



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**ELEKTRO-EĞİRME YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ ÇOK CİDARLI
KARBON NANOTÜP (ÇCKNT) TAKVİYELİ POLİVİNİL ALKOL
(PVA) NANO-KEÇE BARINDIRAN KOMPOZİT LEVHALARIN
MEKANİK DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ**

Ünal ÖZTEN

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2020
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

ÜNAL ÖZTEN tarafından hazırlanan “Elektro-Eğirme Yöntemiyle Üretilmiş Çok Cidarlı Karbon Nanotüp (ÇCKNT) Takviyeli Polivinil Alkol (PVA) Nano-Keçe Barındıran Kompozit Levhaların Mekanik Davranışlarının Belirlenmesi” adlı tez çalışması 31/01/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Danışman

Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

Üye

Prof. Dr. Behcet DAĞHAN

Üye

Doç. Dr. Necati ATABERK

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Gürol ÖNAL

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

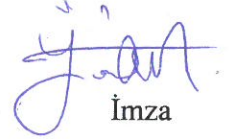
Bu tez çalışması BAP tarafından 17201085 nolu proje ile desteklenmiştir.

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.


İmza

Ünal ÖZTEN

27.02/2020

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ELEKTRO-EĞİRME YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ ÇOK CİDARLI KARBON NANOTÜP (ÇCKNT) TAKVİYELİ POLİVİNİL ALKOL (PVA) NANO-KEÇE BARINDIRAN KOMPOZİT LEVHALARIN MEKANİK DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ

Ünal ÖZTEN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
İkinci Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mürsel EKREM

2020, 164 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Prof. Dr. Ahmet AVCI
Prof. Dr. Behcet DAĞHAN
Doç. Dr. Necati ATABERK
Dr. Öğr. Üyesi Gürol ÖNAL

Bu çalışmada, oda sıcaklığında elektro-eğirme yöntemiyle üretilmiş farklı oranlarda (ağırlıkça %1, %2 ve %3) Çok Cidarlı Karbon Nanotüp (ÇCKNT) takviyeli Polivinil Alkol (PVA) nano keçe barındıran cam elyaf kompozit levhaların mekanik özellikleri ve kırılma davranışlarının standart mekanik deneyler yardımıyla tayin edilmesi amaçlanmıştır. Bunun için ilk olarak, ÇCKNT takviyeli PVA kullanılarak elektro eğirme yöntemiyle nanoelyaf keçeler üretilmiştir. Üretilen nanoelyaf keçelerin morfolojik yapılarının incelenmesi amacıyla Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) görüntüleri alınarak analiz edilmiştir. Son olarak, nanoelyaf keçelerden vakum yardımıyla reçine transfer kalıplama (VARTM) tekniği benzeri bir yöntem olan “Vakum Destekli Elle Yatırma Yöntemi” kullanılarak kompozit levhalar oluşturulmuştur.

Üretilen PVA esaslı nano yapıların ve sonrasında üretimi gerçekleştirilen PVA nanoelyaf keçe barındıran kompozit numuneler standartlara uygun biçimde Çekme Testi

(ASTM D 3039), Düşük hızlı darbe testi (ASTM D 7136), Üç noktadan eğilme testi (ASTM D 7264), Darbe sonrası basma testi (ASTM D 7137) gibi çeşitli mekanik testlere tabi tutulmuşlardır. Testler sonucunda kompozit levhaların mekanik davranışları incelenmiş ve mukavemet değerleri belirlenerek elde edilen sonuçlar mukayese edilmiştir. Son olarak, hasar görmüş numunelerin kırılma yüzeyleri optik ve dijital mikroskop yardımıyla incelenerek farklı oranlardaki ÇCKNT içeren PVA nanofiber takviyesinin numunelerde gelişen hasar davranışlarına ve gelişimlerine etkisi anlaşılmaya çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çok Cidarlı Karbon Nanotüp, Düşük Hızlı Darbe, Darbe Sonrası Basma, Elektro-eğirme, Nano-keçe, Nano-kompozit, Polivinil Alkol.



ABSTRACT

PhD THESIS

INVESTIGATION FOR THE MECHANICAL BEHAVIORS OF NANO MATS COMPOSITE LAMINATES WITH ELECTRO-SPUN MULTIWALLED CARBON NANOTUBE REINFORCED POLYVINYL ALCOHOL

Ünal ÖZTEN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

**Advisor: Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Co-Advisor Dr. Öğr. Üyesi Mürsel EKREM**

2020, 164 Pages

Jury

**Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN
Prof. Dr. Ahmet AVCI
Prof. Dr. Behcet DAĞHAN
Doç. Dr. Necati ATABERK
Dr. Öğr. Üyesi Gürol ÖNAL**

In this study, the mechanical and fracture behaviors of Nano Mats Composite Laminates with different composition rates (%1, %2 and %3) of Electro-Spun Multiwalled Carbon Nanotube (MWCNT) Reinforced Polyvinyl Alcohol (PVA) were investigated by standard mechanical test methods. Firstly, MWCNT reinforced PVA nanofiber mats were produced by electro spinning method. Then, MWCNT reinforced PVA nanofiber mats acquired by electro spinning were used to produce composite laminates by Vacuum Assisted Resin Transfer Molding Process (VARTM) technique. Additionally, SEM (Scanning Electron Microscope) was performed in order to obtain characteristics and morphologies of nano fiber mats of PVA.

MWCNT reinforced PVA nano fiber mat composite laminate specimens were tested by performing standardized mechanical tests such as Tensile test (ASTM D 3039), Low velocity impact test (ASTM D 7136), Three point bending test (ASTM D 7264) and Compression after impact test (ASTM D 7137). Mechanical behaviors of composite laminates were observed, mechanical properties were identified and acquired data were compared by means of the test results. Finally, deformed surfaces of specimens were

inspected by optical and digital microscopes in order to understand the effect of PVA nanofiber reinforcement with different rates of MWCNT contents into the failure mechanism of specimens.

Keywords: Electro-spinning, Multiwalled Carbon Nanotubes, Low Velocity Impact, Compression After Impact, Nano-Composite, Nano Fiber Mats, Polyvinyl Alcohol.



ÖNSÖZ

Bu çalışma, birçok üniversitenin laboratuvarları ve araştırma merkezlerindeki cihazlar ve ekipmanlar kullanılarak başarılı bir şekilde sonuçlandırılmıştır. Dolayısıyla başta tez danışmanım Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN'e minnet ve şükranlarımı sunarım. Ayrıca, Konya Teknik Üniversitesi, Selçuk Üniversitesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi ve KTO Karatay Üniversitesi'nde bize destek olan tüm akademisyen, idari ve teknik personele teşekkür ederim. Tez çalışmalarım esnasında benden manevi desteğini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan aileme de sonsuz şükranlarımı sunarım.

Son olarak, proje çalışmalarımızı her yönüyle destekleyen, bilgisi, emeği ve tecrübelerinden de ziyadesiyle faydalandığımız ikinci tez danışmanım Dr. Öğretim Üyesi Mürsel EKREM'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ünal ÖZTEN
KONYA-2020

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. KURAMSAL TEMELLER	13
3.1. Nanoteknoloji	13
3.2. Karbon Nanotüplerin Keşfi	13
3.3. Karbon Nanotüplerin Yapısı ve Özellikleri	14
3.4. Karbon Nanotüplerin Malzeme Teknolojisindeki Yeri.....	16
3.5. Karbon Nanotüplerin Takviye Elemanı Olarak Kullanılması.....	17
3.6. Karbon Nanotüplerin Matriks içinde Dağılım Problemleri	18
3.7. KNT'lerin Mekanik Yöntemler Yardımıyla Dağılımı	18
3.7.1. Ultrasonik karıştırma yöntemi	18
3.7.2. Silindirde çekme yöntemi	19
3.7.3. Bilyeli değirmende öğütme yöntemi.....	20
3.7.4. Karıştırma ve ekstrüzyon yöntemi	20
3.8. KNT Katkılı Polimer Nano-Kompozitlerin Performansı	20
3.9. KNT/Polimer Nono-Kompozitler	22
3.10. Karbon Nanotüplerin Yapıştırma Bağlantılarında Kullanılması.....	23
3.11. Elektro-Eğirme Yöntemi	24
3.12. Elektro-Eğirme Yöntemi ile KNT Takviyeli Nano Keçe Üretimi	25
3.13. KNT Miktarının Nano Keçelerin Mekanik Özelliklerine Etkisi	26
4. KONSEPT TASARIM	29
5. MATERYAL VE YÖNTEM	33
5.1. PVA ile Yapılan Üretimler.....	33
5.1.1. Kullanılan malzemeler	33
5.1.2. Çözelti hazırlama aşamaları	33
5.1.3. ÇCKNT'lerin çözelti içerisinde dağıtılması	34
5.1.4. Elektro-Eğirme Parametreleri	35
5.1.5. Morfolojik yapının analizi	42
5.1.6. PVA nano elyaf keçelerin mekanik özellikleri	49
5.1.7. PVA içeren kompozit levhaların üretilmesi.....	51
5.1.8. Üretilen kompozit levhaların kesilmesi	56

6. METOT.....	57
6.1. Uygulanan Testler	57
6.1.1. Çekme testi	60
6.1.2. Üç noktadan eğilme testi.....	60
6.1.3. Düşük hızda darbe testi.....	66
6.1.4. Darbe sonrası basma testi	71
7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI.....	83
7.1. Çekme Testi	83
7.2. Üç Noktadan Eğilme Testi	84
7.3. Düşük Hızda Darbe Testi	91
7.3.1. Darbe hızlarının hasar gelişimi üzerine etkisi.....	91
7.3.2. Farklı darbe hızlarının numune özelliklerine etkisi	99
7.3.3. Farklı darbe hızlarında aktarılan kuvvetin zamana bağlı değişimi	101
7.3.4. Farklı darbe hızlarında aktarılan kuvvetin sehim üzerine etkisi	106
7.3.5. Farklı darbe hızlarında aktarılan enerjinin zamana bağlı değişimi.....	110
7.4. Darbe Sonrası Basma (DSB) Testi Sonuçları	115
7.4.1. Standart DSB testi aparatıyla yapılan çalışmalar.....	115
7.4.2. Yenilenen test aparatıyla yapılan çalışmalar	116
7.4.3. DSB testi Kuvvet – Yer Değiştirme ilişkisi.....	127
7.5. Hasar Görmüş Numunelerin Analizleri	133
7.5.1. Mikroyapı analizleri.....	134
7.5.2. Numune yüzeylerinin dijital mikroskop incelemesi	135
7.5.3. Hasar görmemiş yüzeylerin optik mikroskop incelemesi.....	137
7.5.4. Hasar görmüş yüzeylerin optik mikroskop incelemesi.....	138
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	146
KAYNAKÇA.....	150
ÖZGEÇMİŞ	153

SİMGELER VE KISALTMALAR

VARTM	: Vakum destekli reçine transfer kalıplama tekniği
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopisi
TEM	: Geçirimli elektron Mikroskopisi
ÇCKNT	: Çok Cidarlı Karbon Nanotüp
PVA	: Polivinil Alkol
3NE	: Üç Noktadan Eğilme Testi
DHD	: Düşük Hızlı Darbe Testi
DSB	: Darbe Sonrası Basma Testi
F	: Kuvvet (N)
V	: Hız (m/sn)
M	: Kütle (kg)
M'	: Hedefin kütlesi (kg)
m	: Kütle (kg)
W	: Darbe esnasında yapılan iş (numunede yutulan enerji) (Joule)
E _p	: Potansiyel enerji (darbe enerjisi) (Joule)
a	: İvme (m/sn ²)
V	: İzafi hız (m/sn)
g	: Yer çekimi ivmesi (m/sn ²)
s	: Yer değiştirme (m)
k	: Sabit
E ₁	: Fiber yönündeki elastiklik modülü (N/m ²)
E ₂	: Fiber yönüne dik doğrultudaki elastiklik modülü (N/m ²)
v ₁₂	: Poisson oranı
G ₁₂	: Kayma modülü (N/ m ²)
a	: Yüzey çatlak derinliği parametresi (mm)
c	: Yüzey çatlak genişliği parametresi (mm)
t	: Numunenin kalınlığı (mm)
N	: Tabaka sayısı
z	: Her bir tabakanın merkeze olan uzaklığı (mm)
M _w	: Moleküler ağırlık (g/mol)

1. GİRİŞ

Bu çalışmada, genel anlamda karbon nanotüp takviyeli polimer esaslı malzemelerin kompozit levha haline getirilerek aslında tek başına bir yönüyle iyi olan ancak diğer özellikleri bakımından eksiklikleri nedeniyle nihai ürün anlamında kullanılmayan malzemelerin bir arada tek bir kompozit yapı halinde birçok alanda kullanılmasına yol açacak olan bir sonuç alınması amaçlanmıştır. Gelişen teknolojiyle birlikte artık ham malzemeler yerine daha üstün özelliklere sahip kompleks yapılar hayatımıza girmektedir ve bu malzemeler yaşamımızı hem kolaylaştıran hem de daha konforlu bir geleceğe ulaşmamızı sağlayan sistemlerin imalatında kaçınılmaz olmaktadır.

Elektro-eğirme yöntemi nano elyaf üretimi alanında Polivinil Alkol (PVA) gibi polimer esaslı malzemelerin karbon nano tüplerle takviye edilmesinde kullanılan en başarılı yöntemlerin başında gelmektedir. Bu yöntem farklı içeriklerde birçok kombinasyonda ürün elde edebilmemizi mümkün kılmaktadır. Ayrıca, vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) laboratuvar ortamında kompozit malzeme üretimi için pratik ve nispeten başarılı sonuçlar veren bir yöntemdir. Ancak, çalışmalarımızda kompozit malzeme üretmek için elektro-eğirme yöntemi ve VARTM tekniği benzeri bir yöntem olan “Vakum Destekli Elle Yatırma Yöntemi” kullanılmıştır. Üretilen malzemelerin morfolojilerini belirlemek için sıklıkla kullanılan metotlar ve mekanik özelliklerini tayin etmede bilinen standart testler tercih edilmiştir.

Bu çalışma, polimer esaslı bir malzemedeki elektro-eğirme yöntemi ile Çok Cidarlı Karbon Nanotüp (ÇCKNT)’lerle takviye edilmiş nano elyaf keçe üretimi ve sonrasında epoksi yapıştırıcı yardımıyla cam elyaflarla tek bir nihai kompozit malzeme üretilmesi ile ilgili yapılan çalışmaları içermektedir. Çalışmalarımızda kullanılan polimer malzeme Polivinil Alkol’dür ve bu polimer, nano elyaf keçelerin üretilmesinde kullanılmıştır.

Çalışmalarımızda Elektro eğirme yöntemiyle üretilmiş olan ağırlıkça %0, %1, %2 ve %3 oranlarında ÇCKNT takviyeli ve ağırlıkça %10 oranında PVA içeren nano elyaf keçeler üretilmiştir. Ardından, üretilen ÇCKNT içeren PVA nano elyaf keçelerin Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) görüntüleri alınarak morfolojik özellikleri incelenmiş ve aynı zamanda nano elyafların ortalama çapları belirlenmiştir. Elde edilen bu veriler ışığı altında üretilmiş olan ÇCKNT takviyeli PVA nano keçe barındıran kompozit levhaların içeriğindeki ÇCKNT oranlarının değişiminin üretilen malzemeler

üzerinde ne tür etkiler oluşturulabileceği ve üretilen levhaların mekanik davranışlarının nasıl değişim gösterdiğinin mekanik testler yardımıyla anlaşılması amaçlanmıştır.

Çalışmaların devamında, elektro eğirme yöntemiyle üretilen nano elyaf keçeler 10 kat cam fiber kumaş arasına 5+5 tabakalı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra VARTM tekniği benzeri bir yöntem olan “Vakum Destekli Elle Yatırma Yöntemi” ile ÇCKNT takviyeli/takviyesiz PVA nano elyaf keçe içeren epoksi reçine matrisli kompozit levhalar üretilmiştir.

Son aşamada, üretimi yapılan kompozit levhaların yapılan standart testler yardımıyla mekanik davranışlarının incelenmesi ve mukavemet değerleri belirlenerek elde edilen sonuçların, (1) PVA nano keçe barındırmayan kompozit levhaların davranışlarıyla, (2) Farklı oranlarda ÇCKNT takviyeli/takviyesiz PVA nano keçe içeren kompozit levhaların mukavemet değerleri kendi aralarında kıyaslanarak karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Hedeflenen amaçlar doğrultusunda, üretilen kompozit levhalar mekanik özelliklerinin belirlenmesi için standart boyutlarda kesilerek sabit yük altında bazı mekanik testlere maruz bırakılmıştır. Bu testler, darbe öncesinde ve farklı hızlarda darbelere maruz kalmış halde olmak üzere, darbenin malzemenin eğilme mukavemetine etkisini görmek amacıyla tekrarlanan ASTM D 7264 “Üç Noktadan Eğilme Testi”, farklı hızlarda (1.5, 2, 2.5 and 3 m/sn hızlarında) darbelerin malzemede oluşturacağı hasarları incelemek amacıyla yapılmış olan ASTM D 7136 “Düşük Hızda Darbe Testi” ve farklı hızlarda darbelere maruz kalmış numunelerimizin basma dayanımlarını ve oluşacak olan hasar mekanizmalarını incelemek üzere yapılan ASTM D 7137 “Darbe Sonrası Basma Testi” gibi temel standart mekanik testleri içermektedir.

Yapılan testler ve analizler sonrasında, farklı oranlardaki ÇCKNT takviyeli PVA nanoelyaf keçelerin malzemenin mekanik özelliklerin iyileştirilmesi noktasında nasıl etkiler gösterdiği anlaşılmaya çalışılmıştır. Sonuç olarak, farklı miktarlarda nanoelyaf keçe içeren kompozit levhalar ile hiç nanoelyaf keçe içermeyen numuneler için elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmış ve PVA nanoelyaf keçe takviyesinin etkinliği ve hangi oranda en iyi katkı sağladığı tespit edilmiştir.

Özetle, üretilen kompozit levhaların standart testlerle farklı yükler altındaki davranışları incelenmiş ve nano keçe takviyesinin malzeme davranışı üzerine etkileri

incelenmiştir. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek adına ÇCKNT'lerin içeriğinin değişiminin etkisinin nasıl olduğu gözlemlenmiştir. Böylece, alternatif kompozit malzemeler geliştirme yolunda yeni ve detaylı bilgiler edinilmiştir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Diğer birçok nano parçacıklarda olduğu gibi ÇCKNT'ler sahip oldukları üstün mekanik özellikler nedeniyle kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanılmak için idealdirler.

Epoksi matris malzemelere nano parçacıklar takviye edilerek yeni ve farklı özelliklere sahip nano kompozitler oluşturulabilmekle birlikte nano parçacıkların miktarı belirli bir oranda sınırlı kalmaktadır. Sonuç olarak, üretimi oldukça zor olan nano parçacıkların kompozit malzeme içerisinde kullanımını kısıtlamaktadır. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirici etkisi olan nano elyaflar ve nano tellerin nispeten daha kolay üretilebilmesi nano parçacıklara alternatif olarak kullanılmasını mümkün kılmaktadır (Teo ve Ramakrishna, 2009).

Elektrospın yöntemi nanometrik boyuttaki birçok farklı polimer fiberlerin hazırlanmasında kullanılan ve yüksek yüzey alanı ve gözeneklilik elde edebilmeyi sağlayan bir yöntemdir. Elektrospın yöntemi kullanılarak elde edilen malzemede PVA nano keçelerin içerisine oldukça düzgün bir oryantasyonda ÇCKNT'lerin yerleştirilebildiği pek çok çalışmada ispatlanmıştır. Benzer bir çalışmada, ÇCKNT'lerin elektrospın yöntemi kullanılarak elde edilen bir malzemede PVA nano keçelerin içerisine oldukça düzgün oryantasyonda yerleştirilebildiği gözlemlenmiştir (Zhou ve ark., 2005).

Bir çalışmada, farklı oranlarda ÇCKNT kompozit fiberleri içeren PSA (Polisülfonamid) karışımı %70'lik nitrik asit ve %98'lik sülfürik asit çözeltisinde 1 saat boyunca ultrasonik karıştırma yöntemiyle homojenleştirilip elektrospın yöntemi kullanılarak hazırlanmış ve sonuç olarak %3'e kadar oranlarda ÇCKNT içeriğinin mekanik özelliklerini artırdığı görülmüştür (Xin ve Chen, 2015).

Černý ve Mayer (2010), Sıcaklık, süre ve şartlandırmaların değişken olduğu birçok çalışma ile oda sıcaklığında suda bekletilen ve %1 oranına kadar sıvı emiliminin gerçekleştiği cam polyester kompozit malzeme üzerinde yapılan statik ve dinamik testler sonucunda malzemenin mekanik özelliklerinde kayda değer miktarda (eğilme mukavemetinde %30'a kadar) azalma oluştuğunu kanıtlamıştır.

Yüksek sıcaklıktaki nemli (hidrotermal) ortamların kompozit malzeme uygulamalarının mekanik özelliklerine etkisi üzerinde yapılan araştırmalar sınırlıdır.

Zhang ve ark. (2015a), Kısa ve uzun dönemlerde hidrotermal etkilere maruz kalan kompozit yapıştırıcıların farklı dinamik yüklemeler altında ezilme dayanımına etkilerini araştırmış ve yapıştırıcı bağlantı mukavemetinin zayıfladığını gözlemlemiştir.

Ekrem (2017), ağırlıkça %1, %3 ve %5 oranında ÇCKNT takviyeli PVA nano elyafla güçlendirilen yapıştırıcıların tek taraflı bindirmeli ve çift konsol giriş test bağlantılarını oluşturarak kayma dayanımları ve kırılma tokluklarını incelemiş ve ÇCKNT takviyeli PVA nano elyaf köprülenmesi ve sıyrılması, kırılma adımları, mekanik kilitleme gibi mekanizmaların oluşturulmasıyla nano elyaf takviyeli yapıştırıcıların kayma dayanımlarında ve kırılma tokluklarında yüksek oranda iyileşmeler kaydetmiştir.

Benzer çalışmalarda, %3 orana kadar ÇCKNT içeriğinin PVA nano keçe takviyeli malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirdiği ve bu orandan itibaren hızlı bir düşüş olduğu görülmüş, bunun arkasındaki en önemli nedenin aşırı miktardaki KNT'lerin homojen dağılımı olumsuz etkilemesi olarak belirlenmiştir.

KNT'lerin matriks içinde dağılımı genel olarak polimer ve KNT'ler arasındaki yüzeyler arası etkileşimlere bağlıdır. KNT'lerin polimerlere daha sıkı bağlanabilmesi adına bazı işlemlerden geçirilerek fonksiyonelleştirilmesi sağlanabilmektedir. Bu amaçla, Kimyasal ve fiziksel fonksiyonelleştirme olarak iki temel yaklaşım üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar, fiziksel ve kimyasal fonksiyonelleştirme işlemlerinin her ikisinin avantaj ve dezavantajları olduğunu göstermektedir (Ma ve ark., 2010).

KNT'lerin yüzey özelliklerinin tutunmayı iyileştirici yönde geliştirilmesi amacıyla bazı asit çözeltilerinde bekletilmeleri olumlu sonuçlar vermektedir. Nitrik asit (HNO_3), Sülfürik asit (H_2SO_4) ya da karışımından oluşan bazı kuvvetli asit çözeltileri yardımıyla kimyasal olarak fonksiyonelleştirilen ÇCKNT esaslı nano kompozitlerin birçok polimerle kuvvetli bağlar oluşturabildiği ve sonuç olarak kompozit yapının yüksek mekanik özellikler kazanmasına katkı sağladığı gözlemlenmiştir (Ma ve ark., 2010).

Asitlerle fonksiyonelleştirme işlemi yapılan ÇCKNT'lerin yüzey morfolojileri yapı içerisinde yığılmaların önlenmesine ve dolayısıyla homojen bir dağılımın sağlanmasına katkıda bulunmaktadır. Ancak bu gibi işlemler sonrasında moleküler yapının zarar görmesi kaçınılmaz olabilmektedir (Turgunov ve ark., 2014).

Belirli asit çözeltilerinde fonksiyonelleştirilmiş farklı miktarlardaki ÇCKNT (ağırlıkça yaklaşık %1 ve %7 arasında) damıtılmış su içerisinde ağırlıkça yaklaşık %9 oranında PVA ile karıştırılarak homojen bir çözelti elde edilmiş ve elektrospin yöntemiyle nano-fiberler üretilmiştir. Üretilen nano-fiberlerin renklerinde artan nanotüp miktarına göre koyulaşma görülmüştür. Ayrıca düşük miktarda nanotüp içeren nano-fiberlerin yüzey morfolojisinde pürüzsüzlük ve dağılımında homojenlik daha kolay elde edilebilmiştir. Artan nanotüp miktarıyla birlikte bölgesel bazı bozukluklar ve çarpıklıklar, yüzey morfolojisinde kötüleşmeler artmıştır. Yığılmaların oluşmasının ve dolayısıyla homojen olmayan dağılımın önlenmesi amacıyla nanotüplerin tam olarak fonksiyonelleştirilerek PVA sulu çözeltisinde dağılımı sağlanmaya çalışılmış ancak bu hassas dağılım yaklaşık olarak ağırlıkça %2,5 konsantrasyona kadar sağlanabilmiştir. %1 oranında fonksiyonelleştirilmiş ÇCKNT içeren malzemenin akma ve çekme dayanımında da yaklaşık %15 oranında artış görülmekle birlikte artan konsantrasyon mekanik özelliklerin doğrusal olarak artmadığı ve belirli bir seviyeden itibaren artışın giderek azaldığı, bununla birlikte çekme dayanımında düşüş olduğu tespit edilmiştir (S. Jeong ve ark., 2007).

KNT katkısının asidik ortamların malzeme üzerindeki olumsuz etkilerini iyileştirme adına yapılan çalışmalar olumlu sonuçlar vermiştir. Aynı zamanda farklı kuvvetli asit çözeltileriyle fonksiyonelleştirilen ÇCKNT esaslı nano kompozitlerin birçok polimerle kuvvetli bağlar oluşturabilmiş ve sonuç olarak kompozit yapıya yüksek mekanik özellikler kazandırmıştır (Ma ve ark., 2010).

PVA, PMMA, Polistiren gibi malzemeler oldukça hafif ve dökülebilir özellikte hidrofobik polimerler olması nedeniyle mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, sahip olduğu düşük mekanik özellikleri, statik ve dinamik yükler karşısında dayanıksız olmalarına sebep olduğundan dolayı kullanım alanlarını sınırlandırmaktadır. Ancak, kuvvetli dolgu malzemeleriyle desteklenerek kompozit bir yapı oluşturulması sonucu dayanımları artırılabilir. ÇCKNT'ler diğer dolgu malzemeleriyle kıyaslanamayacak kadar yüksek yapısal ve mekanik özellikleriyle öne çıkmaktadırlar. Bu özellikleri itibariyle de birçok polimer için potansiyel bir dolgu malzemesi teşkil etmektedir. Dolayısıyla, son yıllarda ÇCKNT-Polimer kompozit yapıları üzerine birçok bilimsel çalışma yapılmıştır.

Jindal ve ark. (2015), farklı kompozisyonlarda (ağırlıkça %2.5, %5 ve %10) ÇCKNT takviyeli PMMA nano keçe içeren kompozit malzemelerin statik ve dinamik özelliklerini incelemiş ve %5 oranında ÇCKNT içeriğinin saf PMMA ile kıyaslandığında malzemenin mekanik özelliklerini önemli derecede artırdığını (%44 sertlik, % 27 elastiklik modülü) gözlemlemiştir.

Lionetto ve ark. (2014), Elektrospin yöntemiyle üretilmiş Çok Cidarlı Karbon Nanotüp (ÇCKNT) takviyeli PMMA fiberlerinin kompozit yapıdaki oryantasyonundaki değişimin kompozit malzemenin mekanik özelliklerine katkısını incelemiş ve ağırlıkça %1 ve %3 oranındaki ÇCKNT katkısının bu yolla malzemenin elastiklik modülünün %50 oranında artışını mümkün kıldığını göstermiştir. Çalışmasında ayrıca rastgele dağılımın tek yönlü ve düzenli dağılımla kıyaslaması yapılmış ve KNT oryantasyonunun mekanik özelliklere katkısının önemi vurgulanmıştır.

Kompozit malzemeler mühendislik uygulamalarında nispeten yeni bir malzeme gibi nitelendirilebileceği için kullanıldığı uygulamaya göre havacılık, uzay, otomotiv sanayi gibi alanlarda uygunluğunun test edilmesi zaruri olmaktadır. Bununla birlikte, kuru ortamların dışında nemli, tuzlu, asidik ya da farklı kimyasal ve korozif ortamlarda da uygunluklarının anlaşılması adına literatürde farklı çalışmalar mevcuttur. Örneğin, deniz uygulamalarında kullanılabilmesi için uzun süre deniz suyuna maruz kalması sonucunda bile malzemenin mekanik özelliklerini nispeten koruyabilmeleri ve kendisinden beklenen işlevleri yerine getirebilmeleri gerekmektedir. Bununla ilgili olarak, Cam Elyaf Takviyeli Polimerler (GFRP) kompozit malzemelerin deniz şartlarına maruz kalmaları durumunda nasıl davranışlar sergileyeceği hakkında çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda, su ve tuzlu su ortamlarında ve 22 °C sıcaklıkta yapılan deneylerle sekiz tabakalı simetrik ve anti-simetrik GFRP kompozit malzemelerinin fiziksel, kimyasal ve mekanik kararlılığı, su emilim davranışı, mukavemet kaybı mekanizması ve mekanik özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Sonuç olarak, 2000 saat (~12 hafta) boyunca su ve tuzlu su şartlarına tabi tutulan malzemeye mekanik ve fiziksel özelliklerini incelemek amacıyla üç noktadan eğilme testleri uygulanmış ve ciddi miktarda mukavemet kayıpları meydana geldiği gözlemlenmiştir (Aldajah ve ark., 2009).

Kompozit malzemelerin farklı sıcaklıklarda ve farklı tip şartlandırılmış ortamlardaki davranışlarını incelemek üzere birçok çalışma yapılmıştır. Benzer şekilde, yapıştırılmış bağlantıların farklı sıcaklıklarda şartlandırılmış (su ve tuzlu su) ortamlardaki

fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin değişimi incelenmiş ve sıvı solüsyonların yüksek sıcaklıkların da etkisiyle bağlantıları zayıflattığı görülmüştür (Sousa ve ark., 2018).

Kompozit malzeme içine nükseden yüksek orandaki nem matriks malzemede kabarma ya da plastikleşme problemlerine yol açabilmektedir. Nemli ortamda bulunan malzemelerde meydana gelebilecek olan bu tür problemlerin matriks malzemenin cam geçiş sıcaklığında (T_g) ve darbe sönümlenme özelliklerinde değişikliğe neden olduğu görülmüştür. Deniz suyunun kompozit malzemeler üzerindeki olumsuz etkilerini incelemek amacıyla yapılan bu çalışmada, 22 hafta boyunca tuzlu suda bekletilen cam elyaf takviyeli iki farklı tür (polyester ve vinilester) reçineden oluşan kompozit malzemenin kopma gerilmesi gibi mekanik özelliklerinin azaldığı, ancak yorulma mukavemetinin kayda değer miktarda değişmediği gözlemlenmiştir (Poodts ve ark., 2013).

Deniz yapıları uygulamalarında kullanılan kompozit yapıların zaman içinde maruz kaldığı nemin etkisi altında sahip olduğu mekanik özelliklerini kaybettiği ve bu yönüyle tercih edilmeyerek maliyet ve uygulama zorluklarına rağmen metalik malzemelerin kullanımının ön planda olduğu bilinmektedir (Petrie, 2013).

Kompozit malzemeler deniz ortamlarında ahşap ve metal malzemelere kıyasla mekanik özellikler, korozyon dayanımı, ekonomiklik ve imalat kolaylığı gibi üstünlükleri sebebiyle her geçen gün daha fazla oranda kullanılır hale gelmektedirler (Varelidis ve ark., 1998; Petrie, 2013).

Sıcaklık, süre ve şartlandırmaların değişken olduğu birçok çalışmada kompozit malzemeler üzerinde farklı mekanik testler uygulanmıştır. %1 oranına kadar sıvı emiliminin gerçekleştiği oda sıcaklığında suda bekletilen cam polyester kompozit malzeme üzerinde yapılan statik ve dinamik testler sonucunda malzemenin mekanik özelliklerinde kayda değer miktarda (eğilme mukavemetinde %30'a kadar) azalma olduğu gözlemlenmiştir (Černý ve Mayer, 2010).

Yüksek sıcaklıktaki nemli (hidrotermal) ortamların kompozit malzeme uygulamalarının mekanik özelliklerine etkisi üzerinde yapılan araştırmalar sınırlıdır. Yeterince bilgi sahibi olmadığımız bu alanda, kısa ve uzun dönemlerde hidrotermal etkilere maruz kalan kompozit yapıştırıcıların farklı dinamik yüklemeler altında ezilme

dayanımına etkileri araştırılmış ve yapılan deneyler sonrasında bağlantı mukavemetinin zayıfladığını göstermiştir (Zhang ve ark., 2015a).

Diğer bir çalışmada ise, şartlandırılmış ortamda deniz suyuna maruz kalan epoksi yapıştırıcı bağlantılarının uzun dönemli mekanik davranışları incelenmiş ve numuneler yaşlandırma öncesinde ve sonrasında çekme, kayma ve birleşik gerilmelere maruz bırakılarak gerilme durumları sonlu elemanlar yöntemiyle analiz edilmiştir. Birleşik gerilmeler sonucunda hasar oluşum mekanizmasının tahmininde kullanılmak üzere çalışmalar yapılmış ve sonuç olarak su ve tuzlu suyun malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği gözlemlenmiştir (Bordes ve ark., 2009).

Araştırmalar asidik ortamların malzemeler üzerinde olumsuz korozif etkiler oluşturduğunu ve bunun önlenmesi için yapılan çalışmaların nispeten olumlu etkiler gösterdiğini kanıtlamaktadır. Örneğin, atık suların tahliyesinde ve endüstriyel fabrikalarda kullanılan ve asidik ortamlara maruz kalan Portland çimento betonunun asit saldırılarından korunması amacıyla 1,5mm kalınlığında cam fiber takviyeli epoksi ile kaplanarak deney ortamında %3 sülfürik asit çözeltisine maruz bırakılmıştır. Deney sonucunda, malzemenin 20 aylık süre boyunca herhangi bir hasara uğramadığı ve sonuç olarak ömrünün 70 kattan daha fazla bir süre artırılacağı anlaşılmıştır (Vipulanandan ve Liu, 2002).

Nem emiliminin epoksi reçineler üzerinde plastikleştirme gibi fizikokimyasal etkiler ve bağlar arası kuvvetlerini azaltma gibi olumsuz etkiler oluşturduğu bilinmektedir. Su emilimi epoksi malzemeler için birçok uygulamada en kritik çevresel etki olarak karşılaşılmaktadır. Birçok uygulamada suyun korozif etkisine ilave olarak ortaya çıkan asidik çözeltiler de dikkat edilmesi gereken ve önlem alınmazsa ciddi korozif etkilere sebep olabilecek ortamlar oluşturmaktadır. Literatürde bu konu hakkında yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Çalışmaların birinde, farklı miktarlarda (ağırlıkça %1, 3, 5, 10, 15) alümina nano parçacık takviyeli epoksi malzeme farklı sürelerde (0, 10, 30, 40, 50 gün) 100 °C sabit sıcaklıkta ağırlıkça %10 oranında sülfürik asit içeren damıtılmış su çözeltisine maruz bırakılmıştır. Epoksinin korozyon dayanımını artırıcı etkisi üzerine yapılmış olan bu çalışmada nano parçacık takviyesinin hem mekanik hem de korozyon dayanımını artırıldığı görülmüştür (Ravari ve ark., 2012).

Diğer bir çalışmada ise 20 °C sıcaklıkta farklı oranlardaki (%3, 10, 20) sülfürik asit çözeltilerinde 1320 saate kadar yaşlandırmaya maruz bırakılan epoksi kaplamaların davranışları ve bozunma süreçleri gözlemlenmiştir. Yaşlandırma sonucunda kaplamanın oksidasyonu, kabarması ve gözenekleşmesi gibi malzemenin kullanım amacını olumsuz yönde etkileyen hem kimyasal hem de mekanik bozulmalar ve değişimler meydana gelmiştir. Oksitlenme sonucunda kaplamanın oksijen içeriği normal oranın 3 katına (%31) çıkmış ve sertliği de %20 oranında azalmış, ayrıca kimyasal bozulmalar cam geçiş sıcaklığını (T_g) artırıcı yönde etki göstermiştir (Kotnarowska, 2010).

Literatürde, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin tayin edilmesi için yaygın olarak uygulanan standart testlerin genelde malzemelerin çekme, eğilme, darbe ve darbe sonrası basma mukavemetlerinin belirlenmesi amacıyla yapıldığı görülmüştür.

Zhang ve ark. (2015b), Kompozit panellere standart 3NE, DHD ve DSB testler uygulamış ve elde ettiği deneysel sonuçları nümerik çalışmalarla kıyaslamışlardır. Çalışmalarda uygulanan standart testler esnasında malzemelerde oluşan hasarlar ve hasar gelişimleri incelenmiş, basma ve çekme gerilmelerinin hasar oluşumlarına etkileri değerlendirilmiştir. Kompozit yapıyı oluşturan her bir tabakanın ve tabakalar arası hasar mekanizmalarının nasıl başladığı, nasıl bir gelişim gösterdiği ve nasıl sonuçlandığı açıklanmıştır.

Thodsaratpreeyakul ve ark. (2018), Cam elyaf takviyeli polimer esaslı kompozitler üzerinde yapmış olduğu çalışmalarda DHD testleri ile malzemelerin hasar davranışlarını incelemiştir.

Ismail ve ark. (2019), Darbelere maruz kalmaları sonucunda kalıntı gerilmeleri oluşmuş kompozit malzemelerin darbe davranışlarını ve darbe sonrası özelliklerini inceleyen çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında kullandıkları ÇCKNT'lerle modifiye edilerek cam elyaf ve karbon elyaflarla takviyelenmiş hibrit biyo-kompozit yapılara 5J - 20J arasında değişen enerjilerde DHD ve DSB testleri uygulayarak hasar davranışlarını ve mukavemet özelliklerini incelemiştir.

Safri ve ark. (2019), Cam elyaf takviyeli kompozitlerin hasar analizleri üzerine çalışmalar yapmıştır. Farklı kalınlıklardaki numuneler üzerinde farklı hızlarda gerçekleştirilen düşük hızlı ve yüksek hızlı darbe testleri sonrasında numuneler tahribatsız muayene yöntemleriyle incelenmiş olup cam elyafın ve kalınlık değişimlerinin kompozit

numunelerin dayanımları üzerine etkileri açıklanmıştır. Ayrıca, kompozit yapıda darbe esnasında meydana gelen hasar mekanizmaları incelenmiş ve hangi gerilmeler sonucu ne tür hasar modları oluştuğu belirlenmiştir.

