum değerine ulaşmasından sonra geri sekmeye başlayan vurucu ile iç basınçlarda oluşan değişimlerde azalma görülerek, testler sırasında ölçüm alınan süre sınırından önce normal seviyesi olan 12 Bar değerine düştüğü görülmektedir. İç basınçların darbe sonrasında 12 Bar seviyesinde kalması numunelerin hiçbirinde sızıntı ya da delinme gibi hasarların oluşmadığı göstermektedir. İç basıncın normal seviyesi 12 Bar değerine düştükten sonra eğrilerde görülen titreşimler ölçüm esnasında meydana gelen mekanik titreşimler ile ilişkilidir. Darbe esnasında görülen en yüksek iç basınç değerleri 5 J enerjili testler için Şekil 5.45, 10 J enerjili testler için Şekil 5.46 ve 15 J enerjili testler için Şekil 5.47’de verilmiştir.



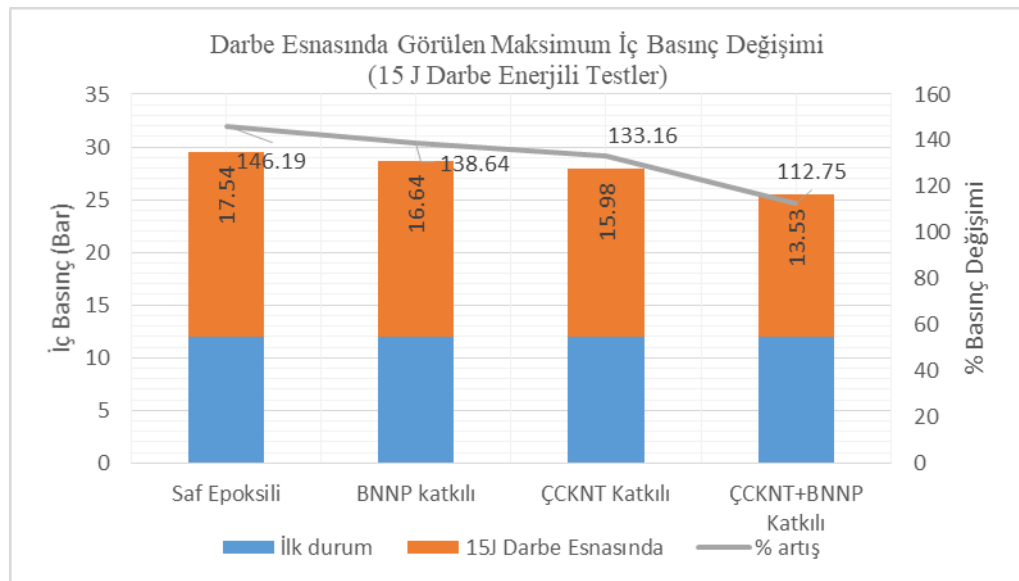
Şekil 5.45. 12 Bar iç basınç altında 5J enerji ile yapılan darbe deneyleri sırasında görülen maksimum iç basınç değerleri

Şekil 5.45’de 5 J darbe testi sırasında numunelerde meydana gelen iç basınç değişimlerinin maksimum değeri sütun grafik halinde verilmiştir. Şekil 5.45’e göre en azdan başlayarak iç basınç değişimi sırasıyla %30.13 artışla ÇCKNT+BNNP katkılı numunede, %31.17 artışla ÇCKNT katkılı numunede, %34.68 artışla BNNP katkılı numunede ve %38.44’lük artışla saf epoksili (nano katkısız) numunede görülmüştür. İç basınç 16.61 Bar değeri ile en yüksek saf epoksili numunede ölçülmüştür.



Şekil 5.46. 12 Bar iç basınç altında 10 J enerji ile yapılan darbe deneyleri sırasında görülen maksimum iç basınç değerleri

Şekil 5.46'e göre 10 J enerji ile yapılan darbe testlerinde en az iç basınç değişimi en azdan başlayarak sırasıyla %82.93 artışla ÇCKNT+BNNP katkı numunede, %85.62 artışla ÇCKNT katkı numunede, % 91.26 artışla BNNP katkı numunede ve %92.66 lık artışla saf epoksili numunede görülmüştür. 10 J ile gerçekleştirilen darbe testlerinde 5 J ile yapılanlara oranla yaklaşık olarak iki kattan daha fazla iç basınç artışının meydana görülmektedir.



Şekil 5.47. 12 Bar iç basınç altında 15 J enerji ile yapılan darbe deneyleri sırasında görülen maksimum iç basınç değerleri

Şekil 5.48 incelendiğinde 15 J ile yapılan darbe testlerinde en yüksek basınç artışlarının bu enerji seviyesi ile yapılan testlerde meydana geldiği görülmektedir. İç basınç artış sıralaması değişmeyip en azdan başlayarak sırasıyla %112.75 artışla ÇCKNT+BNNP katkılı numunede, %133.16 artışla ÇCKNT katkılı numunede, %138.64 artışla BNNP katkılı numunede ve %146.19 artışla saf epoksili numunede belirlenmiştir.

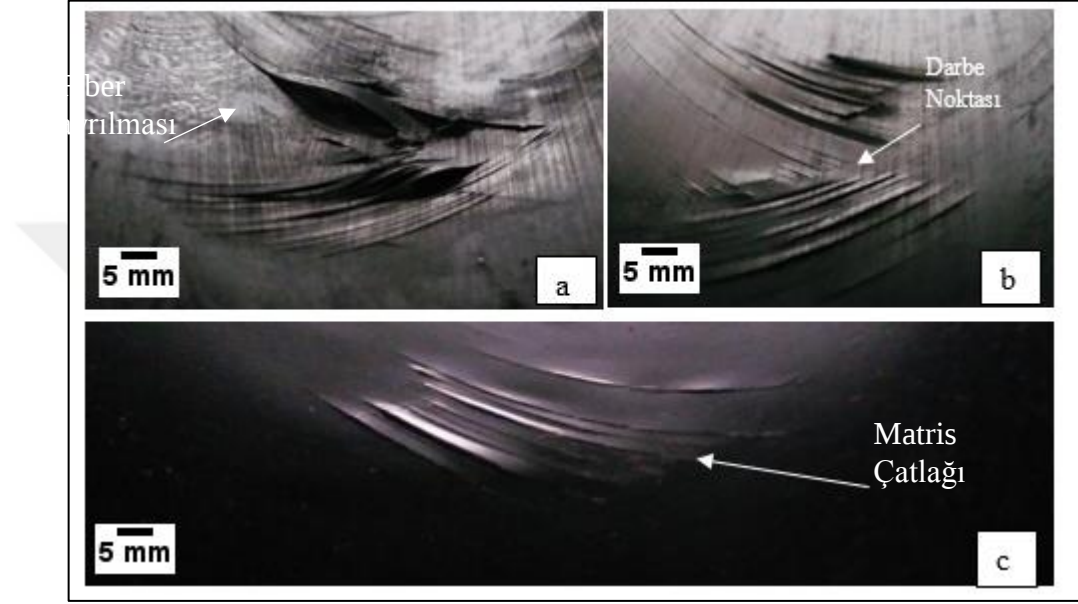
Şekil 5.45, Şekil 5.46 ve Şekil 5.47 incelendiğinde darbe sırasında görülen iç basınç değişiminin darbe enerjileri ile doğru orantılı olarak etkilendiği darbe enerjisinin artırılması ile meydana gelen iç basınç farkının da arttığı görülmektedir. Yapılan tüm testlerde elde edilen iç basınç değişimi en azdan başlanarak en çok farka doğru ÇCKNT+BNNP katkılı, ÇCKNT katkılı, BNNP katkılı ve saf epoksili numunelerde görülmüştür. Darbe sırasında görülen bu iç basınç değişimlerinin darbe esnasında oluşan çökme ve oluşan şok etkisi ile doğrudan ilişkili olduğu düşünüldüğünde en fazla çökmenin en fazla basınç değişimi görülen saf epoksili numunede meydana geldiği en fazla şok etkisi sönümlemesinin ise ÇCKNT+BNNP katkılı numunede meydana geldiği belirlenmektedir. Oluşan şok etkisinin borularda koç darbesi etkisine benzer ani hasar oluşumu meydana getirme olasılığı nedeni ile şok etkisinin değerinin düşük olması ve şok etkisinin çabuk absorbe edilmesi önemli olmaktadır. Bu açıdan incelendiğinde kompozit boruların ÇCKNT, BNNP ve ÇCKNT+BNNP ile katkılanması ile daha düşük şok etkileri meydana gelmesi ve absorpsiyon süresinin kısılmasından dolayı olumlu etki yaratmaktadır.

5.4 Düşük Hızlı Darbe Testleri Sonrası Hasar Bölgesinin İncelenmesi

Yapılan düşük hızlı darbe testleri sonrasında hasar bölgesinin incelenmesi için yüksek çözünürlüklü kamera, optik mikroskop ve SEM görüntülerinden yararlanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan karbon fiberlerin özellikleri bakımından koyu renge sahip olmaları nedeni ile beyazlaşma etkileri ve boru dışarısında hasar bölgesi oluşumu gözlemlenememiştir. Boru iç yüzeyinde oluşan hasar yüksek çözünürlüklü kamera ile incelenirken, hasar bölgesinde borunun kesiti (et kalınlığı) boyunca hasar oluşumunun değerlendirilmesi için optik mikroskop ve SEM görüntülerinden yararlanılmıştır. Değerlendirmeler için en fazla hasarın gözlemlendiği iç basınçsız durumdaki test numunelerinden kullanılmıştır.

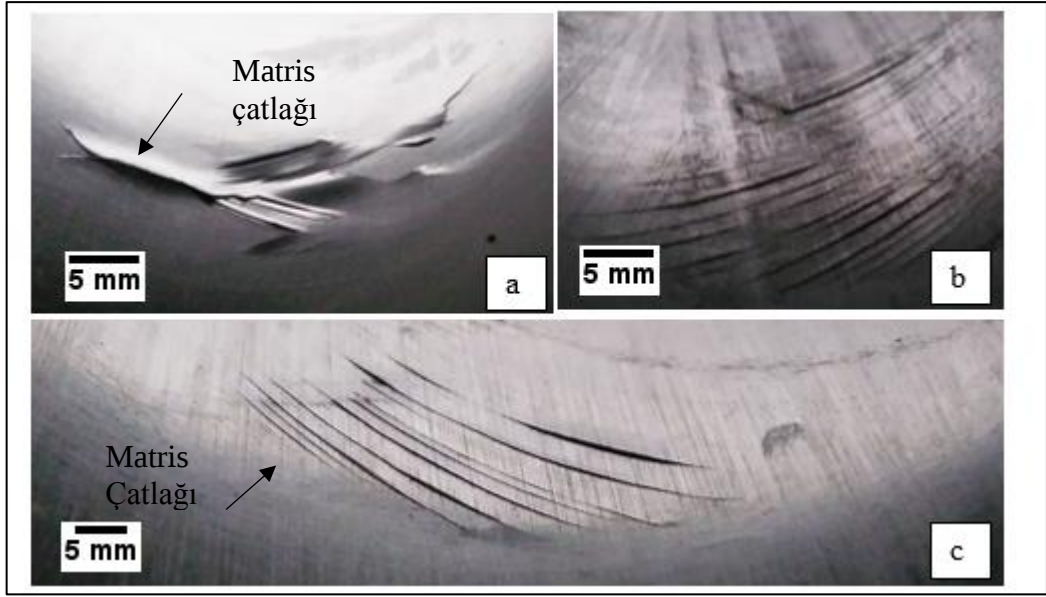
5.4.1. Borunun hasar yüzeylerinin yüksek çözünürlüklü kamera ile incelenmesi

Darbe sonrası test edilen numunelerin hasar bölgelerinin incelenmesi için yüksek çözünürlüklü kamera görüntülerinden yararlanılmıştır. Görüntüler hasarın en belirgin olarak gözlemlenebildiği iç yüzeylerden alınmıştır.

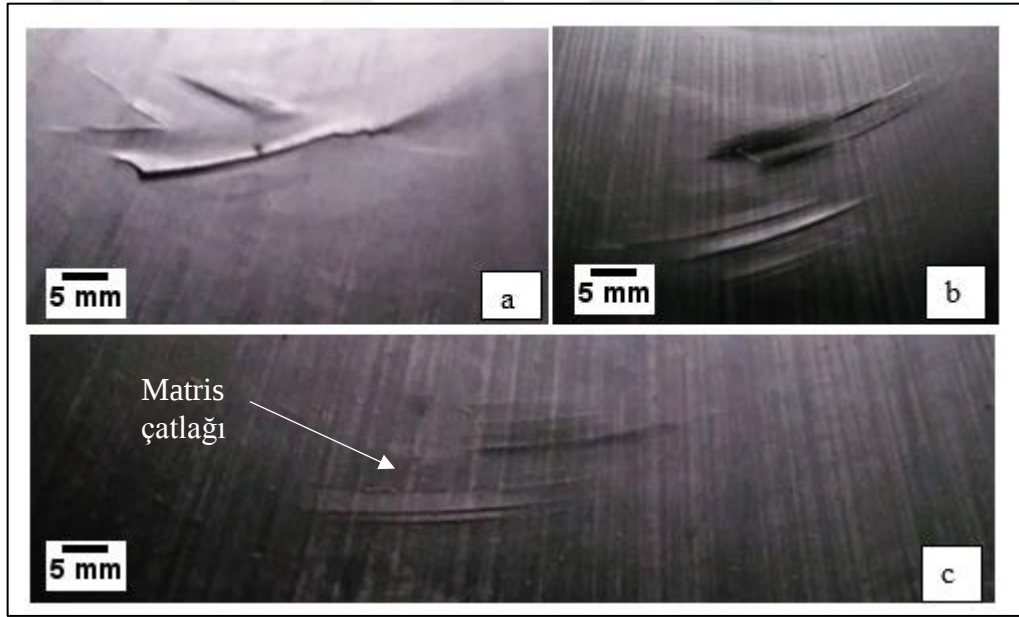


Şekil 5.48. Nano katkısız (saf) numune düşük hızlı darbe testleri sonrası iç yüzey hasarı a) 15J b) 10J c) 5J

Şekil 5.48’de Nano katkısız (saf) numuneye ait iç basınçsız durumda 5,10 ve 15 J darbe enerjileri ile gerçekleştirilen testlerde meydana gelen iç hasarlar görülmektedir. Darbe enerjisi arttıkça meydana gelen hasar miktarı ve hasarlanan alanda artış olduğu görülmektedir. İç kısımda oluşan hasarlar genel olarak darbe noktası civarında ve sarım doğrultusunda görülen matris çatlakları şeklindedir. Bu hasarlar darbe enerjisi ile fiber matris ara yüzeyi arasında çatlak oluşumu ve bunu takip eden fiber matris ayrılması şeklindedir. Özellikle nano katkısız numunede 15 J darbe enerjisi ile boru iç yüzeyinde oluşan darbe hasarında fiber-matris ayrılması ve boru iç yüzeyini oluşturan son katman fiberlerde boru iç yüzeyine doğru bir miktar çökme oluşturduğu, delaminasyon ve fiber ayrılması hasarlarının meydana geldiği görülmektedir.