Aktaş ve ark. (2013), Yaptıkları çalışmalarda, farklı türde cam elyaf kumaş takviyeli epoksi hibrit kompozitlerin sahip olduğu istiflenme dizilimlerinin darbe ve darbe sonrası hasar davranışlarına etkilerini incelemişlerdir. Altı farklı dizilimde el yatırma tekniğiyle üretilmiş olan tabakalı kompozit levhaların mekanik özellikleri ve hasar davranışları farklı enerji seviyelerinde DHD ve DSB testleri yardımıyla incelenmiş ve elde edilen test sonuçları sonlu elamanlar analizi sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Kompozit yapıların sahip olduğu farklı dizilimlerin numunelerde ne tür etkiler oluşturduğu belirlenmiştir.

Richardson ve Wisheart (1996), Kompozit yapıların genel DHD davranışları üzerine yaptıkları kapsamlı literatür araştırmalarında kompozit malzemelerde hasar başlangıcından itibaren nihai kırılma meydana gelinceye kadar oluşan hasar modları detaylı olarak incelenmiş ve kalıntı gerilmeleri numunelerin darbe dayanımlarına ve darbe sonrası performansına ne gibi etkileri olabileceği üzerine temel bilgiler verilmiştir.

Daelemans ve ark. (2018), Cam elyaf takviyeli kompozit levhalara elektro eğirme ile üretilmiş nano elyaf keçelerin tabakalar arasındaki etkilerini incelemiş ve darbe toleransını artırdığını gözlemlemiştir. Nano elyaf keçelerin tabakalar arasındaki bağlantıyı güçlendirerek düşük hızlarda darbelere maruz kalan numunelerdeki hasar miktarının boyutunu %50-60 oranında azalttığını belirlemiştir. Dolayısıyla, kompozit yapıda nano elyaf köprülerin oluşturulmasıyla darbe direncinin artırılarak hem cam elyafların hem de matriks reçinenin daha az hasar almasının sağladığını göstermişlerdir.

Safri ve ark. (2014), Kompozit malzemelerin düşük ve yüksek hızlarda darbelere maruz kalmaları sonucunda yapılarında meydana gelen hasarlar üzerine literatür araştırması çalışmaları yapmış ve farklı darbe hızlarının oluşan deformasyon ve hasar mekanizmalarının gelişimleri üzerine etkilerini incelemiştir. Yapılan çalışmada kompozit yapıların mikro-yapısındaki çentik, çukur, delik gibi boşlukların ve hataların maruz kaldıkları darbelere bağlı gerilmelere karşı dirençlerini düşürdüğü ortaya koyulmuştur. Ayrıca, maruz kalınan darbelerin boyutlarına göre gözle görülebilir darbe hasarı (visible impact damage- VID) ve zor görülebilir darbe hasarı (barely visible impact damage-

BVID) olarak sınıflandırılması ve hasar analizlerinin yapılması üzerine bilgiler sunulmuştur.

Haynes (2016), Kompozit malzemelerin tabakalar arası dayanımının ve iç rijitliğinin fiber ve matriks malzeme içeriğinin değiştirilmeden artırılması ve dolayısıyla yorulma dayanımlarının iyileştirilmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelere (1) tabakalar arasına yeni bir tüm tabaka ekleyerek, (2) tabakalar arasında iğneli bir yapı oluşturarak mukavemet özelliklerinin iyileştirilmiş ve numunelere 3NE ve DSB testleri yapılmıştır. Test sonuçları, uygulanan mukavemet iyileştirme metotların malzemelerin DSB dayanımını artırdığını ancak 3NE dayanımının düşürdüğünü göstermektedir.



3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Nanoteknoloji

Gelişen teknoloji, insanların gündelik ihtiyaçlarının değişimi, teknolojideki ilerleme ve sürekli yeni şeyleri keşfetme hayali insanları farklı ve üstün özelliklere sahip malzemelerin bulunmasına ve dolayısıyla nano boyutta malzemeler üzerinde çalışma alanlarının doğmasına neden olan “nanoteknoloji” biliminin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Nanoteknoloji, adından da anlaşılacağı gibi nano boyutta gerçekleştirilen üretim teknolojisidir. Nano yapıları malzemeler, 0.1-100 nm arasında değişen nano ölçekli, boyutuna kıyasla ciddi büyüklüklerde geliştirilmiş kimyasal, fiziksel ve biyolojik özellikleri ile nano-biyoteknoloji, nano-kimya, nano-elektronik ve nanokompozit gibi nanoteknoloji alanlarının doğuşunu mümkün kılmıştır (Thostenson ve ark., 2001; Thostenson ve ark., 2005).

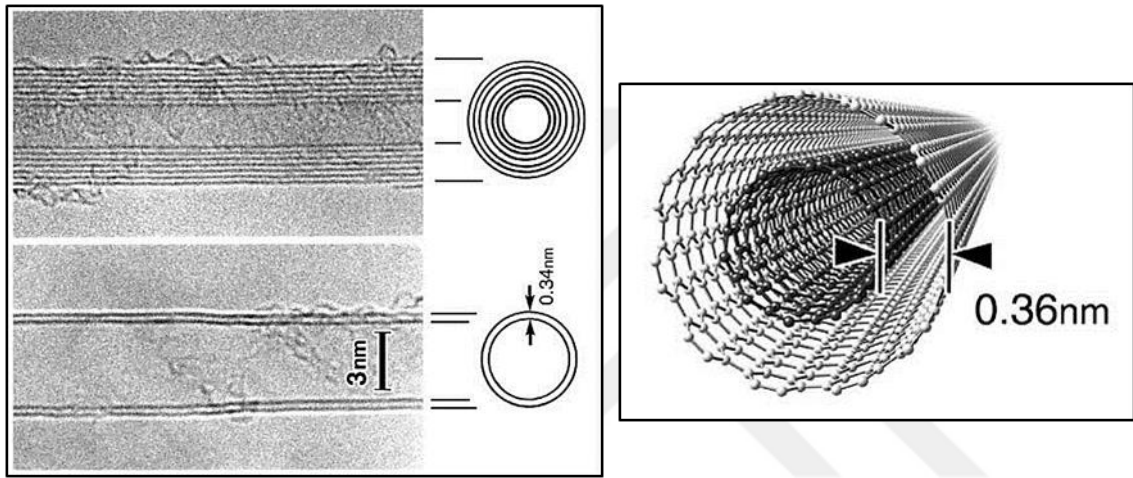
Malzemelerin birbirleriyle olan kimyasal ve fiziksel etkileşimleri temelde yüzey ve yüzey özellikleri ile yakından ilgilidir ve bu açıdan nano boyuttaki malzemeler sahip oldukları yüksek yüzey alanı/hacim oranları açısından diğer geleneksel malzemelerle kıyaslanmayacak konumdadırlar. Bunun nedeni, birim hacme düşen yüzey alanı (mm^2/mm^3) büyüklüğüdür ve bu özellik genel olarak malzemelerin boyutlarındaki düşüşle artan bir olgudur.

3.2. Karbon Nanotüplerin Keşfi

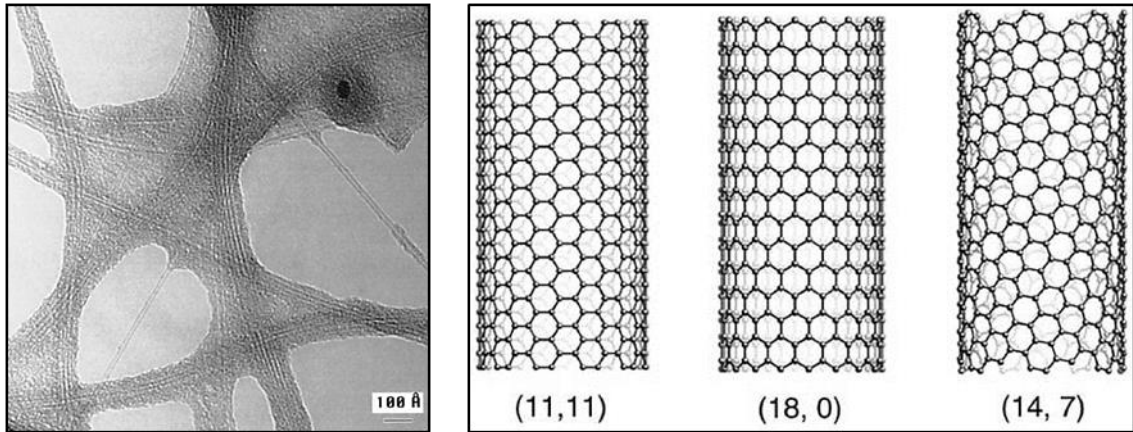
Karbon nanotüpler 1991 yılında Sumio Iijima tarafından keşfedildiğinden itibaren Iijima (1991) bilinen malzeme teknolojisi için yeni ufuklar açmış ve akademiden endüstriye kadar uzanan oldukça geniş bir yelpazede yer alan araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Sumio Iijima tarafından ilk zamanlarda kendi tanımıyla “iğne-gibi malzeme” (needle-like material) olarak tanımlanan ve daha sonra nano boyutlardaki silindirik tüplere benzeyen yapısı itibarıyla “Karbon Nanotüpler” (carbon nanotubes) ismiyle adlandırdığı yapı karbonun yeni bir formudur. Karbon nanotüpler bu haliyle diğer malzemelere kıyasla sahip olduğu üstün fiziksel ve kimyasal özgün özellikleri dolayısıyla nanoteknoloji ile ilgili birçok alanda yeniliklerin doğmasını sağlamıştır.

3.3. Karbon Nanotüplerin Yapısı ve Özellikleri

Karbon nanotüpler en-boy oranı (aspect ratio) 1000'den daha büyük olan karbon malzemelerdir ve üretim metotlarına göre tek-cidarlı (TCKNT) ve çok-cidarlı (ÇCKNT) olmak üzere ikiye ayrılırlar (Ma ve ark., 2010). Silindirik yapısı itibariyle doğada kendiliğinden oluşmayıp yalnızca yapay olarak karbon katı parçacıklar halinde üretilen karbon nanotüpler Şekil 3.1'de gösterildiği gibi ilk defa 1991 yılında çok cidarlı olarak üretilmiş ve Şekil 3.2'de verildiği haliyle 1993 yılında yine Sumio Iijima tarafından tek cidarlı karbon nanotüpler keşfedilmiştir.



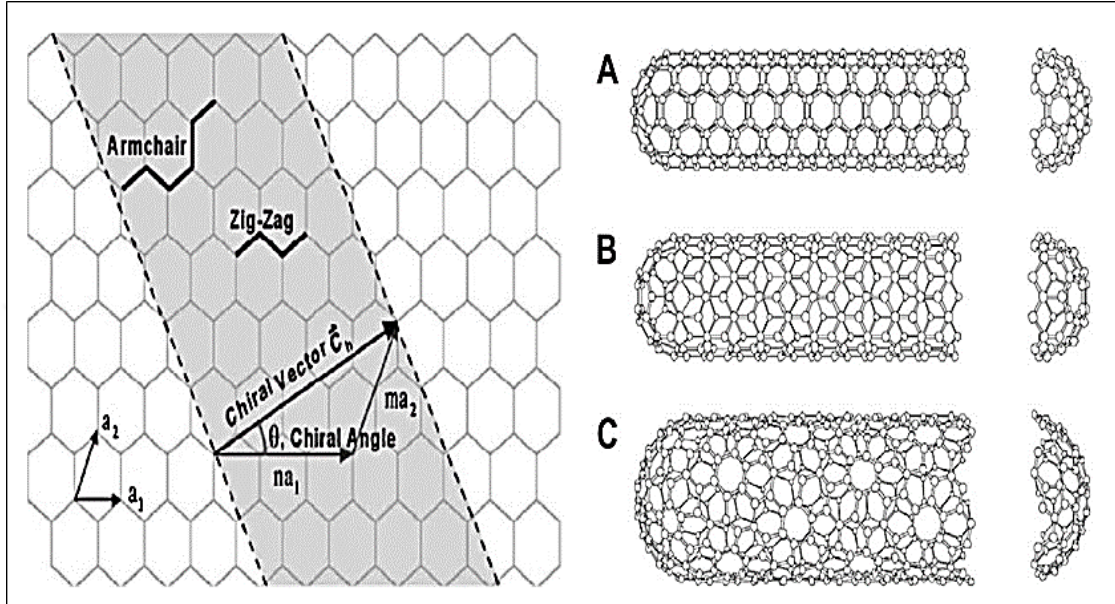
Şekil 3.1. Çok Cidarlı Karbon Nanotüp TEM (Ma ve ark., 2010) ve şematik (Iijima, 1991) görüntüleri



Şekil 3.2. Tek Cidarlı Karbon Nanotüp (TCKNT) TEM (Ma ve ark., 2010) ve şematik (Iijima, 1991) görüntüleri

KNT'ler Şekil 3.3'de gösterildiği gibi nanometrik boyutta çaplara sahip sarmal grafit silindirleri olarak düşünülebilirler.

Grafite tabakalarının açılarına göre KNT'ler, 1) Koltuk (armchair), 2) Zig-Zag ve 3) Kiral (Chiral) olarak sınıflandırılır. Nanotüp yapıların çapları kadar kirallilik dizilimleri (karbon atomlarının sarmal dizilimi) de önem taşımaktadır. Kirallite, karbon atomlarının dizilimine bağlı olarak KNT'lerin fiziksel şekillerinin oluşmasını sağlamasının yanında bazı elektriksel ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesinde de kullanılır.



Şekil 3.3. Hekzagonal grafen kağıdının farklı kirallitelerde KNT'lere dönüşümü (A: koltuk; B: zigzag; C: kirall) (Dresselhaus ve ark., 1995; Thostenson ve ark., 2001; Ma ve ark., 2010)

Kirallitenin hesabı kirallilik açısına bağlıdır ve aşağıdaki gibidir:

$$\text{Kirallite; } C_h = na_1 + ma_2$$

Burada;

$n = m$ ise; "koltuk" ,

$m = 0$ ise; "zigzag" ,

diğer durumlarda ise "kirall" olarak adlandırılır.

Nanotüplerin kirallitesi iletim özellikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bir (n, m) nanotüpte $(2n + m)$ değeri 3'ün katları ise "metallik", değilse "yarı iletken" olarak tanımlanır.

ÇCKNT'ler çok katlı grafen içerirler ve her bir katman farklı kirallitelere sahip olabilir. Bu yüzden, fiziksel özelliklerinin tahmini TCKNT'lere göre daha karmaşıktır.

KNT'lerin keşfi sonrası yapılan araştırmalar bu malzemenin fiziksel özelliklerinin de geliştirilmesiyle elektrik ve optik alanlarda da kullanılabileceğini göstermiş ve bu gelişmeler KNT'lere olan ilginin artmasında büyük bir rol oynamıştır.

KNT'lerin elektriksel iletkenliği 104 S/cm ve oda sıcaklığındaki ısı iletkenliği 6600 W/mK civarındadır. Endüstriyel anlamda kullanımını henüz gerçekleştirilememiş olan KNT'lerin yakın gelecekte ticari ürün olarak karşımıza çıkması muhtemeldir.

KNT'ler var olan tüm malzemelerden daha üstün mekanik özelliklere sahiptirler. Teorik ve deneysel sonuçlar KNT'lerin dünya üzerindeki en mukavemetli malzemelerden biri olduğunu göstermektedir. Elastiklik modülü 1.2 TPa ve çekme dayanımı 50–200 GPa civarında değişmektedir. KNT'ler elektriksel ve termal yönden de birçok avantaja sahiptir. Tüm bu yönleri itibariyle elektrik, kimya, biyoteknoloji, tıp, malzeme, havalandırma ve su arıtma sistemleri, enerji depolama, katalizörler, fiberler, yapısal malzemeler, iletkenler, yapıştırıcılar, sensörler ve daha birçok uygulama için adaydır (Ma ve ark., 2010).

3.4. Karbon Nanotüplerin Malzeme Teknolojisindeki Yeri

KNT'ler nano boyutları itibariyle tek başlarına kullanım imkânı bulamamaktadırlar. Ancak sahip oldukları üstün mekanik özellikler itibariyle diğer malzemelerin eksik yönlerinin desteklenmesi amacıyla takviye elemanı olarak kullanılabilmektedirler. Özellikle hafif ve mukavemeti düşük olan polimer malzemeler bu tür çalışmalar için en önemli adaydır ve bu alanda literatürde birçok çalışma mevcuttur (Loos, 2015b).

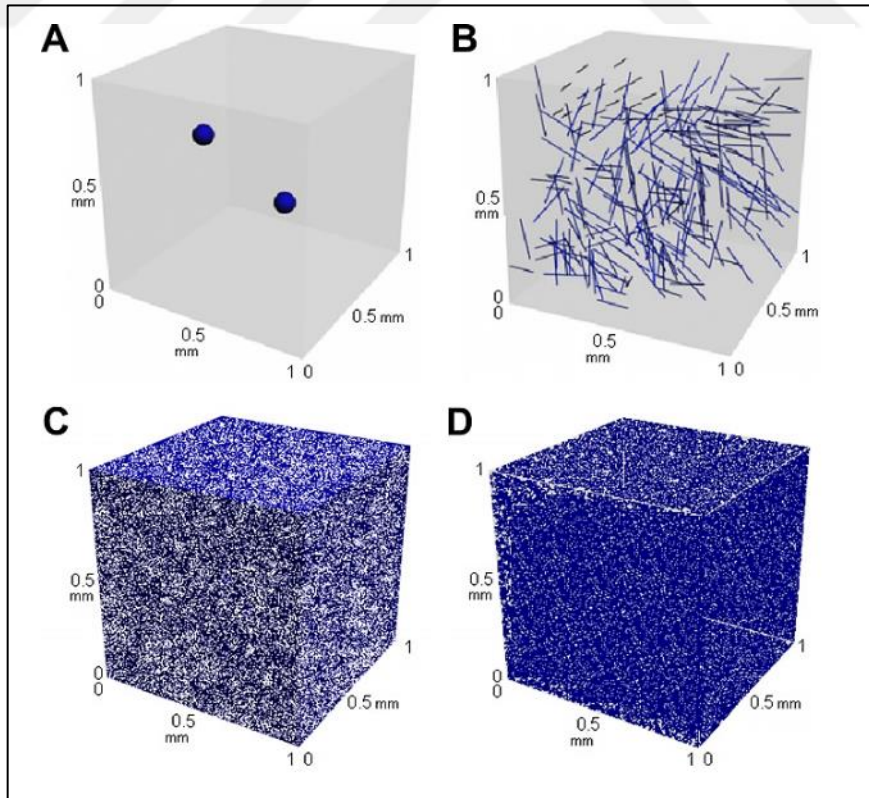
Sahip oldukları benzersiz özelliklerden dolayı KNT'ler hâlihazırda birçok uygulamada kullanılmaktadır ve kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. İlk zamanlarda maliyetinin yüksek olması dolayısıyla çok yaygın kullanılamayan KNT'ler fiyatının ucuzlamasıyla birlikte spor aletlerinden deniz taşıtlarına, savuma ve askeri teçhizat yapımından (Schrand ve Tolle, 2006) elektronik uygulamalarına, sağlık alanından alternatif enerji üretim sistemlerine, uzay sanayinden (Watson ve Connell, 2006) havacılık sektörüne kadar her geçen gün daha fazla ve çok daha farklı alanlarda kullanılmaya başlanmıştır. Fiyatının ekonomik hale gelmesiyle birlikte son yıllarda birçok kişinin hayatında kullandığı genel ürünlerde de yer almaya başlamıştır (Loos, 2015b).

Tüm bu beklentilerin yanında KNT'lerin etkisinin şu anki sahip olunan teknoloji ile sınırlı olduğu ve tam olarak gerçekçi olmadığı da iddia edilmektedir (Loos ve Manas-Zloczower, 2015).

3.5. Karbon Nanotüplerin Takviye Elemanı Olarak Kullanılması

Uzun yıllardır süregelen araştırmalara rağmen KNT'lerin bazı özellikleri kullanım alanlarını sınırlandırmıştır. KNT'lerin nanometrik boyutları ve buna bağlı yüksek en-boy oranı (aspect ratio) dolayısıyla takviye edeceği malzeme içerisindeki dağılımının homojen bir biçimde yapılabilmesi oldukça zordur. Bunun nedeni KNT'ler ve polimer matriks malzemeler arasındaki zayıf yüzeyler arası etkileşimdir. Çok geniş yüzey alanına sahip olan KNT'lerin matriks içerisinde başarılı bir şekilde dağılımı sağlanamadığında istenilen özelliklerin elde edilememesine ve hatta daha zayıf özelliklerin ortaya çıkmasına neden olabilirler.

Diğer malzemelere kıyaslandığında KNT'ler yapı içerisinde tam anlamıyla homojen bir biçimde dağıtılabildiğinde Şekil 3.4'de de gösterildiği gibi matriks malzeme ile bütünlük sergileyebilir.



Şekil 3.4. 1mm³'lük hacmi dolduran Mikro ve Nano boyutlu aynı hacim oranındaki (%0.1) eklenmiş malzemelerin 3 boyutlu dağılımı (A: Al₂O₃ - 100 µm ; B: Karbon fiber - 5 µm ; C: GNP - 45 µm ; D: KNT - 12 nm) (Ma ve ark., 2010)

3.6. Karbon Nanotüplerin Matriks içinde Dağılım Problemleri

KNT'lerin matriks malzeme içerisinde dağılımını etkileyen faktörler;

- Ortalama boyut (çap)
- Yoğunluk
- Birim hacme düşen sayı
- Ortalama yüzey alanı
- Tüpler arası elektrostatik etkileşimler
- Van der Waals kuvveti (moleküller arası etkileşim)
- Karıştırma tekniği

olarak sıralanabilir.

Karmaşık haldeki KNT'lerin yayılım zorluklarının minimize edilebilmesi adına pek çok çalışma yapılmıştır (Kasaliwal ve ark., 2011).

Nano boyutta ve yüksek miktardaki KNT taneciklerinin sahip oldukları geniş yüzey alanı polimer matriks içinde homojen olarak dağılmasına engel teşkil eder. Bu yüzden matriks içinde KNT dağılımının daha iyi olması için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

3.7. KNT'lerin Mekanik Yöntemler Yardımıyla Dağılımı

3.7.1. Ultrasonik karıştırma yöntemi

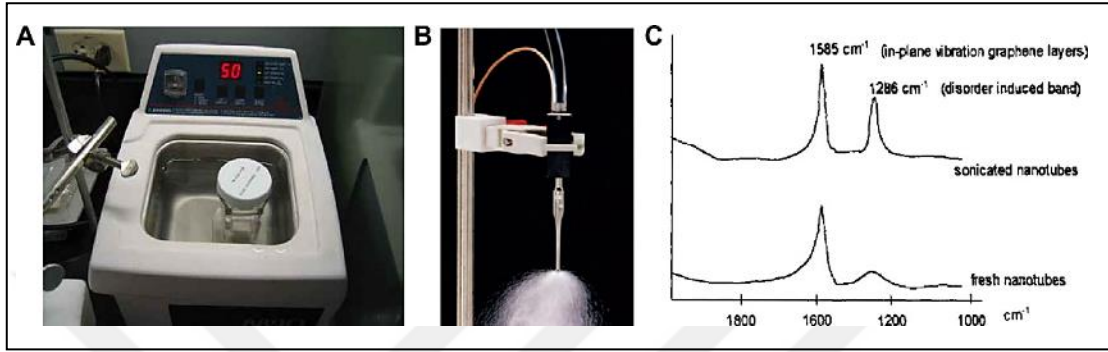
Şekil 3.5'de gösterildiği üzere ultrasonik karıştırma yönteminde ses üstü dalga enerjisi yardımıyla KNT taneciklerinin dağılması sağlanır ve nano parçacık dağılımında en çok kullanılan yöntemdir.

Laboratuvar ortamında genel olarak “ultrasonik banyo” ve “ultrasonik prob” olarak adlandırılan cihazlar (sonikatör) mevcuttur. Su, aseton, etanol gibi düşük viskoziteli sıvılarda KNT'lerin dağılımını sağlamada etkili bir yöntemdir. Birçok polimer katı ve viskoz sıvı halde bulunduğu için bu yöntem kullanılmadan önce çözücüler yardımıyla inceltirilir.

Ultrasonik karıştırma yöntemi esnasında ani sıcaklık artışı meydana gelebilir. Bu yüzden etanol ve aseton gibi malzemeler kullanılıyorsa soğutma işlemi uygulanmalı ve

işleme aralıklarıyla devam edilmelidir. Ultrasonik prob kullanılan ve uzun süreli devam edilen işlemler KNT'lerin hasar görmesine sebep olabilir (Lu ve ark., 1996).

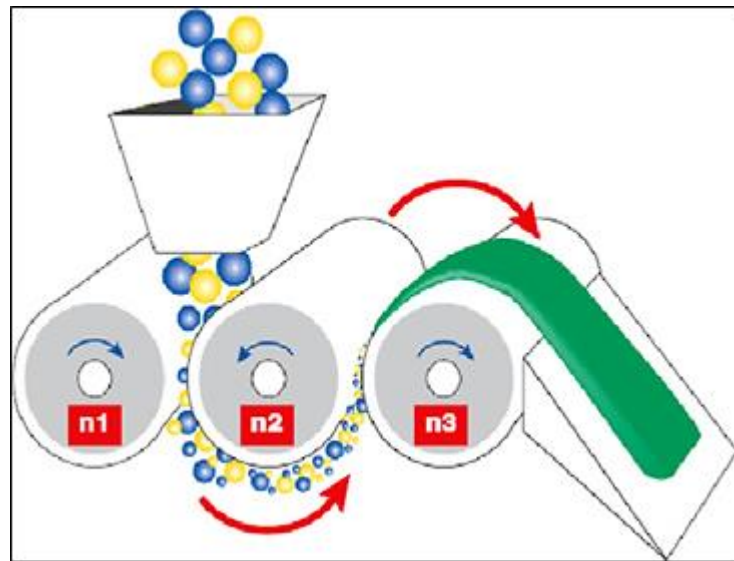
Bu tür hasarlar KNT/polimer kompozit yapının mekanik ve elektriksel özelliklerini zayıflatır. Sonuç olarak KNT grafen katmanları tamamen tahrip olabilir ve nanotüpler de amorf karbon fiberlere dönüşebilir (Mukhopadhyay ve ark., 2002).



Şekil 3.5. A: Ultrasonik su banyosu; B: Ultrasonik prob ve KNT'lerin dağılımına etkisi; C: Ultrasonik karıştırmanın KNT'lerin yapısı üzerine etkisi (Öncesi ve sonrası Raman görüntüleri) (Ma ve ark., 2010)

3.7.2. Silindirde çekme yöntemi

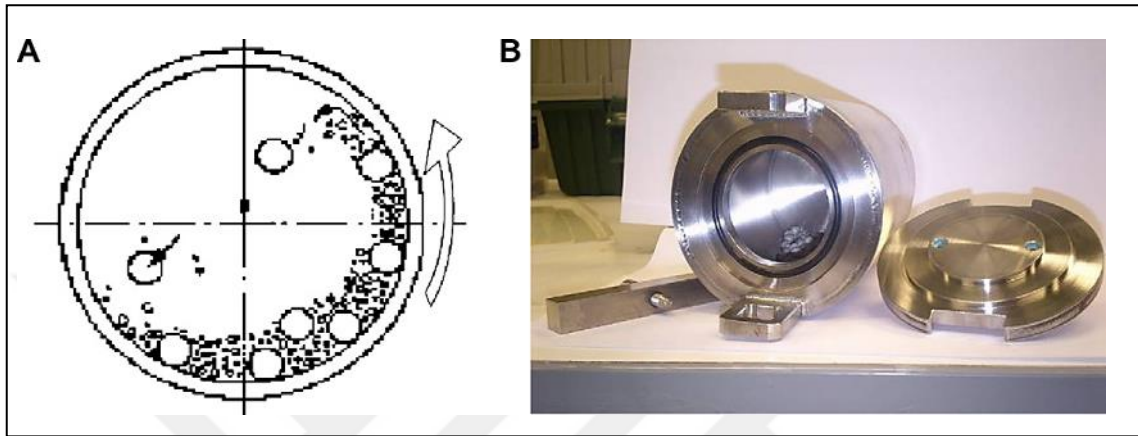
Şekil 3.6'da gösterildiği üzere silindirde çekme yöntemi ile karıştırmada, silindirler tarafından uygulanan kayma kuvveti viskoz malzemeleri karıştırır, dağıtır ve homojen hale getirir. Daha önce farklı uygulamalarda kullanılan bu yöntemin son araştırmalarda KNT'ler için iyi sonuçlar verdiği söylenmekle birlikte çok fazla tercih edilmemektedir (Mukhopadhyay ve ark., 2002; Thostenson ve Chou, 2006).



Şekil 3.6. Silindirle çekme yöntemi mekanizması ve KNT'lerin polimer matriks içine dağılması (Loos, 2015a)

3.7.3. Bilyeli değirmende öğütme yöntemi

Bu yöntem genellikle çok ince toz üretimi gibi farklı uygulamalar için kullanılan bir öğütme yöntemidir. Şekil 3.7’de gösterildiği üzere kimyasallarla birlikte öğütülen KNT’lerin dağılımı sağlanmakla birlikte, KNT’ler yüzeylerine nüfuz eden kimyasallar dolayısıyla fonksiyonelleşebilir.



Şekil 3.7. Bilyeli değirmende öğütme yöntemi; A: Şematik Görünüm, B: Öğütücünün görünümü (Ma ve ark., 2010)

3.7.4. Karıştırma ve ekstrüzyon yöntemi

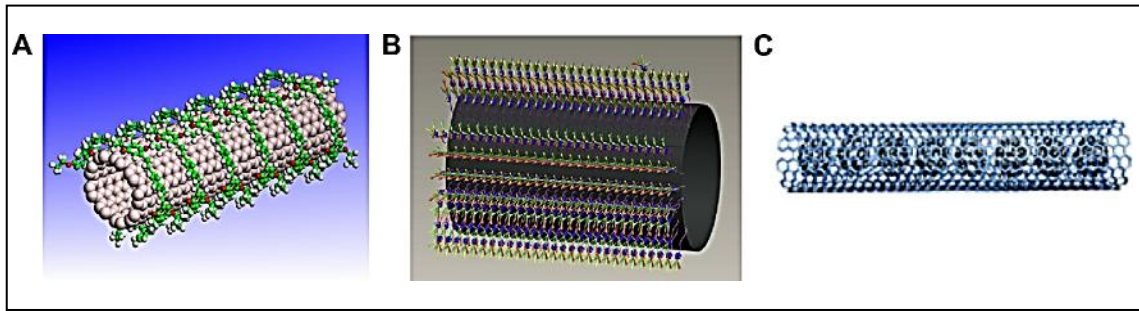
Parçacıkların sıvı sistem içinde dağıtılmasında kullanılan bir yöntemdir. KNT’lerin polimer matriks içinde dağıtılmasında da kullanılabilir. Ekstrüzyon ise KNT’lerin termoplastikler gibi katı polimerlerin içerisinde dağıtılmasında kullanılan bir tekniktir ve özellikle yüksek dolgulu KNT/polimer nano-kompozitlerin üretiminde faydalıdır (Sandler ve ark., 1999).

3.8. KNT Katkılı Polimer Nano-Kompozitlerin Performansı

KNT’lerin matriks içinde dağılımı polimer ve KNT’ler arasındaki yüzeyler arası etkileşimlere bağlıdır. KNT/matriks ara yüzü temel olarak van der Waals etkileşimiyle oluşur ve bu yüzden yük iletimi/aktarımı verimli bir şekilde gerçekleşmez. Dolayısıyla, KNT’lerin yüzey özelliklerinin tutunmayı iyileştirici yönde geliştirilmesi önemlidir.

Yüzey özelliklerinin matriks malzemeye tutunma özelliklerini geliştirmek amacıyla farklı çalışmalar mevcuttur. Yaygın olarak kimyasal ve fiziksel fonksiyonelleştirme olarak iki temel yaklaşım kullanılmaktadır. Fonksiyonelleştirilen KNT’lerin tutunma yüzeyleri dikenli tel örneğindeki gibi Şekil 3.8’de gösterildiği haliyle

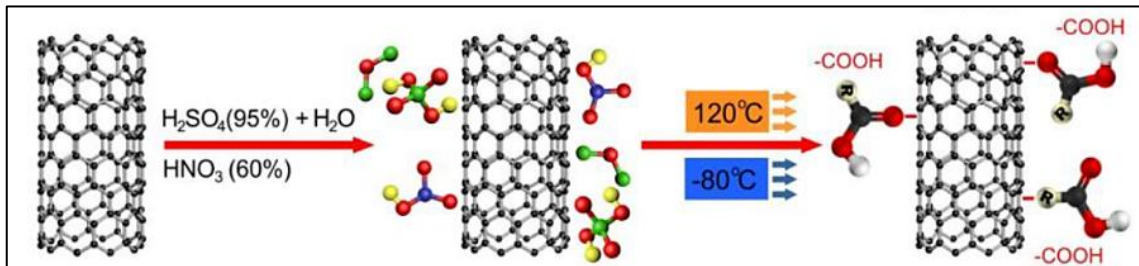
oldukça artırılabilir. Her iki yaklaşımın da avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır (Geng ve ark., 2008).



Şekil 3.8. KNT'lerin Fiziksel fonksiyonelleştirme yöntemleri (A: polimer sarma; B: yüzey etkin madde tutundurma; C: iç yüzey yöntemi) (Ma ve ark., 2010)

KNT'lerin yüzey özelliklerinin tutunmayı iyileştirici yönde geliştirilmesi amacıyla bazı asit çözeltilerinde bekletilmeleri olumlu sonuçlar vermektedir. (Hirsch, 2002) Şekil 3.9'da gösterildiği gibi Nitrik asit (HNO_3), Sülfürik asit (H_2SO_4) ya da karışımından oluşan bazı kuvvetli asit çözeltileri yardımıyla kimyasal olarak fonksiyonelleştirilen ÇCKNT esaslı nano kompozitlerin birçok polimerle kuvvetli bağlar oluşturabildiği ve sonuç olarak kompozit yapının yüksek mekanik özellikler kazanmasına katkı sağladığı gözlemlenmiştir (Ma ve ark., 2010).

Ancak bu işlemler sonucunda moleküler yapının zarar görmesi kaçınılmaz olabilmektedir (Turgunov ve ark., 2014).



Şekil 3.9. KNT'lerin asitler yardımıyla fonksiyonelleştirilmesi aşamaları (Turgunov ve ark., 2014)

Kimyasal fonksiyonelleştirme esnasında KNT'lerin polimer matriksle güçlü bir etkileşim göstermesi sonucu yüksek mekanik ve fonksiyonel özelliklere sahip KNT esaslı nano-kompozit malzeme üretilebilir. Ancak, KNT'ler bu işlem sonrasında hasar görmektedir.

Fiziksel fonksiyonelleştirme ile fonksiyonelleştirilmiş KNT'ler polimer matriksle zayıf bir etkileşim gösterir. Dolayısıyla, yüzey özelliklerinin tutunmayı iyileştirici yönde

geliştirilmesi mümkün olsa dahi yük iletimi verimli bir şekilde gerçekleşmez. Fiziksel fonksiyonelleştirme esnasında özellikle ultrasonik işlem yapılırken KNT'lerin yüzeylerinde büyük oranda hasar oluşabilir ve bazı durumlarda KNT'ler çok küçük parçalara ayrılabilir. Sonuç olarak, mekanik özellikler ve KNT dağılımı bu işlemde olumsuz etkilenebilmektedir (Turgunov ve ark., 2014).

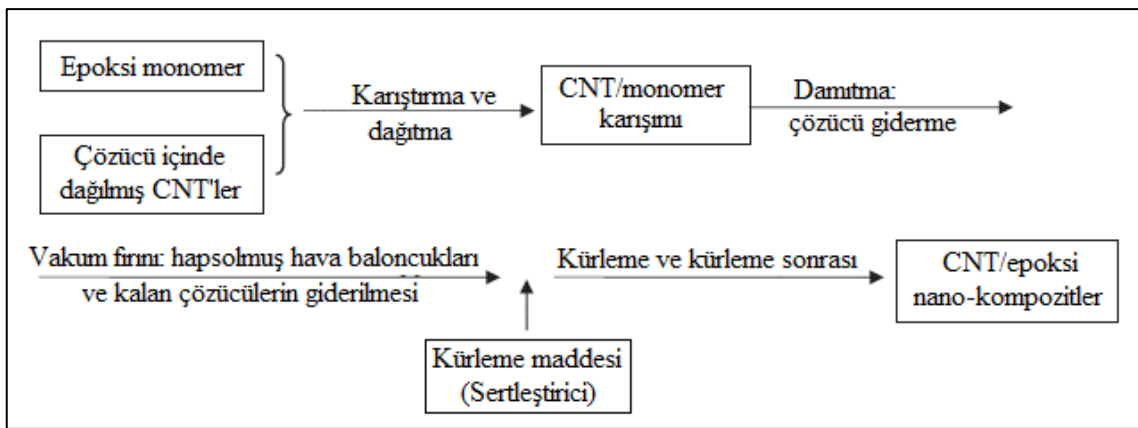
3.9. KNT/Polimer Nono-Kompozitler

Polimer Kompozitler; termoplastik, termoset ve elastomer gibi farklı türde polimer matrisler içerebilirler. Üretim maliyetinin düşük olması sebebiyle birçok mühendislik uygulamasında yer alırlar.

Çok düşük miktarlardaki KNT katkısı bile kompozit yapının hem yapısal hem de fonksiyonel özelliklerinin (yüksek mekanik ve elektriksel özellikler gibi) çok yüksek oranda geliştirilmesini sağladığı birçok çalışmada ile ortaya konulmuştur.

KNT/Polimer kompozit üretimi; (1) Çözelti karışım hazırlama (solution mixing), (2) Eriyik karıştırma (melt blending), (3) Doğal polimerizasyon (in situ polimerization), (4) Lateks teknolojisi, gibi yöntemler kullanılarak yapılır.

En basit haliyle, KNT/epoksi nano-kompozitlerin üretim aşamaları Şekil 3.10'da verildiği gibidir ve kompozit üretimleri genel olarak bu temel yaklaşıma göre yapılmaktadır (Ma ve ark., 2010).



Şekil 3.10. KNT/epoksi nano-kompozitlerin üretim aşamaları (Ma ve ark., 2009)

3.10. Karbon Nanotüplerin Yapıştırma Bağlantılarında Kullanılması

Yüksek performans gerektiren uygulamalar için bir birleştirme yöntemi olarak yapıştırma bağlantılarının kullanımı gittikçe artmış ve bu uygulamalar içinde esnek yapıştırıcıların yapısal amaçlı kullanımları önem kazanmıştır (Zhang ve ark., 2015a).