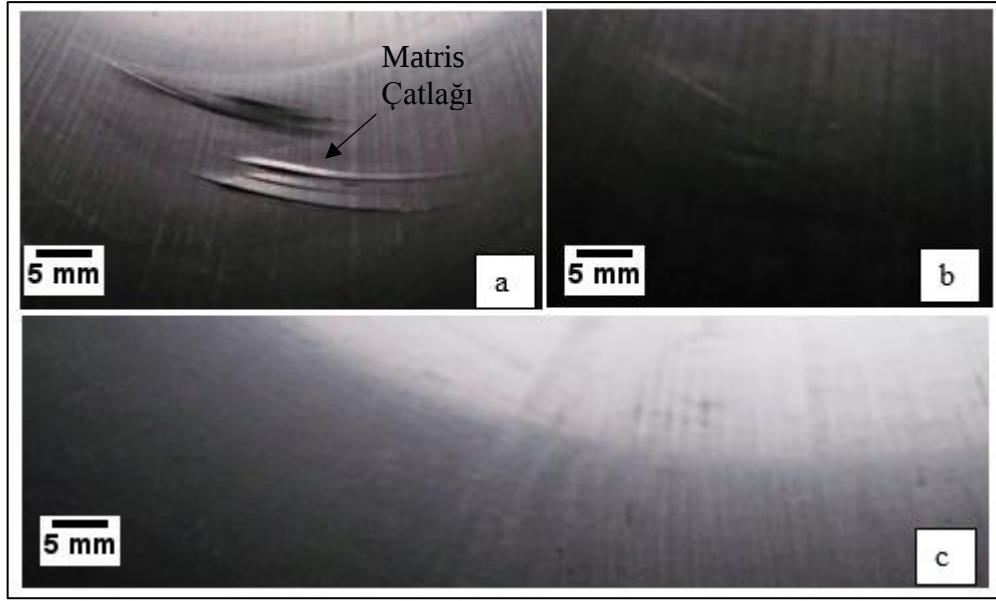


Şekil 5.49. BBNP katkılı numune düşük hızlı darbe testleri sonrası iç yüzey hasarı a) 15J b) 10J c) 5J



Şekil 5.50. ÇCKNT katkılı numune düşük hızlı darbe testleri sonrası iç yüzey hasarı a) 15J b) 10J c) 5J

Şekil 5.49 ve Şekil 5.50’de sırasıyla BBNP katkılı ve ÇCKNT katkılı numunelere ait boru iç hasarları görülmektedir. Şekiller incelendiğinde darbe hasar alanının ve matris-fiber arayüz çatlak oluşumunun BBNP katkılı numunede daha fazla olduğu görülmektedir. Buradan ÇCKNT’lerin darbe hasarına karşı fiber-matris ara yüzeyini daha etkin bir şekilde iyileştirdiğini sonucu elde edilebilmektedir. Hem BBNP ve hem de ÇCKNT katkılı numunelerde oluşan hasar miktarları nano katkısız numunelere oranla kıyaslandığında daha az hasar meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 5.51. ÇCKNT+BNNP katkılı numune düşük hızlı darbe testleri sonrası iç yüzey hasarı a)15 J b)10 J c) 5 J

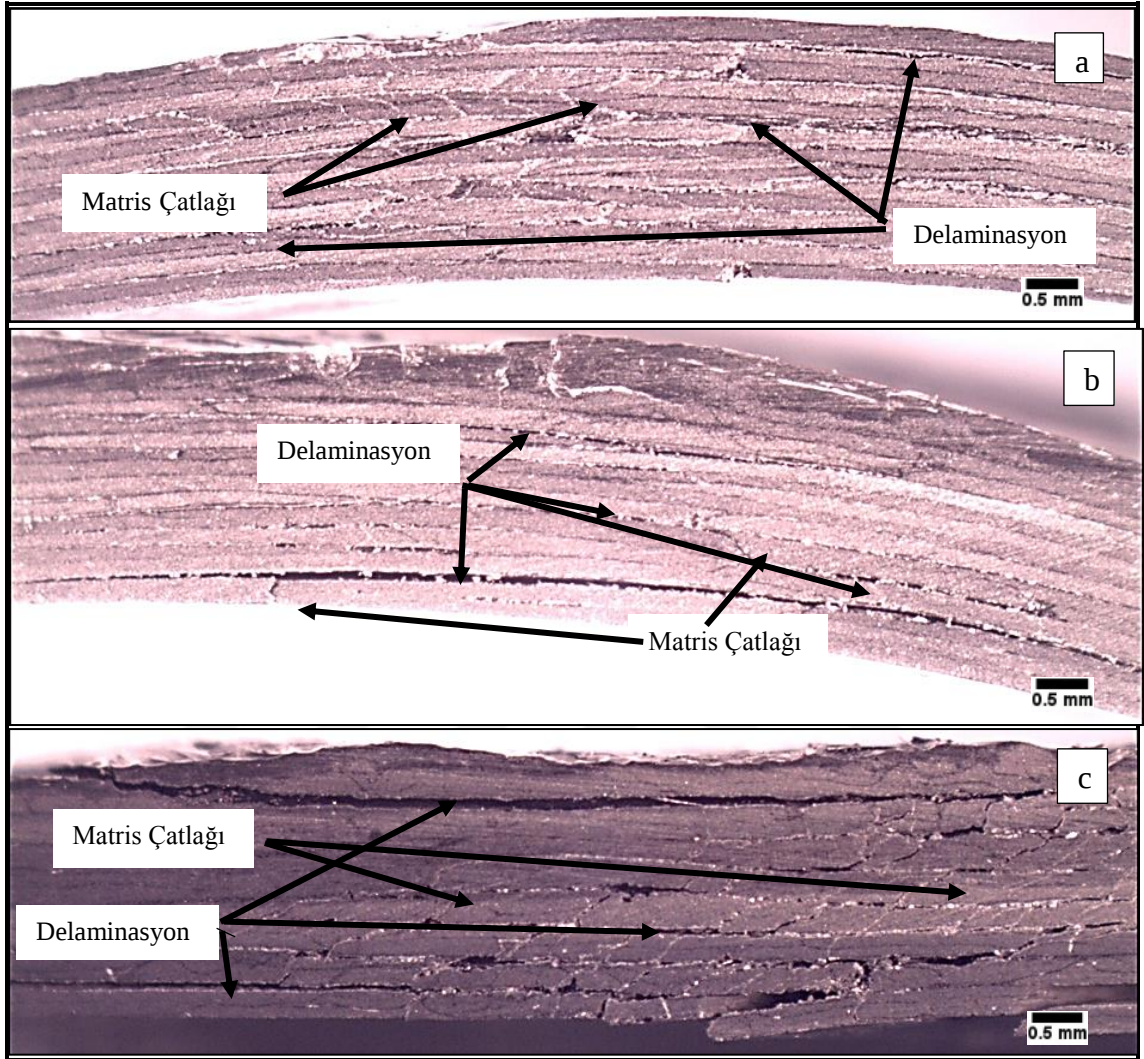
Şekil 5.51’de ÇCKNT+BNNP katkılı numune düşük hızlı darbe testleri sonrası iç yüzey hasarları görülmektedir. Diğer numuneler ile kıyaslandığında en az hasar oluşumunun bu tip numunelerde meydana geldiği görülmektedir. Sadece ÇCKNT veya BNNP katkılı numunelerden daha az hasar oluşumunun gözlenmesi aynı oranlarda katkılandırılmalarına rağmen ÇCKNT ve BNNP’lerin bir arada kullanılmasının sinerjik etki göstererek farklı mekanizmalar ile fiber-matris ara yüzeyini darbelere karşı daha dirençli hale getirdiğini göstermektedir.

5.4.2. Darbe hasarının optik mikroskop ile incelenmesi

Yapılan testler sonrasında darbe hasarının tabakalarda nasıl bir yönelim izlediğinin belirlenmesi için darbe noktasından test numunelerinin et kalınlıkları boyunca kesit alınarak numuneler hazırlanmış ve optik mikroskop ile incelemeye tabi tutulmuştur.

Aşağıda Şekil 5.52 da nano katkısız (saf epoksili) matrise sahip kompozit boru numuneye ait iç basınçsız durumda 5J, 10 J ve 15 J darbe enerjilerinde yapılan darbe testlerine ait hasar bölgesi kesitinden alınan optik mikroskop görüntüleri görülmektedir. Şekil 5.52 incelendiğinde artan darbe enerjisi ile numunede oluşan hasar miktarında artış belirlenmektedir. Bu durum kuvvet deplasman grafikleri ile de uyum sağlamaktadır. Vurucunun numuneye temas ettiği darbe noktasından başlayarak numune kalınlığı boyunca dallamalar şeklinde ilerleyen matris çatlakları oluşumları görülmektedir.

Dallanma şeklinde oluşan matris hasarları darbe esnasında oluşan kayma gerilmeleri ile ilişkilidir (Shyr ve Pan, 2003).

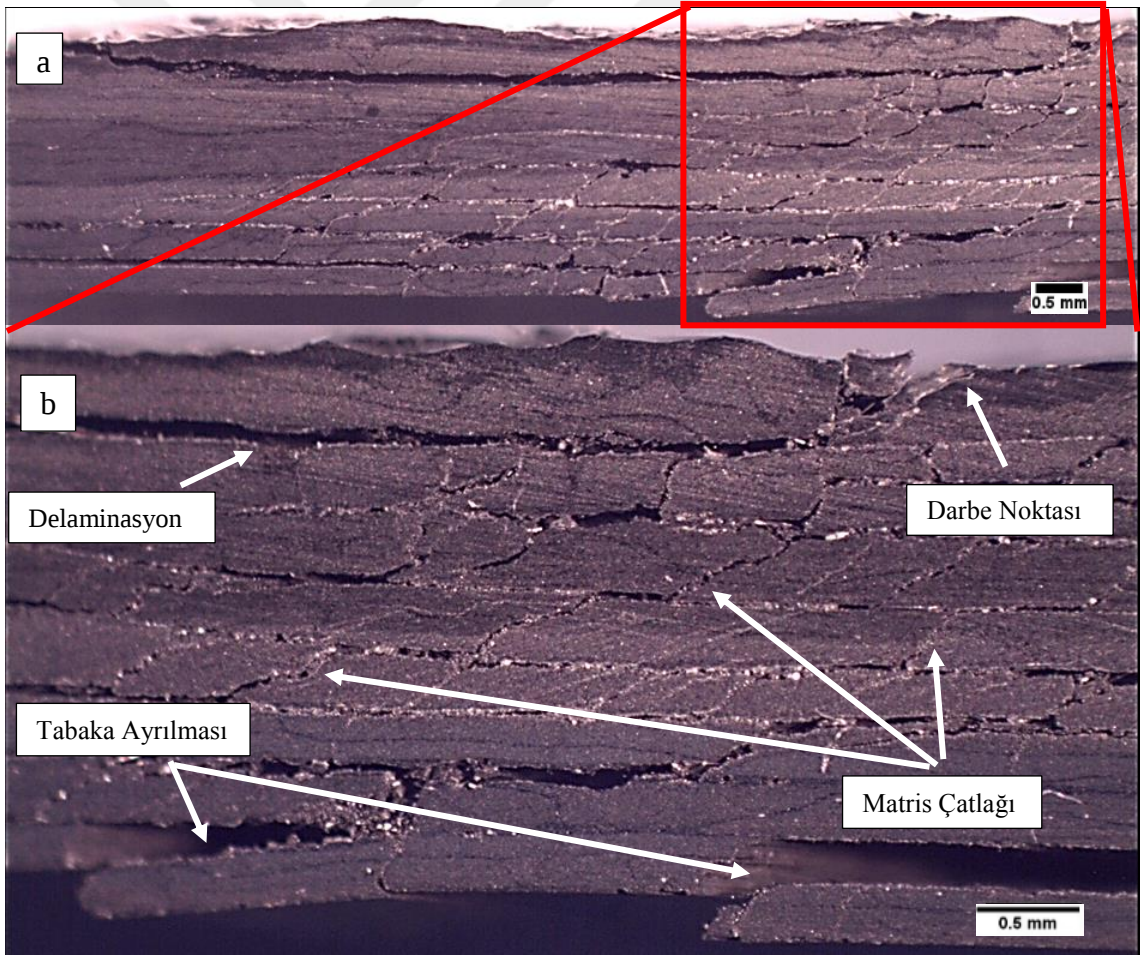


Şekil 5.52. Nano katkısız (Saf epoksi içeren) numunede iç basınçsız durumda görülen darbe hasarları a) 5J darbe enerjisinde görülen hasar b) 10 J darbe enerjisinde görülen hasar c) 15 J darbe enerjisinde görülen hasar

Numuneler üzerine etkiyen darbe enerjisi arttıkça özellikle delaminasyon miktarı ve hasar bölgesinin genişliğinde artış gözlenmektedir. Bu nedenler den dolayı hasar analizlerinin daha sağlıklı yapılabilmesi ve ÇCKNT, BNNP ve ÇCKNT+BNNP ile yapılan katkılandırma etkilerinin daha net belirlenebilmesi için deneylerde kullanılan en yüksek darbe enerjisi olan 15 J enerji seviyesi için tüm numunelerin optik mikroskop görüntüleri alınarak aşağıda açıklanmıştır.

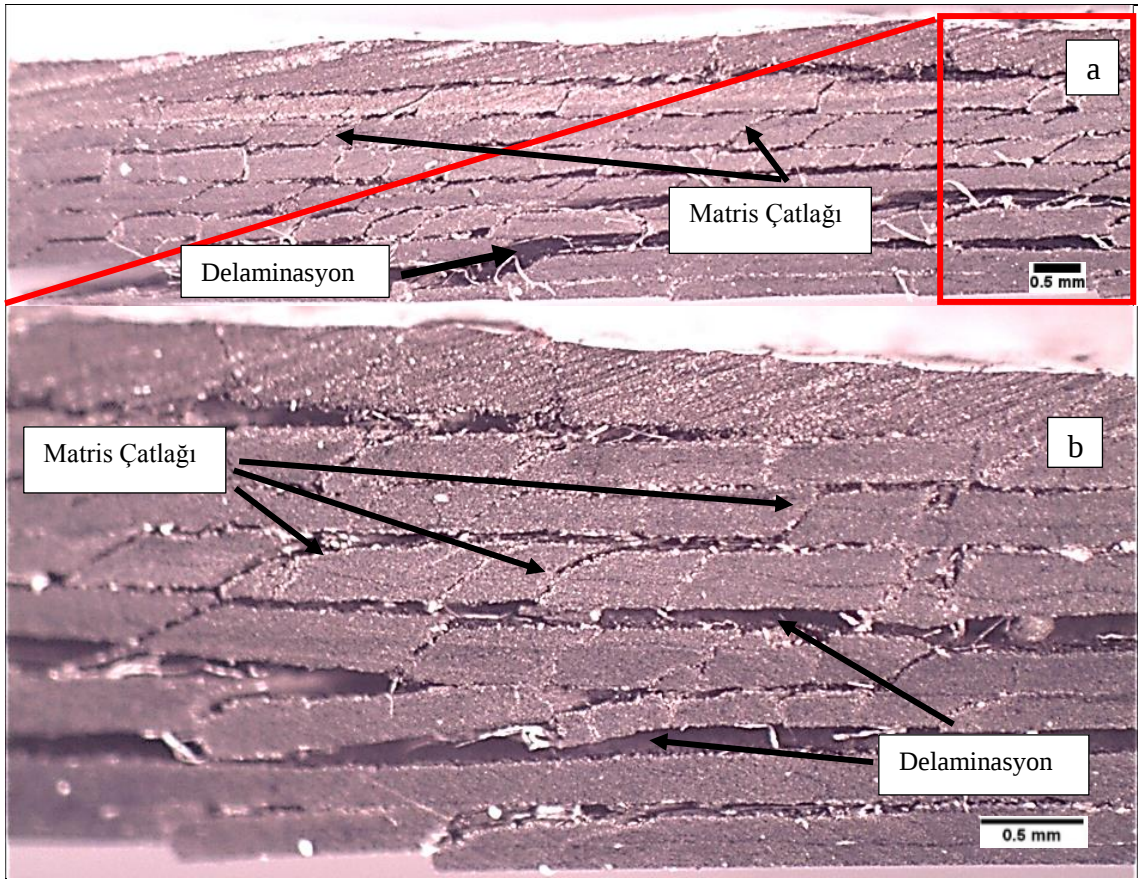
Şekil 5.53’de Nano katkısız (saf epoksi içeren) kompozit boru numunenin iç basınçsız durumda 15 J enerji ile yapılan düşük hızlı darbe testi sonucu hasar kesiti

görülmektedir. Darbe noktası Şekil 5.53.b’de gösterilmiş olup, daha düşük büyütme oranı ile alınan ilk görüntüde (Şekil 5.53.a) numunenin dış yüzeyinde, darbe noktasından başlayarak dallanmalar şeklinde iç yüzeye doğru ilerleyen matris çatlakları görülmektedir. Bununla beraber numunenin dış yüzeyine yakın bir kısmında darbe enerjisi ile meydana gelen delaminasyona rastlanmaktadır. Bu dış yüzeye yakın meydana gelen delaminasyonun kuvvet-zaman grafiklerinde yükleme bölgesinde görülen ani düşüş ve tekrar kuvvetin artmasının devam ettiği zaman zarfında olduğu ve bu nedenle kuvvet düşüşünün görüldüğü düşünülmektedir. Oluşan matris çataklarının özellikle numunenin iç yüzeyine doğru ilerledikçe artarak delaminasyonlara ve iç yüzeyde yer yer tabaka ayrılmasına neden olduğu şekil 5.53.b’de daha net bir şekilde görülmektedir. Oluşan bu hasarlarda yine daha önceki bölümlerde verilen grafikler ile uyum sağlamaktadır. Numunede herhangi bir delinme ya da saplanma hasarı görülmemektedir.