Literatürde nano malzeme katkılı yapıştırma bağlantılarının dayanımı üzerine birçok çalışma mevcuttur (Sancaktar ve Kuznicki, 2011). Nano malzemeler yapıştırma bağlantıların ara yüzeyin iyileştirilmesi yoluyla mekanik ve elektriksel iletkenlik sağlayan katkılarla da elektriksel özelliklerinin istenilen seviyelere yükseltilebilmesi için katkı elemanı (fiber) olarak kullanılabilir (Li ve ark., 2010).

Nano-malzeme katkılı yapıştırıcıların hazırlanma süreci polimer matriksli kompozit yapılarınkine benzer şekilde gerçekleşir. Yapıştırma işlemi ve sonrasındaki uygulamaların laboratuvar şartlarında hassas bir şekilde gerçekleştirilmesi ürün kalitesini etkileyen en önemli faktörlerin başında gelir.

Aynı zamanda nano malzemenin matriks içinde homojen bir şekilde dağılımının sağlanması, çözücü giderme işlemi, vakum fırınında çözücünün buharlaşması sonucu oluşan baloncukların giderilmesi işlemi, kütleme esnasında uygulanan basınç ve geçirilen sürenin iyi ayarlanması, yapıştırılan malzeme kalınlığındaki değişim, yapıştırıcı miktarı ve kalınlığındaki değişim gibi işlemler ürün özelliklerini doğrudan etkileyen aşamalardır (Bauer ve ark., 2006).

Tüm işlemlerin aynı tipte numuneler için benzer şekilde uygulanamaması yapıştırma sonucu elde edilen ürün özelliklerinin de farklı elde edilmesine sebep olur. Esnek karakterli yapıştırıcılar için kürleşme esnasında uygulanan basınçta meydana gelen artışın, bağlantının dayanımında artışa neden olduğu görülmüştür.

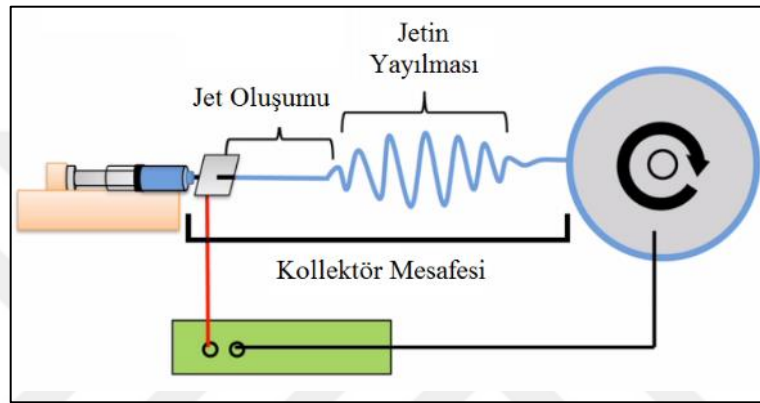
Tüm bu yapılan çalışmalar, yapıştırma bağlantılarında kullanılan KNT katkılı yapıştırıcıların ara yüzeyin iyileştirilmesinde oldukça etkili olduğunu göstermektedir (Zhai ve ark., 2008).

Yaptığımız çalışmalarda ise KNT takviyeli nano keçe kullanılması ile ara yüzey iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bunun gerçekleştirilmesi amacıyla tabakalar arası kaymayı önleyici bir ara yüzey elde edilmesinin mekanik özelliklerin de iyileştirilmesinde en etkili yöntem olduğu anlaşılmaktadır.

3.11. Elektro-Eğirme Yöntemi

Elektrospın yöntemi olarak da adlandırılan Elektro-eğirme yöntemi nanometrik boyuttaki birçok farklı polimer fiberlerin hazırlanmasında kullanılabilir. Yüksek yüzey alanı ve gözeneklilik elde edebilmeyi sağlayan bir yöntemdir.

Bu yöntemde Şekil 3.11'de şematik olarak gösterildiği üzere Polimer solüsyon dönen bir tambur üzerine elektrik alan kuvveti kullanılarak nano boyutta ve sürekli olarak bir çeşit püskürtme işlemine tabi tutulur.



Şekil 3.11. Elektro-Eğirme Yönteminin Şematik Gösterimi (K Leach ve ark., 2011)

Bu işlem sırasında üretilen fiberlerin kalitesi ortamın ve kullanılan cihazların (Voltaj ayarı, dönüş hızı, sıcaklık, temizlik) hassas bir şekilde ayarlanmasıyla artırılabilir.

Elektro-eğirme yöntemi ile üretim yapılmadan önce belirlenmesi gerekli olan kriterler şunlardır;

- **Kullanılacak olan polimerin cinsinin belirlenmesi:**

Elektro-eğirme yöntemiyle fiber üretiminde poli-L-laktik asit (PLLA), polikaprolakton (PCL), polistiren (PS), Polivinil alkol (PVA), nylon, Polimetilmetakrilat (PMMA) vs. gibi birçok farklı polimer kullanılabilir. Seçilecek olan polimer üretilen malzemenin sahip olması arzulanan özellikleri doğrultusunda belirlenir.

- **Polimerin uygun bir biçimde çözülebileceği çözücü cinsinin belirlenmesi:**

Çözücünün cinsi, seçilmiş olan polimerin herhangi bir kimyasal bozulma ya da değişim gerçekleştirilmeyeceği ve başarılı bir şekilde çözülebileceği gibi faktörler göz önünde bulundurularak belirlenmelidir.

- **Fiberlerin üzerinde toplanacağı tambur geometrisinin belirlenmesi:**

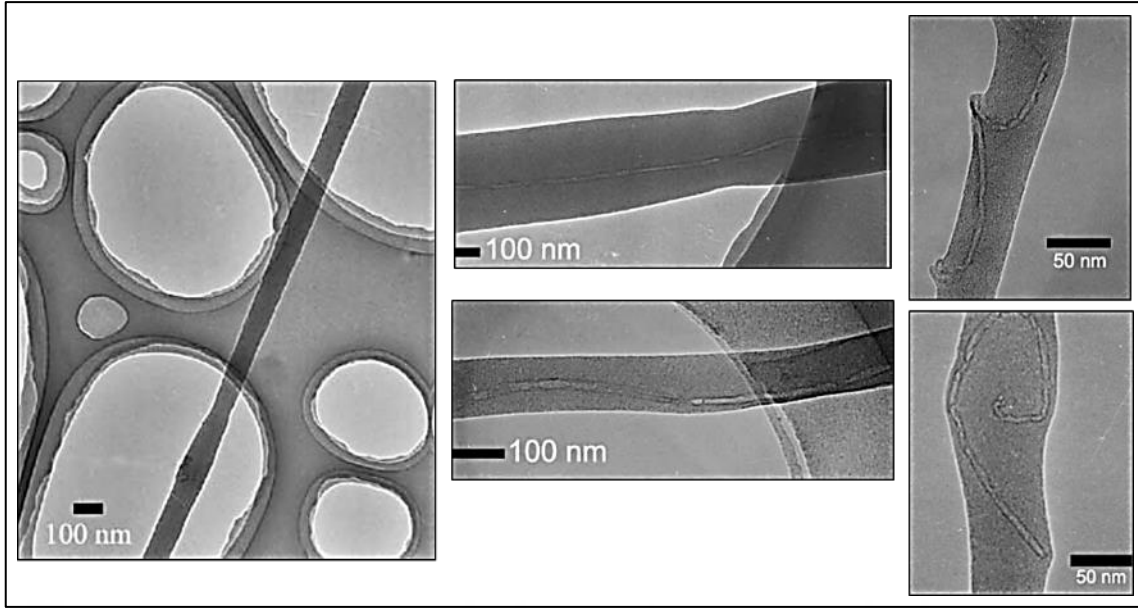
Tambur iletken bir yapıya sahip malzemeden imal edilmelidir ve üretimi yapılması arzulanan fiber özelliklerine ve geometrisine uygun şekilde bir tambur belirlenmelidir. Eğer fiberlerin rastgele (düzensiz) bir şekilde toplanması isteniyorsa sabit bir levha kullanılabilir. Fiberlerin düzenli ve belirli bir şekilde toplanması isteniyorsa döner tambur, çubuk, paralel levhalar vb. toplayıcılar kullanılabilir.

Çözücü içerisindeki polimer konsantrasyonu ise belirlenmesi gereken diğer bir önemli kriterdir. Çözücü içerisinde çözülecek olan polimer miktarının kritik değerden az ya da çok fazla olması ya fiber üretiminin gerçekleştirilememesine ya da kaliteli üretim yapılamamasına neden olabilir. Yani çözelti viskoz akışkan bir yapıda olmalı ancak ne su gibi akışkan bir sıvı ne de jel gibi bir yapıda olmalıdır. Dolayısıyla optimum konsantrasyon değerinin bulunması kaliteli fiber üretimi için kritik olmaktadır (Au - Leach ve ark., 2011).

3.12. Elektro-Eğirme Yöntemi ile KNT Takviyeli Nano Keçe Üretimi

Elektrospin yöntemi KNT takviyeli nano keçe üretiminde en sık kullanılan yöntemdir. Yapılan çalışmalarda bu yöntem kullanılarak elde edilen malzeme nano keçelerin içerisine oldukça düzgün bir oryantasyonda KNT'lerin yerleştirilebildiği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, yaptığımız çalışmalarda KNT takviyeli nano keçe üretimi için en uygun üretim yöntemi olduğu anlaşılmaktadır.

Şekil 3.12'deki SEM görüntülerinde verildiği üzere Elektro-Eğirme yöntemiyle üretilen PVA nano fiberlerin içerisine ÇCKNT'lerin düzenli veya düzensiz olarak yerleştirildiği görülmektedir.



Şekil 3.12. Tek bir PVA nano fiber içinde düzenli ve düzensiz dizimli ÇCKNT/PVA SEM görüntüleri (Zhou ve ark., 2005)

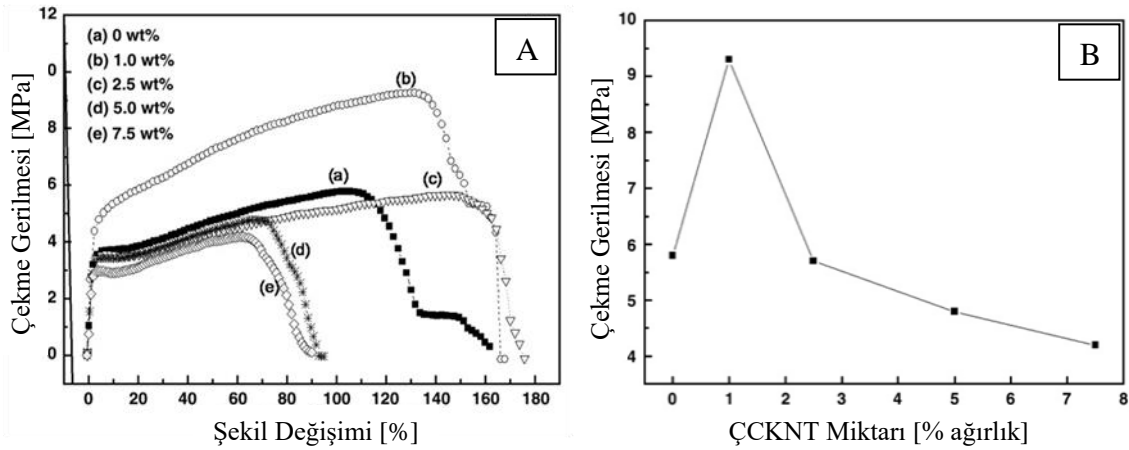
3.13. KNT Miktarının Nano Keçelerin Mekanik Özelliklerine Etkisi

Kompozit malzemelerdeki takviye elemanlarının miktarı dağılımın kalitesini ve dolayısıyla mukavemet değerlerini doğrudan etkilemektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda farklı oranlarda KNT ihtiva eden kompozit yapılar oluşturularak optimum oranlar elde edilmeye çalışılmıştır.

Sonuç olarak, KNT miktarının optimum oranlarda kullanılmasıyla elde edilen nano keçelerin mekanik özellikleri artırılabilir. Aynı zamanda, optimum miktarda KNT içeren nanofiberlerin yüzey morfolojisinde pürüzsüzlük ve dağılımında homojenlik daha kolay elde edilebilmiştir.

Yığılmaların oluşmasının ve dolayısıyla homojen olmayan dağılımın önlenmesi amacıyla nanotüplerin sulu çözeltisinde en iyi şekilde ve hassas dağılım sağlanması belirli bir orana kadar mümkün olabilmektedir. Optimum KNT oranlarının üzerine çıkıldığında ise ürün kalitesinde düşüş görülür.

Benzer şekilde yapılan araştırmalar PVA nano keçedeki %3 orana kadar ÇCKNT içeriğinin malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirdiği ve bu orandan itibaren hızlı bir düşüş olduğunu göstermektedir (Şekil 3.13). Bunun arkasındaki en önemli sebep aşırı miktardaki KNT'lerin yığılmalara neden olup homojen dağılımı olumsuz etkilemesi olarak görülmektedir (S. Jeong ve ark., 2007).

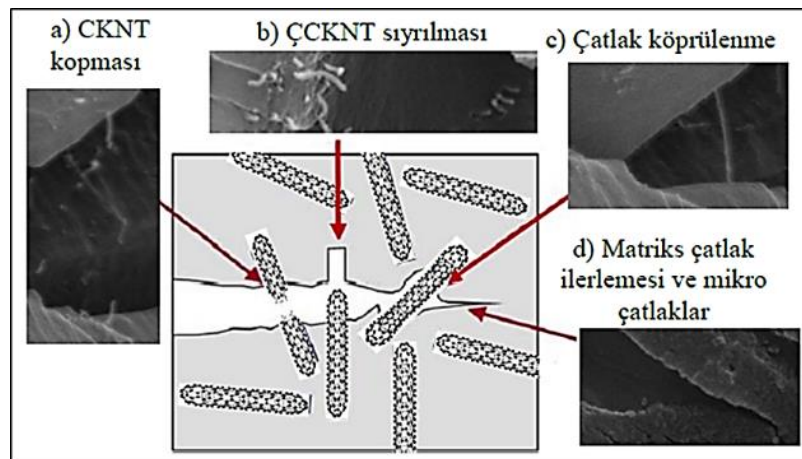


Şekil 3.13. Farklı miktarlarda (a- % 1, b- % 2.5, c- % 5, d- % 7.5) ÇCKNT içeren kompozit yapıların A: Gerilme-Şekil Değişirme grafiği ve B: Çekme dayanımının artan ÇCKNT miktarıyla değişimi (S. Jeong ve ark., 2007)

Epoksi reçine içerisinde homojen olarak dağılımı gerçekleştirilerek elektro eğirme yöntemiyle üretilen nano elyaf keçelerde mekanik özelliklerin artması farklı mekanizmalarla olabilmektedir.

Dolayısıyla, yapılan çalışmalarda KNT takviyeli nano keçe üretiminde takviye elemanı olarak seçilen polimerin ve aynı zamanda takviye elemanının konsantrasyonlarının optimum oranlarda belirlenmesi ve kullanılmasının oldukça önem arz ettiği anlaşılmaktadır.

Mekanik özelliklerin nasıl geliştirildiğini anlamak için üretilen nano elyaf keçeler üzerinde hasarlar oluşturularak hasar mekanizmalarının gelişimleri incelenmelidir. En sık görülen çatlak ilerleme mekanizmaları Şekil 3.14'de gösterildiği üzere nano elyafların kopması ve sıyrılması mekanizmaları olarak sıralanabilir.



Şekil 3.14. Nano keçelerde gözlemlenen hasar gelişim ve engelleme mekanizmaları (Ekrem, 2017)

Çatlak köprülenme mekanizması ise hasarın gelişimini engelleyici bir etki oluşturur. Tüm bu mekanizmalar vasıtasıyla modifiye edilmiş yapının kayma dayanımı, tokluğu, sünekliği ve kırılma tokluğu iyileştirilebilmektedir. Muhtemel hasar mekanizmalarının bir ya da birkaçı darbenin çeşidine ve numunenin özelliklerine bağlı olarak aynı anda gerçekleşebilir.

Yapılan çalışmalar, KNT takviyeli nano keçe kullanımının üretimi yapılacak olan malzemenin mekanik özelliklerini artırma açısından etkili olacağını göstermektedir. Dolayısıyla, yapacağımız çalışmalarda numunelere uygulayacağımız çeşitli yüklemelerin üretilen malzemede ne tür hasarlara yol açacağı ve hasar davranışlarının nasıl iyileştirildiği gözlemlenmiş olacaktır.

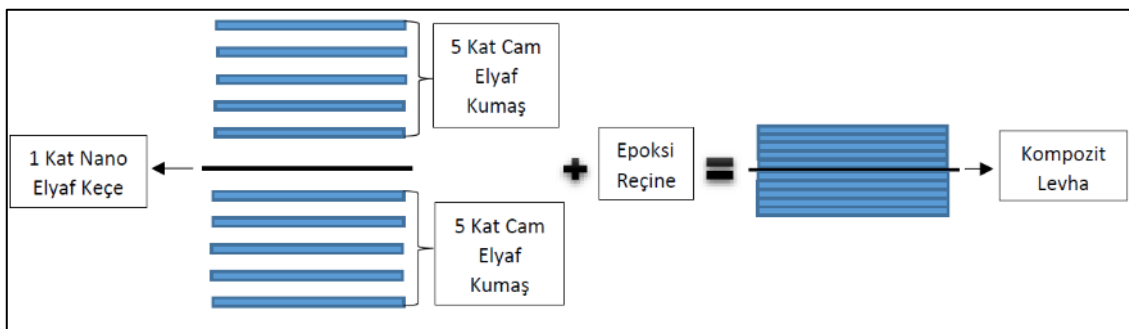


4. KONSEPT TASARIM

Bilindiği üzere kompozit levha üretiminde tabakalar arası bağlantının zayıf olması yapının bir bütün olarak davranmasına engel olmaktadır. Sonuç olarak tabakalar arası bağlantının ve dolayısıyla ara yüzey etkileşiminin çok iyi olması elzemdir. Bu konuda birçok çalışma yapılmış ancak henüz yeterli ilerleme kaydedilemediği ve benzer çalışmalara eğilme ihtiyacı görülmüştür.

KNT'lerin yapıştırma uygulamaları üzerine yapılan literatür araştırmaları KNT'lerin ara yüzey bağlantılarını iyileştirdiği ve kompozit yapıların ara yüzeylerindeki yapışma mukavemetini güçlendirdiğini göstermektedir. Aynı zamanda, KNT takviyeli nano elyaf keçe takviyesinin ara yüzey iyileştirmelerinde başarılı olacağı anlaşılmaktadır. Bu yüzden çalışmalarımızda KNT takviyeli nano elyaf keçelerin kullanılmasıyla ara yüzey iyileştirmelerinin sağlanabileceği ve sonuç itibarıyla kompozit levhaların mukavemetini artıracığı öngörüsüyle bir kompozit levha konsepti geliştirilerek testler yapılması planlanmıştır.

Yapılan çalışmalarda kullanılması planlanan konsept doğrultusunda Şekil 4.1'de verildiği gibi 10 kat cam elyaf arasına tek kat nano elyaf keçe yerleştirilerek kompozit levha üretilmiştir. Konseptin 10 kat cam elyafı desteklenmesi yapılacak olan standart mekanik testler için minimum boyut sınırlaması (optimum numune kalınlığı: ~4mm) dolayısıyla belirlenmiştir. Daha ince ya da daha kalın bir kompozit numune elde edilmesi durumunda ya çok esnek ya da çok rijit bir malzeme elde edileceğinden dolayı optimum numune kalınlığının (~4mm) 10 kat cam elyafı ile elde edilebileceği öngörülmüştür.



Şekil 4.1. Konsept Tasarım- Nano Elyaf Keçe Takviyeli Kompozit Levha Üretimi

Şekil 4.1'de gösterilen kompozit levha konseptinde, üretilen nano elyaf keçeler 10 kat cam elyafın merkezine yerleştirilmiştir. Bunun en önemli sebebi, eğilmeye maruz

kalacak olan levhada maksimum kayma gerilmesi (τ_{maks}) ve minimum eğilme gerilmesinin (σ_{min}) numunenin merkezinde oluşacağıdır. Diğer tabakalar arasında oluşacak olan kayma gerilmesi (τ_{xy}) ise yapının merkezinden uzaklaştıkça azalacak ve eğilme gerilmesi (σ_x) artış gösterecektir. Tarafsız eksenden uzağa bir yere yerleştirilmesi durumunda ise eğilmeye maruz kalacak olan kompozit levhadaki nano elyaf keçe üzerinde kesmeli eğilme yüklemesi oluşacaktır. Diğer tabakalar arasında meydana gelecek gerilme değerlerinin yapılacak olan hesaplamalarda çok fazla karışıklığa ve bilinmezliğe neden olacağı öngörüsüyle yalnızca tarafsız eksendeki ara yüzeye yerleştirilmesi mantıklı bir yaklaşım olmaktadır.

Böylece, numunenin ortasına (tarafsız eksene) yani kayma gerilmesinin maksimum olacağı bölgeye yerleştirilen nano elyaf keçenin bu ara yüzeyde oluşan kayma gerilmesinden kaynaklanan yükleri üzerine alarak ara yüzeyde nasıl bir iyileştirme (yapışma-tutunma) elde edileceği anlaşılmış olacaktır.

Yapılan çalışmalarda numunenin ortasındaki cam elyafların katlarının arasına yerleştirilmiş olan nano elyaf keçenin tabakalar arası kayma direncini artıracığı öngörülmektedir. Böylece, kompozit levhanın tabakaları arasında kaymaya karşı oluşan direnç dolayısıyla kompozit levhanın eğilme direncinde de artış olacağı beklenmektedir.

Tek bir nano elyaf keçe ilavesi ile yaklaşık olarak 4mm kalınlığındaki numunenin tarafsız ekseninin ortalama olarak 0.02 mm (yani nano elyaf keçe kalınlığı miktarınca) ötelenmesi durumu söz konusu olacaktır ve bu değişim ile eğilme direncinin %1 oranında artıracığı beklenmektedir. Birden fazla nano elyaf keçe kullanılması durumu söz konusu olsaydı, tarafsız eksen takviye edilmemiş olan numunelere göre ortalama olarak 0.2 mm (yani tüm nano elyaf keçe kalınlıklarının toplamı miktarınca) ötelenmesi durumu söz konusu olacaktı. Dolayısıyla, bu değişim ile eğilme direncinin yaklaşık %10 oranında artıracığı beklenirdi ve bunun da etkisiyle kompozit yapının gerilme davranışları çok farklı olacaktı.

Bilindiği gibi, cam elyaflar farklı doku ve desenlerde, birçok alternatif örgü yapısında ve farklı kalınlıklarda üretimi yapılabilen ve piyasada kolaylıkla bulunabilen bir kompozit üretim malzemesi olması açısından tabakalı kompozit levhaların üretiminde

sıklıkla tercih edilmektedir. Karbon elyaflarla kıyaslandığında daha düşük mukavemete sahip olmakla birlikte şeffaf yapısı itibariyle görünüm olarak da farklıdır.

Üretimi planlanan tabakalı kompozit yapıda nano elyaf keçenin mukavemete etkisini görebilmek ve şeffaflığı sayesinde numune içerisindeki varlığının net olarak fark edilebilmesi amacıyla bu çalışmada da tercih edilmiştir.

Ayrıca, cam elyaf oryantasyonunun ve dokuma çeşitliğinin deney sonuçlarına minimum etkide bulunmasını sağlamak amacıyla [0/90] oryantasyonda ve tekli örgüye sahip bir cam elyaf kumaş tercih edilmiştir. Cam elyafların [0/90] oryantasyonu sebebiyle de yapının mukavemetine etkisi tek ekseninde olacaktır. Bu oryantasyon dışında başka bir açıda oryantasyona sahip bir cam elyaf kumaş kullanılması yapılacak olan standart testler esnasında farklı yönlerde gerilmelerin doğmasına sebep olacaktır.

Seçilen [0/90] oryantasyonundaki cam elyafların kullanılmasıyla, gerilmelerin açılı olmasının minimize edilmesi ve farklı yönlerde doğabilecek olan gerilmelerin sınırlandırılması mümkün olmaktadır.

Nano elyaf keçe üretiminde ise birçok çalışmada kullanılmış, hassas üretim yapabilme imkânı tanıyan ve etkinliği kanıtlanmış bir fiber üretim tekniği olan elektro-eğirme yöntemi kullanılmıştır. Elektro-eğirme tekniği aynı zamanda istenilen boyutlarda (uzunluk, genişlik ve kalınlık) numuneler üretmemizi mümkün kılmaktadır. Üretim esnasında fiberlerin oluşumunun ve yayılımının görsel olarak analiz edilmesi olası üretim hatalarının önüne geçilmesine de imkân vermektedir.

Elektro-eğirme yönteminin bu gibi avantajlarının yanında bazı dezavantajları da vardır. Bunlar; çok hassas ayar yapılması gerekliliği ve üretim esnasında sistemin her an gözetim altında tutulması zorunluluğu bulunmaktadır. KNT'lerin çözelti içerisinde homojen olarak karıştırılması ve üretim esnasında da enjektörlerde yığılmaların ve çökelmelerin meydana gelmesi ihtimali dolayısıyla az miktarlarda üretim yapılabilmesi diğer bir sorundur. Her bir nano elyaf keçe üretiminin yaklaşık 4-5 saatlik bir süre alması ve üretim esnasında oluşabilecek muhtemel hataların üretimin en başından tekrarlanmasını zorunlu kılması üretim sürecinin daha da zor bir hal almasına neden olmaktadır.

Elektro-eğirme yöntemiyle konsept olarak seçilen tasarıma göre üretimi yapılan kompozit malzemelerden standart boyutlarda kesilerek elde edilen numunelere sıklıkla kullanılan mekanik testler uygulanarak mukavemet özelliklerini tayin edilmesi amaçlanmıştır.

Yapılan testler sonrasında mukavemet değerleri belirlenecek olan kompozit yapının birçok kompozit malzemede olduğu gibi hem hafif hem de mekanik özellikler itibarıyla üstün özelliklere sahip olması, ayrıca bu tür özelliklere sahip malzemelerin yaygın olarak kullanıldığı havacılık ve uzay sanayi gibi uygulamalarda alternatif bir malzeme olması öngörülmektedir.

Polimer esaslı kompozit malzemelerin maruz kaldığı yüklerin sebep olduğu hasarların boyutlarının çıplak gözle tam olarak tespit edilememesi, darbe sonrasında mekanik özelliklerinin çok zayıflaması ve sonuç olarak malzemelerden beklenen performansı gösterememesi gibi durumlar kompozit malzeme uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan problemlerin başında gelmektedir. Dolayısıyla, yapılan çalışmalar sonrasında elde edilecek olan verilerin bu eksikliğin giderilebilmesi ya da farklı bir bakış açısı getirebilmesiyle bu tür kompozit yapıların sorunsuz ve daha güvenilir bir biçimde kullanılabilmesi amaçlanmaktadır.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. PVA ile Yapılan Üretimler

Yapılan çalışmalarda PVA (Poli-vinil Alkol) polimer malzemesi kullanıldı ve ÇCKNT oranları sırasıyla ağırlıkça %0, %1, %2 ve %3 olarak ilave edilerek 4 farklı parametreden oluşan elektro eğirme işlemi gerçekleştirildi.

5.1.1. Kullanılan malzemeler

Numunelerin hazırlanmasında daha önce uygulanan ve başarılı sonuçlar elde edilmiş olan üretim yöntemi takip edilmiştir. Dolayısıyla, çözelti hazırlamak için aşağıdaki adımlar sırasıyla takip edilmiştir:

Polimer Malzeme: Sigma-Aldrich firmasından toz halde PVA ($M_w \sim 350,000$ g/mol) tedarik edilmiştir.

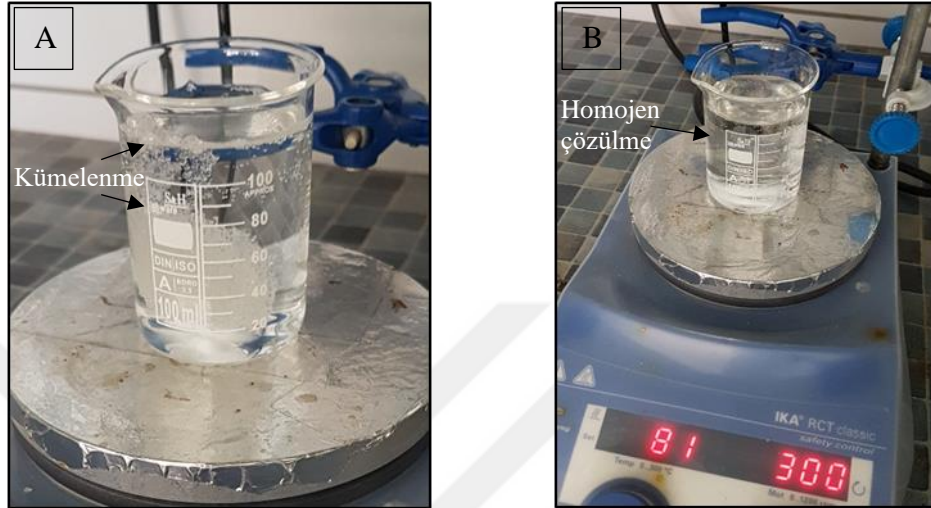
Nano malzeme: 10-20 nm dış çapa ve 30 μm uzunluğa sahip olan Çok Cidarlı Karbon Nanotüp (ÇCKNT) satın alınmıştır.

Çözücü Seçimi: Çözücü seçimi için yapılan literatür araştırmaları sonucunda su bazlı olan polimerler için çözücü olarak saf su kullanıldığı ve ayrıca yüzey gerilimini azaltmak için Dodesil Sülfat'ın (SDS) PVA için en uygun çözücüler olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla, PVA çözücüsü olarak saf su ve yüzey gerilimini azaltmada kullanılmak üzere SDS tedarik edilmiştir.

5.1.2. Çözelti hazırlama aşamaları

PVA çözeltisi elde etmek amacıyla 10 g PVA (%10) oda sıcaklığındaki 90 g saf su içerisine ilave edilerek 80 °C sıcaklığa ısıtılıp PVA'nın tam olarak çözülmesi için karışım manyetik karıştırıcı yardımıyla 3 saat karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Daha düşük sıcaklıklarda yapılan denemelerde, PVA polimer partiküllerin saf su içerisinde başarılı bir şekilde çözülmediği ya da çözülmenin çok uzun süreler aldığı gözlemlenmiştir. Örneğin, daha düşük bir sıcaklıkta (~50 °C) saf su içerisinde 5 saat boyunca manyetik karıştırma işlemine tabi tutulan PVA partikülleri Şekil 5.1'de gösterildiği üzere kümelenme eğilimi göstermiş olup uzun süreler sonunda dahi (5-6 saat) tam anlamıyla bir çözülme gerçekleşmemiştir. Bu sebepten dolayı daha yüksek

sıcaklıklarda (70°C ve 80°C) denemeler yapılmış ve daha iyi sonuçlar alınmıştır. Sonuç olarak artan sıcaklığın PVA'nın saf su içerisinde çözünübilirliğine olumlu etkisi olduğu anlaşılmıştır ve çalışmalarımız boyunca uygulanacak olan optimum karıştırma sıcaklığının 80°C olması ve homojen çözünmenin tam olarak sağlanması adına manyetik karıştırma işleminin 3 saat boyunca sürdürülmesi kararlaştırılmıştır.



Şekil 5.1. PVA'nın saf su içerisinde A: düşük sıcaklıkta ve B: 80°C de karıştırılması

Karıştırma işlemi esnasında buharlaşma yoluyla çözeltilen saf su miktarı ilave edilerek devam edilmiş ve yüzey gerilimini azaltmak için her 10 g PVA çözeltisine karşılık SDS çözücüsünden 1 gr ilave edilmiştir.

5.1.3. ÇCKNT'lerin çözelti içerisinde dağıtılması

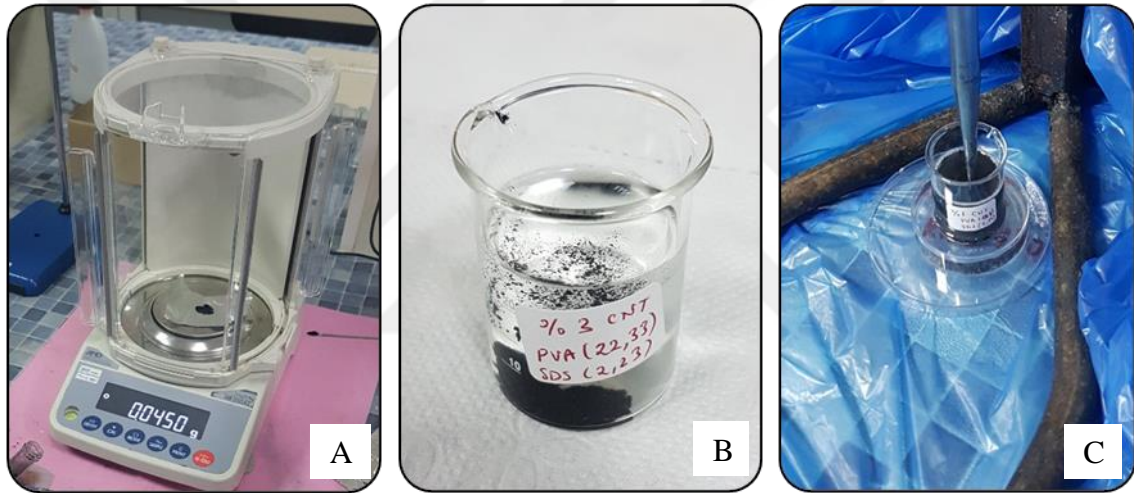
Çözeltideki PVA miktarına göre ağırlıkça sırasıyla %1, %2 ve %3 oranlarında ÇCKNT partikülleri homojen çözeltilere eklenmiştir ve homojen bir dağılım sağlanması amacıyla ultrasonik karıştırıcı yardımıyla karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. ÇCKNT'lerin çözeltinin tamamında eşit oranlarda yayılması 15 dakika boyunca (3 x 5) ve sıcaklığı 50 °C'nin altında tutabilmek için üçer dakikalık aralıklarla karıştırılmıştır.

Dağılımı diğer karıştırma teknikleriyle neredeyse imkânsız olan ÇCKNT'ler ultrasonik karıştırıcı yardımıyla çözelti içerisinde homojen olarak karıştırılabilmektedir. Ultrasonik karıştırıcı belirli çevrimlerde titreşimler oluşturacak şekilde ayarlanmış ve sıcaklığı dengelemek adına 50°C üzerine çıkıldığı durumlarda sıcaklığın malzemelerde bozulma, ÇCKNT'lerin zarar görmesi, çözeltideki sıvının kaynaması ya da hızlı

buharlaşmaya sebebiyet vermesi gibi olası zararlı etkilerinden korumak için su banyosu uygulanmıştır.

Manyetik ve ultrasonik karıştırma esnasında gerek saf su miktarında gerekse SDS miktarındaki buharlaşmaya bağlı azalmaları telafi etmek için çözeltinin yoğunluğu da dikkate alınarak kaybolan miktar çözeltinin derişimini istenen seviyede tutmak amacıyla tekrar eklenmiştir.

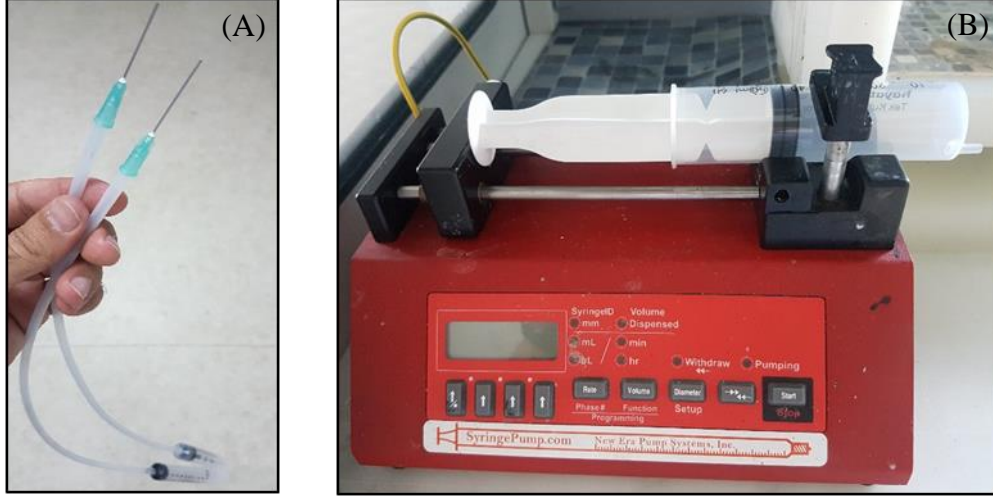
Şekil 5.2, ÇCKNT partiküllerinin PVA çözeltisi içerisinde ultrasonik karıştırıcı yardımıyla homojen bir şekilde dağıtılması işlemlerini göstermektedir. Şekillerden de net bir biçimde anlaşıldığı üzere ÇCKNT'ler birbirinden eş uzaklıklarda (uniform) ve çözelti içerisinde homojen dağılım sağlayacak şekilde karışım elde edilmiştir.



Şekil 5.2. ÇCKNT partiküllerinin A: Tartılması, B: PVA çözeltisi içerisine ilave edilmesi ve C: Ultrasonik karıştırıcı yardımıyla çözelti içerisinde dağıtılması işlemi

5.1.4. Elektro-Eğirme Parametreleri

Hazırlanan PVA/ÇCKNT çözeltisi 300mm x 300mm boyutlarında numuneler elde edebilmek için öncelikle Şekil 5.3'de gösterilen 10 ml'lik 3 adet enjektöre alınarak yatay doğrultuda enjektör pompasına bağlanmıştır. Ardından, 5mm çapındaki hortumlarla çözeltinin aktarılmasını sağlamak amacıyla enjektörler ve 0.8mm çapında metal iğne uçları arasında bağlantı sağlanmıştır.



Şekil 5.3. A: Enjektörlerin hazırlanması ve B: Enjektör pompasına bağlanması

Ardından, nano elyaf keçelerin toplanacağı 320mm x 320mm boyutlarındaki alüminyum folyo 100mm çapında ve 320mm uzunluğundaki tambura Şekil 5.4'de gösterilen düzenekte gibi sarılmıştır. Çözeltinin dikey doğrultuda sabitlenmiş olan metal iğnelerden sabit hızda kendi etrafında dönen ve sağa ve sola hareket edebilen tambura olan mesafesi sabit kalınlıkta fiberler üretebilmek için 150 mm olarak ayarlanmıştır. Üretim çalışmaları için; Şırınga pompasının debisi ortalama 0.3 mL/saat hızında, yüksek gerilim güç kaynağı ortalama 25 kV değerinde ayarlanmıştır.

Çalışmalar oda sıcaklığının 23 °C olduğu bir laboratuvar ortamında elektriksel olarak yalıtılmış kapalı bir kabine sahip olan Şekil 5.4'de verilen Elektro-eğirme cihazında (Innovenso-NE300) önceden belirlenmiş üretim parametreleri doğrultusunda yapılmıştır. Elektro-eğirme işlemlerinin aşamaları aşağıdaki şekilde görülmektedir.

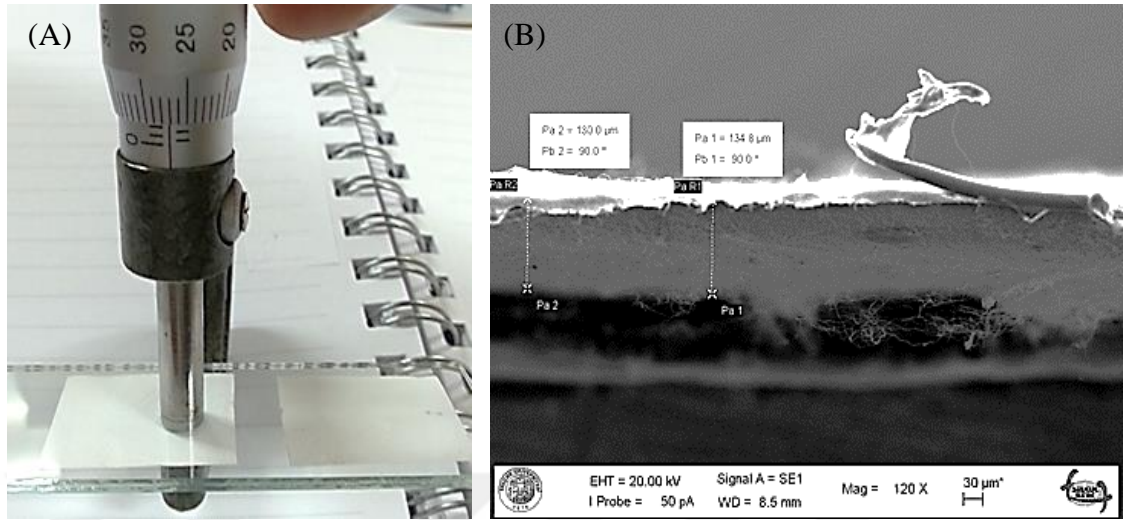


Şekil 5.4. PVA/ÇCKNT çözeltilisinden Elektro-Eğirme yöntemiyle nano elyaf keçe üretimi işlemlerinin aşamaları (A: Cihazın üretim esnasında görünümü, B: Sistemin detaylı görünümü, C: Üretim esnasında nanoelyafların oluşumu, D: Üretimi gerçekleştirilmiş nanoelyaf keçe)

Sonuç olarak, tambur dönüş hızı 500 dev/dak olarak sabit tutulmuş ve yaklaşık 3 saat süren elektro-eğirme işlemi ile sabit kalınlıkta nano elyaf keçe numuneler elde edilmiştir. Üretim sonrasında numuneler oda sıcaklığında düz bir zeminde kurumaya bırakılmıştır.

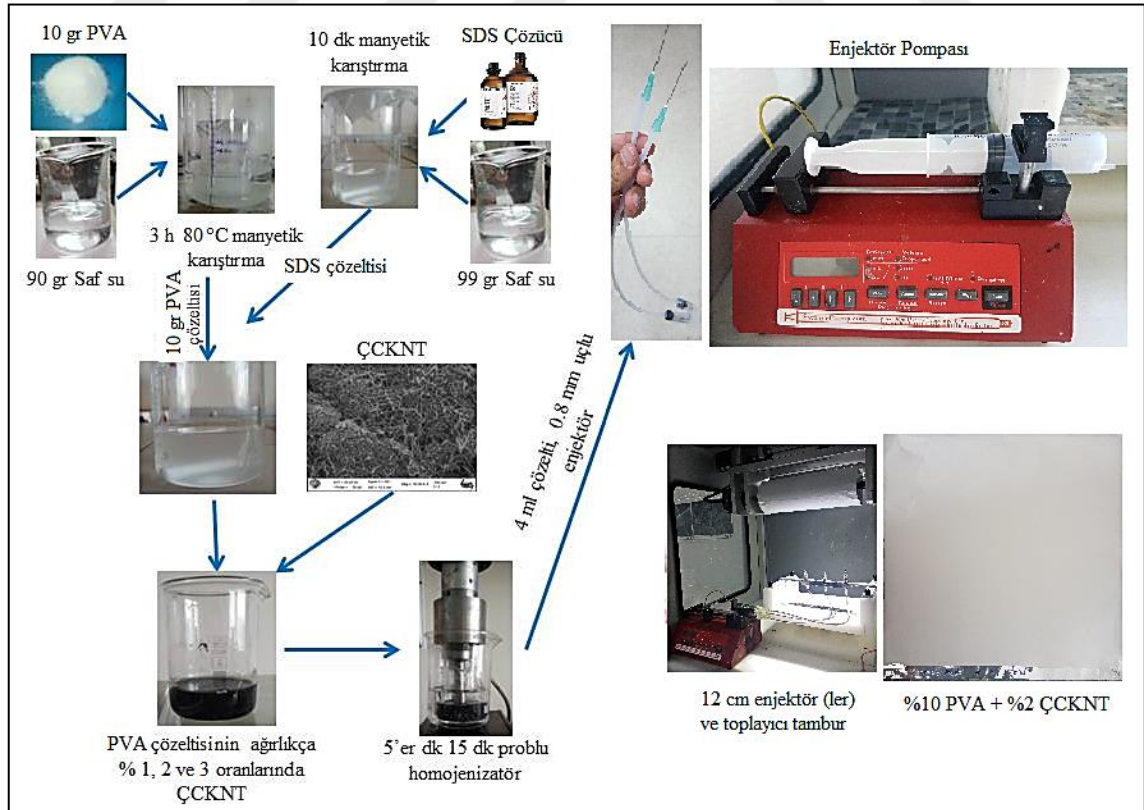
Şekil 5.5’de gösterildiği üzere, elektro-eğirme yöntemiyle üretilen nano keçe elyafların kalınlıkları (A) SEM ve (B) mikrometre kullanılarak ölçülmüştür. SEM görüntüleri ile ölçülen kalınlık mikrometre kullanılarak elde edilen değerden farklı olmuştur. Bunun nedeni mikrometrenin cırcırının elyaf üzerinde bir miktar yük

oluşturmasıdır. Dolayısıyla net bir kalınlıktan bahsedilememekle birlikte kalınlık değerleri için “görünür kalınlık” esas alınmıştır.



Şekil 5.5. Nano keçe elyafların A: Mikrometre ile ve B: SEM yardımı ile kalınlık ölçümü

Şekil 5.6’da Elektro-Eğirme yöntemiyle %1, %2 ve %3 oranlarında ÇCKNT takviyeli PVA nano elyaf keçe üretim işleminin tüm aşamaları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Elektro-eğirme yöntemiyle ÇCKNT takviyeli PVA nano keçe üretim işlemi

%10 oranında PVA ve farklı oranlarda ÇCKNT içeren nano elyaf keçelerin üretim parametreleri Tablo 5.1’de verilmektedir.

Tablo 5.1. Farklı oranlarda (ağırlıkça % 0, 1, 2 ve 3) ÇCKNT ve %10 PVA içeren çözeltilerden Elektro-Eğirme yöntemiyle nano elyaf keçe üretim parametreleri

Numune No.	Saf Su İçeriği (ml)	ÇCKNT Miktarı % (gr)
1	25.1	%0
2	22.4	%1
3	26	%2
4	22.33	%3

Nano elyaf keçe üretimleri Tablo 5.1’de verilen üretim parametreleri doğrultusunda 3 (üç) kez tekrarlanmıştır. PVA içeriği ağırlıkça %10, SDS miktarı ise PVA’ya oranla hacimsel olarak %10 eklenerek besleme hızınının 0.3 ml/saat ve 25 kV gerilim altında üretim gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak her bir parametreden 3’er adet nihai ürün elde edilmiştir. Ürünlerden 1 tanesi nano elyaf keçelerin morfolojik ve yapısal özelliklerinin mikro ve nano boyutta incelenmesi amacıyla yapılan analizlerde, kalan 2 adet numune ise kompozit levha üretiminde kullanılmıştır. Üretimi yapılan farklı miktarlarda ÇCKNT içeren nano elyaf keçeler Şekil 5.7’de gösterilmektedir.



Şekil 5.7. %10 PVA ve ağırlıkça farklı oranlarda ÇCKNT içeren nano elyaf keçeler; A: %0, B: %1, C: %2 ve D: %3 ÇCKNT

Farklı oranlarda ÇCKNT içeren nano elyaf keçelerin içeriğindeki ÇCKNT oranının artmasıyla birlikte renk tonlarında koyulaşma meydana geldiği görsellerden anlaşılmakta olup renklerin dağılımının homojen olması üretimin kalitesinin de bir göstergesidir.

PVA ve PVA/ÇCKNT çözeltileriyle yapılan elektro-eğirme işlemleri esnasında karşılaşılan bazı problemler ve çözüm yöntemleri aşağıda nedenleriyle birlikte açıklanmaktadır.

Bunlardan ilki; çalışmaların ilk aşamasında tek enjektörlü bir sistem kullanılarak üretim gerçekleştirilmiştir ve bu işlemin tek enjektörle yapılması verimli olmamakla birlikte ve olumlu sonuçlar doğurmamıştır. Nihai ürünlerde kalınlığın eşit olmaması, üretim sonrasında malzemelerde kırışıklık meydana gelmesi ve ürün boyutlarının 120mm x 300mm elde edilmesi gibi sorunlarla karşılaşılmıştır. Şekil 5.8’de görüldüğü üzere,

kendi etrafında belirli hızlarda dönen ve sabit hızda sağa-sola hareket eden tamburlarla alüminyum folyo üzerinde toplanan fiberlerin dağılımı eşit ve homojen olarak yapılamamıştır. Bunun da ötesinde, ürünlerin üretim sonrasında kuruması esnasında buruşukluk, kırışıklık ve sonuç itibarıyla yırtılma ve hasar görmesi gibi istenmeyen durumlar ortaya çıkmıştır. Sorunun çözümü için 3 enjektörlü sistemin kullanılması kararlaştırılmıştır.



Şekil 5.8. Tek şırıngalı sistemde üretimi yapılan nano elyaf keçelerin homojen olmayan dağılım göstermesi ve üretim sonrasında üründe buruşuklukların oluşması

Elektro-eğirme ile ilgili karşılaşılan diğer bir problem ise 3 adet enjektörün tek bir enjektör pompasına bağlanması ve bu enjektörlerden çıkan çözelti miktarlarının aynı olmasının ayarlanabilmesidir. Öncelikle, 3-enjektörlü sistemde elektro-eğirme işlemi yapılması üretim hızımızı 3 katına çıkarmakla birlikte daha kaliteli ürün üretimini de mümkün kılmıştır. Ancak, 3 enjektörün bir bütün olarak hareket etmesini sağlamak adına enjektörlerin bant yardımıyla birbirine tutturulması ve bunu yaparken de enjektörlerin düz olarak sabitlenmesi ve herhangi bir eğiklik meydana gelmemesi oldukça hassas bir çalışma gerektiren bir iştir. Aksi halde, çözeltilerin besleme oranları yani enjektörlerden çıkan çözelti hızlarında farklılıklar oluşup bunun sonucunda üretilen PVA/ÇCKNT nano fiber ağlar düzensiz ve dengesiz olarak dağılırlar. Bunun yanında, 3-enjektörlü sistem üretim boyunca zaman zaman kontrol edilip üretim işleminin başarılı bir şekilde devam edip etmediği ya da herhangi bir aksaklığın oluşmaması teyit ve temin edilmelidir. Aşağıda Şekil 5.9’da tek-enjektörlü ve 3-enjektörlü sistemler görülmektedir.



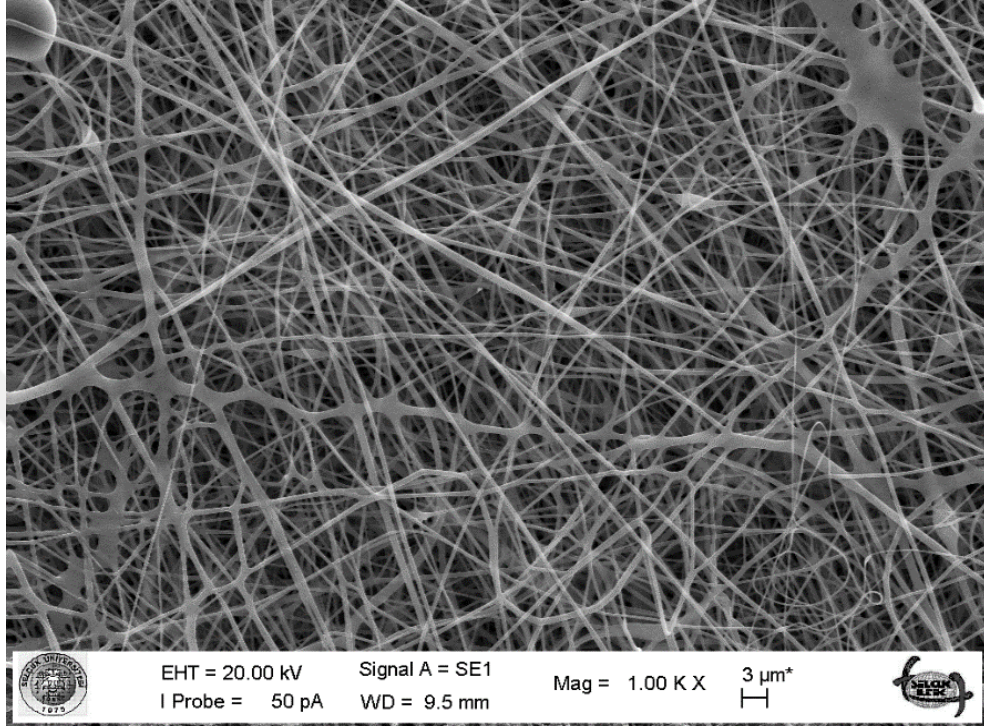
Şekil 5.9. A: Tek-enjektörlü ve B: 3-enjektörlü sistemler

Diğer bir önemli problem ise 10 ml'lik enjektörlerin çözelti ile doldurulmaları, dolayısıyla 5 mm çapındaki hortumların da iğnelere kadar çözelti ile dolu olduğunun ve dolum esnasında kabarcıkların oluşmamasının sağlanması, 0.7 mm iç çapa sahip olan iğnelerin tambura dik bir şekilde yerleştirilerek iğne uçlarından çözelti geldiğinin teyit edilmesi önem arz etmektedir. Enjektörlerin içinde hava ya da vakum oluşturmadan doldurulması hassas bir çaba gerektirmektedir. Aynı zamanda ne boruda ne de iğne içerisinde hava kabarcığı, vakum ya da tıkanma oluşmaması kaliteli ürün elde edilmesinde şarttır. Aksi halde, hava kabarcıkları, vakum ya da tıkanma problemleri çözelti akışında ve dolayısıyla nano fiber ağların üretiminde istenmeyen herhangi bir düzensizliğe sebep olabilmektedir.

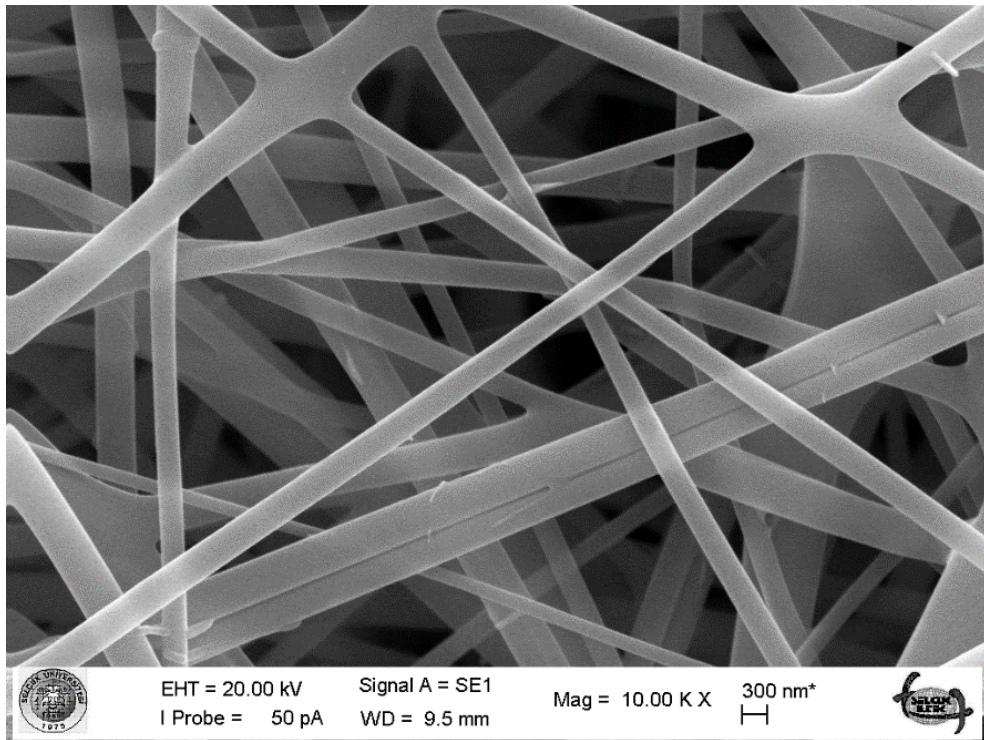
5.1.5. Morfolojik yapının analizi

Üretimi gerçekleştirilen farklı oranlarda ÇCKNT içeren nano elyaf keçelerin morfolojik yapılarının incelenmesi için Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) görüntüleri alınarak incelenmiştir. Sırasıyla yalnızca PVA, PVA ve ağırlıkça %1, %2 ve %3 oranlarda ÇCKNT içeren nanoelyaf keçe ürünlerin SEM görüntüleri aşağıdaki şekillerde (Şekil 5.10 - Şekil 5.17 arası) verilmektedir. Şekillerden görüldüğü üzere üretimi gerçekleştirilen numunelerin geneli için elyafların dizilimi oldukça düzgün dağılımdadır ve çapları numunenin tamamı için eşdeğer sayılabilecek düzeydedir. Elyaf kalınlıklarının ölçülmesinde CAD programı kullanılarak her bir görüntü üzerinden en az 10 farklı elyafın kalınlığının ölçümü yapılması suretiyle ortalama bir değer bulunmuştur. Elyaf oluşumlarında numune özelliklerini olumsuz etkileyebilecek hatalar bulunmamaktadır.

%10 PVA ile hazırlanmış ÇCKNT içermeyen çözelti ile üretilmiş fiberlerin gösterildiği Şekil 5.10 ve Şekil 5.11 ile verilen SEM görüntüleri incelendiğinde, fiber çaplarının yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. PVA nanoelyaf keçe için ortalama fiber çaplarının 300 ± 11 nm olduğu tespit edilmiştir.

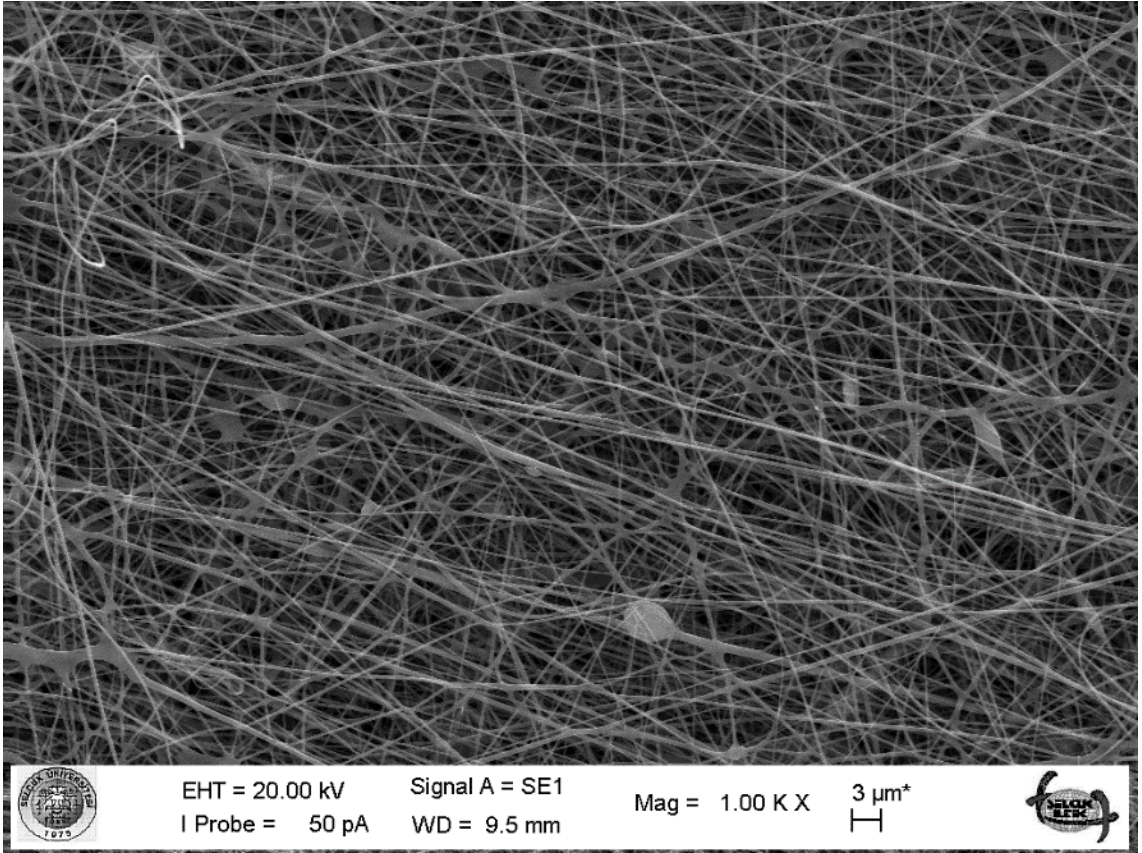


Şekil 5.10. %10 PVA ile hazırlanmış ÇCKNT içermeyen çözelti ile üretilmiş fiberler (1K.X)

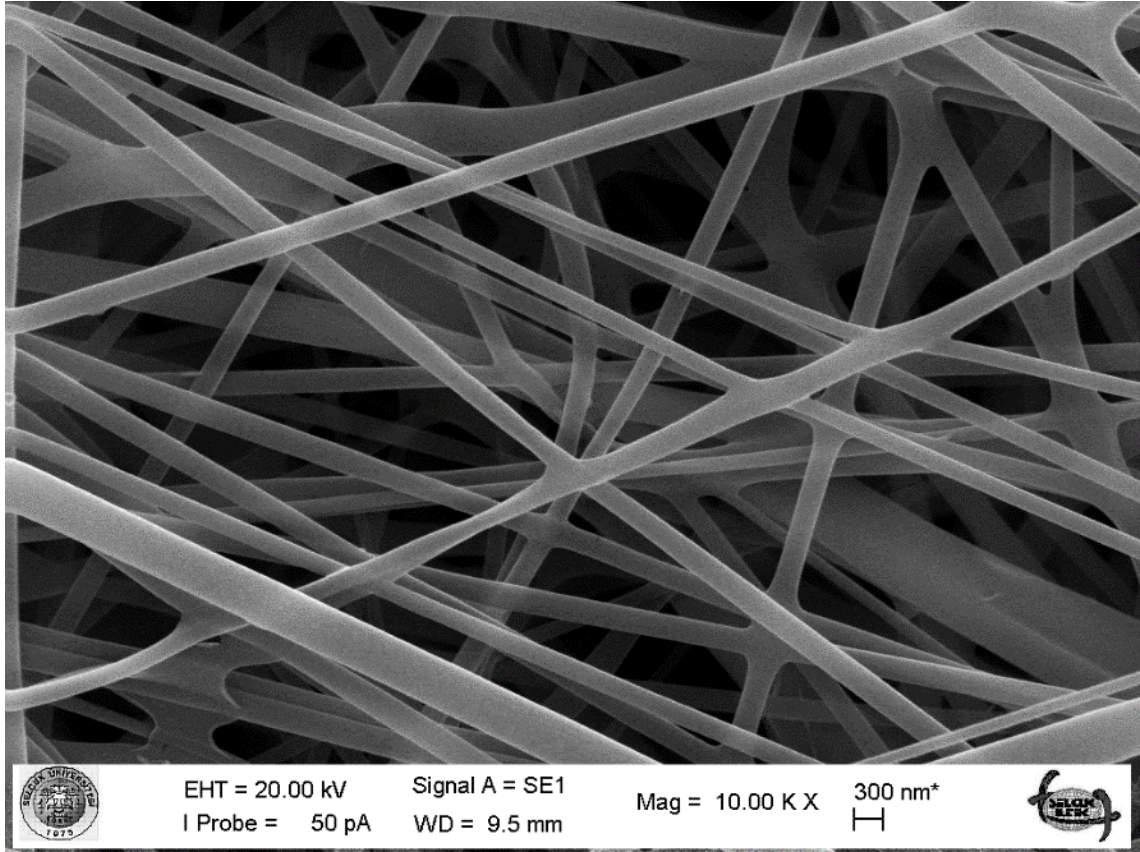


Şekil 5.11. %10 PVA ile hazırlanmış ÇCKNT içermeyen çözelti ile üretilmiş fiberler (10K.X)

Şekil 5.12 ve Şekil 5.13 ile verilen %10 PVA ve ağırlıkça %1 ÇCKNT içeren çözelti ile üretilmiş fiberlerin gösterildiği SEM görüntüleri incelendiğinde, ortalama fiber çaplarının %1 oranında ÇCKNT içeren PVA nanoelyaf keçe için 215 ± 13 nm olduğu görülmektedir. Fiberlerin yerleşimi oldukça düzgün elde edilmiş olup fiber çaplarındaki dağılım aralığı kabul edilebilir sınırlar içerisinde elde edilmiştir. Şekil 5.12’de görüldüğü üzere minimal düzeyde boncuklaşmaların varlığı tespit edilmiştir ancak boncuklaşmaların miktarı numunelerin geneli üzerinde olumsuz etkiler yaratmayacak kadar azdır.

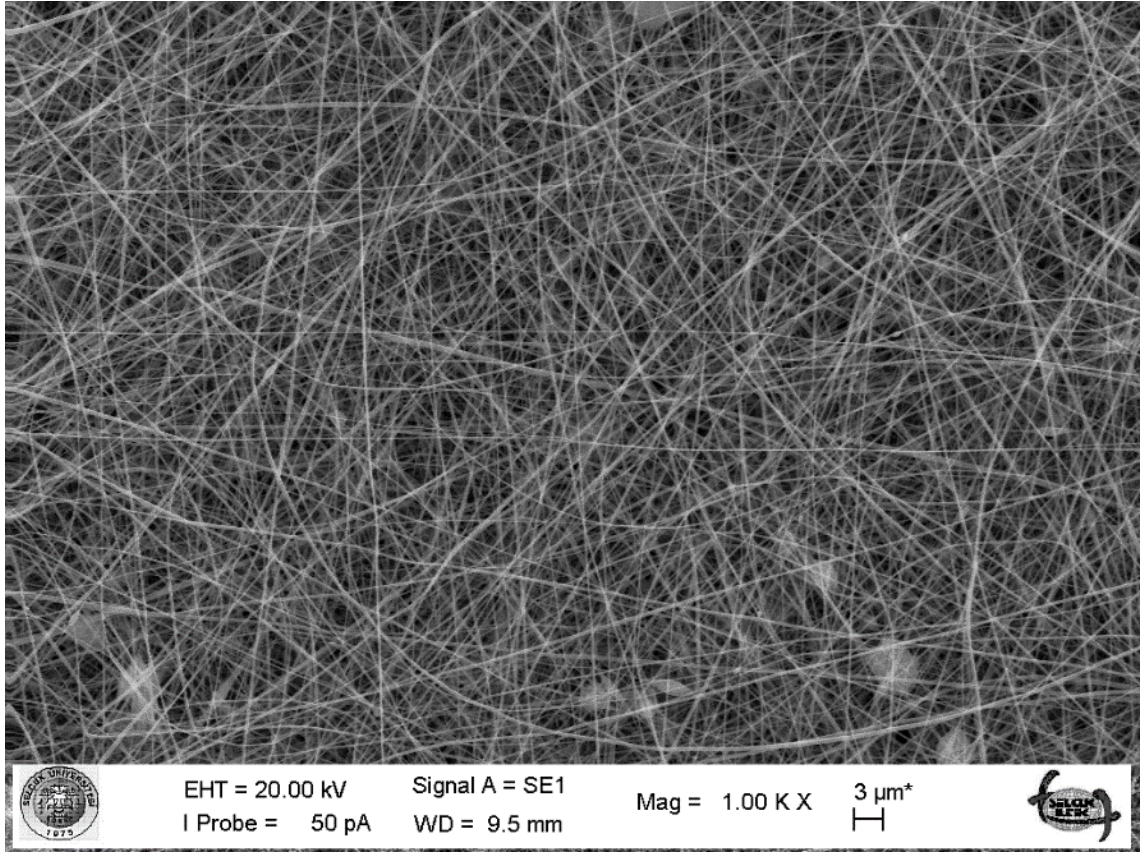


Şekil 5.12. %10 PVA ve ağırlıkça %1 ÇCKNT içeren çözelti ile üretilmiş fiberler (1K.X)

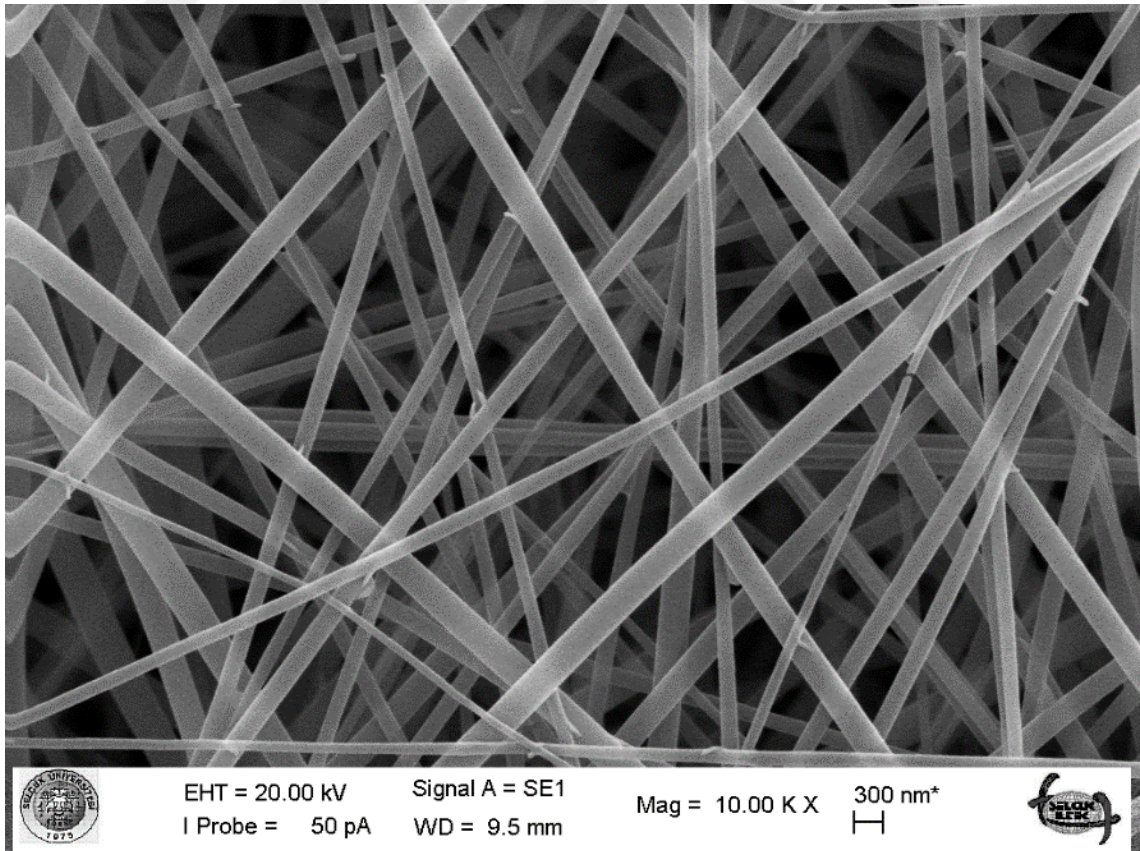


Şekil 5.13. %10 PVA ve ağırlıkça %1 ÇCKNT içeren çözelti ile üretilmiş fiberler (10K.X)

Şekil 5.14 ve Şekil 5.15 ile verilen %10 PVA ve ağırlıkça %2 ÇCKNT içeren çözelti ile üretilmiş fiberlerin gösterildiği SEM görüntüleri incelendiğinde fiber çaplarının yaklaşık olarak aynı olduğu tespit edilmiştir. Nanoelyaf keçelerin 180 ± 10 nm aralığında değerlerde çaplara sahip olduğu ve yerleşimlerinin oldukça düzgün elde edildiği görülmektedir.

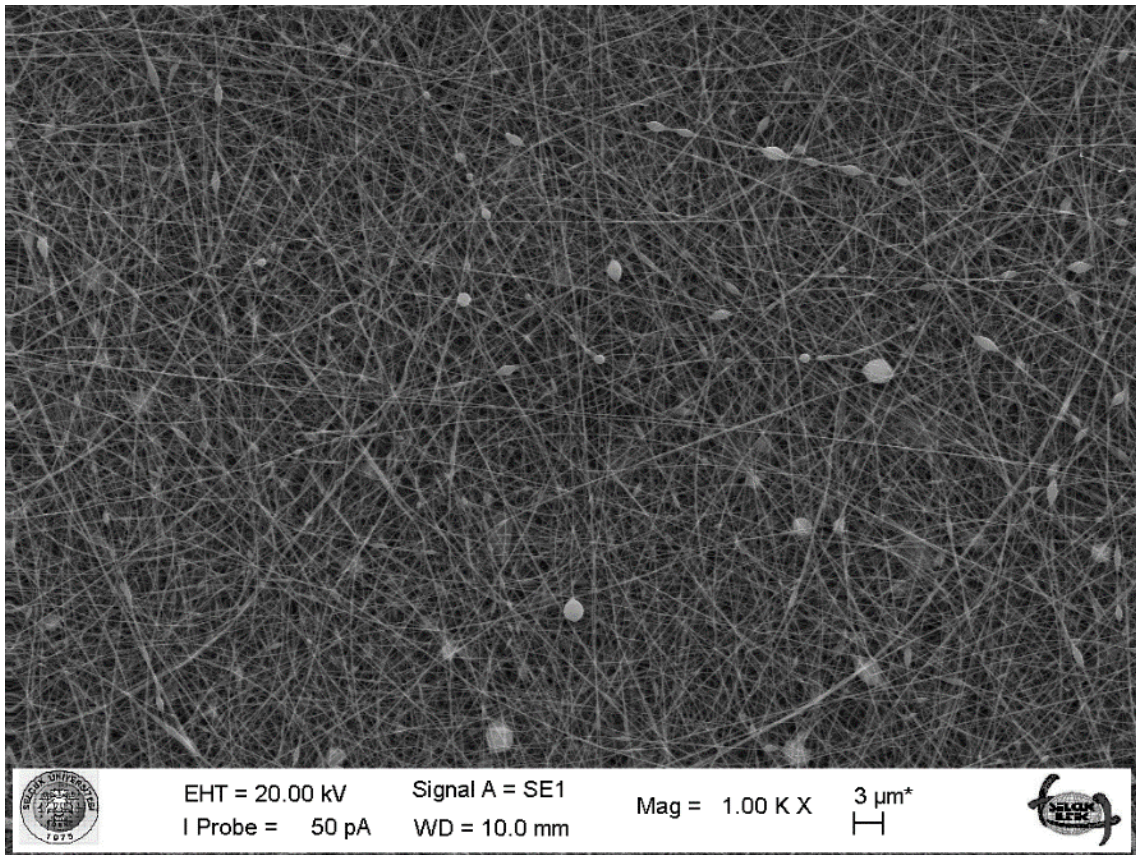


Şekil 5.14. %10 PVA ve ağırlıkça %2 ÇCKNT içeren çözelti ile üretilmiş fiberler (1K.X)

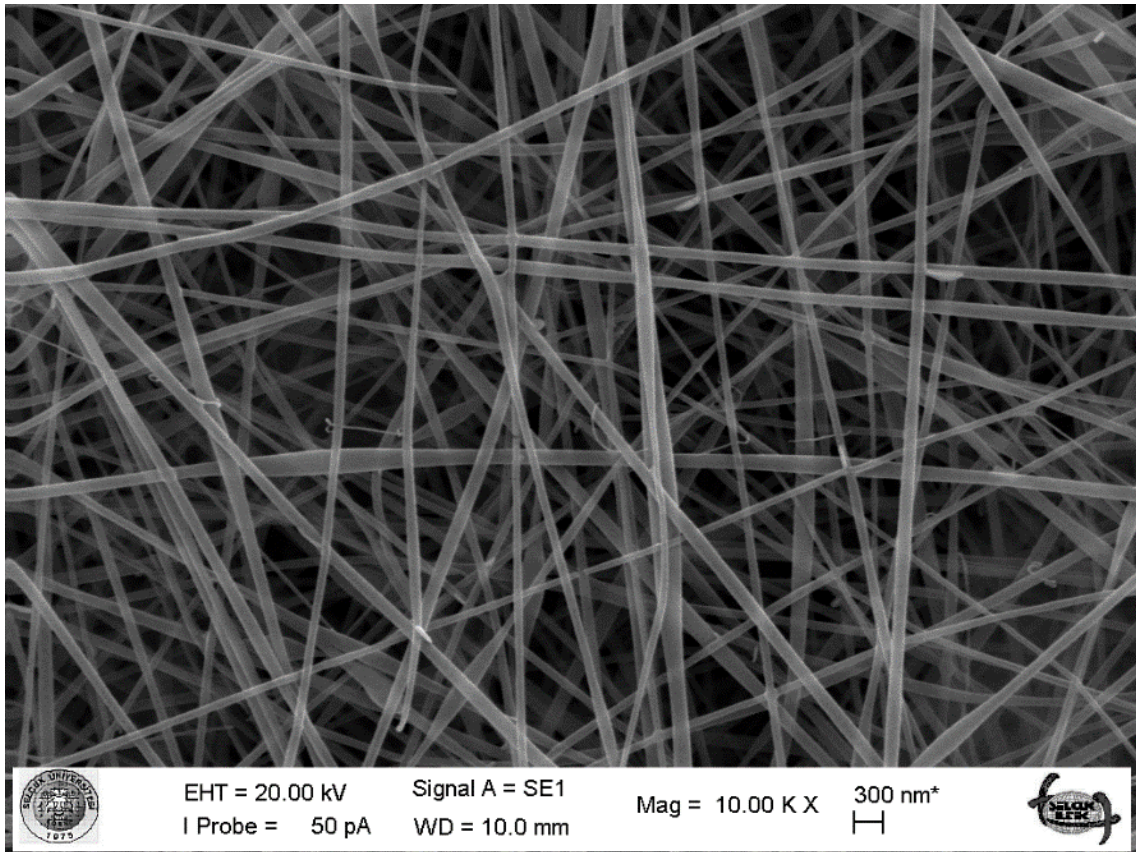


Şekil 5.15. %10 PVA ve ağırlıkça %2 ÇCKNT içeren çözelti ile üretilmiş fiberler (10K.X)

Şekil 5.16 ve Şekil 5.17’de gösterilen %10 PVA ve ağırlıkça %3 ÇCKNT içeren çözelti ile üretilmiş fiberlere ait SEM görüntülerinde, fiber çaplarının yaklaşık olarak aynı olduğu tespit edilmiştir olup ortalama fiber çapları 100 ± 8 nm aralığında elde edilmiştir. Fiberlerin yerleşimi oldukça düzgün ve fiber çaplarındaki dağılım aralığı kabul edilebilir sınırlar içerisinde elde edilmekle birlikte Şekil 5.16’da verilen SEM görüntüsünde verildiği üzere boncuklaşmaların mevcut olduğu gözlemlenmiştir. Boncuklaşma miktarındaki artışın CNT miktarındaki artışa bağlı olarak gelişmekte olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte, boncuklaşmaların miktarı numunelerin geneli üzerinde olumsuz etkiler yaratmayacak düzeydedir.