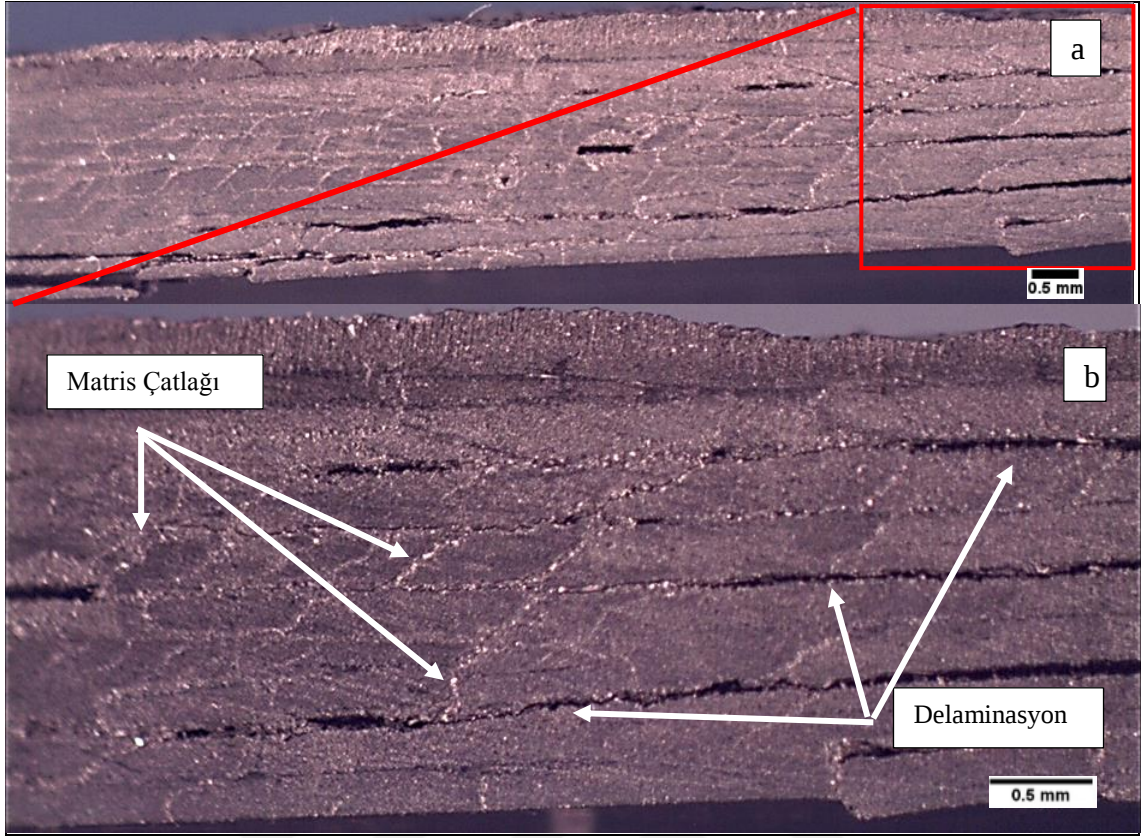
Şekil 5.53. Nano katkısız (saf epoksi içeren) numunenin iç basınçsız durumda 15 j enerji ile yapılan darbe sonucu hasarları

Şekil 5.54’de BNNP katkıli epoksi matrise sahip kompozit boru numunenin 15 J enerji ile yapılan darbe testi sonucunda darbe bölgesinin kesiti görülmektedir. Şekil 5.54 a’da numunenin üst ve alt noktalarında daha yoğun olarak delaminasyon hasarının gerçekleştiği, ara bölgelerde ise matris çatlaklarına bağlı matris hasarının olduğu görülmektedir. Matris çatlakları numunenin dış kısmındaki darbe bölgesinden başlayarak, et kalınlığı boyunca görülen aşağıya doğru dallanmalar şeklindedir.



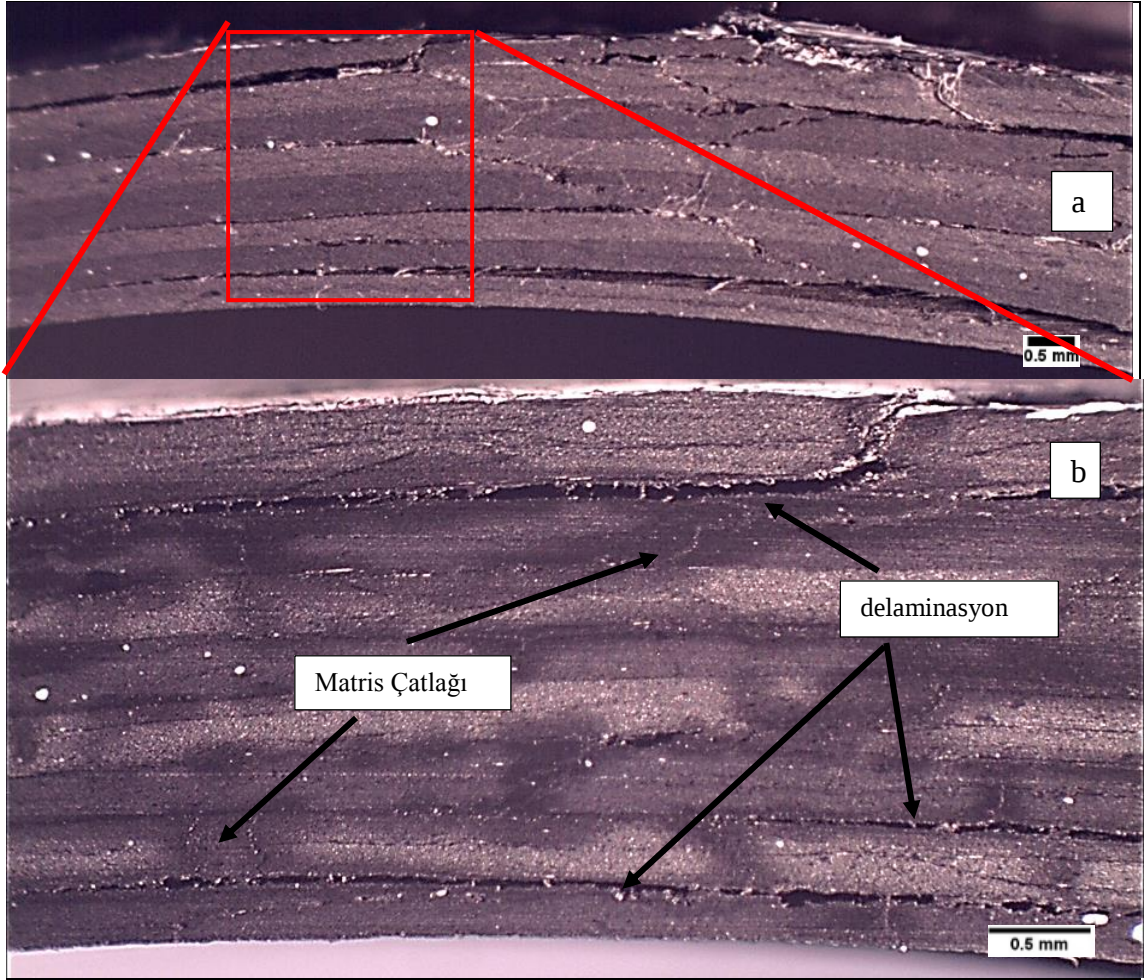
Şekil 5.54. BNNP katkıli numunelerin iç basınçsız durumda 15 J enerji ile yapılan darbe sonucu hasarları

Şekil 5.55’de ÇCKNT katkıli numuneye ait iç basınçsız koşullarda 15 J enerji ile yapılan darbe testi sonucu hasar bölgesinin kesiti görülmektedir. Şekil 5.54’de BNNP içeren numuneye benzer hasar davranışları bu tip numunede de görülmektedir. Hasar alanının ve hasar şiddetinin her iki şekil (Şekil 5.54 ve Şekil 5.55) incelenerek yapılan kıyaslamalarında ÇCKNT katkıli numunenin BNNP katkıli numuneye oranla daha az etkilendiğini göstermektedir. Bu sonuç ÇCKNT’lerin BNNP’lere oranla daha iyi darbe direnci oluşturduğunu kanıtlamaktadır ve darbe testlerinin değerlendirilmesini içeren grafikler ile uyum sağlamaktadır.



Şekil 5.55. ÇCKNT katkılı numunelerin iç basınçsız durumda 15 J enerji ile yapılan darbe sonucu hasarları

Şekil 5.56'da ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matrise sahip numunenin iç basınçsız durumda 15 J enerji ile gerçekleştirilen darbe testi sonucu hasar bölgesinin kesiti görülmektedir. Tüm diğer numuneler ile kıyaslandığında en az hasarın ÇCKNT+BNNP içeren numunelerde olduğu görülmektedir.



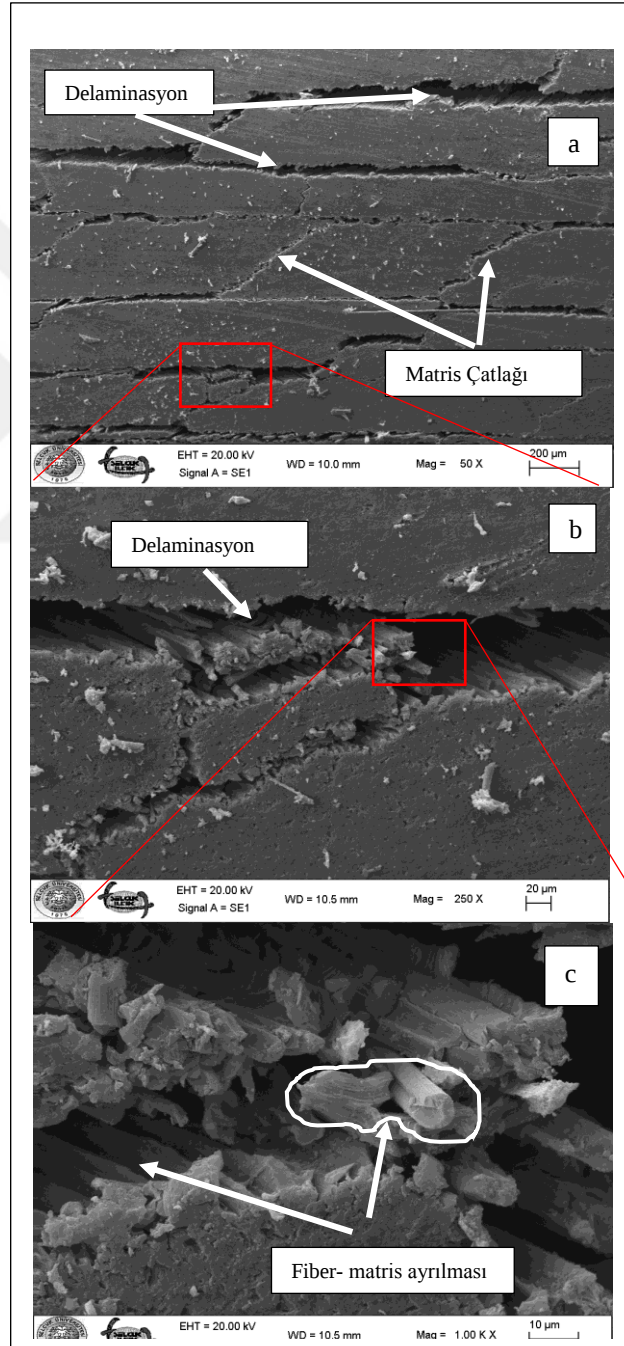
Şekil 5.56. ÇCKNT+BNNP katkılı numunelerin iç basınçsız durumda 15 J enerji ile yapılan darbe sonucu hasarları

5.4.3. Darbe hasarının SEM ile incelenmesi

Yapılan testler sonrasında darbe hasarının daha detaylı olarak incelenebilmesi için kesitten alınan numuneler SEM incelemesine tabi tutulmuştur. SEM incelemesi için kullanılan tüm numuneler darbe hasarının en fazla gözlemlendiği iç basınçsız durumda ve 15 J darbe enerjisi ile yapılan test numunelerinden seçilmiştir.