Şekil 5.16. %10 PVA ve ağırlıkça %3 ÇCKNT içeren çözelti ile üretilmiş fiberler (1K.X)



Şekil 5.17. %10 PVA ve ağırlıkça %3 ÇCKNT içeren çözelti ile üretilmiş fiberler (10K.X)

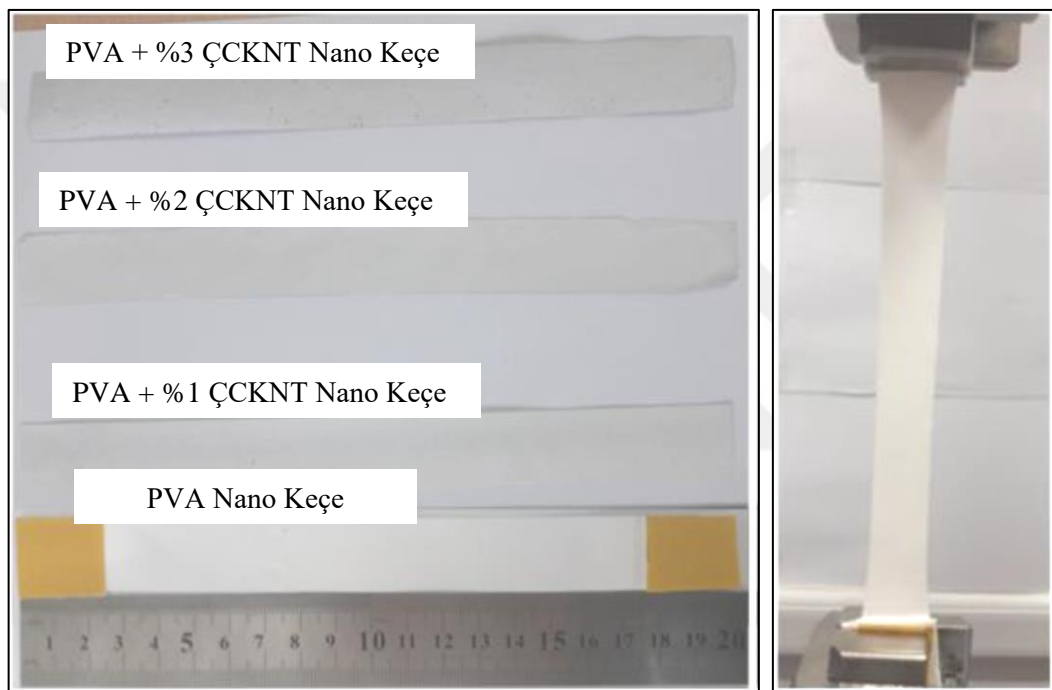
Numunelerin geneli incelendiğinde, aynı karışım oranlarındaki numunelerin ortalama fiber çaplarının yaklaşık aynı boyutlarda olduğu, elektro eğirme yöntemiyle üretilen nano elyaf keçelerde görülen ve malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyeceği öngörülen damlacık oluşumları gibi hataların önemsenmeyecek kadar az olduğu ve fiberlerin uygun dağılımlarda ve ÇCKNT'lerin de yeterince iyi yerleşim gösterdiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, üretim esnasında kullanılan parametrelerin uygun ve dolayısıyla elde edilen ürünlerin kalitesinin yeterli olduğu anlaşılmaktadır.

Literatürdeki benzer çalışmalardan anlaşıldığı üzere, karışımın viskozitesinin ve iletkenliğinin damlacık oluşumu üzerinde belirgin etki meydana getirdiği ve yüksek viskozitelere çözelti elde edilmesinin nano elyaf üretiminde damlacık oluşumunu azalttığı gözlemlenmiştir (Uyar ve ark., 2009). Artan ÇCKNT miktarının çözeltinin viskozitesinde artışa neden olduğu ve dolayısıyla fiber kalınlıklarının da o nispette azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, yüksek oranlarda ÇCKNT içeriğinin elektriksel iletkenlik üzerine de katkıları olduğu bilinmektedir (Ke ve ark., 2012). Çözeltinin iletkenliğinin artması nedeniyle, elektrospin cihazından üretim esnasında polarizasyon oluşması numunelerin homojenliğini olumsuz yönde etkilemiş ve üretimler esnasında

kuşaklaşmalara neden olmuştur. Ancak, başarısız olduğu görülen düşük kaliteli ürünler ayrılarak yerine yenileri üretilmiştir.

5.1.6. PVA nano elyaf keçelerin mekanik özellikleri

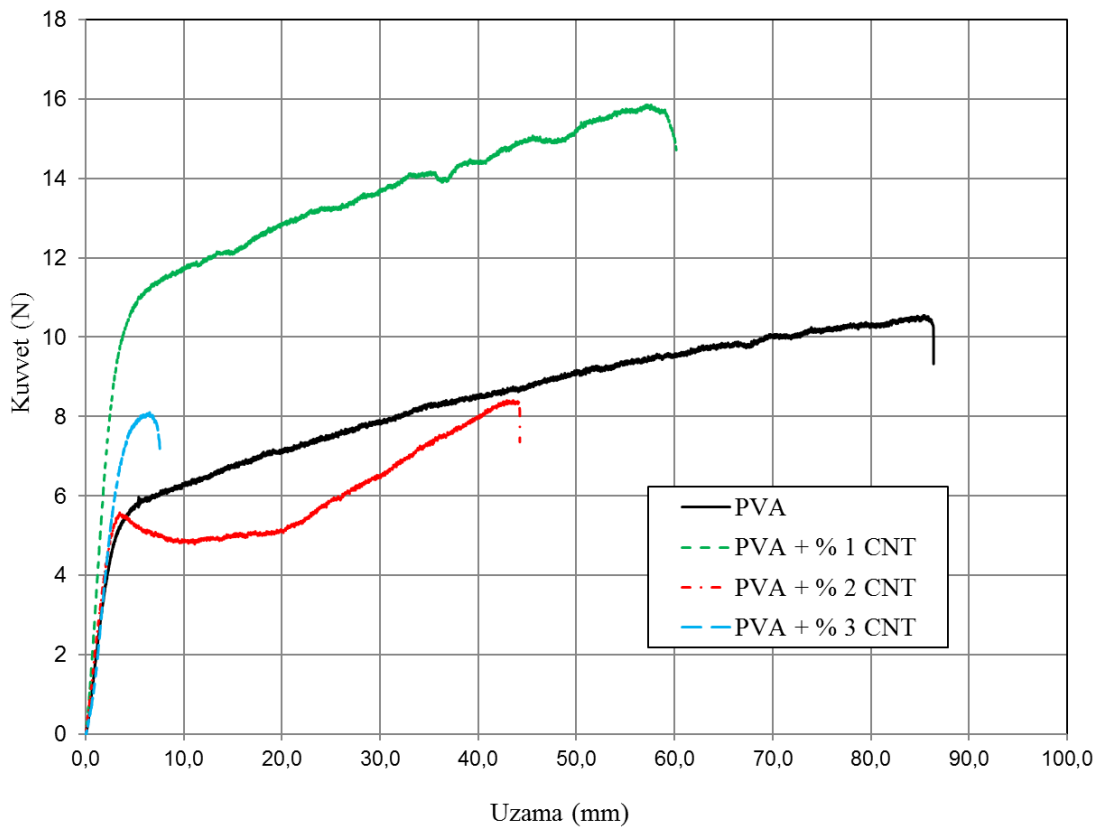
Elektro-eğirme yöntemiyle üretilen PVA nano keçeler 200x20 mm boyutlarında ASTM D 882-02 standardına uygun olarak kesilerek Şekil 5.18’de gösterilen haliyle çekme testi için uygun hale getirilmiştir. Çekme testi Shimadzu AGS-X çekme cihazı kullanılarak ve şekilde gösterildiği şekilde bağlanarak 15 mm/dak hızda hareket eden yük hücresi ile yükleme yapılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.18. Çekme testine tabi tutulacak PVA nano keçeler ve Numunenin bağlanması

Saf PVA’dan oluşan ve farklı oranlarda (ağırlıkça %1, 2 ve 3) ÇCKNT içeren PVA nano elyaf keçelerin tipik statik çekme deneyine tabi tutulmasıyla elde edilen veriler Şekil 5.19’da verilen Kuvvet – Uzama grafiğinde gösterilmektedir. Şekilden anlaşıldığı üzere, yalnızca PVA içeren nano elyaf keçenin uzama miktarı yaklaşık olarak 87 mm elde edilmiştir ve bu uzama değerine karşılık olarak yaklaşık 12 N değerinde bir kuvvet uygulanmıştır. Ağırlıkça %1 oranında ÇCKNT takviyeli PVA nano keçenin uzama miktarı PVA’ya kıyasla %30 oranında bir düşüş sergileyerek 59 mm değerine ve bu uzama değerine karşılık gelen kuvvet miktarı ise yaklaşık olarak %50 oranında bir artışla 15.9 N değerine ulaşılmıştır. Sonuç itibariyle, takviye elemanı malzemenin dayanımına katkıda bulunmuştur ancak sünekliğinde azalmaya yol açmıştır.

Ağırlıkça %2 oranında ÇCKNT takviyeli PVA nano keçenin uzama miktarı PVA'ya kıyasla %50 oranında bir düşüş sergileyerek yaklaşık olarak 45 mm değerine ve bu uzama değerine karşılık gelen kuvvet miktarında %30 oranında bir azalma meydana gelerek 8.2 N değeri elde edilmiştir. Son olarak, %3 oranında ÇCKNT takviyeli PVA nano elyaf keçenin uzama miktarı PVA ile kıyaslandığında %90 civarında oldukça büyük bir düşüşle 7.5 mm değeri elde edilmiştir. Bununla birlikte, bu uzama değerinde elde edilen kuvvet miktarının %2'lik ÇCKNT içeren PVA nano elyaf keçe için elde edilmiş olan değere çok yakın bir değerde olduğu görülmektedir. Bu düşüşün temel nedeni, artan takviye elemanının numunelerin sünekliliğine olumsuz etkide bulunmasıdır.



Şekil 5.19. Saf PVA ve PVA+ÇCKNT içeren nano elyaf keçelerin çekme testi sonuçları (Kuvvet - Uzama Grafiği)

Tablo 5.2'de saf PVA ve farklı oranlarda (ağırlıkça %1, 2 ve 3) ÇCKNT içeren PVA nano elyaf keçelerin çekme testlerinden elde edilen Maksimum Yük (P_{maks}), Elastiklik Modülü (E), Görünür Çekme Dayanımı (σ_c), Şekil Değiştirme Miktarı (ϵ_{maks}), ve Tokluk değerleri verilmektedir. PVA nano elyaf keçe ile kıyaslandığında %1 ÇCKNT takviyeli nano elyaf keçenin P_{maks} , Elastiklik Modülü ve Tokluk değerlerinde sırasıyla yaklaşık olarak %50, %88 ve %12'lik artışlar tespit edilmiştir. Ancak aksine, süneklilik

miktarında düşüş meydana gelmesiyle daha gevrek bir kırılma durumu gözlemlenmiştir. ÇCKNT oranlarındaki artışla birlikte numunelerin mekanik özelliklerinde görülen zayıflamanın nedeni ÇCKNT'lerin yapı içerisinde toplanmaları (agglomeration) ve nano fiberlerin çaplarının düşmesi olarak açıklanabilmektedir.

Numunelerin kesit alanları tam olarak belirlenemediğinden dolayı gerilme değerleri net bir şekilde ölçülememektedir. Dolayısıyla tabloda verilen gerilme değerleri hesaplanırken görünür kalınlık temel alınmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen değerler göz önüne alındığında, yalnızca PVA içeren nano keçenin çekme dayanımı 3.9 MPa elde edilmiştir. Ağırlıkça %1 oranında ÇCKNT takviyeli PVA nano keçenin çekme dayanımında yaklaşık olarak %50 oranında bir artış görülerek 5.9 MPa değerine ulaşılmıştır. Bununla birlikte, PVA nano elyaf keçenin şekil değiştirme oranı 0.58 mm/mm iken %1 ÇCKNT içeren nano keçede %29 oranında bir düşüş görülerek 0.4 mm/mm elde edilmiştir. Sonuç itibarıyla, takviye elemanı malzemenin çekme dayanımına katkıda bulunmakla birlikte sünekliğinde azalmaya neden olmuştur.

Tablo 5.2. Saf PVA ve %1, 2 ve 3 oranlarında ÇCKNT takviyeli PVA nano elyaf keçelerin P_{maks} , E , σ_{ζ} , ε , ve Tokluk değerleri

Numune Adı	P_{maks} (N)	E (GPa)	σ_{ζ} (MPa)	ε_{maks} (mm/mm)	Tokluk (MJ/m ³)
PVA	10.6	0.11	3.9	0.58	307.4
PVA+%1 ÇCKNT	15.9	0.20	5.9	0.4	344.2
PVA+%2 ÇCKNT	8.4	0.14	3.1	0.3	106.5
PVA+%3 ÇCKNT	8.1	0.12	3.0	0.05	30

5.1.7. PVA içeren kompozit levhaların üretilmesi

Üretilen nano elyaf keçeler 10 kat cam elyaf kumaşların orta katına (5 Kat cam elyaf + 1 kat nano elyaf keçe + 5 kat cam elyaf) yerleştirilerek kompozit levhalar üretildi. Kompozit levhaların üretiminin Necmettin Erbakan Üniversitesi Malzeme Laboratuvarında yapılması kararlaştırılmış ve üretim için gerekli malzemeler tedarik edilmiştir.

Kompozit levhaların üretiminde Vakum yardımcı reçine transferi kalıplama (VARTM) yöntemi benzeri bir yöntem olan “Vakum Destekli Elle Yatırma Yöntemi” kullanıldı. Kalıplama ünitesi paslanmaz çelik saç, sıcaklık ve basınç kontrol ünitesi ve

vakum pompasından oluşan oldukça yaygın kullanılan bir takviyeli kompozit kalıplama ve üretim yöntemidir.

Bu yöntemde, öncelikle cam elyaf kumaşların yerleştirileceği yere florokarbon polimerleri içeren naylonumsu bir ayırıcı film (release film) yerleştirildi. Örgülü kumaş (0/90°) cam elyaf malzemesinin serileceği yerin etrafına hava sızdırmazlığını sağlayan çift taraflı bant yapıştırıldı ve kalıp ayırıcı sürülerek katılaşması için belirli bir süre beklendi. Katılaşma tamamlandıktan sonra üzerine dağıtıcı file ve soyma kumaşı yerleştirilerek bu tabakaların üzerine önceden hazırlanan 330x330 mm ölçülerinde 5 kat cam elyaf kumaşlar yerleştirildi. Numunelerin üretiminde elyaf malzemesi olarak yüksek mukavemetli 385 g/m² twill cam elyaf kumaşı kullanılmıştır.

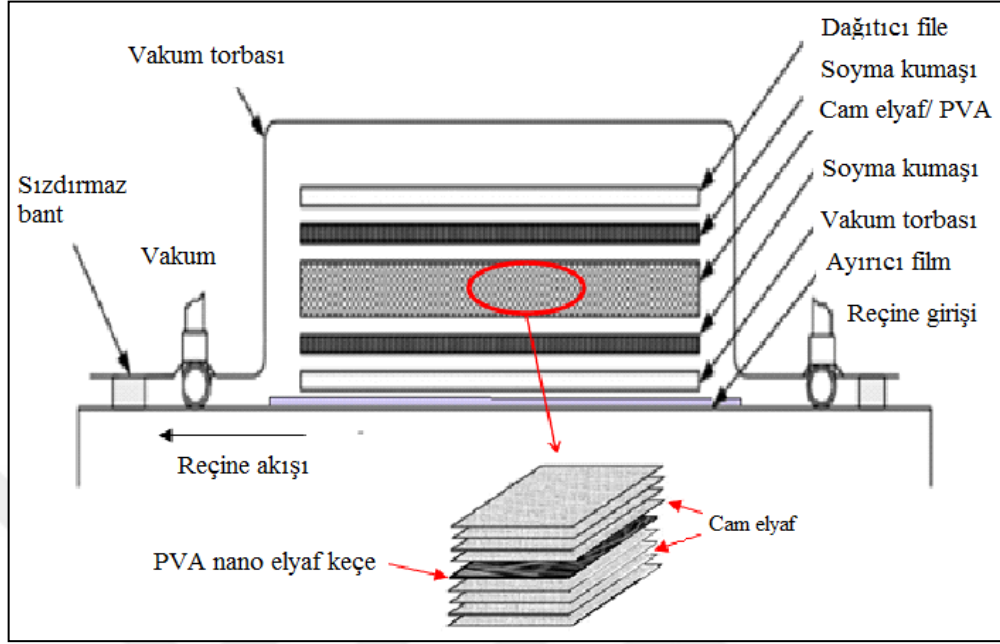
Her bir cam elyaf kumaş 100/25 oranında kürleştirici katılarak homojen oluncaya kadar karıştırılan epoksi reçine ile ıslatılarak diğer kumaşlarla arasında hava boşlukları kalmayacak şekilde yerleştirildi.

Epoksi reçine olarak Momentive (ABD) firmasının düşük viskoziteli MGS-L160 epoksi laminasyon reçinesi ve sertleştirici olarak aynı firmaya ait MGS-H160 sertleştirici tercih edilmiştir. Karışım oranı ağırlıkça 100:40 olan L160 reçine ve H160 sertleştirici yaklaşık 5 saatlik bir uygulama süresine sahiptir.

Önceden hazırlanan PVA nano elyaf keçeler beşinci katman cam elyafın üzerine yatırıldı ve epoksi ile tamamen ıslatılması sağlandı. Tekrar nano elyafların üzerine aynı şekilde 5 tabaka cam elyaf kumaş yerleştirilip ve kumaşların üzerine tekrar soyma kumaşı ve dağıtıcı file serilerek vakumlama işlemine geçildi.

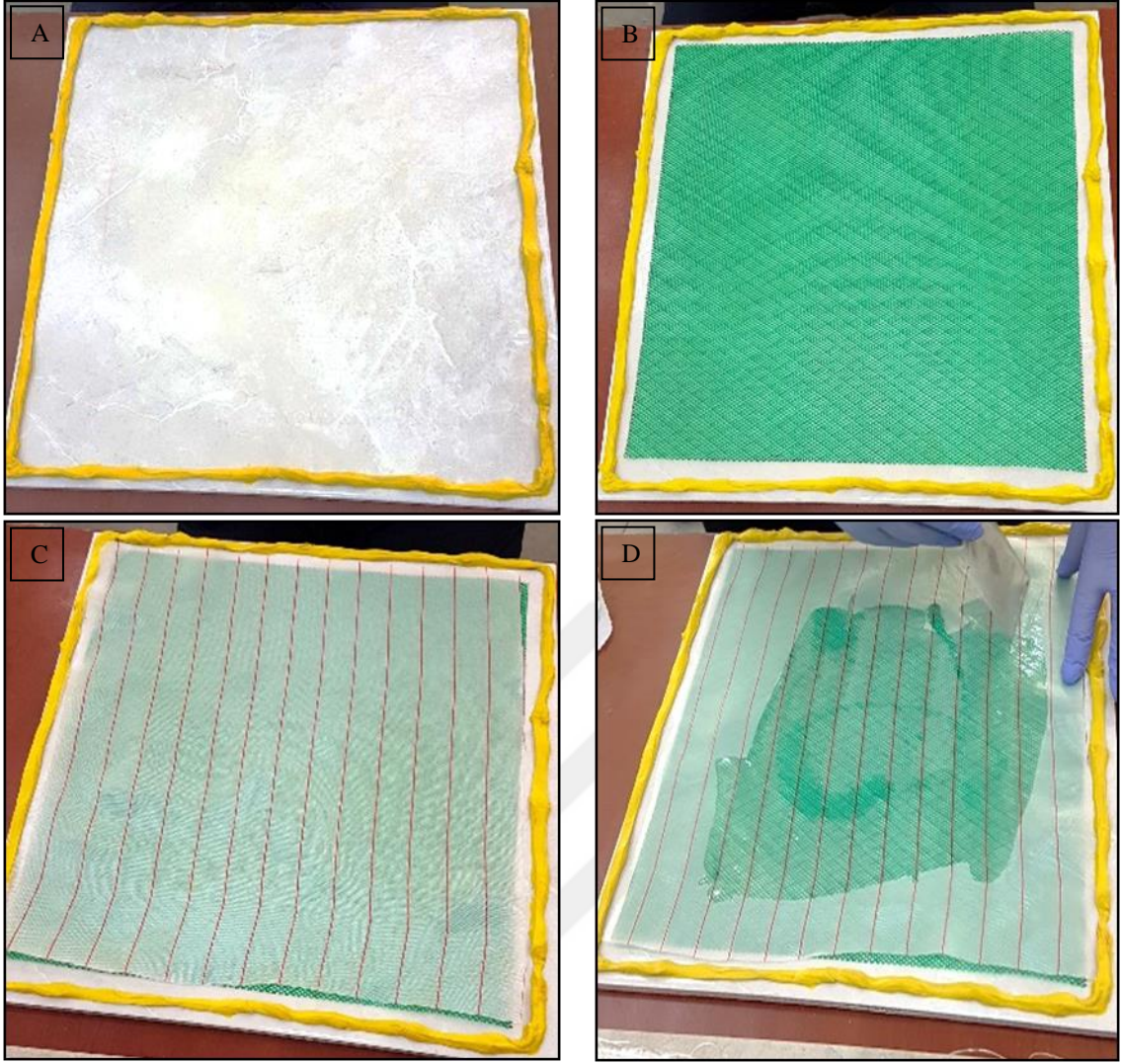
Vakumlama işlemi öncesinde fazla miktardaki epoksi reçinenin sistemden alınması için ve çıkış hazırlanarak ve son olarak tüm katmanların üzerine vakum torbası serilerek sızdırmazlık sağlandı. Vakum torbası içerisindeki hava boşlukları ve fazla epoksi miktarı 0.7 bar vakum uygulanarak çekilene kadar bir müddet bekletildi. Fazla epoksi tamamen uzaklaştırıldığında sistem 0.3 bar vakum altında bir süre bekletilerek ve basınç düşüşü zaman zaman kontrol edilip tekrar ayarlanarak katılaşma sağlanana kadar bu işleme devam edildi. Ardından yaklaşık 12 saat vakum altında bekletilen PVA nano keçe takviyeli kompozit levhalar kademeli olarak 70°C'de 1 saat ve 120°C'de 4 saat son kürleme işlemine tabi tutularak tamamen kurduğundan emin olunmuştur.

Şekil 5.20’de VARTM yöntemi ile PVA nano fiber takviyeli kompozit levha üretim işlemi şematik olarak gösterilmektedir.

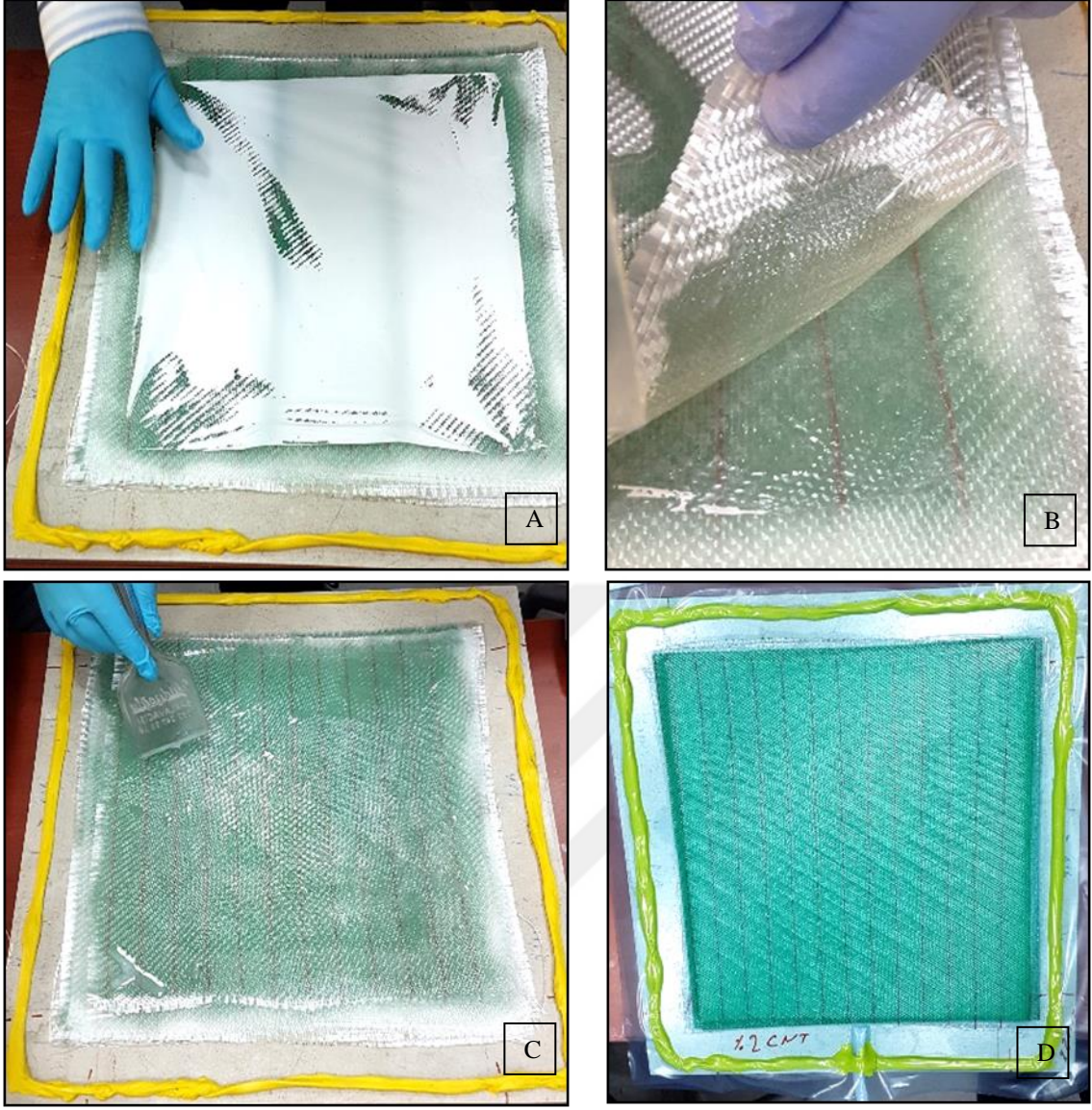


Şekil 5.20. VARTM yöntemi ile PVA Nano fiber takviyeli kompozit levha üretiminin şematik gösterimi

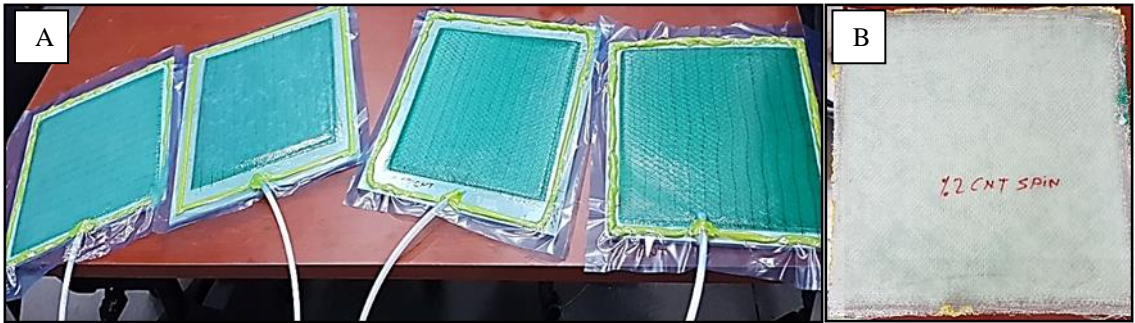
Yapılan üretim çalışmaları sonrasında toplamda 10 adet 320mm x 320mm boyutlarında ve yaklaşık 3.5 mm kalınlığında PVA nanoelyaf keçe takviyeli 10 katlı cam elyaf içeren kompozit levhaların üretimi gerçekleştirilmiştir. Yukarıda üretim aşamaları detaylarıyla anlatılan kompozit levha üretimi Şekil 5.21, Şekil 5.22 ve Şekil 5.23’de sırasıyla görülmektedir.



Şekil 5.21. Kompozit levhaların üretim aşamaları; A: Yüzeyinin hazırlanması, B: Örtü kumaşın ve C: Ayırıcı kumaşın yerleştirilmesi, D: Epoksi emdirme işlemleri



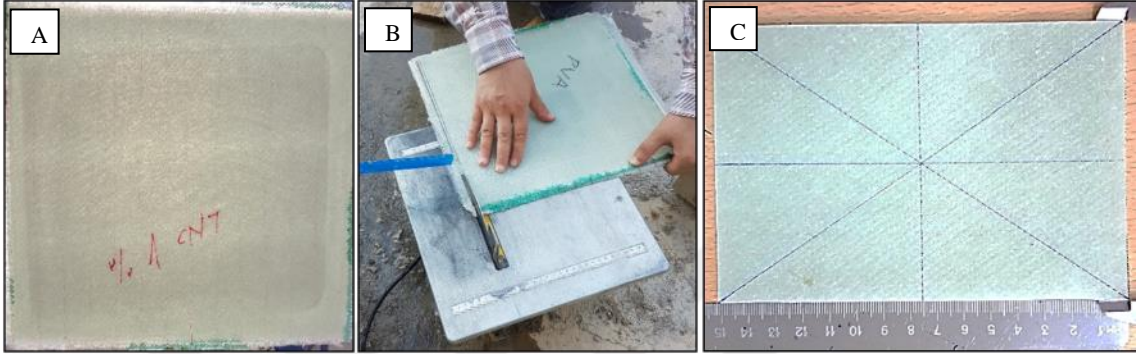
Şekil 5.22. Kompozit levhaların üretim aşamaları; A: Cam elyaf ve Nano elyaf keçelerin serilmesi, B: Epoksi emdirme, C: Hava boşluklarının giderilmesi ve D: Vakumlama işlemleri



Şekil 5.23. Kompozit levhaların üretim aşamaları; A: Birden çok numunenin vakumlanması ve B: Nihai ürün elde edilmesi işlemleri

5.1.8. Üretilen kompozit levhaların kesilmesi

Her bir kompozit levhadan 320mm x 320mm boyutlarında Şekil 5.24’de görülen şekilde 2’şer adet üretildi. Üretilen kompozit levhalar standart test numunesi boyutları olan 100mm x 150mm uzunluklarında kesildi. Kesim işlemine ait ve kesim sonrası elde edilen numuneler Şekil 5.24’de görülmektedir. Kesim işlemi sonrasında malzemelerin orta noktaları daha sonra uygulanacak testler için belirlenerek işaretlendi.



Şekil 5.24. Kompozit levhaların standart numune boyutlarında kesilmesi aşamaları; A: Kompozit levha, B: Levhanın kesilmesi, C: Standart test numunesi boyutlarında numune

6. METOT

6.1. Uygulanan Testler

Üretimi gerçekleştirilen kompozit levhaların mukavemet özelliklerini belirlemek amacıyla aşağıda verilen standart mekanik testler uygulanmıştır:

- Çekme Testi
- Üç Noktadan Eğilme (3NE) Testleri (Darbe Öncesi ve Darbe Sonrası)
- Düşük Hızda Darbe (DHD) Testleri
- Darbe Sonrası Basma (DSB) Testleri

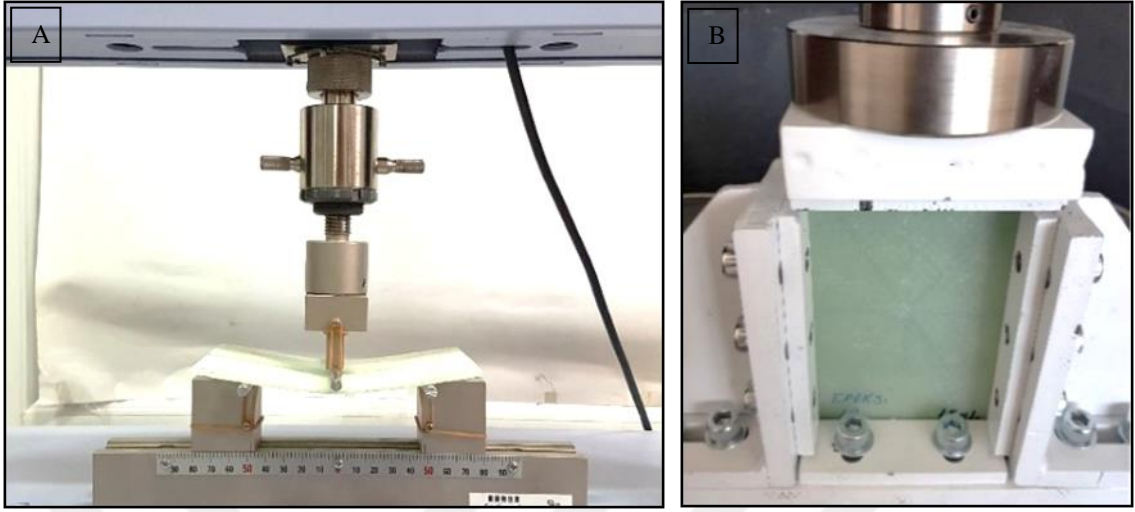
İlk olarak, numunelerin tamamı için çekme dayanımlarını ölçmek amacıyla 150mm x 100mm boyutlarında şeritler kesilmek suretiyle hazırlanan numuneler üzerinde Çekme Testi uygulanmıştır. Deneyler sonrası elde edilen veriler analiz edilerek kompozit yapının mukavemet ve hasar davranışlarına bağlı olarak mekanik özellikleri belirlenmiştir.

Daha sonra, numunelerde herhangi bir hasar oluşturmayacak seviyede (1500 N basma yüklemesine kadar) Üç Noktadan Eğilme Deneyi (Şekil 6.1) yapılmıştır. Yükün büyüklüğü daha önce yapılan ön çalışmalarda malzemelerde hasar başlangıcından yaklaşık bir değer olan 1500 N olarak belirlenmiştir. Daha büyük yüklerde malzemede kalıcı hasarların oluşabileceği öngörülmüştür.

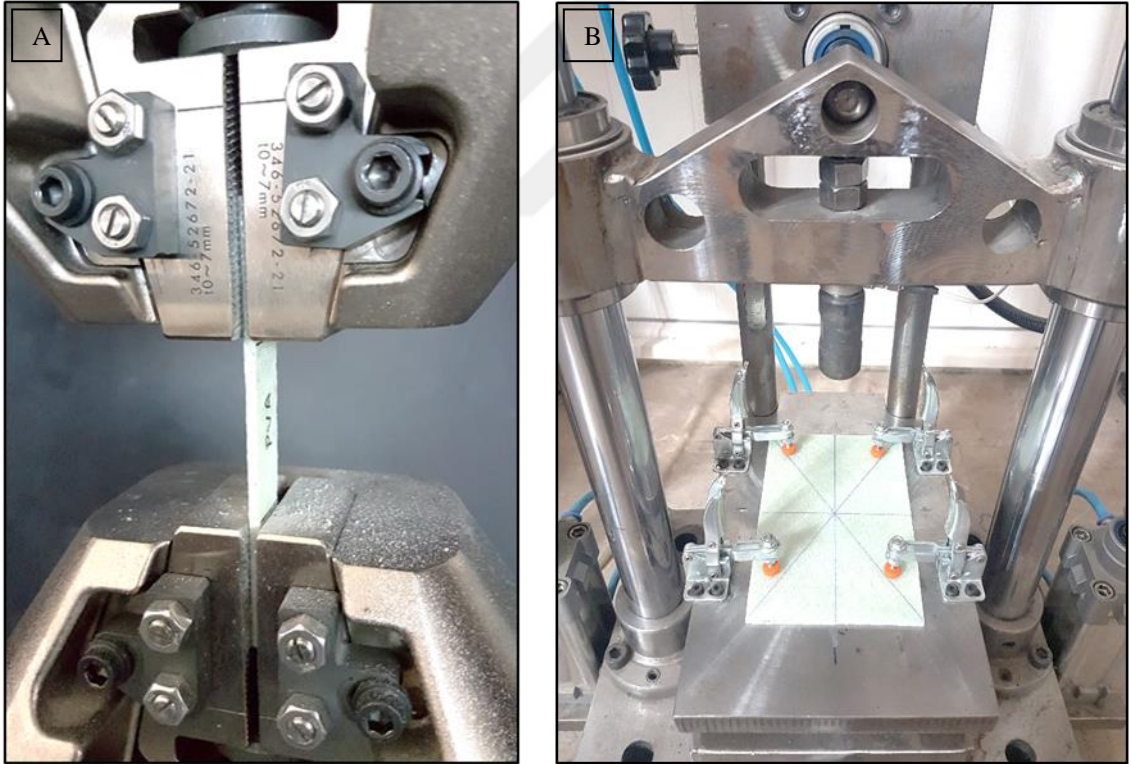
Ayrıca, farklı hızlarda malzemelerin ne tür bir davranış sergileyeceğini tespit etmek amacıyla Düşük Hızda Darbe Deneyleri (1.5m/sn, 2m/sn, 2.5m/sn ve 3m/sn hızlarında) (Şekil 6.2) gerçekleştirilmiştir. Darbe hızlarının büyüklüğü daha önce yapılan çalışmalar esas alınarak belirlenmiştir. Numunelerde oluşturulacak olan hasar büyüklüğünün sınırlandırılmasının nedeni numunelerin bütünselliğini bozmayacak seviyede tutulmak istenmesi ve uygulamalar esnasında gelişebilecek olası darbelere eşdeğer bir hasarın etkisinin belirlenebilmesidir. Bununla birlikte, numunelere daha sonra uygulanacak olan DSB testleri esnasında gelişebilecek erken burkulmaya yol açmayacak kadar düşük seviyede tutulması da diğer bir etkidir.