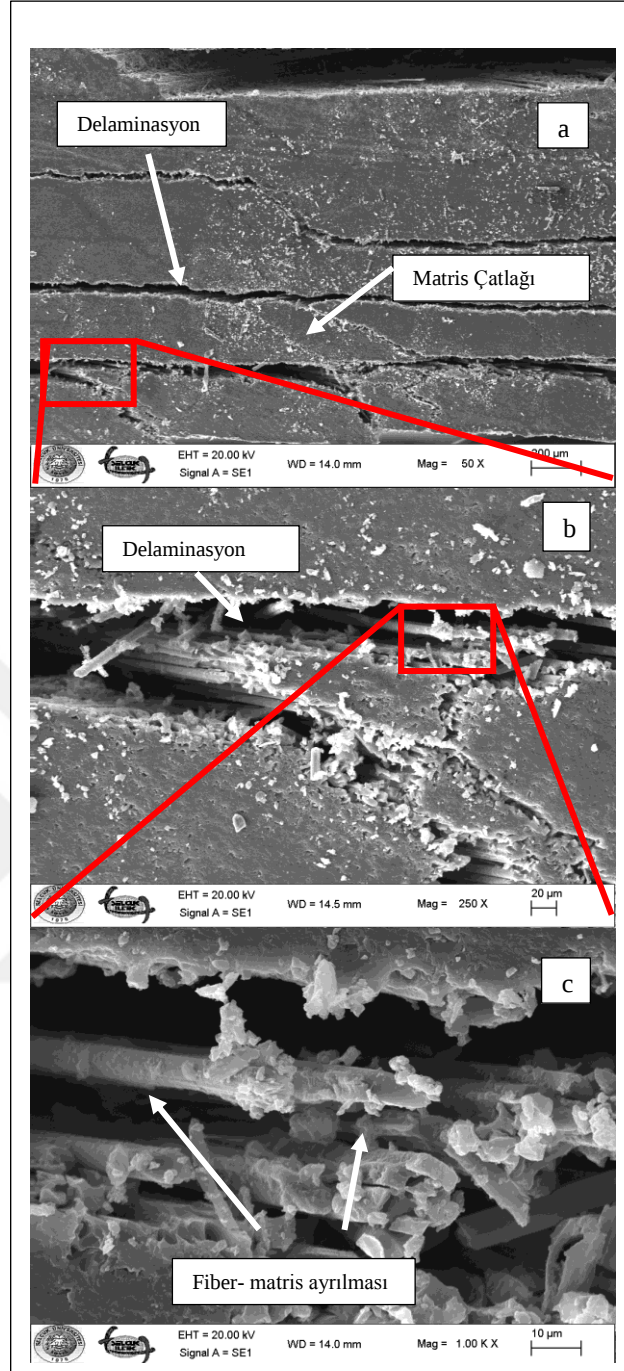
Şekil 5.57’de saf nano katkısız epoksi matrise sahip numuneden alınan hasar kesiti SEM görüntüsü görülmektedir. Şekil 5.57 incelendiğinde Şekil 5.57.a’da numunenin dış yüzeyindeki darbe noktasından başlayarak iç yüzeyine doğru ilerleyen darbe hasarının oluşumları görülmektedir. Oluşan hasarlar iki fiber demeti arasında matris hasarına ve çatlak oluşumuna bağlı ve bunu takip eden delaminasyonlar şeklinde olduğu görülmektedir. Şekil 5.57.b’de darbe kuvveti nedeni ile meydana gelen delaminasyonlar daha net bir şekilde görülmektedir. Şekil 5.57.c’de delaminasyon

bölgesi daha yüksek büyütme oranı ile incelenmiştir. Alınan görüntü incelendiğinde darbe hasarı oluşumu sırasında fiber kopması hasarının oluşmadığı genellikle matris hasarının meydana geldiği görülmektedir. Fiber ve matris ayrılma yüzeyleri incelendiğinde, matris üzerinde görülen fiberlerin ayrılma yüzeylerinin oldukça düzgün olduğu ve fiber yüzeylerinde matris malzeme kalıntılarının olmadığı görülmemektedir. Bu sonuç hasarın nano katkısız numunede fiber matris ara yüzeylerinde başlayarak geliştiğini ve fiber matris arasında iyi bir yük aktarımının olmadığını göstermektedir.



Şekil 5.57. Saf (nano katkısız) numuneye ait 15 J darbe hasarı SEM görüntüsü

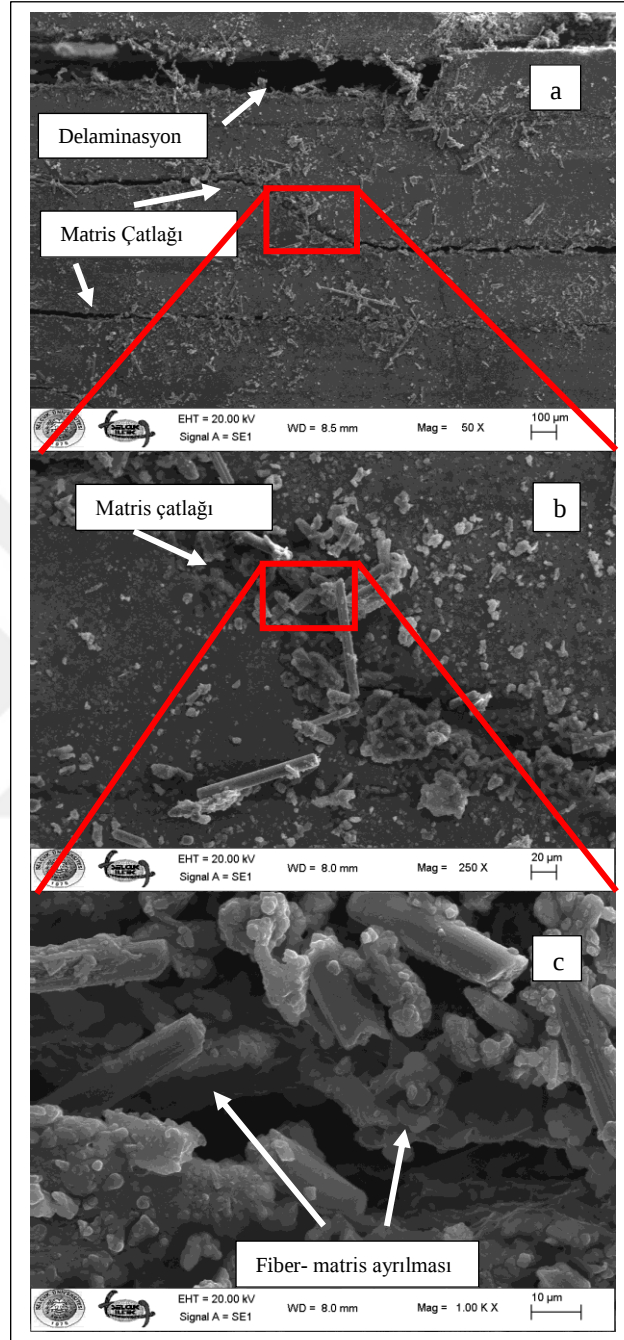
Şekil 5.58’de BNNP katkılı epoksi matrise sahip numuneden alınan hasar kesiti SEM görüntüsü görülmektedir. Şekil 5.58.a ve Şekil5.58.b incelendiğinde BNNP katkılı numunede oluşan darbe hasarlarının yoğunlukla matris çatlaması ve buna bağlı olarak gelişen delaminasyonlara bağlı olduğu görülmektedir. Şekil 5.58.c’de Fiber matris ayrılma yüzeyleri incelendiğinde daha pürüzlü yüzeylerin oluştuğu, matrisin parçalı kırıklar şeklinde fiberler üzerinde yer aldığı görülmektedir. Fiber üzerinde parçalı kırıklar şeklinde matris malzemenin yer alması epoksi matris içerisine katılan BNNP’lerin fiber-matris ara yüzey bağlantısını güçlendirdiğini göstermektedir. Bu nedenle epoksi matris fiberler üzerinden tamamen sıyrılmayıp hasar sonrası fiber üzerinde bulunmaktadır. Güçlenen ara yüzey bağlantısı ise daha iyi yük aktarımı ve daha iyi darbe direnci oluşumunu sağlamaktadır.



Şekil 5.58. BBNP katkılı numuneye ait 15 J darbe hasarı SEM görüntüsü

Şekil 5.59’da ÇCKNT katkılı epoksi matrise sahip numuneden alınan hasar kesiti SEM görüntüsü görülmektedir. Şekil 5.59.a incelendiğinde nano katkısız ve BBNP katkılı numunede görülen benzer hasar oluşumları ÇCKNT katkılı numunede de rastlanmaktadır. Genel olarak nano katkısız numuneye ve BBNP katkılı numuneye oranla hasarlı bölge miktarı azalmış ve daha az delaminasyon ve matris çatlağı belirlenmiştir. Hasar bölgesi incelendiğinde kırılmış fiber parçalarında artış gözlemlenmiştir (Şekil5.59.b). Hasar bölgesindeki fiber yüzeylerinin epoksi matris ile kaplı olduğu,

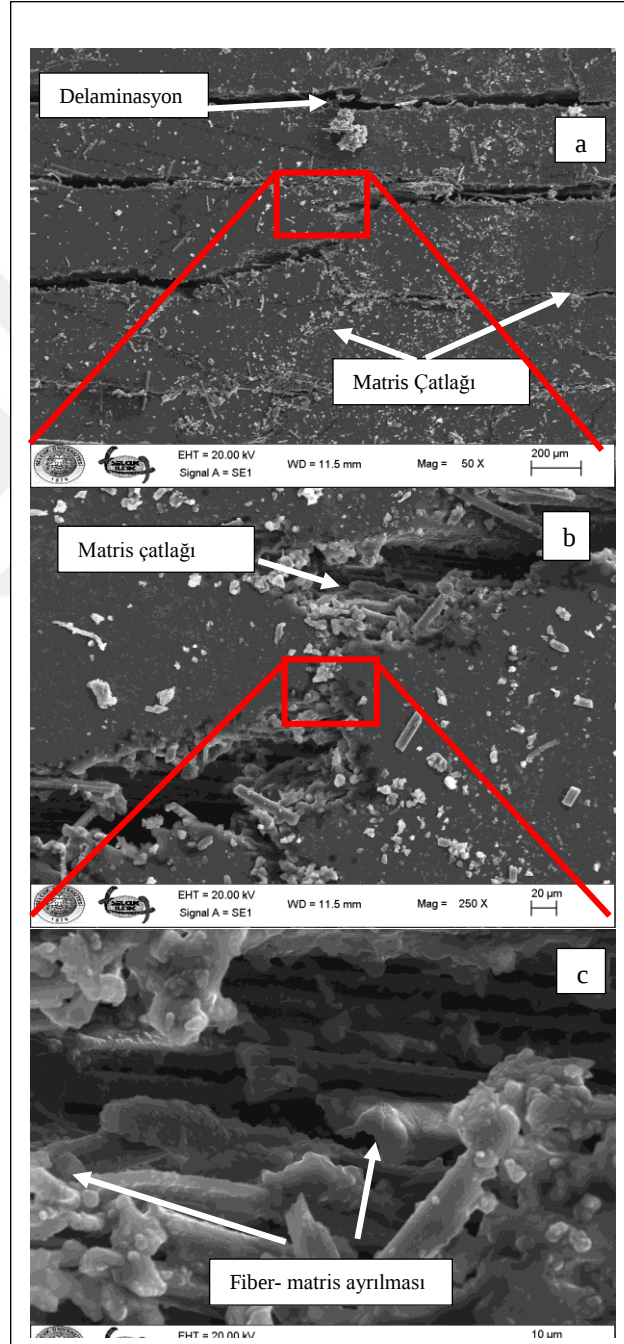
ÇCKNT ile fiber-matris ara yüzey bağlantısının BNNP'den daha güçlü hale geldiği belirlenmiştir (Şekil5.59.c)



Şekil 5.59. ÇCKNT katkılı numuneye ait 15J darbe hasarı SEM görüntüsü

Şekil 5.60'da ÇCKNT+BNNP katkılı epoksi matrise sahip numuneden alınan hasar kesiti SEM görüntüsü görülmektedir. Şekil 5.60.a ve Şekil 5.60.b incelendiğinde ÇCKNT+BNNP katkılı numunelerde de nano katkısız, BNNP ve ÇCKNT katkılı numunelerde gözlemlenen benzer delaminasyon ve matris çatlaması hasarları

görülmektedir. En düşük hasarlı bölge miktarı ÇCKNT+BNNP içeren numunede görülmüştür. Hasar bölgesinde de en çok fiber kırığına bu tip numunede rastlanmıştır. Fiberlerin tamamının epoksi matris ile kaplı olduğu, fiber-matris ara yüzey bağlantısının güçlendiği, kırılma yüzeyinin ise daha pürüzlü hale geldiği görülmektedir (Şekil 5.60.c). Gelişen fiber-matris ara yüzey bağlantısı ile daha iyi yük transferi sağlayarak daha az hasar oluşumu gösterdiği belirlenmiştir.

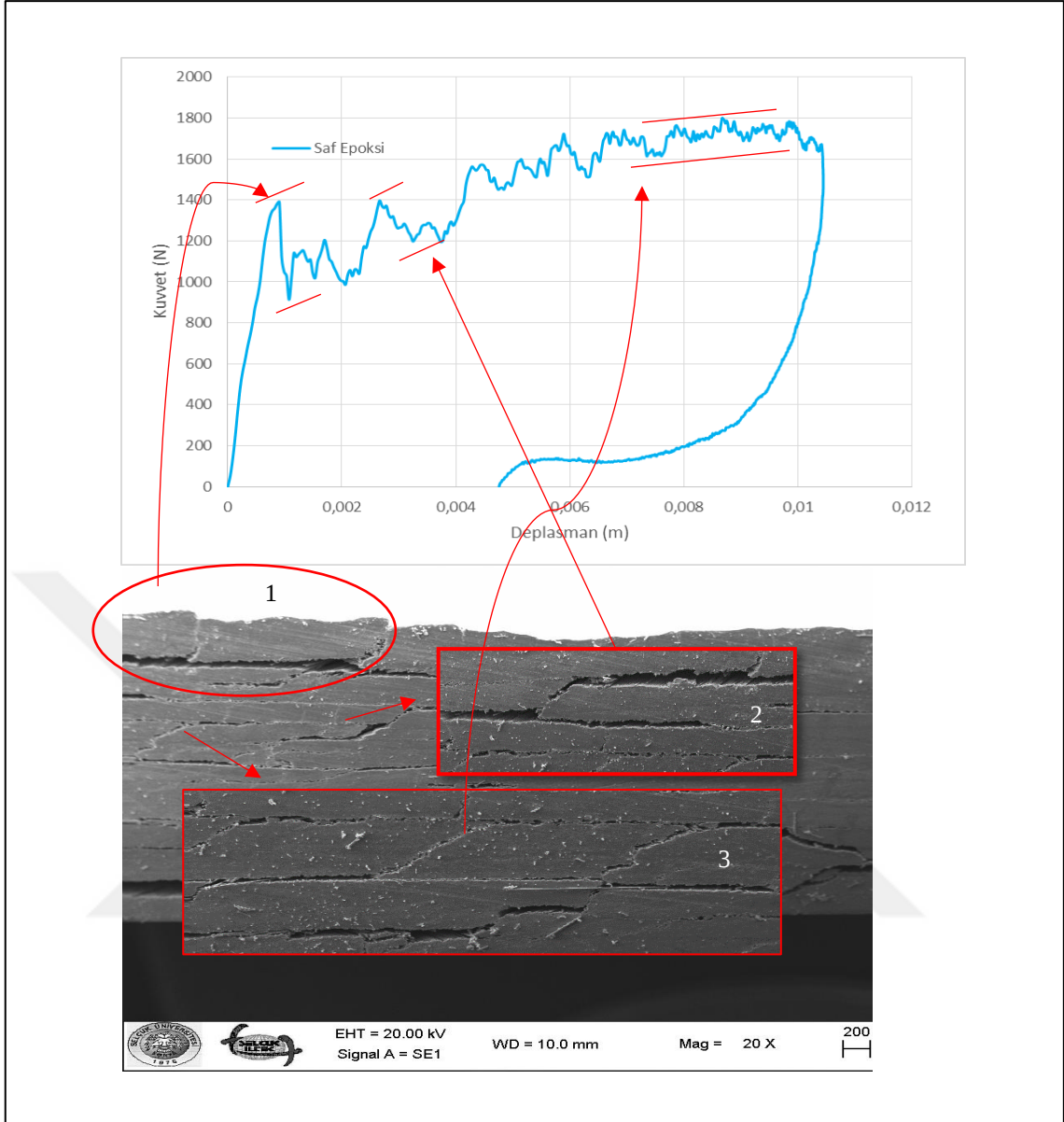


Şekil 5.60. ÇCKNT+BNNP katkılı numuneye ait 15 J darbe hasarı SEM görüntüsü

Şekil 5.61’de saf epoksili (nano katkısız) numuneye ait 15 J enerji ile iç basınçsız koşullarda gerçekleştirilen darbe testine ait kuvvet-deplasman eğrisi ve hasar bölgesi kesit alanı karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Hasar mekanizmasının daha iyi anlaşılabilmesi için yukarıda verilen şekilde 1 nolu kısımda gösterilen bölge vurucunun numuneye temas ettiği yeri ve burada oluşan tabaka ayrılması hasarlarını göstermektedir. Oluşan bu hasar sebebi ile ani kuvvet düşüşü yaşanmış ve buna bağlı olarak temas rijitliği azalmıştır. Bu noktadan sonra kuvvet yükleme bölgesi boyunca artmaya devam etmiştir. İlk önemli kuvvet düşüşünün görüldüğü bu nokta Hertzian hasarı olarak isimlendirilmektedir (Shyr ve Pan, 2003).