Darbe deneyi sonrasında numunelerin eğilme dayanımlarının ne derecede etkilendiğini tespit etmek için tekrar Üç Noktadan Eğilme Deneyi ve son olarak darbelerin numunelerde ne tür hasarlar oluşturduğunu ve bu hasarların basma yüklemeleri

altında hangi hasar mekanizmalarının oluşmasına neden olacağını belirlemek için Darbe Sonrası Basma Deneyle (Şekil 6.1) yapılmıştır.

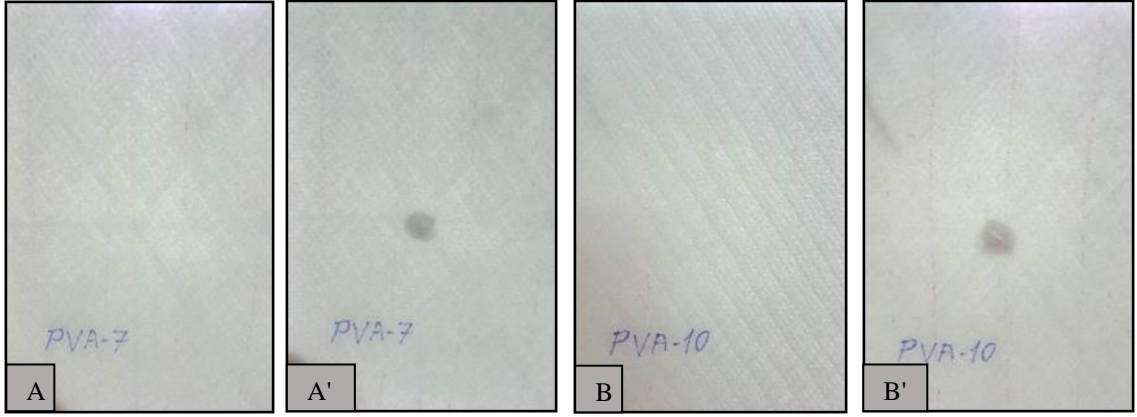


Şekil 6.1. A: Üç Noktadan Eğilme (3NE) ve B: Darbe Sonrası Basma (DSB) Testleri



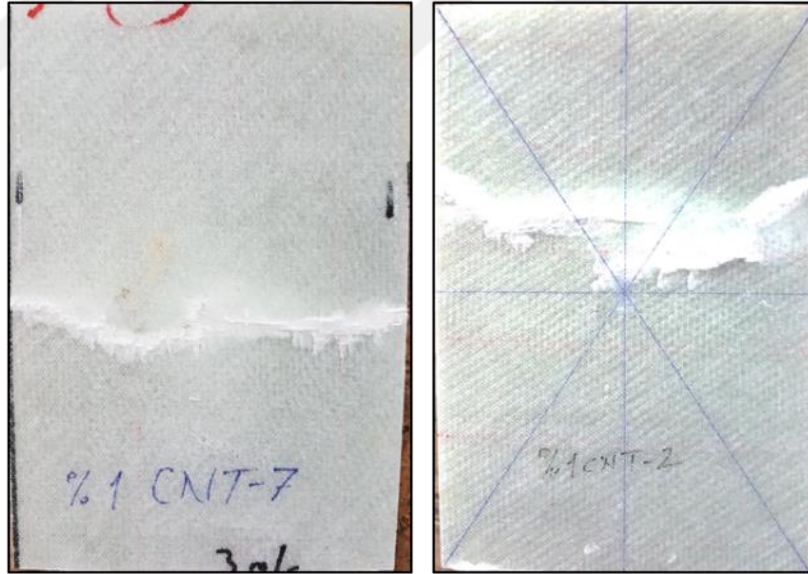
Şekil 6.2. A: Çekme ve B: Düşük Hızda Darbe (DHD) Testleri

Darbe testleri esnasında numunelerin merkezinde (darbelerin uygulandığı noktalarda) hasar oluşumu Şekil 6.3’de darbe öncesi ve darbe sonrası halleri verilen numunelerde gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Darbe testleri öncesi (A-B) ve sonrası numuneler (A'-B') (Darbe hızı: 3m/sn)

Malzemelerin darbe öncesi ve darbe sonrası eğilme dayanımları ölçülmüş ve levhaların darbe öncesi ve darbeye maruz kalmış halde elde edilen eğilme deneyi sonuçları kıyaslanmıştır. Sonuç olarak, oluşturulan darbenin etkilerinin numunelerin eğilme ve basma yüklemelerine maruz kalması esnasındaki davranışlarına etkileri incelenmiştir. Darbeye maruz kalmış levhaların basma dayanımları DSB testiyle tespit edilmiştir. DSB sonuçlarına ait görseller Şekil 6.4'de görülmektedir.



Şekil 6.4. Darbe Sonrası Basma (DSB) testleri sonrası bazı numuneler

6.1.1. Çekme testi

Üretimi gerçekleştirilen ÇCKNT takviyeli PVA nano keçe barındıran cam elyaf fiberli kompozit levhaların çekme yükleri altında davranışını ve mukavemet özelliklerini belirlemek amacıyla standart “ASTM D 3039 Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler için Çekme Testi” uygulanmıştır.

Şekil 6.5’de gösterildiği gibi, numunelerden 100mm x 10mm boyutlarında kesilmiş olan parçalar Çekme Cihazı’na bağlanarak sabit hızda (2 mm/dak.) çekme yüküne maruz bırakılmışlardır.



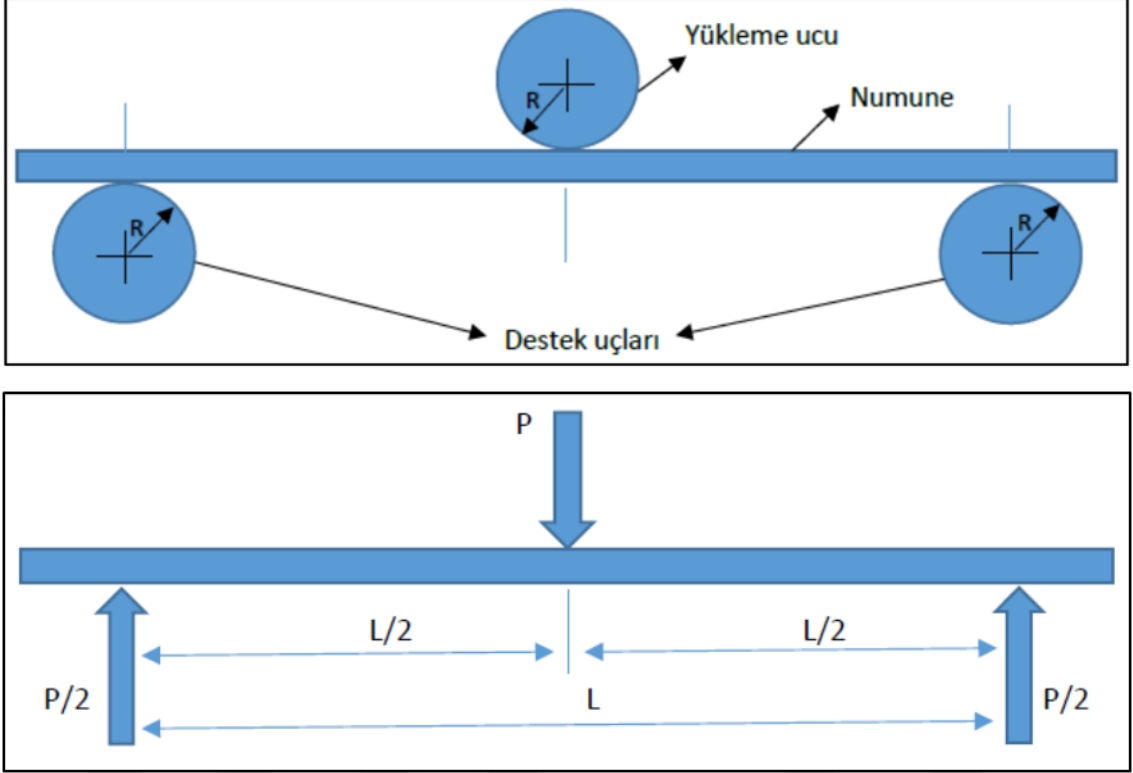
Şekil 6.5. Çekme numuneleri ve çekme cihazı aparatına bağlanması

Çekme testleri boyunca numunelere uygulanan yükün değişimi, malzemede meydana gelen gerilme miktarları ve test süresince numunede kopma oluşuncaya kadarki uzama miktarları kaydedilmiştir.

6.1.2. Üç noktadan eğilme testi

Üretimi gerçekleştirilen ÇCKNT takviyeli PVA nano keçe barındıran cam elyaf fiberli kompozit levhaların eğilme rijitliğini ve mukavemet özelliklerini belirlemek amacıyla standart “ASTM D 7264 Eğilme Testi” uygulanmıştır. Test üretilen her bir numune için sırasıyla hem darbe testi öncesi hem de sonrasında uygulanarak darbenin malzemenin mukavemetinde ne gibi değişikliklere yol açtığı da anlaşılmaya çalışılmıştır.

Yapılan çalışmalarda Üç Noktadan Eğilme Testi Şekil 6.6'da gösterildiği üzere iki noktadan desteklenen levhanın merkezine tek bir noktadan yükleme yapılmasıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.6. Üç Noktadan Eğilme Testinde destek noktaları ve yükün uygulanması (R=2mm)

Bu metot destek noktalarının yalnızca yarısına yükleme yapıldığından dolayı özellikle standart geometrilere sahip numuneler için daha kolay hesaplamalar yapmamızı mümkün kılmaktadır.

Benzer şekilde numunenin eğme testi sırasında alt desteklerin orta noktasından bir kesit alınırsa, yükün uygulandığı noktada basma gerilmesinin maksimum seviyede ve numunenin alt kısmında ise aynı düzeyde bir çekme gerilmesi olduğu görülecektir. Bununla birlikte, numune üzerine uygulanan yükün dağılımı ve oluşturduğu kayma gerilmeleri göz önüne alındığında maksimum kayma gerilmesi numunenin tam orta noktasında, yani tarafsız eksen üzerinde oluşacaktır.

Test cihazı ile testler boyunca numuneye uygulanan kuvvet ve desteklerin orta noktasında oluşan şekil değişimi (sehim) değerleri ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Malzemenin hasar görmemesi amacıyla yükleme elastik şekil değişimine izin verecek ancak kalıcı şekil değişimi oluşturmayacak bölgenin içinde kalacak şekilde önceden

belirlenmiş olan 1500 N değerine ulaştığı anda sonlandırılmıştır. Çünkü başlangıçta numunelerde herhangi bir hasar oluşması amaçlanmamıştır ve yalnızca malzemenin elastik davranışları gözlemlenmiştir. Bunun en önemli nedeni, numunenin, kompozit levha içindeki cam fiberlerin ya da nano elyaf keçelerin hasar görmesi sonucunda yapılacak olan Darbe ve Basma testi gibi diğer tüm mekanik testlerden elde edilecek verilerin sağlıklı bir şekilde ölçülemeyeceği anlamına gelmektedir.

Bu test yöntemi, sürekli-fiber destekli polimer matrisli kompozit malzemelerin eğilme özelliklerini (dayanım, rijitlik ve gerilme/eğilme şekil değişimi davranışı) tanımlanmış olan koşullarda belirlemek amacıyla kullanılmaktadır.

Üç noktadan eğilme testi konfigürasyonunda maksimum eğilme gerilmesi numuneye yükün uygulandığı noktanın hemen altındaki yüzeyde basma gerilmesi ve aynı zamanda en uzak nokta olan diğer yüzeyde çekme gerilmesi olarak oluşmaktadır. Ortaya çıkan dikey kesme kuvvetinin varlığı üç noktadan yüklemeli bu konfigürasyonda sadece yükün uygulandığı noktanın hemen altı dışında kiriş üzerindeki her noktada görülmektedir.

Numunemizin eğilme özellikleri, hiçbir kompozit levhanın kendi içinde tam olarak mükemmel bir simetrik yapıya sahip olmaması dolayısıyla, yükün hangi yüzeyden uygulandığına bağlı olarak değişebilmektedir. Bu tür farklılıklar tarafsız eksenin kaymasına neden olmakla birlikte ihmal edilecek seviyede etkilenmektedir. Bunun yanında, eğilme özellikleri numune kalınlıkları, test ortamının sıcaklığı/nemliliği ve gerilmenin miktarına bağlı olarak da değişebilmektedir.

Eğilme özelliklerinin hesaplanması kiriş teorisine dayanmaktadır çünkü numuneler çalışmamızda kullandıklarımız gibi genellikle levhalar halindedir. Bazı durumlarda önemli farklılıklar görülmekle birlikte numune kalınlığının artmasıyla kiriş teorisinden sapmalar azalmaktadır.

Yük uygulama ucunun tipi test sonuçlarını etkileyebilmektedir. Bizim çalışmamızdaki kompozit numuneleri test etmek üzere sabit tipte uçlar seçilmiştir. Seçilen yük uygulama uçları numunelerle tüm temas yüzeyi boyunca eş dağılımlı bir temas sağlayacak şekilde ayarlanmıştır.

Eş dağılımlı temas oluşmaması kirişin eş dağılımlı bir yükleme elde edilememesine ve malzemenin hasar görmesine sebebiyet vermesi ihtimali dolayısıyla malzemenin eğilme özelliklerinin yanlış hesaplanmasına neden olacaktır. Bu istenmeyen durumu önlemek ve en doğru test sonuçlarına ulaşabilmek amacıyla test boyunca yükleme uçlarıyla numune arasındaki temas noktalarının doğruluğu gözlemlenmiştir.

ASTM D 7294 Standardında kullanılan formüller yükleme ucunda ve destek noktalarında numune genişliği boyunca temas yüzeyinin eş dağılımlı bir çizgi halinde oluştuğunu varsaymaktadır. Dolayısıyla çalışmalarımızda bu tür yükleme koşullarından sapma ihtimalini azaltmak ve standartta verilen formüllerle doğru sonuçlara ulaşmak amaçlanmıştır.

Test Cihazı, testler öncesinde kuvvet uygulama sistemindeki hataları en aza indirmek amacıyla sabit hızda bir yükleme ucu hareketi sağlamak için kalibre edilmiştir.

Kullanılan yükleme ucu ve destekler Şekil 6.6'da görüldüğü üzere 2 mm çapında ve numunelerin 100 mm olan genişliği boyunca tüm yüzey boyunca uzanan çelik silindirik çubuklardan oluşmaktadır. Kullanılan çubukların sertliği ve mukavemeti yükleme esnasında elastik ya da plastik olarak şekil değişimine müsaade etmeyecek kadar yüksektir. Aynı zamanda, numunelere zarar vermemesi için yüzeyleri pürüzsüz hale getirilmiş ve keskin uçları alınmıştır.

Numunelerin kalınlık ölçümleri mikrometre kullanılarak her yerinde aynı değeri verip vermeyeceğini görmek amacıyla her bir numune için birden çok noktadan alınmıştır ve numunelerin kalınlık değişiminin kabul edilebilir sınırlarda ($\pm 0,1$ mm) benzer sonuçlarda olduğu görülmüştür. Aynı zamanda numunelerin genişlik ve uzunluk gibi diğer boyutların ölçümleri kumpas yardımıyla ölçülmüştür. Okuma hassasiyetleri test cihazının yeterli doğrulukta sonuçlar vermesi adına %1 doğrulukla yapılmıştır.

Numune boyutları eğilme özelliklerinin doğru bir şekilde bulunabilmesi için standart boyutlarda ayarlanmıştır. Numune kalınlığının (h) destek noktalarının açıklığına (L) olan oranı (L:h) standartta verildiği üzere 32:1 olarak seçilmiştir. Çalışmamızda numune kalınlıkları 3mm ile 4mm arasında değişmekle birlikte destek noktalarının açıklığı 96mm ile 128mm olarak değişmektedir ve ölçüm sonuçlarının güvenilirliği için her bir numuneden 4 adet birebir aynı numune için eğilme testleri tekrarlanmıştır.

Test Prosedürü:

Testlere başlamadan önce numune boyutları ölçülerek numunenin köşegenlerinin kesişim noktası orta noktaları işaretlenmiştir. Desteklerin aralığı standartlara uygun olarak hassas bir şekilde ayarlanmıştır.

Test hızı (yük uygulanan hareketli ucun hızı) tüm ölçümler için 1 mm/dak olarak ayarlanmıştır.

Yükleme ucu ve desteklerin eksenler birbirine ve numunenin kendi eksenine paralel olacak şekilde ve eşit uzaklıkta ayarlanmıştır. Çalışmamızda kuvvet ucu desteklerin tam orta noktasına gelecek şekildedir.

Test boyunca 1 mm/dak hızla ilerleyen kuvvet ucuyla numunelere uygulanan kuvvet ve aynı zamanda kuvvetin malzemede oluşturduğu sehim ölçülmüştür ve kaydedilmiştir. Sonuç olarak her bir test için “Kuvvet – Şekil Değişimi” eğrileri elde edilmiştir. Ölçülen şekil değişimi (sehim) değerleri destek noktalarına izafi olarak elde edilmiştir.

Çalışmamızda yüklemeye önceden belirlenmiş olan 1500 N değerine kadar yani numunelerin hasar görmemesi amacıyla elastik şekil değişimine izin verecek ancak kalıcı şekil değişimi oluşturmayacak bölgenin içinde kalacak şekilde yapılmıştır. Çünkü testlerimizde numunelerde ne yüzeysel ne de tabakalar arası iç hasar ya da daha sonra yapılacak olan testleri etkileyecek derecede deformasyon oluşması amaçlanmamıştır.

Buna ilave olarak, nanoelyaf keçelerin de gerek kendi içinde kırılma ya da ezilme yoluyla hasar ve gerekse numunelerin çoğunluğu için sınır tabakalarında herhangi bir ayrılma (delaminasyon) görülmemiştir. Tabakalar arasında delaminasyon olup olmadığı dikkatli bir şekilde incelenmiş ve yalnızca birkaç numunede ayrılma olayının (delaminasyon) görüldüğü tespit edilerek bu numunelerin daha sonraki testlerde kullanılmaması sağlanmıştır.

Hesaplamalar:

Maksimum Eğilme Gerilmesi: Numunelerimiz homojen ve elastik giriş şeklinde olup üç noktadan eğilme testine tabi tutulmuştur.

Gerilme “Kuvvet – Birim Şekil Değişimi” eğrileri üzerinde her noktada aşağıda verilen Denklem 6.1 kullanılarak hesaplanabilir;

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (6.1)$$

burada;

σ = Gerilme miktarı, [MPa]

P = Uygulanan kuvvet, [N]

L = Destekler arası mesafe, [mm]

b = kiriş genişliği, [mm]

h = kiriş kalınlığı, [mm] olarak ifade edilmektedir.

Eğilme Mukavemeti: Eğilme mukavemeti yükleme altındaki malzemenin hasar görmeden dayanabileceği en büyük yükleme değerindeki numunede oluşan gerilme miktarına eşittir.

Belirli şekil değişimine (sehim) denk gelen Eğilme Gerilmesi: En büyük eğilme gerilmesi değeri Denklem 6.1’de P değerinin Kuvvet – Şekil Değişimi eğrisinden okunan uygulanan kuvvet miktarı esas alınarak istenen miktardaki şekil değişimine (sehim) göre hesaplanabilir. Şekil değişim (sehim) miktarına karşılık gelen gerilim miktarı Denklem 6.2 kullanılarak hesaplanır.

Maksimum Birim Şekil Değişimi: 3 Noktadan Eğilme Testi prosedürüne göre dış yüzeydeki maksimum birim şekil değişimi orta noktada oluşmaktadır ve bu değer aşağıdaki şekilde hesaplanabilir;

$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (6.2)$$

burada;

ε = Dış yüzeydeki maksimum birim şekil değişimi, [mm/mm]

δ = orta noktadaki sehim miktarı, [mm]

L = destekler arası mesafe, [mm] ve

h = kiriş kalınlığı, [mm] olarak ifade edilmektedir.

Eğilme Elastiklik Modülü: Eğilme elastiklik modülü belirli birim şekil değiştirme miktarının o noktada karşılık gelen gerilme miktarına oranıdır. Eğilme elastiklik modülünün hesaplanmasında Denklem 6.3’den faydalanılır.

$$E_f = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (6.3)$$

burada:

E_f = Eğilme Elastiklik Modülü, [MPa]

$\Delta\sigma$ = belirli iki gerinim değeri arasındaki gerilme miktarı farkı, [MPa] ve

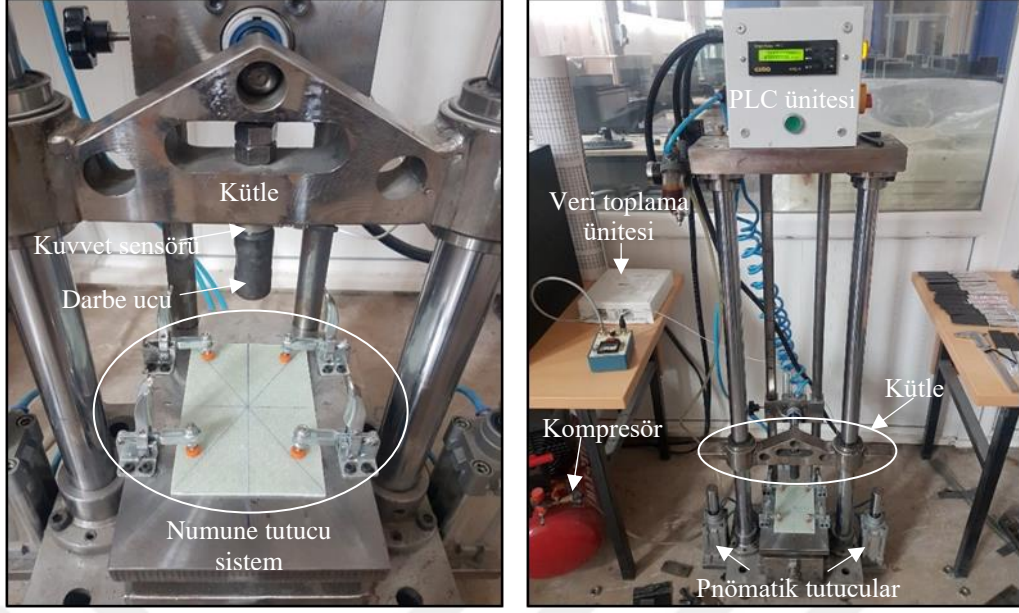
$\Delta\varepsilon$ = belirli iki gerilme değeri arasındaki gerinim miktarı farkı olarak ifade edilmektedir.

6.1.3. Düşük hızda darbe testi

Üretimi yapılan ÇCKNT takviyeli PVA nano keçe barındıran cam elyaf takviyeli kompozit levhaların darbe dirençlerini ölçmek amacıyla standart “ASTM D 7136 Düşük Hızda Darbe Testi” uygulanmıştır. Bu test öncesinde ve sonrasında 3 Noktadan Eğilme Testi yapılarak Darbe Testi esnasında uygulanan farklı hızlardaki (1.5, 2.0, 2.5, 3.0 m/sn) darbe etkisinin özellikleri farklı olan numunelerimizin mukavemetinde ne gibi değişikliklere yol açtığı da anlaşılmaya çalışılmıştır. Aynı zamanda Darbe Testi sonrasında numunelere Basma Testi uygulanarak hem basmaya karşı dayanımı hem de hasar davranışları incelenmiştir.

Test Prosedürü:

Düşük Hızda Darbe Testi, serbest düşmeli darbelere maruz kalan çok eksenli polimer matriksli kompozit levhaların hasar direncini belirlemek için kullanılır. Bu deneyde, boyutları bilinen düz levha halindeki numunelerimize yuvarlak uçlu serbest düşme yapan Şekil 6.7’de gösterilen standartlara uygun olarak imal edilmiş ve kalibrasyonu yapılmış olan düzenekle darbe uygulanmıştır. Darbenin etkisi, sistemin (darbe ucunun) numuneden yüksekliği ile ifade edilen bir potansiyel enerjiye sahip olan kütle ile belirlenmektedir. Hasar miktarı ise numune üzerindeki hasarın büyüklüğü ve tipiyle açıklanmaktadır. Numunelerde oluşan hasarların tip ve büyüklüklerinin etkileri Darbe Sonrası Basma Testi ile hasar ve kırılma davranışlarına yansıtıldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.7. Düşük Hızda Darbe Testi düzeneği

Çalışmamızda kullandığımız malzemelerin hasar dirençlerinin içeriğindeki ÇCKNT oranlarına bağlı olarak değişmesi beklenmektedir. Hasar dirençlerini etkileyebilecek diğer unsurlar ise malzeme boyutlarıyla (özellikle kalınlık değişimleri), ağırlık, sertlik ve bağlantı koşullarıyla açıklanabilmektedir. Darbe hızı, darbe ucu konfigürasyonu, numunenin duruş şekli ve konumu gibi unsurlar tüm numuneler için sabit olarak ayarlandığı için test sonuçlarına etkileri ihmal edilecek seviyede kalmaktadır. Numunelerin daha önce orta noktaları belirlendiği ve işaretlendiği için darbenin istenen noktaya gelip gelmediği ya da merkezden ne kadar saptığı test sonrasında kolaylıkla görülebilmektedir.

Standart Darbe Testi her ne kadar malzemenin darbe direncini, darbe sönümlenme özelliklerini ve hasar davranışlarını tayin etmede kullanılsa da bazı durumlarda ve bizim çalışmamızda da yaptığımız üzere darbeye maruz kalan malzemelerin hasar davranışlarını anlamak amacıyla “ASTM D 7137 Darbe Sonrası Basma Testleri”ne tabi tutulacak olan malzemelere de sıklıkla uygulanmaktadır.

Malzemeye uygulanan kuvvet (F_1) ve malzeme tarafından sönümlenen enerji (E_1) fiziksel olarak hasar oluşumunu temsil etmez çünkü daha düşük kuvvetler ve dolayısıyla düşük enerji uygulandığında malzeme içinde matris çatlakları ve küçük delaminasyonlar oluşabilmektedir. F_1 ve E_1 değerleri, numunenin rijitlik karakterindeki değişimi başlatan kuvvet ve enerjiyi temsil etmektedirler. Bu yolla malzemenin rijitliği hakkında bilgi

sahibi olabilmekteyiz. Bunun yanında, farklı darbe hızlarında numunelerde oluşan hasar miktarı darbenin sebebiyet verdiği renk değişimi ile de orantılı olarak değişmektedir.

Düşme Yüksekliği ve Darbe Enerjisi Hesaplamaları:

Numunelere uygulanan darbe enerjisi düşme yüksekliğine bağlı olarak değişmektedir ve aşağıda verilen Denklem 6.4 ile hesaplanmaktadır;

$$E = C_E \cdot h \quad (6.4)$$

burada;

E: Darbe öncesi potansiyel enerji, [J]

C_E : Birim numune kalınlığına düşen spesifik darbe enerjisi oranı, [6.7 J/mm]

h: Numune kalınlığı, [mm]

olarak ifade edilir.

Belirli miktardaki darbe enerjisini üretebilmek için darbe ucunun yüksekliğinin belirlenmesi gerekir. Darbe ucunun numunenin merkezine olan mesafesi darbe yüksekliğini vermektedir ve bu değer Denklem 6.5 ile hesaplanmaktadır;

$$H = \frac{E}{m_d g} \quad (6.5)$$

burada,

H: Darbe yüksekliği, [m]

m_d : Darbe sisteminin kütlesi, [kg]

g: Yer çekimi ivmesi, [9.81 m/s²] olarak ifade edilmektedir.

Aynı zamanda, deneylerden elde ettiğimiz sonuçları kullanarak oluşturduğumuz Kuvvet-Zaman grafikleri numuneler tarafından sönmölen Darbe Enerjisini bulmamızda yardımcı olmaktadır. Yapılan hesaplamalarda sürtünmeler ihmal edilmiştir.

Darbe Hızlarının Hesaplanması:

Bu çalışmada, darbe testleri başlangıcında elde edilmesi istenen darbe hızları (1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 m/sn) aşağıda verilen Denklem 6.6 yardımıyla hesaplanmıştır. Sistemimizdeki sürtünmeler ihmal edilerek hareketli kısmın yer çekimi etkisiyle aşağı doğru serbest düşme yaptığı kabul edilmiştir.

$$V = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (6.6)$$

burada;

V : Darbe Hızı, [m/sn]

g : teorik yerçekimi ivmesi, [9.81 m/sn²]

h : darbe ucunun numune yüzeyine olan uzaklığı [m]

olarak ifade edilmektedir.

Gerçek Darbe Enerjisinin Hesaplanması:

Ölçülen darbe enerjisi, darbe ucuna kılavuzluk eden dört adet silindirik boru şeklindeki dikey parçalardan oluşan sistemle temas halinde aşağı yönde hareket eden kayar parçalar arasında meydana gelen sürtünme kayıplarından dolayı Denklem 6.7 ile hesaplanan nominal darbe enerjisinden farklı olabilmektedir. Bu yüzden, gerçek darbe enerjisi aşağıdaki denklemlerle hesaplanmaktadır.

$$E = \frac{m \cdot V^2}{2} \quad (6.7)$$

burada;

E : Ölçülen darbe enerjisi, [J]

m : Hareket eden darbe aparatının kütlesi, [kg]

V : Darbe Hızı, [m/sn]

olarak ifade edilmektedir.

Bununla birlikte, yapılan deneylerde hız ölçümleri cihaz üzerindeki sensörler yardımıyla otomatik olarak ölçülmekte ve kaydedilmektedir.

Düşük hızlı darbenin analizi:

Darbeler düşük hızlı veya yüksek hızlı olarak ayrılır, fakat bu kategoriler arasında açık bir ilişki yoktur. Yapılan araştırmalar bu ilişkinin belirlenmesinde henüz net bir sonucun elde edilemediğini göstermektedir. Düşük hızlı darbeler normal olarak çarpışma temas anında malzeme iç yapısında deformasyon oluşturan darbelerdir. Bazı tanımlarda düşük hızlı darbe düşük enerjili darbe olarak da adlandırılmaktadır.

Düşük hızlı darbede malzemenin iç yapısında darbeye karşı cevap verebilmek için gerekli olan temas süresi yeterlidir ve daha fazla enerji elastik olarak absorbe edilir. Yüksek hızlı darbede malzeme darbeye karşı cevap verebilme zamanına sahip olamaz ve çok küçük bir bölgede hasar oluşur.

Kompozit malzemenin darbe davranışını belirlemek için Charpy ve Izod gibi darbe deneyleri kullanılmış ve düşüş hızı 10 m/s'ye kadar olan hızlar olarak tanımlanmıştır. Yüksek hız, delinme şeklinde meydana gelmiş fiber kopması, düşük hız ise tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) ve matris kırılması ile belirlenir.

İki cismin çarpışması sonucunda temas yüzeyinde oluşan basınç nedeniyle deformasyon ve/veya nüfuziyet meydana gelebilir. Çarpışmanın etkisiyle oluşan enerji iki cismi birbirinden ayırmaya zorlar. Darbe sonrasında oluşan deformasyonlar cisimlerin sertliğine olduğu kadar, izafi çarpma hızına da bağlıdır. Yüksek hızlı çarpışmada plastik akma oluşabileceği için büyük şekil değiştirmeler olabilir. Plastik deformasyonun oluşabilmesi için gerekli hız aralığının aşılması gerekir.

Deney sırasında oluşan temas kuvvetleri zamana bağlı olup deney cihazından elde edilmiştir. Daha sonra kuvvet-zaman, kuvvet-sehim, enerji-zaman eğrileri elde edilmiştir. Şekil 6.8'de tipik bir kuvvet-zaman değişimi grafiği verilmektedir.

Grafikte gösterilen noktalar sırasıyla şu şekilde ifade edilir;

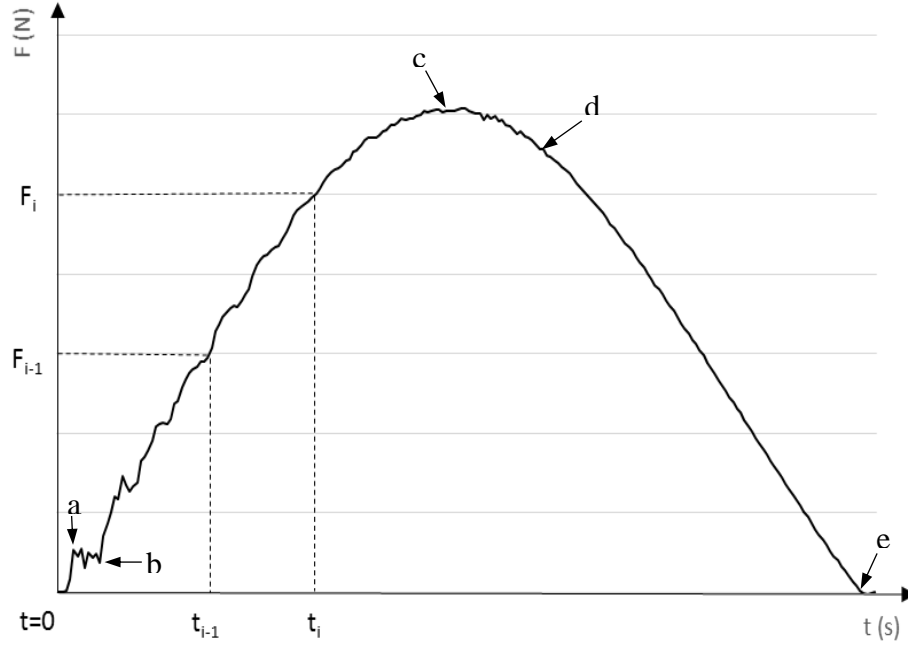
(a) İlk hasarın oluştuğu nokta: Elastik şekil değişimi bu noktada sona erer.

(b) Hasar gelişimi (b-c arası): Kalıcı hasar oluşumu başlar ve bu noktadan itibaren fiber kırılması, matris hasarı oluşumu, delaminasyon, fiber/matris ayrılması ve fiber sıyrılması gibi hasar gelişimleri gerçekleşebilir.

(c) Maksimum kuvvetin elde edildiği noktadır.

(d) Maksimum penetrasyonun (nüfuziyet) görüldüğü noktadır. Bazı durumlarda (c) ve (d) noktası birbirine çok yakın görülebilir.

(e) Hasar gelişiminin sonu: Darbe ucu bu noktada numuneden ayrılmıştır.



Şekil 6.8. Tipik kuvvet-zaman değişimi grafiği

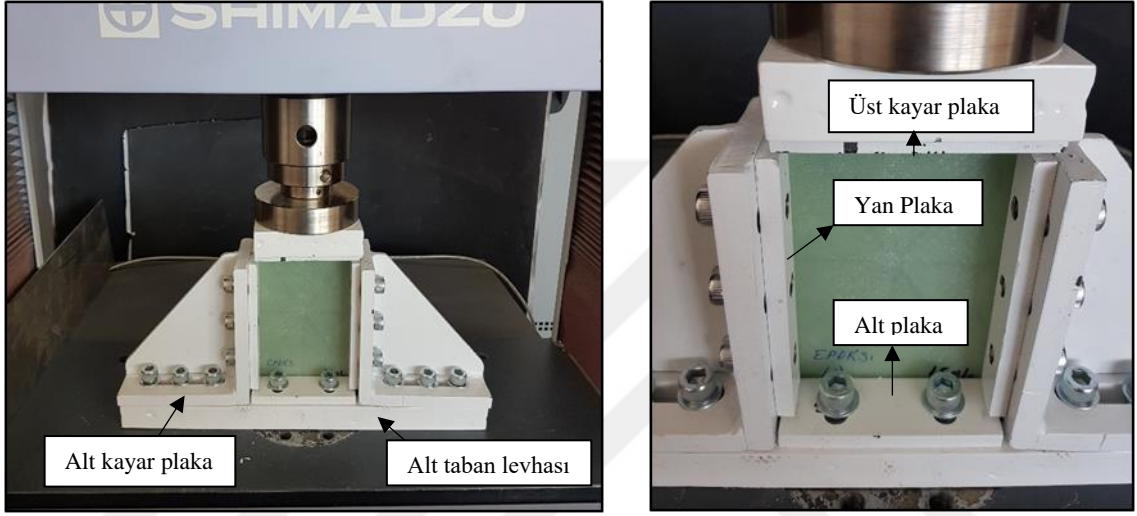
DSB testlerinin ardından malzemelerin hasar sonrası kalan rijitliklerinin belirlenmesi amacıyla 3NE testleri uygulanmıştır.

6.1.4. Darbe sonrası basma testi

Standart ASTM D 7136 Darbe testine maruz kalmış polimer matrisli kompozit tabakalı levhaların basma mukavemeti özelliklerinin belirlenmesinde standart “ASTM D 7137 Darbe Sonrası Basma” testleri uygulanmaktadır. Çalışmalarımızda daha önce düşük hızda darbe uyguladığımız numunelere bu standarda uygun olarak Basma Cihazı ile (Shimatsu AGS-X, 100kN) 1.25 m/dak hızda numunelerde hasar oluşuncaya kadar dikey eksenli basma yükü ile yükleme yapılmış, malzemelerde meydana gelen hasar oluşum mekanizmaları (başlangıç, ilerleme ve sonlanma) incelenerek analiz edilmiştir. Ayrıca, özellikle numune üzerinde hasarın meydana geldiği kısımlardaki çatlak/kırık yüzeyler incelenerek hem makro hem de mikroskobik görüntüler yardımıyla kompozit yapıda ne tür hasarlar oluştuğu incelenmiştir. Yapılan tüm testler boyunca standart olarak imal edilmiş aparatlar kullanılmış ve uygun boyutlarda üretilen numuneler dikkatli bir şekilde bağlanarak özenli bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Test Prosedürü

Basma Aparatı Şekil 6.9’da görselleri verilen ve çalışmalarımızda kullandığımız farklı numune boyutları için test yapmaya uygun şekilde ayarlanabilir parçalara sahip bir biçimde tasarlanmış ve standartlara uygun şekilde imal ettirilmiştir. Aparat numuneyi dört köşesinden test boyunca sabit tutarak yükün eşit dağılımını sağlamak ve üst ve alt kenarlara uygulanan yüklerden dolayı oluşması muhtemel burkulmayı engellemek amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 6.9. DSB testi sistemi ve standart basma testi aparatı

Şekilde görülen darbe sonrası basma testi aparatı şu parçalardan oluşmaktadır;

- Bir alt taban levhası,
- İki adet alt kayar plaka,
- İki adet alt plaka,
- Dört adet yan plaka,
- İki adet üst kayar plaka.

Yan destekler sivri uçlara sahiptir ve düzlem dışı dönme hareketine engel teşkil etmemektedir. Üst ve alt destekler numuneyi sıkıca tutmamakla birlikte şeklinden dolayı dönme hareketini bir miktar engellemektedir. Kayar plakalar köşeli geometriye sahiptir ve numuneye 8 mm’lik bir bindirme etkisi yapar. Aparat numune boyutlarına bağlı olarak az miktarda uzunluk, genişlik ve kalınlık gibi boyutsal değişiklikleri karşılamak üzere ayarlanabilmektedir.

Üst kısım ve kayar plakalar aparatın diğer alt kısımlarına bağlı olmadıklarından dolayı numunenin üst kenarı üzerinde kayabilmektedir. Yan plakalar test boyunca üst kısım ile arada boşluk muhafaza edecek kadar kısadır.

Aparat, ısıtılma işlemi görmemiş düşük karbonlu çelik malzemeden imal edilmiştir ve oda sıcaklığında yapılacak testler için uygundur. Test aparatının yükü numuneye aktaracak olan üst kısmının temas halinde olduğu ilerleme mekanizması test cihazı ile kontrol edilmektedir ve ilerleme hızı bu cihazdan ayarlanabilmektedir.

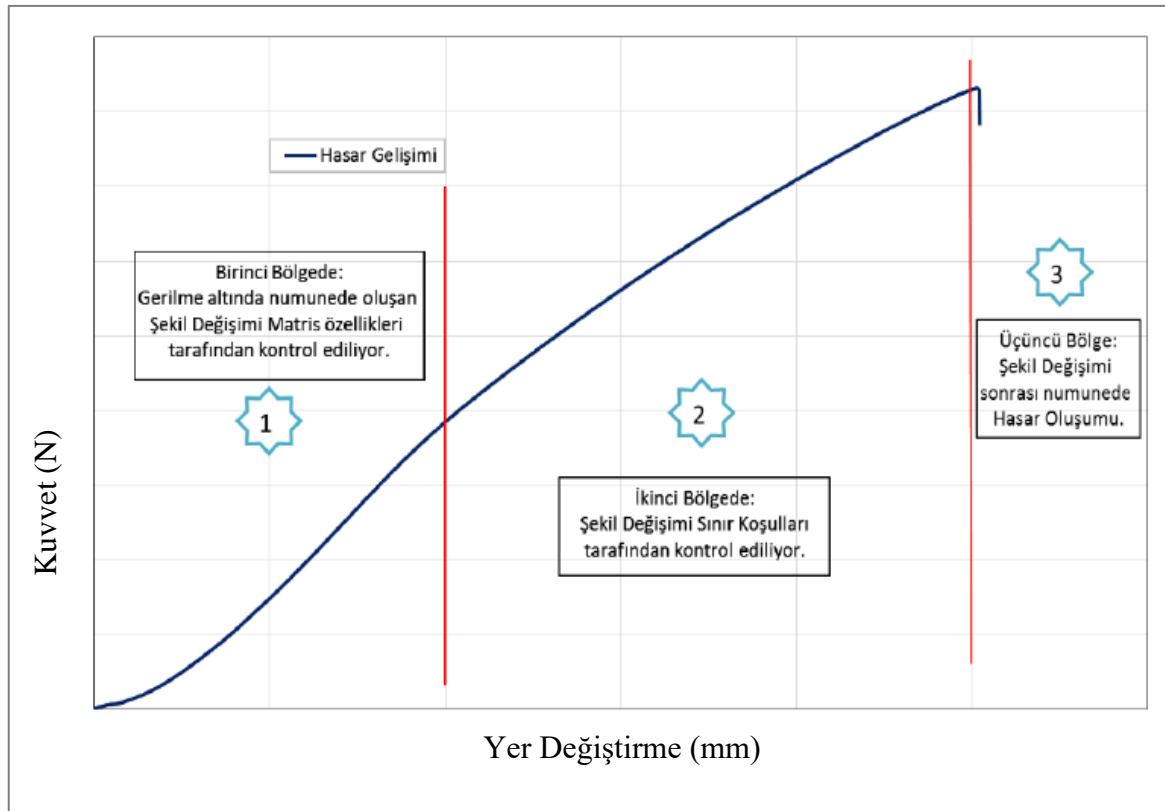
Test cihazı aynı zamanda test boyunca ilerleme (stroke) miktarını göstermekte ve kaydedebilmektedir. Yapılan testlerde numuneler üzerine herhangi bir gerinim ölçer alet (strain-gage vs.) yerleştirilmemiştir. Ancak test cihazı uygulanan kuvveti, ilerleme miktarı ve gerinim verilerini ölçüp kaydedebilmektedir.

Şekil 6.10'da Darbe Sonrası Basma Testi hasar gelişim evreleri 3 ana kısma ayrılmıştır.

Birinci bölgede, DSB testleri esnasında belirli bir kuvvete kadar numuneler üzerine uygulanan yükler sonucunda kompozit malzemede oluşan basma gerilmesi ilk aşamada matriks malzeme üzerinde yoğunlaşır. Bu kısımda cam elyafların ya da nano elyaf keçe'nin artan basma yüklerine karşı herhangi bir etkisi yoktur. Numunede gelişen şekil değişimi matriks malzeme tarafından kontrol edilir.

İkinci Bölgede, gerilmenin belirli bir seviyeye çıktığı ve artık matriks malzemenin basma yüklerine karşı koyamaması ve bunun sonucunda numunede şekil değişimleri, eğilmeler ve sonrasında da burkulmalar meydana gelmektedir. Bunun nedeni, yük altındaki numunelerin hasar göreceği kuvvete çıkılmadan önce şekil değişimine zorlanarak elastik burkulmaya maruz kalmasıdır. Böylece numune üzerindeki yük şekil değişimi ile bir miktar bertaraf edilmektedir. Bu bölgedeki şekil değişimi ise sınır değerler tarafından kontrol edilmektedir ve elastik şekil değişiminin yanı sıra matriks malzemede ve aynı zamanda takviye elemanlarında kırılmalar meydana gelmektedir. Bu bölge, yük altındaki yapının kendisine denge aradığı ve "Elastik Burkulma Noktası" (ayrılma noktası - beforcation point) olarak adlandırılan yerdir. Elastik burkulmanın olduğu bölgede hem basma hem de eğilme gerilmeleri etkili olmaktadır.

Üçüncü bölgede ise numune üzerinde oluşan yükler artık ne matriks malzeme ne de takviye elemanları tarafından taşınamayarak malzemede elastik şekil değişiminin bittiği ve kalıcı hasarların oluştuğu gözlemlenmektedir. Bu bölgede basma gerilmesinden daha çok eğilme gerilmeleri etkilidir. Elastik Burkulma Noktasına erişilmeden hasar gören malzemelerde ise yalnızca basma gerilmeleri gözlemlenir. Ancak bu noktaya kadar hasar görmemiş olan malzemelerde, bu bölgeden itibaren basma ve eğilme gerilmesinin birleşimi olarak görülen gerilmeler ortaya çıkar. Hasar oluşumu (kırılma-kopma) da bu iki gerilmenin etkisinde gerçekleşir.



Şekil 6.10. Darbe Sonrası Basma Testi Hasar Gelişim Evreleri Grafiği

Yaptığımız çalışmada, uyguladığımız DSB Testleri ile elde ettiğimiz veriler birçok numunede bu etkinin açıkça görüldüğünü kanıtlamaktadır. Bunun nedeni, numunelerin elastik davranış sergilemesi yani esnek bir yapıya sahip olması olarak açıklanabilir. Yapılan literatür araştırmalarına göre, daha sert yapıdaki kompozit malzemelere, örneğin; Karbon Elyaf takviyeli kompozit levhalara, uygulanan DSB testlerinde numunelerde burkulma, eğilme ya da elastik burkulma davranışları gözlemlenmemektedir.

Hesaplamalar

Malzemelerin darbe sonrasında dayanabileceği en yüksek basma mukavemeti Denklem 6.8 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$F^{DSB} = \frac{P_{maks}}{A} \quad (6.8)$$

burada,

F^{DSB} : Darbe sonrası en yüksek basma mukavemeti , [Mpa]

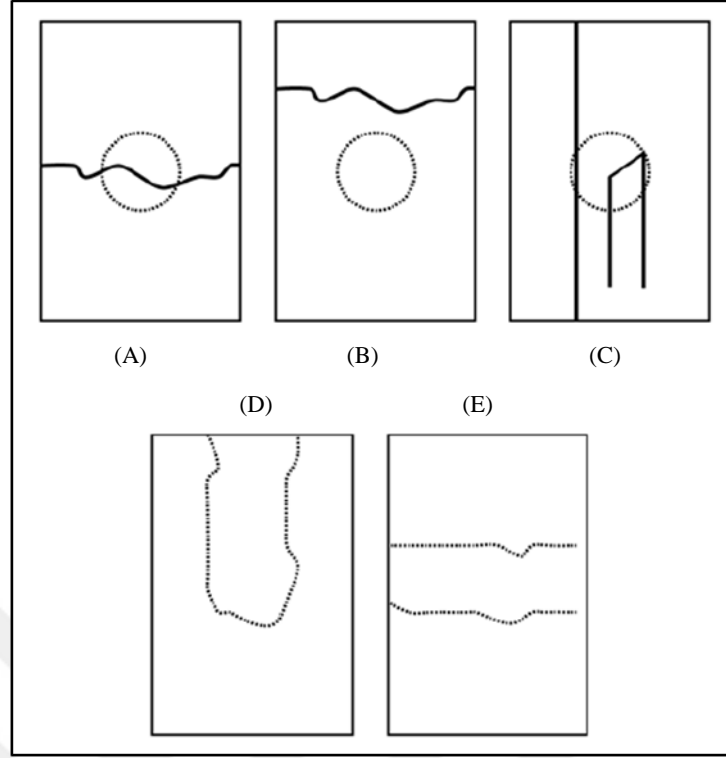
P_{maks} : kırılma öncesi görülen en büyük kuvvet , [N]

A: kesit alanı , [mm²] olarak ifade edilmektedir.

Darbe sonrası basma testinde, kompozit malzemelerin basma dayanımı özellikleri numune geometrisi, tabaka sayısı ve konfigürasyonu, darbe tipi, darbe boyutları, darbenin konumu ve sınır değerlerine bağlı olarak değişmektedir ve test sonuçları genel olarak numunelerin geometrik ve fiziksel durumlarına dayanmaktadır.

Hasar Modları

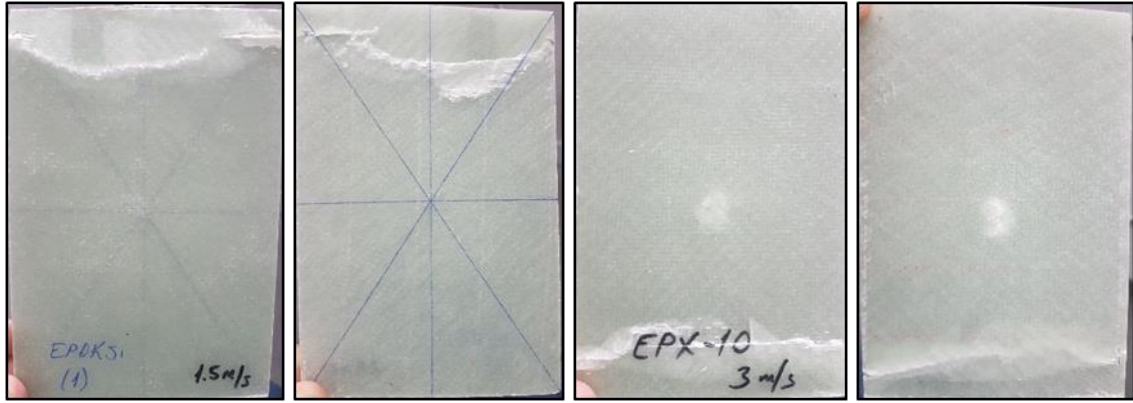
ASTM D 7137 Darbe Sonrası Basma Testi standardında gerçekleştirilecek olan testler esnasında numunelerde oluşabilecek muhtemel hasar modları, hasar bölgesi ve hasar büyüklükleri ile ilgili standart tanımlamalar yapılmıştır. Çalışmalarımızda kullandığımız numunelerde oluşan hasarların tanımlanmasında da verilen notasyonlar kullanılmıştır. Şekil 6.11'de verilen hasar modları genel olarak standart testlerde gözlemlenmiş olan kabul edilebilir hasar modlarını göstermektedir [ASTM D 7136].



Şekil 6.11. Darbe Sonrası Basma Testi kabul edilebilir hasar modları [ASTM D 7136]
 (A: Merkezden geçen, B: Merkezden uzak, C: Eksenel, D: Uç kısımlardan ilerleyen, D: Paralel hasarlar)

Çalışmalarımızda, ilk numuneler uygulanan darbe sonrası basma testleri oldukça olumsuz sonuçlanmışlardır ve Şekil 6.12’de verilen görsellerde olduğu üzere testler esnasında beklenen hasar modları oluşmadan önce numune ucu hasarları gibi istenmeyen hasar modları gözlemlenmiştir.

Ayrıca, basma yüklerine maruz kalan numunelerde aşırı eğilmeler ve esnemeler gözlemlenmiştir ve bu testlerden alınan sonuçlar geçersiz kabul edilmiştir çünkü numunelerde boyutlarına oranla en fazla %10 miktarda eğilme beklenmektedir ve bu miktarda şekil değişikliklerine kadar oluşan esnemeler kabul edilebilir varsayırlar. Aynı zamanda darbe bölgesinden çok uzak noktalarda oluşan hasarlarla karşılaşıldığında numuneye uygulanan kuvvetler tekrar incelenerek kabul edilebilir limitler dâhilinde olup olmadığı kontrol edilmiştir.



Şekil 6.12. Darbe sonrası basma testleri uygulanan ve numune ucu hasarları gibi istenmeyen hasar modları gözlemlenen bazı numuneler

Bunun sonucunda, yapılacak olan testlerde daha sağlıklı sonuçlar elde etmeyi ve numunelerde meydana gelecek olan kırılmaların ve hasarların daha önce darbe testiyle hasar görmüş ve numunelerin diğer kısımlarına kıyasla daha zayıf hale gelmiş olduğu düşünülen kısımlardan oluşmasını sağlamak amacıyla darbe uygulanan aparat üzerinde bazı ayarlamalar ve küçük değişiklikler yapılmıştır. Ancak yapılan bu minimal değişiklikler ve ayarlamalar test sonuçlarını değiştirmemiştir.

Yapılan testlerin beklendiği gibi sonuçlanmamasının nedenleri şu şekilde sıralanabilir;

- Numunelerin uygulanan yüklerde esneyerek şekil değiştirmesi ve dolayısıyla numunelerde basma yerine bir noktadan itibaren kesme kuvvetleri oluşması sonucunda numunelerin uç kısımlarında deformasyon oluşması,
- Numunelerin uç kısımlarının darbe testinde hasar gören noktalardan dahi daha zayıf kalması ya da hasarın yeterince büyük olmaması,
- Numune boyutlarının (kalınlık/uzunluk oranlarının) uygunsuz olması,
- Basma aparatının tutma kolunun ya da yanıl elemanlarının yeterince düzgün bir şekilde ayarlanamaması.

Tüm bu ihtimaller değerlendirilerek, basma aparatının uygunluğunun deney numunelerimizle aynı boyutlarda ancak farklı malzemedan (Karbon Elyaf) imal edilmiş olan numunelerle kontrol edilmesi düşünülmüş ve yapılan denemelerde basma testlerinin sorunsuz gerçekleştiği anlaşılmıştır. Sonuç olarak, basma aparatı ile ilgili soru işaretleri ortadan kaldırılmış ve özellikle elastiklik gibi numune özelliklerinin deney sonuçlarına etki edebileceği düşünülmüştür. Karbon elyafların cam elyaflara göre çok daha sert malzemeler olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla, bundan sonraki deneylerde numunelerimizin basma deneyleri esnasında aşırı şekilde (uzunluğa göre %10'un

üzerinde) esnemesinin önlenmesinin gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bunun bir yolu numune boyutlarının (kalınlık/uzunluk oranlarının) değiştirilerek testlerin tekrarlanması diğer yolu ise numunelerin esneyerek istenmeyen bölgelerinden hasar görmesinin önüne geçecek yeni bir aparat kullanılmasıdır. Yapılan literatür araştırmaları ikinci çözüm yolu olan aparat değişikliğinin daha uygun olduğunu göstermiştir ve deneylere aynı numune boyutlarıyla devam edilmesine karar verilmiştir.

Yukarıda sayılan tüm bu sebeplere dayanarak ve literatür araştırmalarının sonuçları göz önüne alınarak, daha önce yapılan denemelerde gözlemlenen hasarların darbe bölgesinden oldukça uzak yerlerde meydana gelmesinin önüne geçmek için ve hasar mekanizmalarının test standartlarında gelişmesini sağlayabilmek adına aşağıda verilen koşullar da göz önünde bulundurularak yeni bir test aparatı tasarlanmıştır;

- Aparatın mekanik düzen ayarı,
- Numune ile kayar plakalar veya yan plakalar arasındaki optimum boşluk miktarı,
- Yan kayar plakaların sıkıştırılma miktarları,
- Numunelerin kenar ve köşelerinin uygulanan yükün numunenin tamamına eşit ve dengeli bir şekilde aktarılmasını mümkün kılacak şekilde düzeltilmesi.

şekil 6.13'de gösterildiği üzere, numunenin üst ve alt kısımlarını destekleyecek ve o kısımlardan istenmeyen hasarların oluşma olasılığını azaltacak şekilde numune ile temas yüzeyini artıracak şekilde daha uzun kenarlara sahip üst ve alt kayar plakalar tasarlanarak imal edilmiştir.



şekil 6.13. Daha uzun kenarlara sahip yeni üst ve alt kayar plakalar

Darbe Sonrası Basma Testlerinin Uygulanması

Çalışmalarımızın bu kısmında, daha önce darbe uygulanmış olan uygun boyutlardaki kompozit levhalardan oluşan numunelere eş eksenli basma testlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Numunelere uygulanan darbe yükleri daha önceki bölümde detaylı bir şekilde açıklandığı üzere standart test metodu takip edilerek gerçekleştirilmiştir.

Her bir darbe görmüş numune, Şekil 6.14'de görselleri verilen test düzeneğine yerleştirilerek basma yükünün numuneye dengeli bir biçimde aktarılması adına yüklemenin numunenin üst ve alt kenarına dik doğrultuda uygulanmasını sağlayacak şekilde bağlanmıştır.

Test başlangıcında basma cihazı kalibrasyonu yapılarak test aparatına temas edinceye kadar yaklaştırılmış ve numune yüzeyiyle baskı plakası arasındaki boşluğun sıfırlanmasını sağlayacak kadar ön gerilme uygulanmıştır. Daha sonra deney cihazı tarafından ölçülen ve numunede herhangi bir kayda değer şekil değişimine sebebiyet vermeyecek olan yük ve şekil değişimi sıfırlanmış (resetlenmiş) ve ardından test cihazı belirlenen ilerleme hızında (1.25 mm/dak hızda ilerleme) çalışmak üzere test başlatılmıştır.

Her bir numune için test boyunca basma kolu tarafından uygulanan yük miktarı numunede belirli miktarda hasar oluşumuna kadar test cihazı tarafından ölçülmüş ve kaydedilmiş olan başlıca önemli veriler şunlardır;

- Uygulanan yükün değişimi,
- İlerleme miktarı (şekil değişimi - kısalma),
- Numunelerde oluşan gerilmenin şekil değişimine göre değişimi.

Tercih edilen hasar modu standart test yönteminde beklendiği üzere numune üzerinde oluşturulan darbenin üzerinden geçmelidir. Bununla birlikte, eğer hasar boyutu küçükse ve malzeme üzerinde nispeten düşük yoğunluklu bir gerilme konsantrasyonu oluşturmuşsa darbe bölgesi dışında bir yerde de hasar gelişimi görülmesi kabul edilebilir bir durumdur.

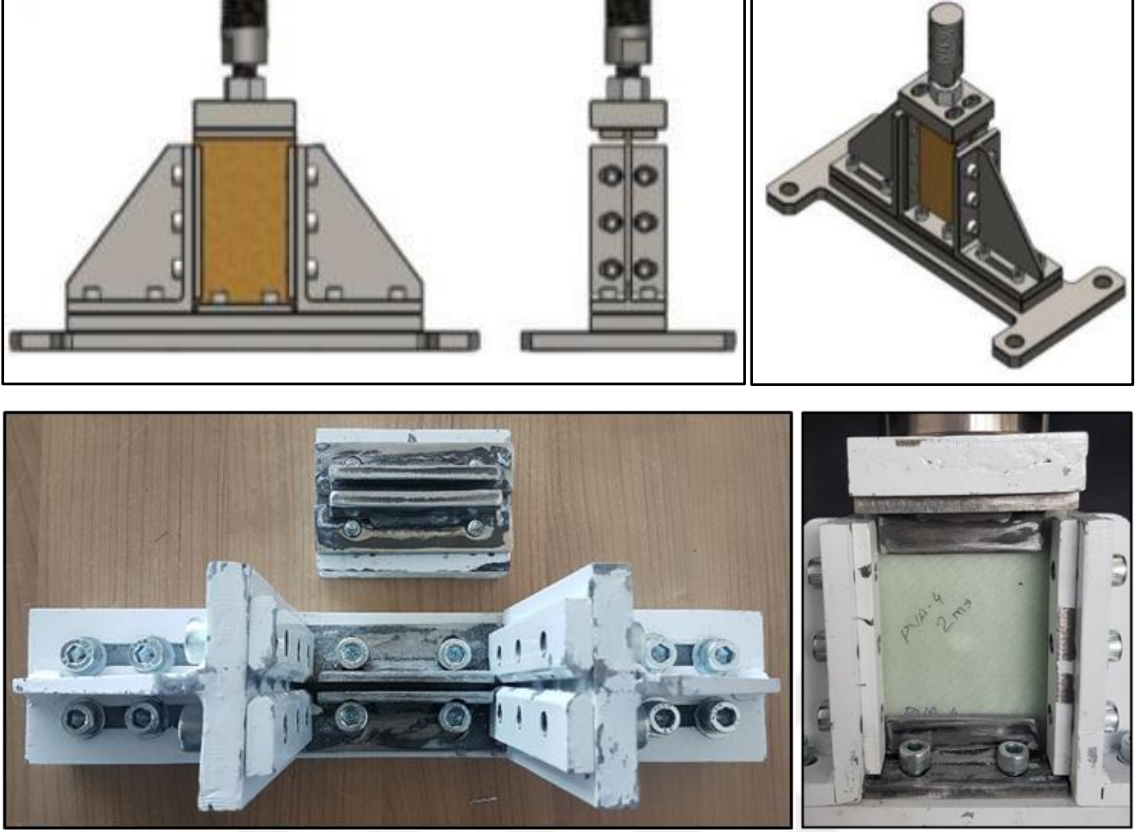
Gerçekleştirilen ilk testlerde şahit olduğumuz kabul edilemeyen hasar modlarının oluşması durumu numuneler üzerine uygulanan yükün basma aparatı tarafından doğru bir biçimde aktarılamaması, numune bağlantılarının yapıldığı sabitleme plakalarının

durumundaki bozukluklar ya da numunenin dengesiz bir şekilde durması olarak açıklanabilmektedir. İlk testlerin ardından gerçekleştirilen deneylerde daha olumlu sonuçlar alabilmek ve başarılı hasar modları gözlemek amacıyla tüm test parametreleri yeniden kontrol edilmiş ve başarısız denemelerin ardındaki tüm muhtemel nedenler belirlenerek ikinci faz basma testlerine geçilmiştir.

Test koşullarının gözden geçirilmesine ilave olarak, darbe testleriyle oluşturulan hasarlar tekrar analiz edilmiş ve hasar büyüklüğünün çok düşük miktarda olma ihtimali göz önüne alınarak bazı numunelerde daha önce darbe oluşturulan bölgeye daha yüksek hızlarda iki ya da üç kez daha darbe uygulanmıştır. Böylece noktasal deformasyon büyüklüğü artırılmış ve malzemenin merkezinde daha büyük boyutlarda hasarlar oluşturularak dayanım düşürülmüştür. Böylece, basma testi esnasında numunenin merkezinde bir hasar gelişimi gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Bununla birlikte, uygulanan ilave darbeler sonrasında yapılan basma testleri esnasında dahi numune üzerinde gelişen hasar mekanizmasında olumlu bir ilerleme kaydedilmemiş ve test sonuçlarında iyileşme gözlemlenmemiştir.

Kalan numuneler üzerinde gerçekleştirilecek olan testler için kullanılacak olan aparat için, bir önceki bölümde ifade edildiği üzere literatür araştırmaları ışığı altında daha önce yapılan denemelerde gözlemlenen hasarlar analiz edilmiş ve hasarın darbe bölgesinden uzak noktalarda oluşmasını engellemek adına ve istenen hasar mekanizmalarının gelişmesini temin etmek amacıyla Şekil 6.13’de verilen, kompozit levhaların üst ve alt kısımlarında daha geniş bir alanı destekleyecek, numune ile temas yüzeyini artıracak ve o bölgelerde hasarların oluşmasını engelleyecek daha uzun kenarlara sahip üst ve alt kayar plakalar kullanılması kararlaştırılmıştır.

Darbe Sonrası Basma Testlerinin çalışmalarının kalan kısmı Şekil 6.14’de görüldüğü üzere yeni kayar plakalar tarafından desteklenmiş bir şekilde aparata bağlanmış olarak gerçekleştirilmiş ve nispeten başarılı sonuçlar alınmıştır.



Şekil 6.14. Yeni kayar plakalar tarafından desteklenmiş DSB Testi aparatı çizimleri ve görüntüleri

Elde edilmiş olan DSB Testleri verileri farklı konfigürasyonlardaki aparatlarla yapılan tüm test sonuçlarını kapsamaktadır. Yapılan çalışmalarda karşılaşılan aksaklıklar, çözüm aşamalarında izlenen adımlar, bulunan çözüm yöntemleri ve edinilen tecrübeler daha sonra yapılacak benzer çalışmalara ışık tutması amacıyla detaylarıyla anlatılmıştır.

Standart test numunesi boyutlarında (150mm x 100m) üretilmiş olan numunelerimiz düşük hızda darbe testleri sonrasında Darbe Sonrası Basma Testlerine maruz bırakılmışlardır. DSB testleri esnasında numuneler basma aparatına bağlanarak Şekil 6.14’de gösterildiği şekliyle üst ve alt kenarına sabit hızda (1.25 m/dak) ilerleyen basma kolu ile eksenel ve doğrusal basma yükleri oluşturulur ve dolayısıyla uygulanan yükler numune içerisinde iç gerilmelerin meydana gelmesine neden olur.

Numuneye uygulanan dikey yönlü eksenel basma kuvveti öncelikle numunenin merkezine doğru iç gerilmelerin oluşmasına yol açar. Yükün artmasıyla birlikte Hook Kanunu ile tanımlandığı biçimde numunede gerilmeler artar ve lineer bir elastik şekil değişimi oluşmaya başlar ve numunenin boyu kısalarak eninde genişleme meydana gelir. Oluşan şekil değişimi nedeniyle numunenin yan kenarları aparatın yan kısımlarına temas eder ve sonrasında yanal baskıların/yüklerin doğmasına neden olur. Numunenin yan

plakalara yaptığı baskı sonucunda oluşan tepki kuvvetleri ters yönde bir kuvvet oluşturarak numunenin daha fazla enine genişlemesine engel teşkil eder ve yine numunenin merkezine doğru yatay yönlü aksenal basma kuvvetlerinin doğmasını sağlar. Oluşan tüm bu gerilmeler numunenin iç kısmında burkulmaya zorlayıcı etkiler oluşturarak ve şekil değiştirmesine (iç kısmının şişmesine) yol açmaktadır.

Sonuç olarak, numunenin merkezinde gerilmelerin artmasıyla birlikte numunede bir süre lineer elastik şekil değişimi devam eder ancak belirli bir noktada elastik şekil değişimi limitine ulaşıldığında numunede lineer olmayan plastik şekil değişimi oluşmaya başlar. Bu etkiyle birlikte en büyük gerilme limitine ulaşılır ve bu noktadan itibaren numunedeki şekil değişimi yerini hasar oluşumuna bırakır. Aynı zamanda, kompozit numune içerisindeki epoksi matriks, cam elyaf kumaş ve nano elyaf keçede hızlı bir şekilde hasar oluşumu gelişir ve numunenin darbenin etkisiyle en zayıf kısmı olması öngörülen merkezinden itibaren çatlak oluşumu başlar. Hasarın gelişimiyle birlikte numunede tam bir kırılma ya da kopma oluştuğunda teste otomatik olarak son verilir.

Test esnasında hasar gelişimleri darbenin etkisiyle zayıflamış olması beklenen noktadan itibaren başlar ve çatlağın numunenin kenarlarına doğru ilerler ya da kenarlardan başlayarak darbe merkezine doğru ilerler. Sonuç olarak, gerçekleştirilecek olan DSB testlerinde benzer şekillerde hasar oluşumları da görülmesi beklenmektedir.

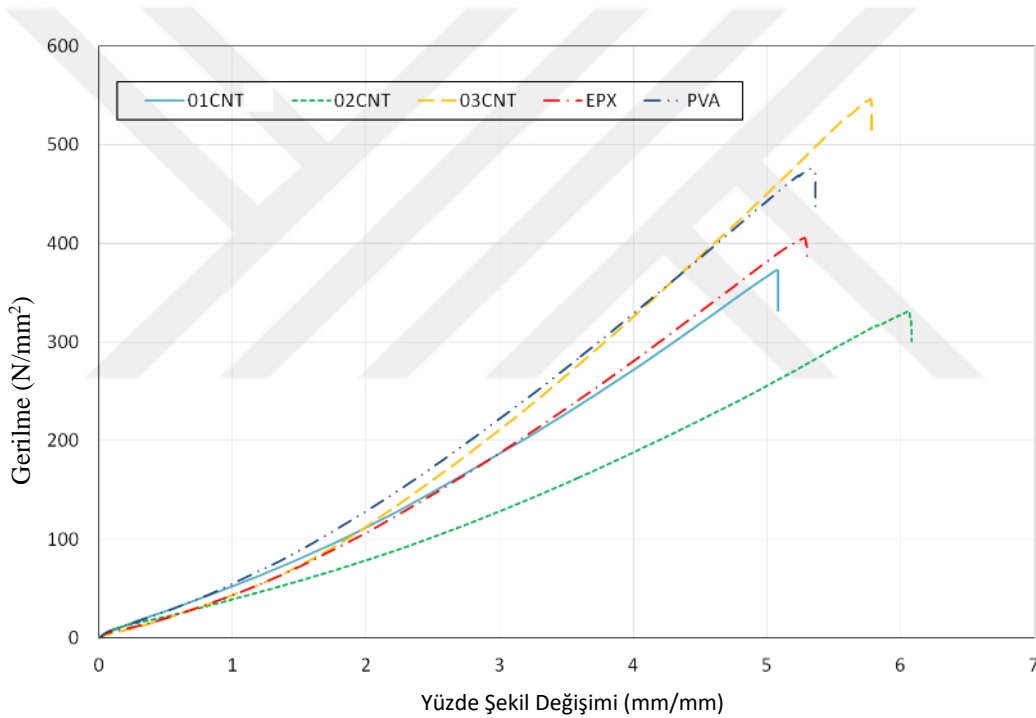
Bu hasar gelişimleri dışında beklenmeyen biçimde hasarlarla (numune ucunda ezilme, darbe merkezine uzak ve kenarlara yakın yerlerden kırılma gibi) da karşılaşılabilir. Bunun nedeni, yapılan testlerin standarda uygun olarak gerçekleştirilmemiş olması, numunelerin aparata düzgün bir şekilde bağlanmamış olması, numune içinde üretimden kaynaklı yapısal hataların bulunması ya da darbenin etkisinin sınırlı kalarak numunenin darbe uygulanan noktasının diğer kısımlara göre daha dayanıklı bir özellik göstermesi ile açıklanabilir.

7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI

7.1. Çekme Testi

Testler sonucunda elde edilen değerlere ait veriler Şekil 7.1'deki grafikte gösterilmektedir.

Elde edilen verilerden ağırlıkça %3 oranında ÇCKNT içeren numunenin daha yüksek mukavemet değerine sahip olmakla birlikte en düşük gerilme değerinin ağırlıkça %2 oranında ÇCKNT içeren numuneye ait olduğu görülmektedir. Diğer numuneler için elde edilen gerilme ve yüzde şekil değiştirme miktarlarının birbirine yakın elde edildiği görülmektedir.



Şekil 7.1. Çekme Testi (Gerilme – Yüzde Şekil Değişimi)

Tablo 7.1'de Çekme Testi esnasında numune üzerinde görülen en büyük gerilme, numunede kopma öncesinde oluşan yüzde uzama değerleri ve numunelerin elastiklik modülleri verilmektedir. PVA nanoelyaf keçe ile güçlendirilmiş cam elyaf takviyeli epoksi kompozit numunenin çekme dayanımı sadece cam elyaf takviyeli numunelerle kıyaslandığında %18 artışla 493 MPa olarak gerçekleşmiştir. Ağırlıkça %3 oranında ÇCKNT içeren PVA nanoelyaf keçe takviyeli numunelerin çekme dayanımı PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numunelerle karşılaştırıldığında daha yüksek çekme

mukavemeti değerine sahip olduğu saptanmıştır ve bu değer yaklaşık olarak %34 oranında bir artışla ve 562 MPa değerine çıkmıştır.

Bunun yanı sıra, ağırlıkça %1 ve %2 oranında ÇCKNT içeren PVA nanoelyaf keçe takviyeli numunelerin çekme dayanımı PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numunelerle kıyaslandığında ise yaklaşık olarak sırasıyla %8 ve %18 oranında düşüş tespit edilmiş ve sırasıyla 386 MPa ve 344 MPa değerlerine düşmüştür. Ağırlıkça %1 oranında ÇCKNT içeren PVA nanoelyaf keçe takviyeli numunenin çekme dayanımı PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numuneler ile kıyaslandığında yaklaşık olarak %18'lik düşüş tespit edilmiş ve bu değer 386 MPa değerine düşmüştür. Tüm numuneler için elde edilen verilerin birbirine yakın elde edildiği, ancak %2 oranında ÇCKNT içeren numunenin çekme dayanımının diğer numunelere kıyasla yaklaşık olarak %20-50 daha farklı olduğu görülmektedir. Ağırlıkça %3 oranında ÇCKNT içeren numunenin diğer numunelere kıyasla daha yüksek çekme mukavemeti değerine sahip olduğu saptanmıştır ancak bu verilerden numunelerin çekme dayanımlarına ÇCKNT katkısının ya da nanoelyaf keçe takviyesinin herhangi bir etkisinin olup olmadığı tespit edilememektedir.

Tablo 7.1. Çekme Testi ile elde edilen veriler

Numune Adı	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	% ϵ_{maks} (mm/mm)	Elastiklik Modülü (GPa)
01CNT	386±14	5.2	7.45
02CNT	344±26	6.2	5.59
03CNT	562±12	5.9	9.55
EPX	419±15	5.4	7.79
PVA	493±17	5.4	9.09

7.2. Üç Noktadan Eğilme Testi

Yapılan testler boyunca iki (2) numunede darbe sonrası yapılan testlerde tabakalar arası ayrılma olduğu görülmüştür ve o numune diğer testlere tabi tutulmaksızın değerlendirme dışı bırakılmıştır. Onun dışında herhangi bir anormal durumla ya da problemle karşılaşılmamıştır.

DHD Testi öncesi yapılmış olan 3NE Testleri numunelerde hasarın oluşmayacağı bir noktada (sehim miktarı 5.3 mm olduğunda) durdurulmuştur. DHD Testi sonrası yapılmış olan 3NE Testleri ise daha önce belirlenmiş olan 1500 N değerine kadar sürdürülmüştür. Bunun nedeni, DHD testi esnasında oluşacak hasar gelişimlerine bağlı

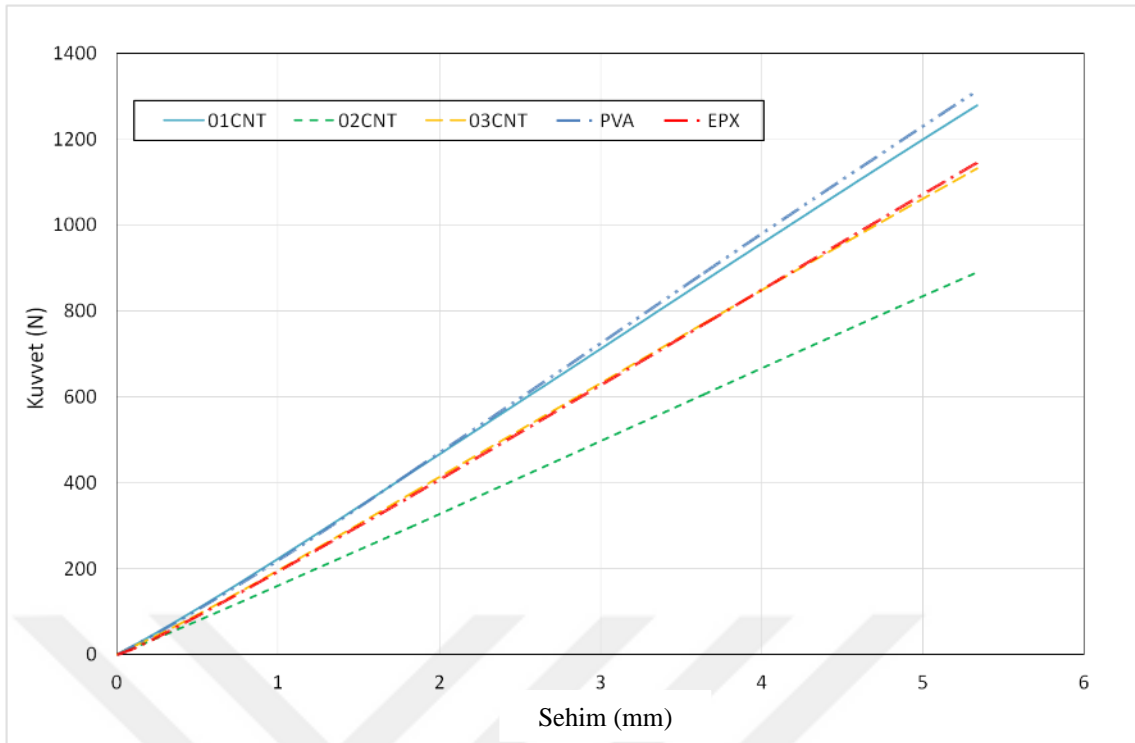
olarak elastiklik modülü değerlerinin değişeceğinden dolayı tüm numunelerin eşit koşullarda test edilebilmesinin amaçlanmasıdır.