Şekilde 5.61’de 2 nolu kısım da verilen ve grafikte yer yer kuvvet düşüşü piklerine karşılık gelen bölgelerde delaminasyon hasarlarının olduğu görülmektedir. Darbe ile numuneye verilen enerjinin bir kısmı burada delaminasyon hasarı ve hareketleri için harcanmıştır (Shyr ve Pan, 2003).

Son olarak 5.61’de 3 nolu bölgede verilen hasar matris hasarı olup, matris çatlamlarını ve fiber matris arayüz ayrılmalarını göstermektedir. Delaminasyon ve tabaka hasarına nazaran daha az enerjili hasar oluşumları olması nedeni ile kuvvet deplasman eğrilerinde titreşimler şeklinde görülmekte ve daha az kuvvet düşüşleri oluşturmaktadır.

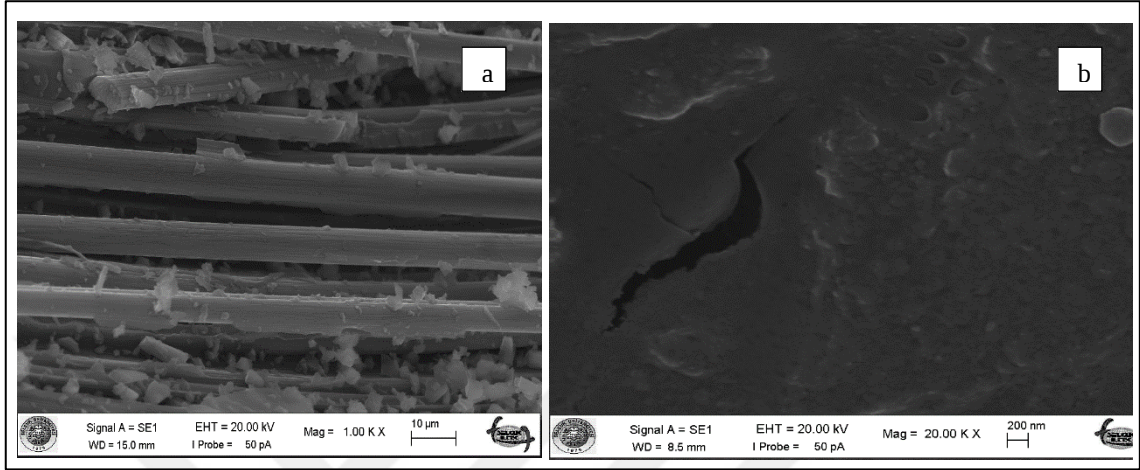


Şekil 5.61. Saf nano katkısız numuneye ait 15 J darbe hasarı oluşum mekanizmaları

Şekil 5.62’de saf nano katkısız numuneye ait 15 J enerji ve iç basınçsız koşullarda yapılan darbe testi sonucu alınan SEM numune örneği görülmektedir. Şekil 5.62.a’da hasar bölgesinden alınmış karbon fiber takviye durumunu gösteren bir SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntü incelendiğinde hasar bölgesinde fiberler üzerinde parçalı kırıklar şeklinde epoksi matrisin bulunduğu görülmektedir. Hasar oluşumunun fiber matris ara yüzey bağlantısında daha etkili gerçekleştiği ve fiberlerden matrisin sıyrıldığı görülmektedir. Bu sonuç saf epoksi matrisin fiber yüzeylerine yeteri kadar iyi bağlanmadığını göstermektedir.

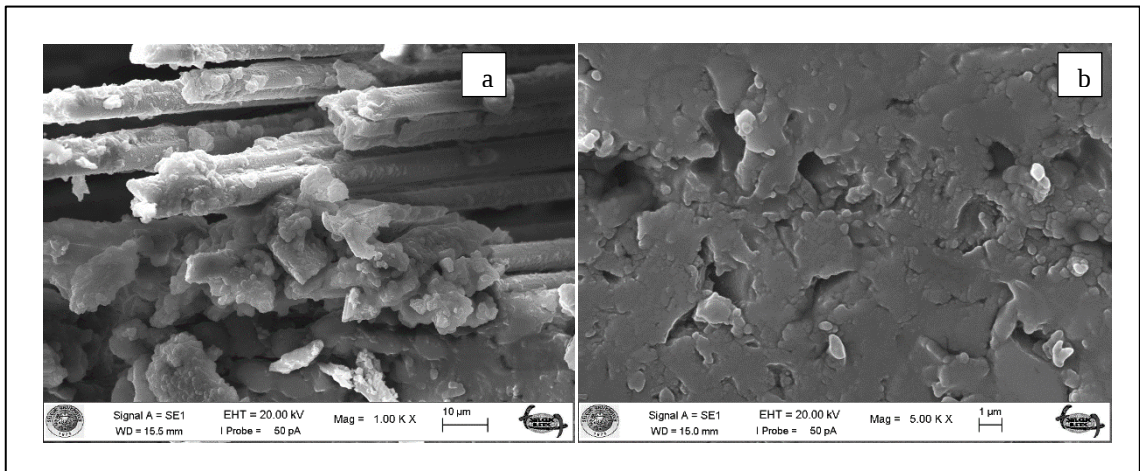
Şekilde 5.62.b’ de ise epoksi matriste hasar oluşumu görülmektedir. Darbe enerjisi ve burada meydana gelen şekil değişimleri nedeni ile epoksi matriste meydana gelen

çatlak oluşumu ve ilerlemesi görülmektedir. Nano katkılarda görülen çatlak ilerlemesini önleyici, çatlak yönünü ve davranışını değiştirecek köprüleme, çatlak yönü değiştirme, sıyrılma, kopma gibi mekanizmaların olmaması saf epoksi matrisi daha hassas kılmaktadır.



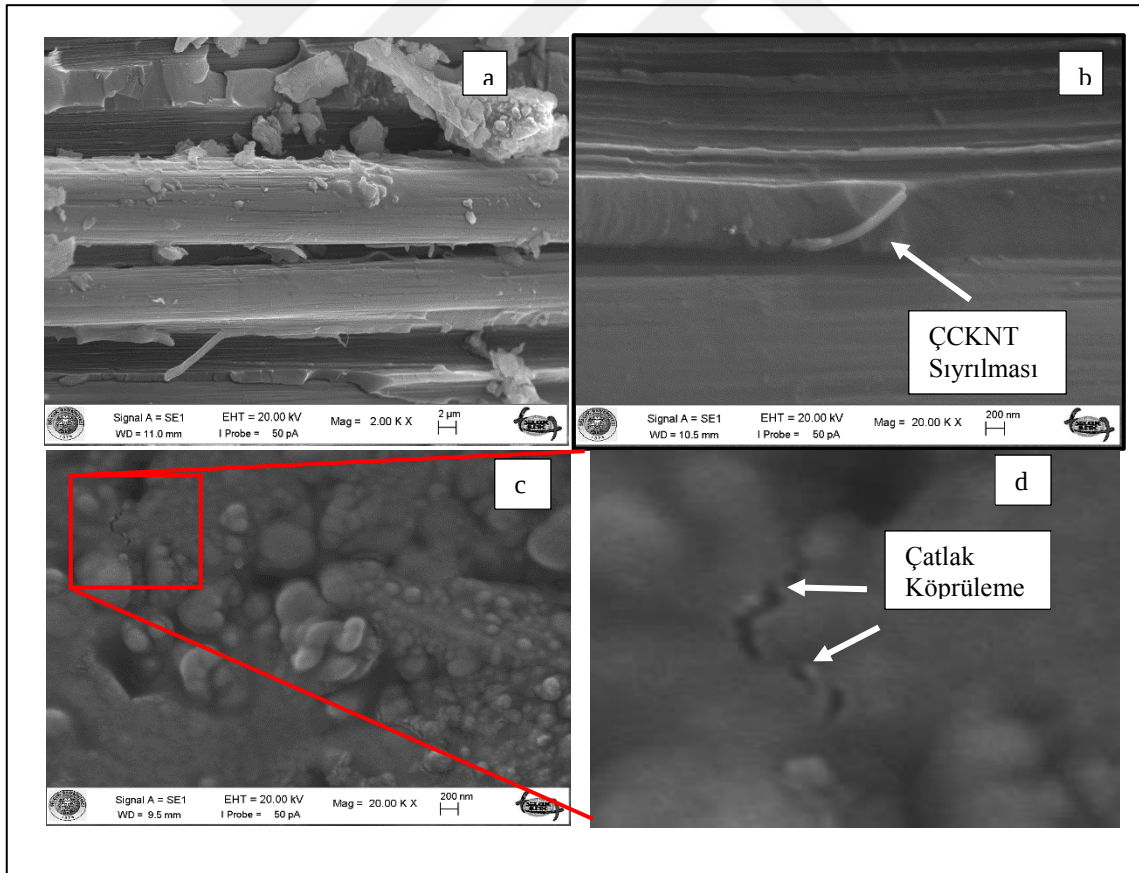
Şekil 5.62 Saf nano katkısız numuneye ait 15J darbe hasarları

Şekil 5.63’de BNNP katkılı numuneye ait 15 J enerjili iç basınçsız koşullu darbe testi hasarı SEM görüntüsü görülmektedir. Karbon fiberler üzerinde saf epoksili duruma oranla daha çok epoksi matrise rastlanmıştır. Bu sonuç BNNP katkılandırma ile epoksi matris fiber arayüz bağlantısının güçlendirildiğini göstermektedir. Aynı şekilde matris hasarı incelendiğinde de daha pürüzlü yüzeyler olduğu görülmektedir. Bu sonuç epoksi matrisin hasara uğraması için çatlak yönelimlerinin değiştiğini ve hasar oluşumu için daha fazla enerji yuttuğunu göstermektedir.



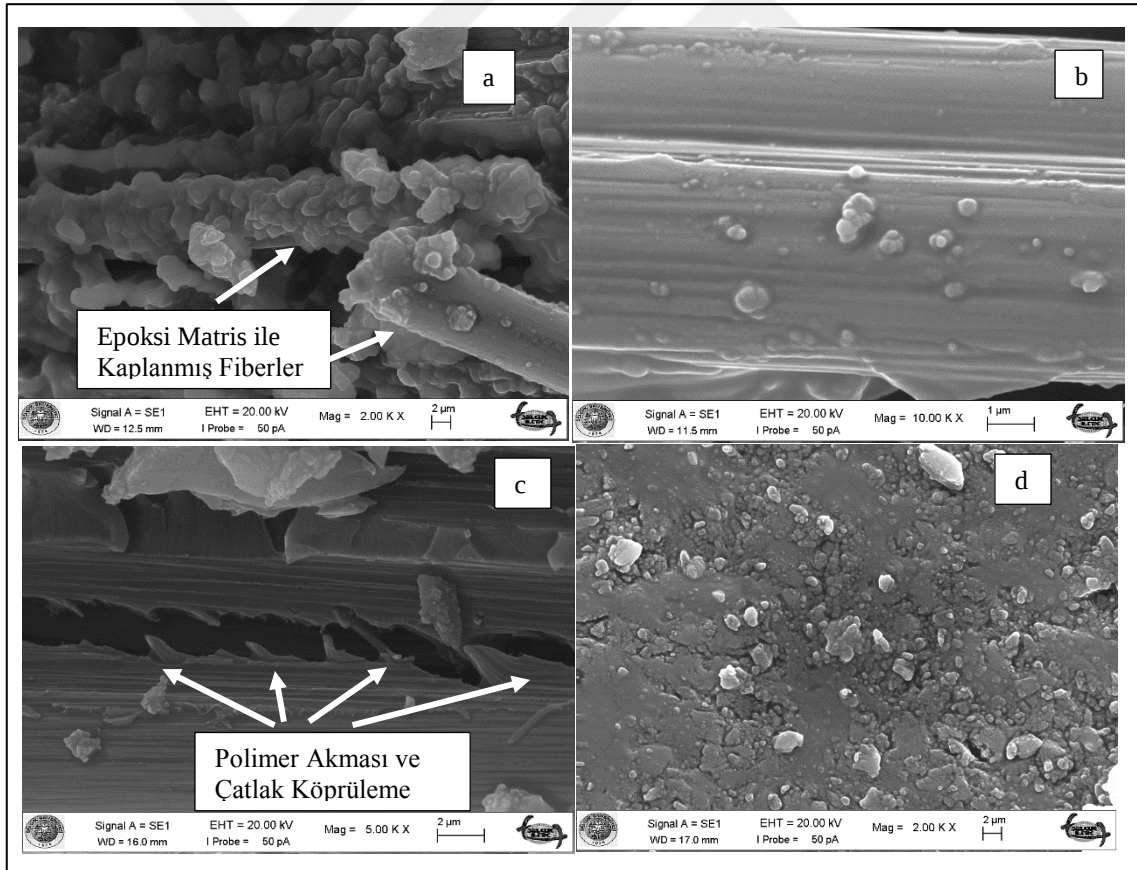
Şekil 5.63. BNNP katkılı numuneye ait 15 J darbe hasarları

Şekil 5.64’de ÇCKNT katkılı numuneye ait 15 J enerjili iç basınçsız koşullu darbe testi hasarı SEM görüntüsü görülmektedir. Karbon fiber takviye malzemesi üzerinde saf epoksili duruma oranla BNNP katkılı olan numunede olduğu gibi ÇCKNT katkılı numunede de daha çok epoksi matrise rastlanmıştır (Şekil5.64.a). Bu sonuç ÇCKNT katkılandırma ile de epoksi matris fiber ara yüz bağlantısının güçlendirildiğini göstermektedir. Şekil 5.64.b’de epoksi matris özellikleri iyileştiren mekanizmalardan biri olan karbon nanotüplerin sıyrılması görülmektedir. Nanotüp epoksi içerisinden sıyrılırken daha fazla enerji yutmaktadır. Aynı şekilde matris hasarı incelendiğinde de daha pürüzlü yüzeyler olduğu görülmektedir. Bu sonuçta yine epoksi matrisin hasara uğraması için daha fazla enerji yuttuğunu göstermektedir. Şekil 5.64.c’de epoksi matrisde oluşan çatlak görülmektedir. Şekil 5.64.d’de çatlak bölgesinin daha yüksek büyütme ile incelenmesi yer almakta olup, görüntü incelendiğinde epoksi matriste meydana gelen çatlakların yine ÇCKNT’lerin köprüleme mekanizmaları ile etkilenecek hasar oluşumu azaltıldığı görülmektedir.



Şekil 5.64. ÇCKNT katkılı numuneye ait 15 J darbe hasarları

Şekil 5.65’de ÇCKNT+BNNP katkılı numuneye ait 15 J enerjili iç basınçsız koşullu darbe testi hasarı SEM görüntüsü görülmektedir. Karbon fiber takviye malzemesi üzerinde en fazla epoksi matrise bu tip numunelerde rastlanmıştır (Şekil 5.65.b). Bu sonuç ÇCKNT+BNNP katkılandırmanın epoksi matris fiber ara yüz bağlantısını en saf epoksili, ÇCKNT ve BNNP katkılı durumlara göre daha iyi güçlendirildiğini göstermektedir. Şekil 5.65.c’de epoksi matriste çatlak oluşumu sırasında meydana gelen köprüleme ve polimer akması etkileri görülmektedir. Köprüleme ve polimer akması tokluğu arttıran mekanizmalardan biri olup literatürde saf epoksi matrisin kırılma tokluğunun bu mekanizmalar ile %100 arttırdığına dair veriler bulunmaktadır (Zhang ve ark., 2008, Blanco ve ark., 2009). Nanotüplerde epoksi içerisinden sıyrılırken daha fazla enerji yutmaktadır. Şekil 5.65.d’de matris hasarı incelendiğinde diğer numunelere oranla daha fazla pürüzlü yüzeyler oluştuğu görülmektedir. Bu sonuçta yine epoksi matrisin hasara uğraması için daha fazla enerji yuttuğunu göstermektedir.



Şekil 5.65. ÇCKNT+BNNP katkılı numuneye ait 15 J darbe hasarları

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında karbon fiber/ epoksi matris filaman sarım kompozit borular saf epoksili (nano katkısız), BNNP katkılı, ÇCKNT katkılı ve ÇCKNT+BNNP katkılı matrise sahip olarak üretilmiştir. Çalışmada kullanılmak üzere üretimi yapılan nano katkılı ve katkısız epoksi matrisin özellikleri SEM, FT-IR, TGA/DSC analizleri ile belirlenmiştir. Üretimi yapılan kompozit boruların mekanik özellikleri, darbe davranışları ve ÇCKNT, BNNP ve ÇCKNT+BNNP ile yapılan katkılandırmanın mekanik özellikler ile darbe davranışı üzerindeki etkisi 12 Bar iç basınçlı ve iç basınçsız koşulda, 5 J, 10 J ve 15 J enerji seviyelerinde yapılan düşük hızlı darbe testleri, iç basınç ve statik patlatma testleri ve halka çekme testleri yapılarak belirlenmiştir. Tüm numunelerden elde edilen sonuçlar kendi aralarında da kıyaslanarak, detaylı sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Yapılan testler sonucu meydana gelen hasar bölgeleri ve yüzeyleri yüksek çözünürlüklü kamera, optik mikroskop ve SEM ile incelenip değerlendirilmiştir. Tez çalışmasından elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- 1- Filaman sarım metodun da nano katkı kullanılması uygulanabilir bir yöntem olmakta beraber, nano katkılandırma işleminde epoksi matris içerisine nano malzemelerin homojen dağılımlarının sağlanması için literatürde ve kaynak araştırması bölümünde belirtilen uygun metotların kullanılması gerekmektedir.
- 2- FT-IR analizlerine göre BNNP, ÇCKNT ve ÇCKNT+BNNP ile yapılan epoksi matrisin katlandırımlarında yeni bağların oluşumuna rastlanmamış sadece bağların sayısının arttığını gösteren pik şiddetlerinin arttığı görülmüştür. Fonksiyonelleştirmemiş BNNP ve ÇCKNT kullanımı nedeni ile yeni bağların oluşumunun gözlenmemesi beklenen bir sonuçtur.
- 3- TGA ve DSC ile yapılan termal analizlerde BNNP, ÇCKNT ve ÇCKNT+BNNP katkı durumunda epoksi matrisin bozunmaya başlama sıcaklığının saf epoksili duruma göre arttığı görülmektedir. Bozunma sonunda kalan malzeme oranlarının saf epoksili numuneye göre nano modifiyeli numunelerde artış gösterdiği belirlenmiştir. Camsı geçiş sıcaklıklarının da nano katkıya bağlı olarak etkilenecek tüm numuneler için

saf epoksili duruma göre artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar nano katkılandırma ile termal stabilitenin arttırıldığını işaret etmektedir. Termal stabilitenin en fazla artış gösterdiği numuneler BNNP katkılı numuneler olup, BNNP'lerin kullanım amacına uygun olarak epoksi matrisin termal özelliklerini geliştirdiği sonucuna ulaşılmıştır.

- 4- Yakma ve yoğunluk farkı deneyleri ile fiber-hacim oranı hesaplanmıştır. Fiber-hacim oranı yakma testine göre %53, yoğunluk farkı testine göre ise %55 olarak ölçülmüştür. Her iki metotla yapılan fiber-hacim oranının belirlenmesi işlemlerinde, nano katkılı ve nano katkısız numunelerde benzer fiber hacim oranları elde edilmiştir. Üretim metotlarının ve üretim koşulların her numune için birebir aynı olması ve nano katkı miktarlarının kütle hacim oranını değiştirebilecek miktarlardan çok düşük oranda olması nedeni ile benzer sonuçlar elde edilmiştir.
- 5- Kompozit boruların statik patlatma testi sonucunda elde edilen ortalama patlama basınçları; saf epoksili numunede 300 Bar, BNNP katkılı numunede 310 Bar, ÇCKNT katkılı numunede 335 Bar, ÇCKNT+BNNP katkılı numunede 350 Bar olarak ölçülmüştür. Buradan saf epoksili kompozit borulara oranla BNNP katkılıda borularda %3.33, ÇCKNT katkılıda borularda %11.66 ve ÇCKNT+BNNP katkılı borularda %16.66 patlama basıncı artışı olduğu belirlenmiştir.
- 6- Boruların statik patlatma testlerinin tamamında iç basınç nedeni ile çap artışı ve sarım açısına bağlı olarak borularda eğilme, eğilme nedeni ile çekme ve basma bölgelerinin oluşumu ve bu noktalarda görülen ani matris ve fiber hasarı bağlı yarıma şeklinde meydana gelen son hasar belirlenmiştir. Su jeti son hasarına ise rastlanmamıştır.
- 7- Halka çekme testleri sonucunda ortalama olarak nano katkısız numunelerde 377 MPa maksimum gerilme değeri elde edilmiştir. Maksimum gerilmeler de en azdan başlayarak sırasıyla BNNP %11, ÇCKNT %26.2, ÇCKNT ve BNNP katkılı numunelerde %31.7'lik artış belirlenmiştir.
- 8- Düşük hızlı darbe testi sonuçları değerlendirildiğinde;
 - a) İç basınçlı ve iç basınçsız koşullarda ve 5, 10 ve 15 J darbe enerjileri yapılan tüm testlere ait kuvvet-zaman grafiklerinde ilk önemli hasarın görüldüğü darbe kuvveti değeri düşükten büyüğe doğru sırasıyla Saf epoksili, BNNP katkılı, ÇCKNT katkılı ve ÇCKNT+BNNP katkılı

numunelerde görülmüştür. Temas rijitliğinin nano katkılandırmadan çok fazla etkilenmediği, iç basınçlandırma koşullarından ise etkilendiği belirlenmiştir. 12 Bar iç basınçlı koşullarda yapılan testlerde, tüm numunelerde daha yüksek temas rijitliği elde edilmiştir. İç basınçlandırmanın boruları daha rijit hale getirdiği sonucu elde edilmiştir. Darbe kuvvetinin maksimum değerine yine sırasıyla saf epoksili, BNNP katkılı, ÇCKNT katkılı ve ÇCKNT+BNNP katkılı numunelerde rastlanmıştır.

- b) İç basınçlı ve iç basınçsız koşullarda ve 5,10 ve 15 J darbe enerjileri yapılan tüm testlere ait kuvvet-deplasman grafiklerinde eğri altında alan ile belirlenen darbe hasarı için harcanan enerji miktarı değeri büyükten küçüğe doğru sırasıyla Saf epoksili, BNNP katkılı, ÇCKNT katkılı ve ÇCKNT+BNNP katkılı numunelerde görülmüştür. Kuvvet-deplasman grafiklerinde yükleme bölgesinde eğrinin eğimi ile belirtilen eğilme rijitliğinin nano katkılandırmadan çok fazla etkilenmediği, iç basınçlandırma koşullarından ise etkilenecek arttığı belirlenmiştir.
- c) İç basınçlı ve iç basınçsız koşullarda ve 5,10 ve 15 J darbe enerjileri yapılan tüm testlere ait enerji-zaman grafiklerinde BNNP, ÇCKNT ve ÇCKNT+BNNP kullanılarak üretilen tüm numunelerde saf epoksili olanlara oranla daha az enerji absorpsiyonu ve daha yüksek geri sekme enerjisi değeri elde edilmiştir. Enerji absorpsiyon değeri iç basınçlandırma koşullarından da etkilenmektedir. 12 Bar iç basınçlı durumda iç basınçsız koşullara göre daha fazla geri sekme enerjisi ve daha az enerji absorpsiyonu görülmüştür. Absorbe edilen enerjinin numunedeki hasar oluşumu için kullanıldığı, geri sekme enerjisinin de sisteme geri verilen enerji olduğu düşünüldüğünde nano katkılı numunelerde darbe direncinin arttırıldığı görülmektedir. Absorbe edilen enerjinin en az ve geri sekme enerjisinin en fazla olduğu 15 J darbe enerjisi ile 12 Bar iç basınçlı koşullarda saf epoksili numunede absorbe edilen enerji 12.18 geri sekme enerjisi ise 2.82 olarak ölçülmüştür. Buna göre saf epoksili numuneye göre BNNP içeren numunede geri sekme enerjisi %12.41, ÇCKNT içeren numunede %20.57 ve ÇCKNT+BNNP içeren numunede %30.85 artış göstermiştir. Bu sonuç nano katkılandırmanın numunenin enerji absorpsiyon özelliklerini iyileştirdiğini göstermektedir.

- d) 12 Bar iç basınçlı durumda yapılan düşük hızlı darbe testlerine ait iç basınç değişimi ölçümlerinde, 5, 10 ve 15 J enerji seviyeleri için darbe esnasında en fazla iç basınç değişimi ve artışı saf epoksili matrise sahip kompozit boru numunelerde belirlenmiştir. Kompozit boruların üretiminde kullanılan epoksi matrisin ÇCKNT, BNNP ve ÇCKNT+BNNP ile katkılanması ile darbe esnasında iç basınç değişiminin saf epoksili duruma göre azaldığı belirlenmiştir. İç basınç değişiminin numunelerde darbe etkisi ile çökme ve şok etkisine bağlı olarak etkilenmesinden dolayı bu sonucun nano katkılandırma ile rijitliğin artırılması ve sökmenin azalması ile ilişkilendirilmektedir.
- 9- Darbe testleri sonucu hasar bölgesinden alınan numunelerin kesitinin incelenmesi sonucunda genel olarak numunelerde tabaka ayrılması, matris çatlaması ve delaminasyonlara rastlanmıştır. Hasar oluşumunun miktarı bakımından en yüksekten en aza doğru hasar saf epoksili, BNNP katkılı, ÇCKNT katkılı ve ÇCKNT+BNNP katkılı numunede meydana geldiği belirlenmiştir. Darbe enerjisinin artması ile tüm numunelerde oluşan hasar miktarı artmış, iç basınçlandırma ile ise hasar oluşumu azalmıştır.
- 10- Numunelerin iç yüzeylerindeki oluşan darbe hasarları incelendiğinde en fazla hasar saf epoksili numunede görülmüştür. Tüm numuneler için oluşan hasarlar genellikle sarım açısı doğrultusunda oluşan matris çatlamaları ve fiber matris arayüz ayrılması şeklindedir. En az hasar ise sırasıyla ÇCKNT+BNNP katkılı, ÇCKNT katkılı, BNNP katkılı ve saf epoksili matrise sahip kompozit boru numunede belirlenmiştir.
- 11- Hasar bölgelerinin SEM görüntüsü ile incelemelerinde epoksi içerisine katılan ÇCKNT ve/veya BNNP'lerin fiber yüzeyinde herhangi bir modifikasyon ya da kullanılan nano malzemelerde herhangi bir fonksiyonelleştirme yapılmasa bile etkileyerek daha iyi fiber-matris ara yüz bağlantısı sağladığı belirlenmiştir. ÇCKNT'lerin fiber sıyrılması, çatlak köprüleme gibi mekanizmalar, BNNP'lerin ise çatlak yönü değiştirme gibi mekanizmalar ile epoksi matrisin mekanik özelliklerini etkileyerek geliştirdiği belirlenmiştir.
- 12- Genel olarak sonuçlar incelendiğinde;
- a) Nano katkının patlama basıncı ve darbe direncine etkisi kullanılan nano malzeme özelliklerinden etkilendiği, BNNP veya ÇCKNT kullanılması ile değişiklik gösterdiği,

- b) ÇCKNT ve BNNP kullanımı ile epoksi matris kompozit borularda darbe enerjisi absorpsiyon özelliklerinin iyileştirildiği,
- c) ÇCKNT'lerin BNNP'lere oranla daha iyi mekanik özellikler gösterdiği,
- d) BNNP'lerin daha iyi termal özellikler gösterdiği,
- e) ÇCKNT ile BNNP'lerin bir arada kullanıldıkları numunelerde bu nano malzemelerin ayrı ayrı kullanılmalarından daha yüksek oranda iyileştirme görüldüğü,

Buradan ÇCKNT ve BNNP'lerin farklı mekanizmalar ile epoksi matrisi etkilediği, mekanik özelliklerini iyileştirdiği ve bir arada kullanılmaları halinde sinerjik etki göstererek ayrı ayrı kullanılmaların daha iyi mekanik özellikler gösterdikleri sonuçlarına ulaşılmıştır.

6.2. Öneriler

- 1- ÇCKNT ve/veya BNNP ile katkılandırılan epoksi matrise sahip filaman sarım kompozit borularda tuzlu su, korozyif ortam, ortam sıcaklığı gibi etmenlerin belirlenmesi için farklı şartlandırma koşulları sağlanarak bu durumlarda nano katkının etkisi belirlenebilir.
- 2- Farklı nano malzemeler ile üretim gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar kıyaslanabilir.

EKLER

EK 1. DÜŞÜK HIZLI DARBENİN KİNETİK ANALİZİ

A1. Darbe Başlangıç Şartları

$$F_0=0 \text{ N,}$$

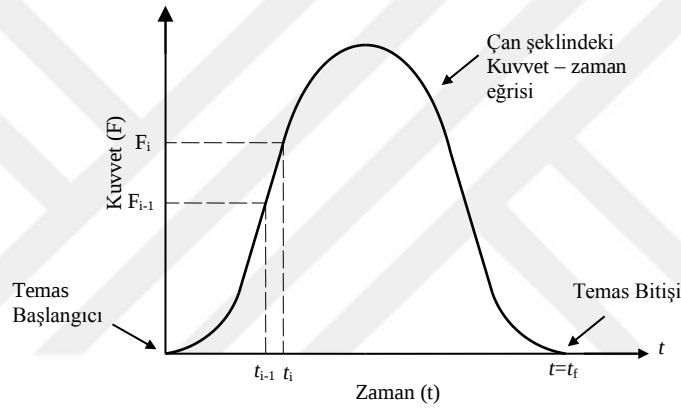
$$a_0=0 \text{ m/s}^2$$

$$m: \text{ etkin kütle}=6.35 \text{ kg}$$

$$t_0=0 \text{ s}$$

$$v_0= \text{ Vurucunun numuneye ilk temastaki hızı m/s}$$

Düşük hızlı darbede genel olarak elde edilen kuvvetin zamana bağlı olarak değişimi Şekil A1’de görüldüğü gibidir.



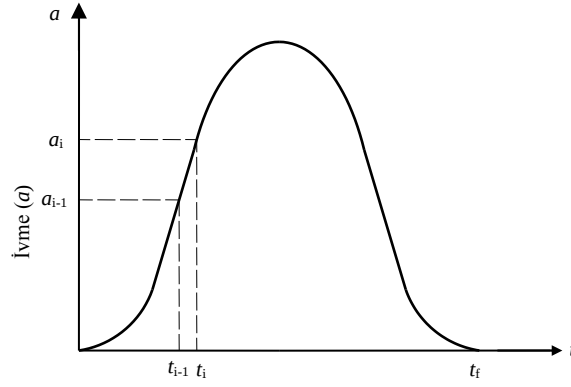
Şekil A1 Kuvvetin zamana göre değişimi

A.2 İvme Değişiminin Elde Edilmesi

Merkezi çarpışma için $t=t_i$ anındaki ivme Newton’un 2. kanunu yardımıyla hesaplanır:

$$a_i = \frac{F_i}{m} \quad (\text{A.1})$$

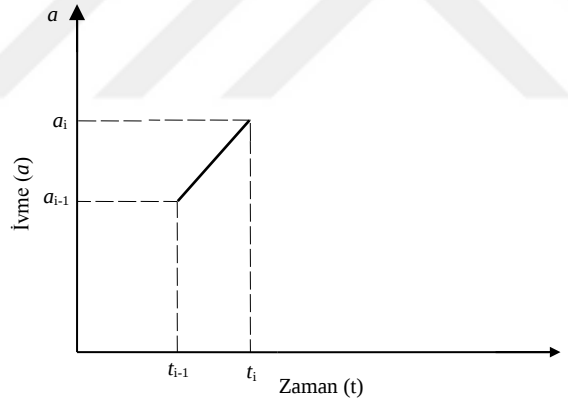
Burada F_i , t_i anında kuvvet algılayıcıdan elde edilen kuvvet değeridir. İvmenin zamana göre değişimi, kuvvet-zaman grafiğine benzemektedir.



Şekil A2 İvmenin zamana göre değişimi

Şekil A2'den görüleceği üzere ivme zamana en az 2. dereceden bağlıdır. Δt zaman aralığı çok küçük olduğunda bu değişim 1. dereceden kabul edilebilir. Deney sonuçları 1. dereceden ve 2 dereceden yaklaşımla değerlendirildiğinde elde edilen sonuçlar arasında ihmal edilecek kadar küçük farklar elde edilmiştir. Bu nedenle ifadelerin basitliği ve hesap kolaylığı açısından 1. dereceden yaklaşım ile denklemler türetilerek açıklanacaktır.

A.2.1 İvmenin Δt aralığında doğrusal değişimi (1. dereceden yaklaşım)



Şekil A3 1.dereceden yaklaşımla ivme-zaman değişimi

İki noktadan yalnızca bir doğru geçer. (a_{i-1}, t_{i-1}) ile (a_i, t_i) noktalarından geçen doğrunun denklemi,

$$a(t) = kt + c \quad (\text{A.2})$$

Şeklinde olup,

Burada k doğrunun eğimini belirtir ,

$$k = \frac{a_i - a_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (\text{A.3})$$

ve c ,

$$c = \frac{t_i a_{i-1} - t_{i-1} a_i}{t_i - t_{i-1}} \quad (\text{A.4})$$

$$a(t) = \frac{dv}{dt}, \quad dv = a(t)dt \quad (\text{A.5})$$

(A.5) yardımıyla hız,

$$v = v_0 + \frac{1}{2}k(t^2 - t_0^2) + c(t - t_0) \quad (\text{A.6})$$

t_{i-1} ve t_i zaman aralığı için (A.6) denklemi düzenlenirse,

$$v_i = v_{i-1} + \frac{1}{2}k_i(t_i^2 - t_{i-1}^2) + c_i(t_i - t_{i-1}) \quad (\text{A.7})$$

Yer deęiřtirmeler ise,

$$v = \frac{ds}{dt}, \quad ds = vdt \quad (\text{A.8})$$

(A.8) denkleminde (A.6) daki v ifadesini yerine koyarsak

$$s = s_0 + \frac{1}{6}k(t^3 - t_0^3) + \frac{1}{2}c(t^2 - t_0^2) - (v_0 + ct_0 + \frac{1}{2}kt_0^2)(t - t_0) \quad (\text{A.9})$$

t_{i-1} ve t_i zaman aralığında yer değiştirme,

$$s_i = s_{i-1} + \frac{1}{6}k_i(t_i^3 - t_{i-1}^3) + \frac{1}{2}c_i(t_i^2 - t_{i-1}^2) - (v_{i-1} + c_i t_{i-1} + \frac{1}{2}k_i t_{i-1}^2)(t_i - t_{i-1}) \quad (\text{A.10})$$

Böylece N çift (F_i, t_i) kuvvet-zaman verilerinden N çift (F_i, s_i) kuvvet-yer değiştirme değerleri elde edilir.

A.3 Düşük hızlı darbe neticesinde deney numunesi tarafından yutulan enerjinin bulunması

Kütlenin hareket süresince değişmesi halinde Newton'un ikinci kanunu:

$$F = \frac{d(mv)}{dt} \quad (A.11)$$

Burada $m.v$ terimi lineer momentum p dir. Kütlenin sabit olması halinde (A.11) denklemi;

$$Fdt = d(mv) = mdv \quad (A.12)$$

şeklini alır.

$$\int_{t_1}^{t_2} Fdt = \int_{v_1}^{v_2} mdv \quad (A.13)$$

Eşitliğindeki sol tarafta bulunan entegral, kuvvet-zaman eğrisi altındaki alanı verir ve impuls kuvveti olarak isimlendirilir. İmpuls kuvveti J ile gösterilir.

$$J = \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{dp}{dt} \right) dt = p_{t_2} - p_{t_1} = p_{final} - p_{initial} = \Delta p = m \quad (A.14)$$

(A.14) den impuls kuvvetinin J 'nin lineer momentumdaki değişimine eşit olduğu görülür.

$$\int_{t_{01}}^t Fvdt = \int_v^v vdp = \frac{1}{2} m(v_2^2 - v_1^2) \quad (A.15)$$

(A.15) eşitliğinin sağ tarafının kinetik enerjideki değişime eşit olduğu görülmektedir. Bu da numune tarafından yutulan enerjiyi belirtmektedir.

KAYNAKLAR

- Abbasi, S., Carreau, P. J. and Derdouri, A., 2010, Flow induced orientation of multiwalled carbon nanotubes in polycarbonate nanocomposites: Rheology, conductivity and mechanical properties, *Polymer*, 51, 4, 922-35.
- Abdalla, M., Dean, D., Robinson, P. and Nyairo, E., 2008, Cure behavior of epoxy/MWCNT nanocomposites: The effect of nanotube surface modification, *Polymer*, 49, 15, 3310-7.
- Alderson, K. L. and Evans, K. E., 1992, Failure Mechanisms during the Transverse Loading of Filament-Wound Pipes under Static and Low Velocity Impact Conditions, *Composites*, 23, 3, 167-73.
- Andrews, R. and Weisenberger, M. C., 2004, Carbon nanotube polymer composites, *Curr Opin Solid St M*, 8, 1, 31-7.
- ANSI AWWA C950, 1996, AWWA Standard for Fiberglass Pressure Pipe, AWWA.
- ASTM D1599-99, 2005, Standard Test Method for Resistance to Short-Time Hydraulic Pressure of Plastic Pipe, Tubing, and Fittings, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2290-12, 2012, Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2584-11, 2011, Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bakshi, S. R., Lahiri, D. and Agarwal, A., 2010, Carbon nanotube reinforced metal matrix composites - a review, *Int Mater Rev*, 55, 1, 41-64.
- Bal, S. and Samal, S. S., 2007, Carbon nanotube reinforced polymer composites - A state of the art, *B Mater Sci*, 30, 4, 379-86.
- Bekyarova, E., Thostenson, E. T., Yu, A., Itkis, M. E., Fakhrutdinov, D., Chou, T. W. and Haddon, R. C., 2007, Functionalized single-walled carbon nanotubes for carbon fiber-epoxy composites, *J Phys Chem C*, 111, 48, 17865-71.
- Belingardi, G. and Vadori, R., 2002, Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates, *Int J Impact Eng*, 27, 2, 213-29.
- Blanco, J., Garcia, E. J., De Villoria, R. G. and Wardle, B. L., 2009, Limiting Mechanisms of Mode I Interlaminar Toughening of Composites Reinforced with Aligned Carbon Nanotubes, *J Compos Mater*, 43, 8, 825-41.
- Breuer, O. and Sundararaj, U., 2004, Big returns from small fibers: A review of polymer/carbon nanotube composites, *Polym Composite*, 25, 6, 630-45.

- Broyles, N. S., Chan, R., Davis, R. M., Lesko, J. J. and Riffle, J. S., 1998, Sizing of carbon fibres with aqueous solutions of poly(vinyl pyrrolidone), *Polymer*, 39, 12, 2607-13.
- Byrd, L. W. and Birman, V., 2006, Effectiveness of z-pins in preventing delamination of co-cured composite joints on the example of a double cantilever test, *Compos Part B-Eng*, 37, 4-5, 365-78.
- Cartie, D. D. R. and Irving, P. E., 2002, Effect of resin and fibre properties on impact and compression after impact performance of CFRP, *Compos Part a-Appl S*, 33, 4, 483-93.
- Chawla, K. K., 2012. Composite Materials Science and Engineering, Birmingham, Springer, p.
- Chen, J., Ramasubramaniam, R., Xue, C. and Liu, H., 2006, A versatile, molecular engineering approach to simultaneously enhanced, multifunctional carbon-nanotube-polymer composites, *Adv Funct Mater*, 16, 1, 114-9.
- Chiang, T. H. and Hsieh, T. E., 2006, A study of encapsulation resin containing hexagonal boron nitride (hBN) as inorganic filler, *J Inorg Organomet P*, 16, 2, 175-83.
- Chou, T. W., Gao, L. M., Thostenson, E. T., Zhang, Z. G. and Byun, J. H., 2010, An assessment of the science and technology of carbon nanotube-based fibers and composites, *Compos Sci Technol*, 70, 1, 1-19.
- Coleman, J. N., Khan, U. and Gun'ko, Y. K., 2006, Mechanical reinforcement of polymers using carbon nanotubes, *Adv Mater*, 18, 6, 689-706.
- Davies, G. A. O., Hitchings, D. and Zhou, G., 1996, Impact damage and residual strengths of woven fabric glass/polyester laminates, *Compos Part a-Appl S*, 27, 12, 1147-56.
- Davies, G. A. O. and Zhang, X., 1995, Impact Damage Prediction in Carbon Composite Structures, *Int J Impact Eng*, 16, 1, 149-70.
- Davies, G. A. O., Zhang, X., Zhou, G. and Watson, S., 1994, Numerical Modeling of Impact Damage, *Composites*, 25, 5, 342-50.
- De Greef, N., Gorbatikh, L., Lomov, S. V. and Verpoest, I., 2011, Damage development in woven carbon fiber/epoxy composites modified with carbon nanotubes under tension in the bias direction, *Compos Part a-Appl S*, 42, 11, 1635-44.
- de la Vega, A., Kinloch, I. A., Young, R. J., Bauhofer, W. and Schulte, K., 2011, Simultaneous global and local strain sensing in SWCNT-epoxy composites by Raman and impedance spectroscopy, *Compos Sci Technol*, 71, 2, 160-6.
- Fan, Z., 2007. Flow and rheology of multi-walled carbon nanotubes thermoset resin suspensions in processing of glass fiber composites, University of Delaware, p.

- Fiedler, B., Gojny, F. H., Wichmann, M. H. G., Nolte, M. C. M. and Schulte, K., 2006, Fundamental aspects of nano-reinforced composites, *Compos Sci Technol*, 66, 16, 3115-25.
- Fraga, F., Vazquez, E. C., Rodríguez-Núñez, E. and Martínez-Ageitos, J. M., 2008, Curing kinetics of the epoxy system diglycidyl ether of bisphenol A/isophoronediamine by Fourier transform infrared spectroscopy, *Polym Advan Technol*, 19, 11, 1623-8.
- Frankland, S. J. V., Caglar, A., Brenner, D. W. and Griebel, M., 2002, Molecular simulation of the influence of chemical cross-links on the shear strength of carbon nanotube-polymer interfaces, *J Phys Chem B*, 106, 12, 3046-8.
- Ganguli, S., Aglan, H. and Dean, D., 2005, Microstructural origin of strength and toughness of epoxy nanocomposites, *J Elastom Plast*, 37, 1, 19-35.
- Garcia, E. J., Wardle, B. L. and Hart, A. J., 2008, Joining prepreg composite interfaces with aligned carbon nanotubes, *Compos Part a-Appl S*, 39, 6, 1065-70.
- Garg, P., Singh, B. P., Kumar, G., Gupta, T., Pandey, I., Seth, R. K., Tandon, R. P. and Mathur, R. B., 2011, Effect of dispersion conditions on the mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes based epoxy resin composites, *J Polym Res*, 18, 6, 1397-407.
- Gatti, T., Vicentini, N., Mba, M. and Menna, E., 2016, Organic Functionalized Carbon Nanostructures for Functional Polymer-Based Nanocomposites, *Eur J Org Chem*, 6, 1071-90.
- Gemi, L., Tarakcioglu, N., Akdemir, A. and Sahin, O. S., 2009, Progressive fatigue failure behavior of glass/epoxy (+/- 75)(2) filament-wound pipes under pure internal pressure, *Mater Design*, 30, 10, 4293-8.
- Gibson, R. F., Ayorinde, E. O. and Wen, Y. F., 2007, Vibrations of carbon nanotubes and their composites: A review, *Compos Sci Technol*, 67, 1, 1-28.
- Gning, P. B., Tarfaoui, M., Collombet, F. and Davies, P., 2005, Prediction of damage in composite cylinders after impact, *J Compos Mater*, 39, 10, 917-28.
- Godara, A., Mezzo, L., Luizi, F., Warriar, A., Lomov, S. V., van Vuure, A. W., Gorbatikh, L., Moldenaers, P. and Verpoest, I., 2009, Influence of carbon nanotube reinforcement on the processing and the mechanical behaviour of carbon fiber/epoxy composites, *Carbon*, 47, 12, 2914-23.
- Gong, X. Y., Liu, J., Baskaran, S., Voise, R. D. and Young, J. S., 2000, Surfactant-assisted processing of carbon nanotube/polymer composites, *Chem Mater*, 12, 4, 1049-52.
- Han, J. T. and Cho, K., 2006, Nanoparticle-induced enhancement in fracture toughness of highly loaded epoxy composites over a wide temperature range, *J Mater Sci*, 41, 13, 4239-45.

- Hirai, Y., Hamada, H. and Kim, J. K., 1998, Impact response of woven glass-fabric composites - I. Effect of fibre surface treatment, *Compos Sci Technol*, 58, 1, 91-104.
- Huang, Y. Y. and Terentjev, E. M., 2012, Dispersion of Carbon Nanotubes: Mixing, Sonication, Stabilization, and Composite Properties, *Polymers-Basel*, 4, 1, 275-95.
- Ishida, H., Campbell, S. and Blackwell, J., 2000, General approach to nanocomposite preparation, *Chem Mater*, 12, 5, 1260-7.
- Ishida, H. and Rimdusit, S., 1998, Very high thermal conductivity obtained by boron nitride-filled polybenzoxazine, *Thermochim Acta*, 320, 1-2, 177-86.
- Jia, X. L., Zhu, J. M., Li, W. B., Chen, X. P. and Yang, X. P., 2015, Compressive and tensile response of CFRP cylinders induced by multi-walled carbon nanotubes, *Compos Sci Technol*, 110, 35-44.
- Kamigaito, O., 1991, What Can Be Improved by Nanometer Composites?, *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 38, 3, 315-21.
- Kara, M., 2012, Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yama ile Tamir Edilmiş Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı, *Doktora Tezi*, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kerr, C. J., Huang, Y. Y., Marshall, J. E. and Terentjev, E. M., 2011, Effect of filament aspect ratio on the dielectric response of multiwalled carbon nanotube composites, *J Appl Phys*, 109, 9.
- Kim, S. J., Goo, N. S. and Kim, T. W., 1997, The effect of curvature on the dynamic response and impact-induced damage in composite laminates, *Compos Sci Technol*, 57, 7, 763-73.
- Kruis, F. E., Fissan, H. and Peled, A., 1998, Synthesis of nanoparticles in the gas phase for electronic, optical and magnetic applications - A review, *J Aerosol Sci*, 29, 5-6, 511-35.
- Lalwani, G., Henslee, A. M., Farshid, B., Lin, L. J., Kasper, F. K., Qin, Y. X., Mikos, A. G. and Sitharaman, B., 2013, Two-Dimensional Nanostructure-Reinforced Biodegradable Polymeric Nanocomposites for Bone Tissue Engineering, *Biomacromolecules*, 14, 3, 900-9.
- Lalwani, G., Henslee, A. M., Farshid, B., Parmar, P., Lin, L. J., Qin, Y. X., Kasper, F. K., Mikos, A. G. and Sitharaman, B., 2013, Tungsten disulfide nanotubes reinforced biodegradable polymers for bone tissue engineering, *Acta Biomater*, 9, 9, 8365-73.
- Li, W. K., Dichiara, A. and Bai, J. B., 2013, Carbon nanotube-graphene nanoplatelet hybrids as high-performance multifunctional reinforcements in epoxy composites, *Compos Sci Technol*, 74, 221-7.

- Liu, L. Q. and Wagner, H. D., 2005, Rubbery and glassy epoxy resins reinforced with carbon nanotubes, *Compos Sci Technol*, 65, 11-12, 1861-8.
- Lordi, V., Ma, S. X. C. and Yao, N., 1999, Towards probing pentagons on carbon nanotube tips, *Surf Sci*, 421, 1-2, L150-L5.
- Manias, E., 2007, Nanocomposites - Stiffer by design, *Nat Mater*, 6, 1, 9-11.
- Marasco, A. I., Cartie, D. D. R., Partridge, I. K. and Rezai, A., 2006, Mechanical properties balance in novel Z-pinned sandwich panels: Out-of-plane properties, *Compos Part a-Appl S*, 37, 2, 295-302.
- Matemilola, S. A. and Stronge, W. J., 1997, Low-speed impact damage in filament-wound CFRP composite pressure vessels, *J Press Vess-T Asme*, 119, 4, 435-43.
- Moghadam, R. M., Hosseini, S. A. and Salehi, M., 2014, The influence of Stone-Thrower-Wales defect on vibrational characteristics of single-walled carbon nanotubes incorporating Timoshenko beam element, *Physica E*, 62, 80-9.
- Moniruzzaman, M. and Winey, K. I., 2006, Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes, *Macromolecules*, 39, 16, 5194-205.
- Morozov, E. V., 2006, The effect of filament-winding mosaic patterns on the strength of thin-walled composite shells, *Compos Struct*, 76, 1-2, 123-9.
- Nag, A., Raidongia, K., Hembram, K. P. S. S., Datta, R., Waghmare, U. V. and Rao, C. N. R., 2010, Graphene Analogues of BN: Novel Synthesis and Properties, *Acs Nano*, 4, 3, 1539-44.
- Natsuki, T., Takayanagi, H., Tsuda, H. and Kemmochi, K., 2003, Prediction of bending strength for filament-wound composite pipes, *J Reinf Plast Comp*, 22, 8, 695-710.
- Pegel, S., Potschke, P., Petzold, G., Alig, I., Dudkin, S. M. and Lellinger, D., 2008, Dispersion, agglomeration, and network formation of multiwalled carbon nanotubes in polycarbonate melts, *Polymer*, 49, 4, 974-84.
- Rousseau, J., Perreux, D. and Verdiere, N., 1999, The influence of winding patterns on the damage behaviour of filament-wound pipes, *Compos Sci Technol*, 59, 9, 1439-49.
- Sahin, O. S., Akdemir, A., Avci, A. and Gemi, L., 2009, Fatigue Crack Growth Behavior of Filament Wound Composite Pipes in Corrosive Environment, *J Reinf Plast Comp*, 28, 24, 2957-70.
- Samanci, A., Avci, A., Tarakcioglu, N. and Sahin, O. S., 2008, Fatigue crack growth of filament wound GRP pipes with a surface crack under cyclic internal pressure, *J Mater Sci*, 43, 16, 5569-73.

- Sanchez, M., Campo, M., Jimenez-Suarez, A. and Urena, A., 2013, Effect of the carbon nanotube functionalization on flexural properties of multiscale carbon fiber/epoxy composites manufactured by VARIM, *Compos Part B-Eng*, 45, 1, 1613-9.
- Sayer, M., Bektas, N. B., Sayman, O. and Topcu, M., 2009, An Experimental Investigation on the Impact Behaviour of Glass/Epoxy and Hybrid Composite Plates, *Adv Compos Lett*, 18, 4, 113-22.
- Schadler, L. S., Giannaris, S. C. and Ajayan, P. M., 1998, Load transfer in carbon nanotube epoxy composites, *Appl Phys Lett*, 73, 26, 3842-4.
- Schoeppner, G. A. and Abrate, S., 2000, Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates, *Compos Part a-Appl S*, 31, 9, 903-15.
- Shaffer, M. S. P. and Windle, A. H., 1999, Fabrication and characterization of carbon nanotube/poly(vinyl alcohol) composites, *Adv Mater*, 11, 11, 937-+.
- Shi, D. L., He, P., Lian, J., Chaud, X., Bud'ko, S. L., Beaugnon, E., Wang, L. M., Ewing, R. C. and Tournier, R., 2005, Magnetic alignment of carbon nanofibers in polymer composites and anisotropy of mechanical properties, *J Appl Phys*, 97, 6.
- Shyr, T. W. and Pan, Y. H., 2003, Impact resistance and damage characteristics of composite laminates, *Compos Struct*, 62, 2, 193-203.
- Sinha, S. K., Reddy, S. U. and Gupta, M., 2006, Scratch hardness and mechanical property correlation for Mg/SiC and Mg/SiC/Ti metal-matrix composites, *Tribol Int*, 39, 2, 184-9.
- Song, Y. S. and Youn, J. R., 2005, Influence of dispersion states of carbon nanotubes on physical properties of epoxy nanocomposites, *Carbon*, 43, 7, 1378-85.
- Spencer S., B. H., 1978, Effect of winding angle on the failure of filament wound pipe., *Composites*, 9.
- Spitalsky, Z., Matejka, L., Slouf, M., Konyushenko, E. N., Kovarova, J., Zemek, J. and Koteck, J., 2009, Modification of Carbon Nanotubes and Its Effect on Properties of Carbon Nanotube/Epoxy Nanocomposites, *Polym Composite*, 30, 10, 1378-87.
- Sun, L. Y., Gibson, R. F., Gordaninejad, F. and Suhr, J., 2009, Energy absorption capability of nanocomposites: A review, *Compos Sci Technol*, 69, 14, 2392-409.
- Swanson, S. R. and Smith, L. V., 1996, Comparison of the biaxial strength properties of braided and laminated carbon fiber composites, *Compos Part B-Eng*, 27, 1, 71-7.
- Takeichi, N., Senoh, H., Yokota, T., Tsuruta, H., Hamada, K., Takeshita, H. T., Tanaka, H., Kiyobayashi, T., Takano, T. and Kuriyama, N., 2003, "Hybrid hydrogen storage vessel", a novel high-pressure hydrogen storage vessel combined with hydrogen storage material, *Int J Hydrogen Energ*, 28, 10, 1121-9.
- Tarakcioglu, N., Akdemir, A. and Avci, A., 2001, Strength of filament wound GRP pipes with surface crack, *Compos Part B-Eng*, 32, 2, 131-8.

- Thostenson, E. T. and Chou, T. W., 2003, On the elastic properties of carbon nanotube-based composites: modelling and characterization, *J Phys D Appl Phys*, 36, 5, 573-82.
- Thostenson, E. T., Li, C. Y. and Chou, T. W., 2005, Nanocomposites in context, *Compos Sci Technol*, 65, 3-4, 491-516.
- Thostenson, E. T., Li, W. Z., Wang, D. Z., Ren, Z. F. and Chou, T. W., 2002, Carbon nanotube/carbon fiber hybrid multiscale composites, *J Appl Phys*, 91, 9, 6034-7.
- Thostenson, E. T., Ren, Z. F. and Chou, T. W., 2001, Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review, *Compos Sci Technol*, 61, 13, 1899-912.
- Tian, Z. T., Hu, H. and Sun, Y., 2013, A molecular dynamics study of effective thermal conductivity in nanocomposites, *Int J Heat Mass Tran*, 61, 577-82.
- Ulus, H., Ustun, T., Eskizeybek, V., Sahin, O. S., Avci, A. and Ekrem, M., 2014, Boron nitride-MWCNT/epoxy hybrid nanocomposites: Preparation and mechanical properties, *Appl Surf Sci*, 318, 37-42.
- Ulus, H., Ustun, T., Sahin, O. S., Karabulut, S. E., Eskizeybek, V. and Avci, A., 2016, Low-velocity impact behavior of carbon fiber/epoxy multiscale hybrid nanocomposites reinforced with multiwalled carbon nanotubes and boron nitride nanoplates, *J Compos Mater*, 50, 6, 761-70.
- Ustun, T., Ulus, H., Karabulut, S. E., Eskizeybek, V., Sahin, O. S., Avci, A. and Demir, O., 2016, Evaluating the effectiveness of nanofillers in filament wound carbon/epoxy multiscale composite pipes, *Compos Part B-Eng*, 96, 1-6.
- Uyaner, M. and Kara, M., 2012, Experimental study of the impact behavior of laminated composites stricken by sharp impactors, *Sci Eng Compos Mater*, 19, 3, 307-13.
- Vasiliev, V. V., Krikanov, A. A. and Razin, A. F., 2003, New generation of filament-wound composite pressure vessels for commercial applications, *Compos Struct*, 62, 3-4, 449-59.
- Verma, V., Jindal, V. K. and Dharamvir, K., 2007, Elastic moduli of a boron nitride nanotube, *Nanotechnology*, 18, 43.
- Vlasveld, D. P. N., Parlevliet, P. P., Bersee, H. E. N. and Picken, S. J., 2005, Fibre-matrix adhesion in glass-fibre reinforced polyamide-6 silicate nanocomposites, *Compos Part a-Appl S*, 36, 1, 1-11.
- Weisenberger, M. C., Grulke, E. A., Jacques, D., Rantell, T. and Andrews, R., 2003, Enhanced mechanical properties of polyacrylonitrile/multiwall carbon nanotube composite fibers, *J Nanosci Nanotechnol*, 3, 6, 535-9.

- Wetzel, B., Rosso, P., Hauptert, F. and Friedrich, K., 2006, Epoxy nanocomposites - fracture and toughening mechanisms, *Eng Fract Mech*, 73, 16, 2375-98.
- Xi, W. J., Yin, S., Guo, S. J. and Lai, H. Y., 2000, Stainless steel lined composite steel pipe prepared by centrifugal-SHS process, *J Mater Sci*, 35, 1, 45-8.
- Xia, M., Takayanagi, H. and Kemmochi, K., 2001, Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under internal pressure, *Compos Struct*, 53, 4, 483-91.
- Xie, X. L., Mai, Y. W. and Zhou, X. P., 2005, Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix: A review, *Mat Sci Eng R*, 49, 4, 89-112.
- Yokozeki, T., Iwahori, Y. and Ishiwata, S., 2007, Matrix cracking behaviors in carbon fiber/epoxy laminates filled with cup-stacked carbon nanotubes (CSCNTs), *Compos Part a-Appl S*, 38, 3, 917-24.
- Zhang, H., Zhang, Z., Friedrich, K. and Eger, C., 2006, Property improvements of in situ epoxy nanocomposites with reduced interparticle distance at high nanosilica content, *Acta Mater*, 54, 7, 1833-42.
- Zhang, S., Sun, D., Fu, Y. Q. and Du, H. J., 2003, Recent advances of superhard nanocomposite coatings: a review, *Surf Coat Tech*, 167, 2-3, 113-9.
- Zhang, W., Picu, R. C. and Koratkar, N., 2008, The effect of carbon nanotube dimensions and dispersion on the fatigue behavior of epoxy nanocomposites, *Nanotechnology*, 19, 28.
- Zhang, X., 1998, Impact damage in composite aircraft structures - experimental testing and numerical simulation, *P I Mech Eng G-J Aer*, 212, G4, 245-59.
- Zhi, C. Y., Bando, Y., Terao, T., Tang, C. C., Kuwahara, H. and Golberg, D., 2009, Towards Thermoconductive, Electrically Insulating Polymeric Composites with Boron Nitride Nanotubes as Fillers, *Adv Funct Mater*, 19, 12, 1857-62.
- Zhou, G., 1998, The use of experimentally-determined impact force as a damage measure in impact damage resistance and tolerance of composite structures, *Compos Struct*, 42, 4, 375-82.
- Zhou, W. Y., Qi, S. H., Li, H. D. and Shao, S. Y., 2007, Study on insulating thermal conductive BN/HDPE composites, *Thermochim Acta*, 452, 1, 36-42.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Salim Eğemen KARABULUT
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : Isparta / 23.04.1984
Telefon : 0533 351 97 76
Faks :
e-mail : egemak@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Muhittin Güzelkılınç Lisesi	2002
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi	2006
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi	2009
Doktora	: Selçuk Üniversitesi	2017

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2006	Doğacan Ltd. Şti.	Proje Müh.
2007	Doğdular Müh. Ltd. Şti.	Proje Müh.
2014	NYener Ltd. Şti.	Yönetim Sis. Müh.

UZMANLIK ALANI

Nano Malzemeler
 Kompozit Malzemeler
 Malzemelerin Mekanik Özellikleri

YABANCI DİLLER

İngilizce
 Almanca

YAYINLAR

Eskizeybek V, **Karabulut E.S**, Avcı A., 2011, Synthesis of Carbon Nanostructures and CaCO₃ Nanoparticles by Arc Discharge in Mineral Water, Journal of Nano Research Vol. 15 (2011) pp 57-67 doi:10.4028/www.scientific.net/JNanoR.15.57

Üstün T., Ulus H., **Karabulut S. E**, Eskizeybek V, Şahin Ö.S., Avcı A., Demir O, 2016, Evaluating the Effectiveness of Nanofillers in Filament Wound Carbon / Epoxy Multiscale Composite Pipes, Composites Part B; doi:10.1016/j.compositesb.2016.04.031

Ulus H., Üstün T., Şahin Ö.S., **Karabulut S.E.**, Eskizeybek V., Avcı A., 2015, Low-velocity impact behavior of carbon fiber/epoxy multiscale hybrid nanocomposites reinforced with multiwalled carbon nanotubes and boron nitride nanoplates; Journal of composite materials, doi:10.1177/0021998315580835