Numuneye ait bilgiler, malzeme içeriği, üretim yöntemleri ve aşamaları, numune boyutları ve diğer bilgiler daha önceki bölümlerde detaylı bir şekilde verilmiştir.

Yoğunluk, hacim ve malzemedeki boşluk miktarları, numune geometrisi, test parametreleri ve çıktıları da detaylı olarak raporlanmıştır. Ayrıca “Kuvvet-Sehim” grafikleri ve her bir numune için Darbe Testi Öncesi 3NE Testi ile elde edilen sonuçlar da sunulmaktadır.

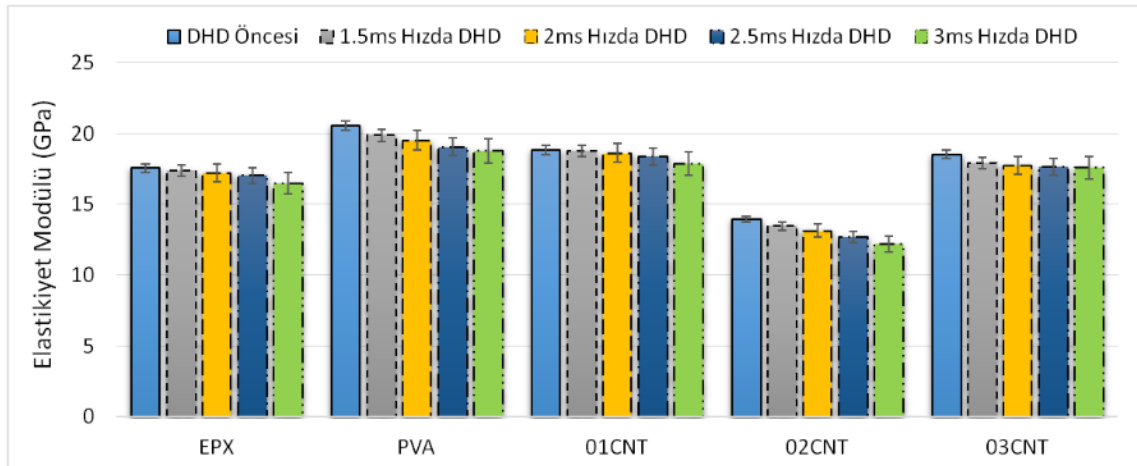
Darbe Testi Öncesi her bir numune için tekrarlanan 3NE Testi “Kuvvet - Sehim” grafikleri elde edilmiştir. Her tür numune için darbe öncesi 3NE testleriyle elde edilen test sonuçlarının ortalamaları alınarak tüm numuneler için ortalama “Kuvvet - Sehim” değerlerinden elde edilen grafikte, numunelerde meydana gelen gerilme değerlerinin karşılaştırılması Şekil 7.2’de gösterilmiştir.

Şekil 7.2’de verilen eğriler kıyaslandığında, aynı sehim değeri karşılığında uygulanması gereken kuvvetin büyüklüğünün ağırlıkça %2 oranında ÇCKNT içeren numuneler için en küçük miktarda olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, ağırlıkça %1 oranında ÇCKNT içeren (01CNT) ve yalnızca PVA nanoelyaf keçe içeren numuneye (PVA) uygulanan kuvvet diğer iki numuneye (03CNT ve EPX) kıyasla yaklaşık olarak %10 daha yüksek elde edilmiştir. Buradan anlaşılacağı üzere, 01CNT ve PVA numunelerin mukavemet değerinin diğerlerine kıyasla daha yüksek olduğu, diğer iki numune için elde edilen kuvvet ve sehim miktarlarının birbirine çok yakın elde edildiği görülmektedir. Sonuç olarak, DHD testi öncesinde elde edilen verilerden 01CNT ve PVA numunelerinin eğilme rijitliği değerlerinin daha büyük olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 7.2. Kompozit numunelerin 3NE testi kuvvet- sehim grafiği

Her bir numune için DHD Testi Sonrası 3NE Testi ile elde edilen veriler kullanılarak hesaplanan rijitlik değerlerinin değişimi Şekil 7.3 ve Tablo 7.2'de verilmektedir. Grafikten ve tablodan da anlaşılacağı üzere, elde edilen en büyük rijitlik değeri PVA nanoelyaf keçe içeren numunelerde elde edilmiştir. En küçük rijitlik değeri ise %2 oranında ÇCKNT içeren (02CNT) numunelere aittir. Darbe öncesi ve 3m/s hızda darbe testi sonrası veriler kıyaslandığında ise numunelerde farklı oranlarda ve nanoelyaf keçe takviyesinden bağımsız olarak kayıplar gözlemlenmiştir. Darbe sonrası değerlere bakıldığında mukavemet kaybı miktarları yaklaşık olarak EPX için % 6.3, PVA için %8.3, 01CNT için % 4.8, 02CNT için % 12.2 ve 03CNT için % 4.9 değerlerinde gerçekleşmiştir.



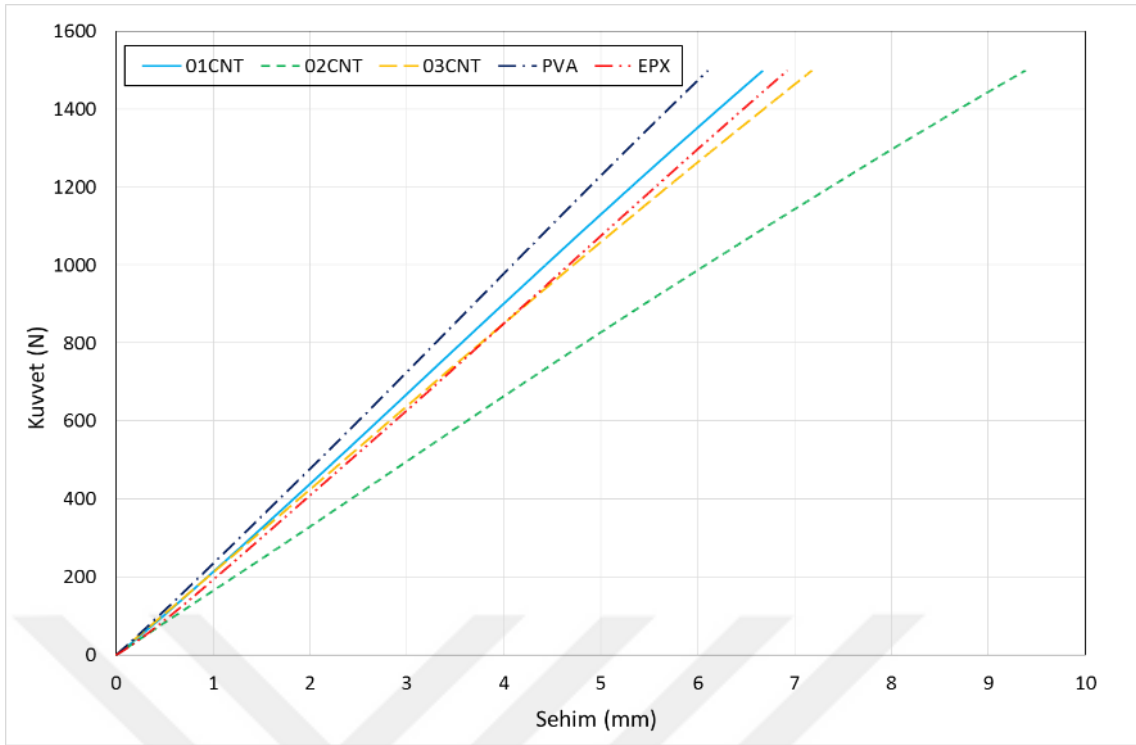
Şekil 7.3. Darbe Testi Öncesi ve Sonrası 3NE Testleri ile elde edilen sonuçlar

Tablo 7.2. Üç Noktadan Eğilme Testi ile elde edilen Darbe Testi öncesi ve sonrası Rijitlik Değerlerinin Değişimi

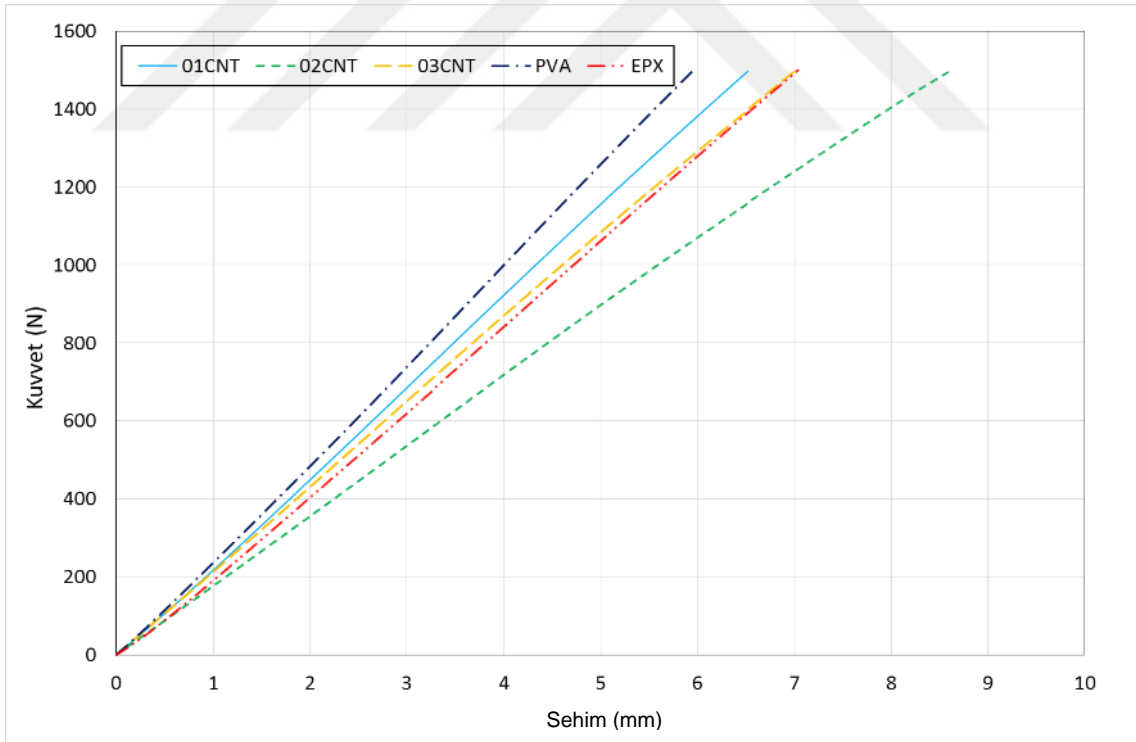
Numune	DHD Öncesi	1.5m/s Hızda DHD	2m/s Hızda DHD	2.5m/s Hızda DHD	3m/s Hızda DHD
	E (GPa)	E (GPa)	E (GPa)	E (GPa)	E (GPa)
EPX	17.6±0.6	17.4±0.5	17.2±0.2	17±0.6	16.5±0.3
PVA	20.5±0.6	19.9±0.4	19.5±0.4	19.1±0.3	18.8±0.4
01CNT	18.8±0.9	18.7±0.2	19.03±0.6	18.4±0.7	17.9±0.6
02CNT	13.9±0.5	13.5±0.2	13.1±1.3	12.7±0.3	12.2±0.5
03CNT	18.5±0.7	17.9±0.5	17.8±0.2	17.7±0.4	17.6±0.8

Darbe Testi sonrasında 3NE Testi “Kuvvet- Şekil Değişimi” grafikleri elde edilmiştir. Farklı hızlarda Darbe Testlerine maruz kalmış numuneler için darbe sonrası uygulanan 3NE testleriyle elde edilen test sonuçlarının aynı darbe hızlarındaki ortalamaları alınarak tüm numuneler için ortalama Kuvvet-Şekil Değişimi değerlerinden elde edilen grafiklerde, numunelerde meydana gelen gerilme değerlerinin karşılaştırılması aşağıdaki grafiklerde (Şekil 7.4 ve Şekil 7.7 arası) verilmiştir.

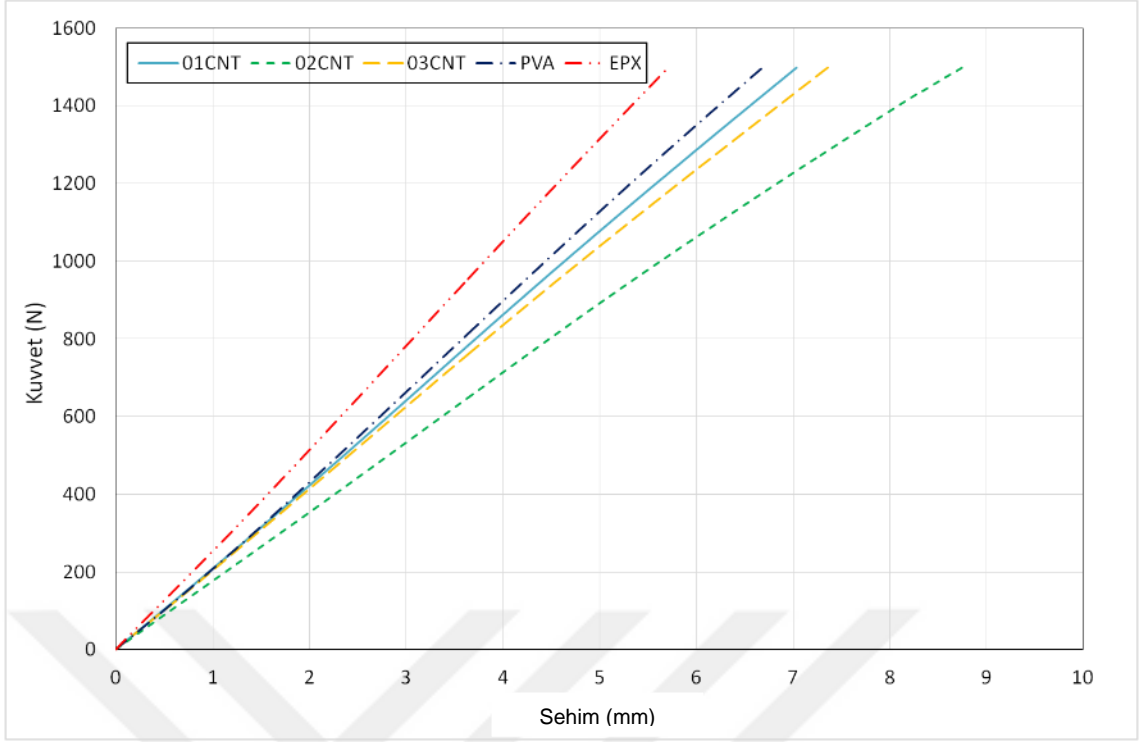
Elde edilen veriler, grafikler ve tablolar incelenerek farklı hızlardaki darbelerin numunenin eğilme rijitliğine etkileri anlaşılmasına çalışılmıştır. Sonuç olarak, artan darbe hızlarıyla numunelerde oluşan hasar büyüklüğüne bağlı olarak belirli derecede mukavemet düşüşü görülmekle birlikte bu düşüş 02CNT haricindeki numuneler için %4.8-8.3 aralığındadır. Dolayısıyla, numunelerin merkezlerinde oluşturulan hasar numunenin eğilme direncinde genel olarak önemli bir etkide bulunmamaktadır. Hasarın lokal olması ve numunenin kalanına herhangi bir ciddi deformasyon etkisi oluşturmaması nedeniyle eğilme mukavemeti değerlerinde önemsiz derecede azalma meydana getirdiği gözlemlenmiştir.



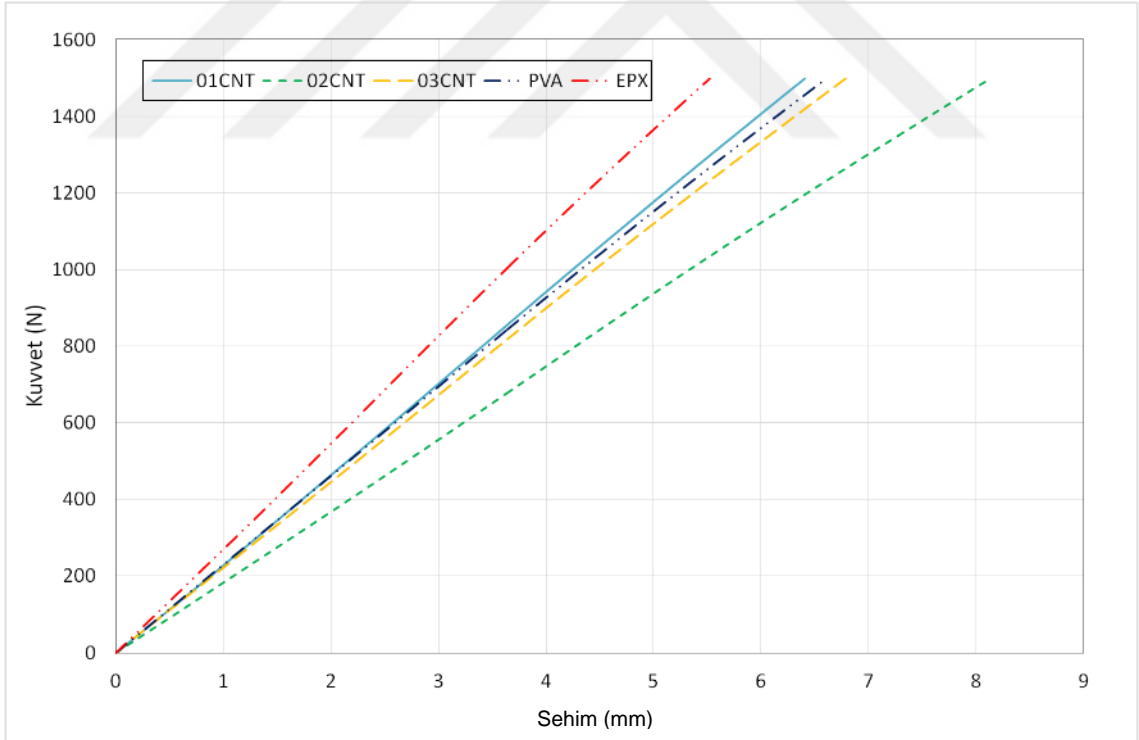
Şekil 7.4. 1.5 m/s hızda DHD Testi sonrası 3NE testi kuvvet- sehim grafiği



Şekil 7.5. Kuvvet- Sehim Değişimi Grafiği (Darbe Hızı: 2 m/s)



Şekil 7.6. Kuvvet- Sehim Değişimi Grafiği (Darbe Hızı: 2.5 m/s)



Şekil 7.7. Kuvvet- Sehim Değişimi Grafiği (Darbe Hızı: 3 m/s)

Ancak elde edilen sonuçlardan da anlaşılacağı üzere bazı numunelerde, özellikle kompozit levha kalınlığının büyük olduğu %2 oranında ÇCKNT içeren numuneler için durumun farklı olduğu görülmektedir. Test sonuçlarında 3 numunede ciddi mukavemet

düşüşü gözlemlenmiştir. Bunların nedeni numunelerde delaminasyon (tabakalar arası ayrılma) meydana gelmesi olarak yorumlanmıştır. Ancak diğer test sonuçlarında da karşılaşıldığı üzere, malzemenin rijitlik değerindeki bu düşüşün büyük ölçüde darbe testinde ya da eğme testleri esnasında uygulanan yüklerden bağımsız olup doğrudan kalınlığa bağlı olarak gelişen bir üretim hatasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

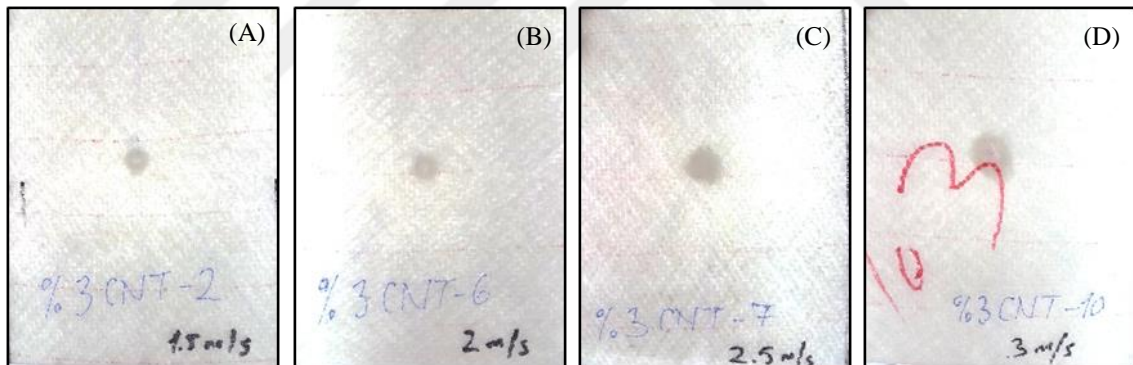


7.3. Düşük Hızda Darbe Testi

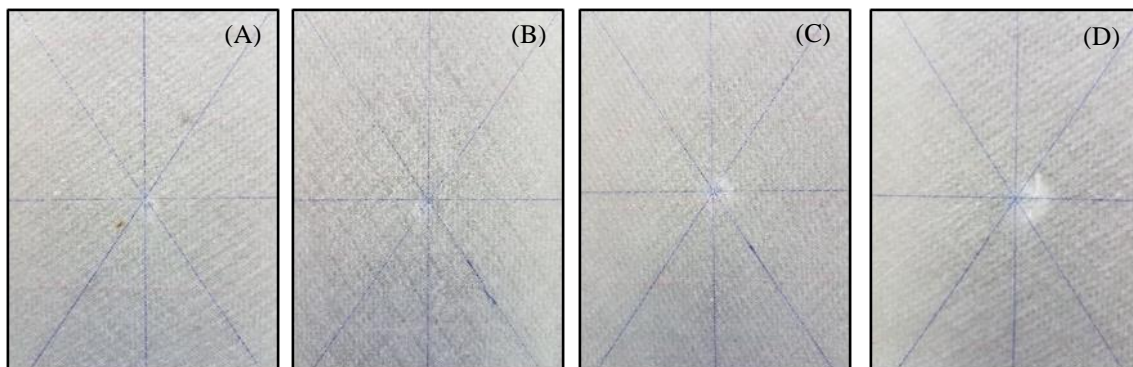
7.3.1. Darbe hızlarının hasar gelişimi üzerine etkisi

Çalışmalarımızda her bir özelliği temsil eden on iki (12) adet numune bulunmaktadır ve Darbe Testlerini her bir numune türü için dört (4) farklı hızlarda (1.5, 2.0, 2.5, 3.0 m/sn) testler gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla, her bir hız için toplamda 3 adet test numunemiz mevcuttur.

Şekil 7.8.a ve Şekil 7.8.b’de verilen %3 oranında ÇCKNT içeren PVA nano elyaf keçe takviyeli numunelere farklı hızlarda uygulanan Darbe Testleri sonrasında numunelerin ön ve arka yüzeylerinde oluşan hasar büyüklüklerinin değişimi net bir şekilde görülebilmektedir. Darbe hızlarındaki artış numuneler üzerinde oluşan hasar büyüklüklerinde de artışa neden olmuştur. Numunelerin ön yüzeylerinde görülen matriks hasarları ve delaminasyon miktarlarındaki büyümede darbe hızına bağlı olarak lineer bir artış söz konusudur. Numunelerin arka yüzeylerinde ise yalnızca matriks hasarları gözlemlenmiştir.

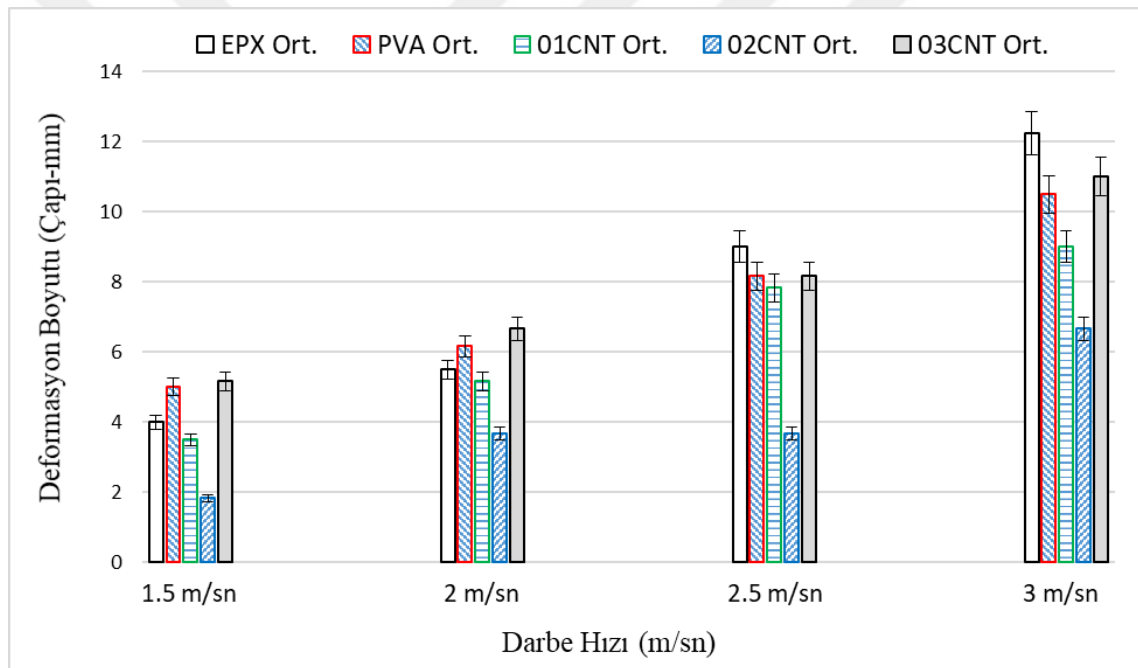


Şekil 7.8.a. Aynı tür numunelerde farklı hızlarda (A: 1.5 m/sn, B: 2 m/sn, C: 2.5 m/sn, D: 3 m/sn) Darbe Testleri sonrasında oluşan hasar büyüklüklerinin değişimi (önden görünüm)



Şekil 7.8.b. Aynı tür numunelerde farklı hızlarda (A: 1.5 m/sn, B: 2 m/sn, C: 2.5 m/sn, D: 3 m/sn) DSB Testleri sonrasında oluşan hasar büyüklüklerinin değişimi (arkadan görünüm)

Bir kompozit levha halindeki numunedeki hasarın miktarı artırıldığında ve boyutu büyütüldüğünde, kompozit yapı içerisindeki matriks malzemenin ve cam elyafların hasar davranışı üzerindeki rolü daha iyi anlaşılabilir. Şekil 7.9'da artan hızda darbelerin sonucunda (darbe hızının 1.5 m/sn'den 3 m/sn'ye çıkarıldığında) epoksi matrikse sahip cam elyaf destekli kompozit levhalarda meydana gelen hasarın boyutlarındaki değişimi görülmektedir. Tahmin edileceği üzere düşük hızlarda yapılan testler sonucunda oluşan hasar boyutu görece azdır ve test hızındaki (darbe hızı) artışla birlikte lineer olarak artmaktadır. Şekil 7.9'da 5 farklı numunemiz için ölçülen ortalama deformasyon boyutlarına ait değerler yer almaktadır. Burada deformasyon boyutu ölçümü yapılırken darbe bölgesinin dairesel olduğu düşünülerek farklı hızlarda oluşturulan darbeler sonucunda oluşan ortalama deformasyon çapı referans alınmıştır.



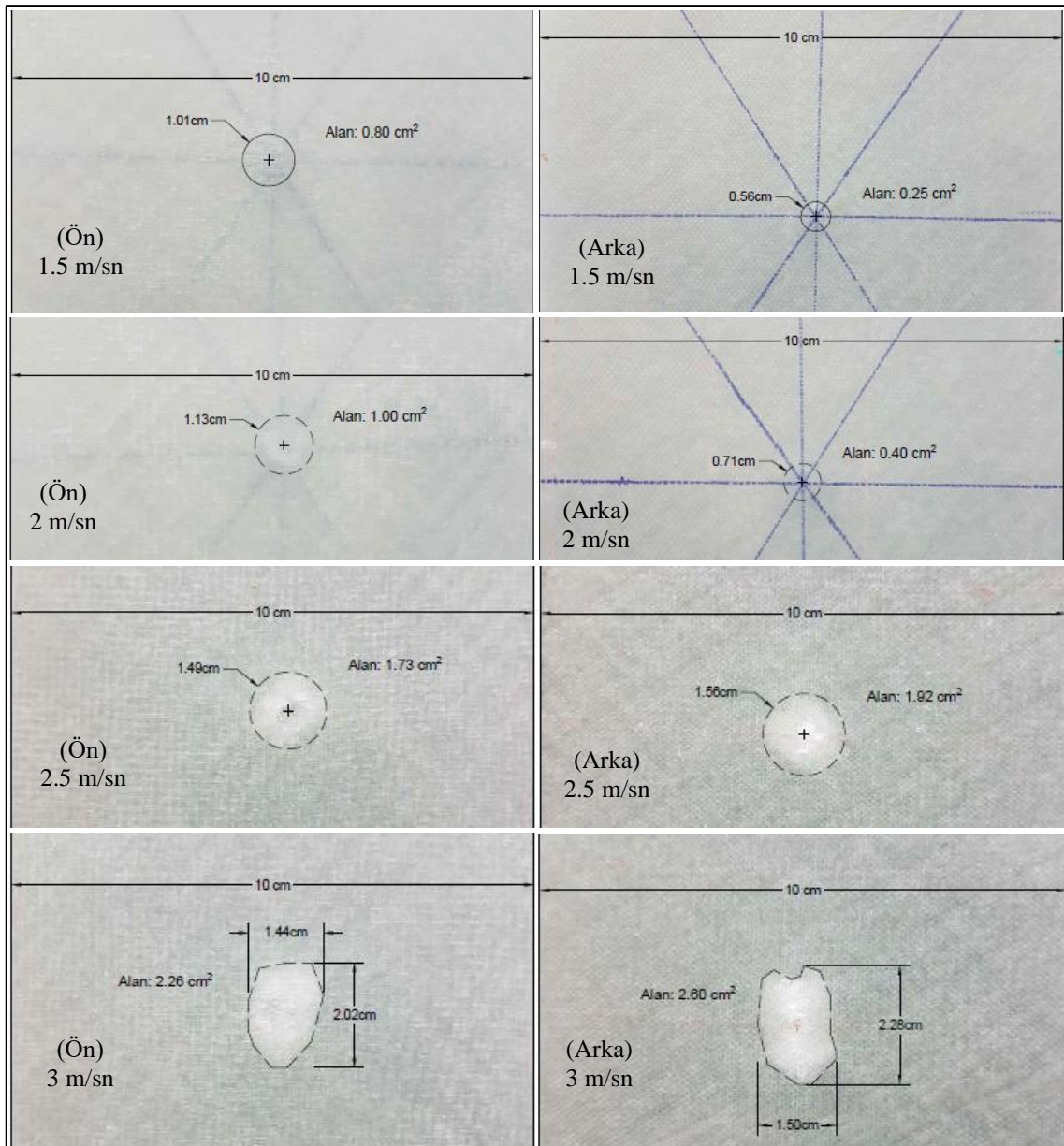
Şekil 7.9. Numunelerde oluşan hasar boyutunun darbe hızına bağlı değişimi

Benzer şekilde, Şekil 7.9'da verilen grafikten numunelere artan hızlarda uygulanan testlerde elde edilen darbe enerjisinin 6.3 J'den 11.2 J, 17.5 J ve son olarak 25.5 J'e kademeli olarak çıkarılmasıyla deformasyon (tabakalar arası ayrılma) oluşan alanın büyüklüğünde görülen değişim görülebilmektedir. Darbe enerjisinin düşük olduğu durumda tabakalar arası ayrılma ya da elyaflarda kırılma gözlemlenmemektedir. Buradan anlaşılacağı üzere, hasarın başlangıç aşamasında darbenin ilerlemesi (hasar mekanizması) epoksi matriks tarafından yönetilmiştir. Darbe enerjisi yeterince yüksek seviyelere çıktığında (bizim durumumuzda 17.5 J) cam elyaf kumaşlarda ezilmeler/ kırılmalar/

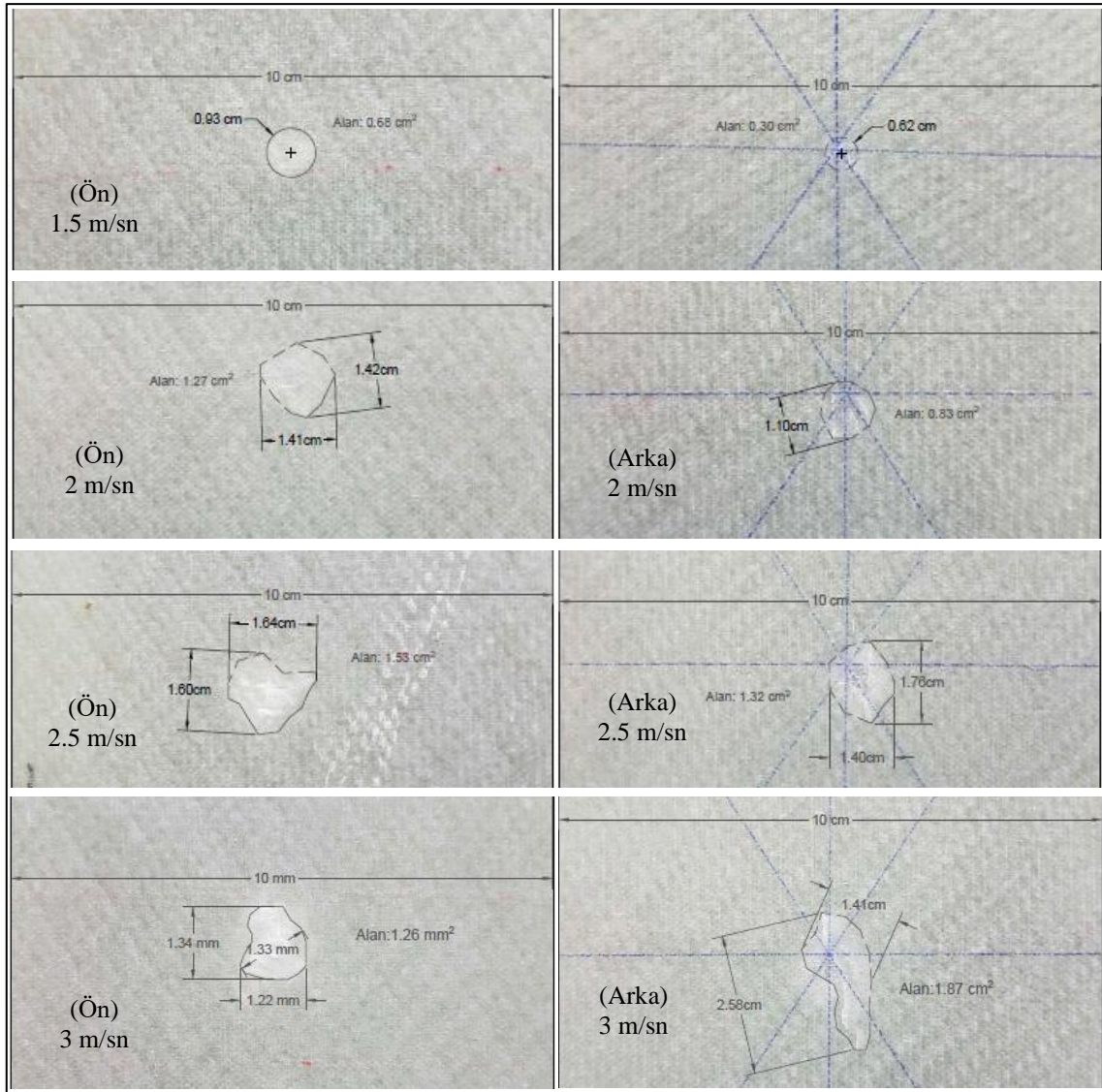
kopmalar başlar ve hasar mekanizması cam elyaflar ve cam elyaf kumaşları arasındaki bağlantıların koparılması olarak devam eder. Bu davranış, kompozit yapı içerisindeki matiks malzemenin ve takviye elemanlarının darbe enerjisini sönümlenme oranları/değerleri ile açıklanabilmektedir.

Numunelere uygulanan yük öncelikle matiks malzeme tarafından sönümlenmeye çalışılır ve belirli bir değer aşıldığında sönümlenemeyen darbe enerjisi matiks malzemedeki hasar oluşturmaya başlar. Hasar oluşumu esnasında da bir miktar darbe enerjisi daha sönümlenir ve kalan enerji fiberlerin üzerinde yoğunlaşır. Fiberler tarafından soğurulan/absorbe edilen enerjinin üzerindeki bir enerji seviyeye çıkılması fiberlerin daha fazla dayanamayıp hasar görmesiyle sonuçlanır. Bu hasar oluşumu esnasında da bir miktar darbe enerjisi absorbe edilir. Gözle görülemeyecek kadar hızlı gelişen darbe etkisiyle birlikte numune üzerine aktarılan darbe enerjisi en son aşamada fiberlerin kırılmasına ve cam elyaf kumaş tabakaları arasında hasar oluşmasına neden olacaktır. Sonuç olarak, çalışmalarımızda kullanılan kompozit numunelerin kırılma tokluğu hem epoksi matiks malzemenin hem de cam elyaf kumaşların direncine ve aynı zamanda matiks malzeme ile takviye elemanları arasındaki yapışma kuvvetine (bizim durumumuzda epoksi ve cam elyaf kumaşlar arasındaki oluşan yapışma kuvveti) bağlı olarak değişmektedir.

Farklı hızlarda PVA nano elyaf keçe içeren ve içermeyen numuneler için uygulanan DHD testleri sonucunda numunelerin ön ve arka yüzeylerinde (üst yüzey ve alt yüzey) meydana gelen deformasyonun boyut ve şekillerindeki değişim Şekil 7.10 ve Şekil 7.11’de gösterilmektedir. Şekillerden anlaşılacağı üzere, artan darbe hızıyla birlikte deformasyon boyutlarında da net bir biçimde artış meydana gelmiştir. Ancak, darbe hızlarındaki değişimin numunelerin ön ve arka yüzeylerindeki boyutsal değişimleri ve hasar şekillerinde belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir. Darbe hızındaki artışla birlikte ön yüzeydeki darbe boyutunda lineer bir artış gözlemlenirken hasarın şeklinde daireselden köşeli bir şekle geçiş gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, arka yüzeydeki darbe boyutundaki artış hızı ön yüzeye göre çok daha fazladır ve benzer biçimde dairesel olan hasar köşeli bir hasara dönüşmüştür.



Şekil 7.10. Farklı hızlarda DHD Testleri sonrasında PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numunelerde oluşan hasar büyüklüklerinin ön ve arka yüzeylerde değişimi



Şekil 7.11. Farklı hızlarda DHD Testleri sonrasında ağırlıkça %3 ÇCKNT'li PVA içeren numunelerde oluşan hasar büyüklüklerinin ön ve arka yüzeylerde değişimi

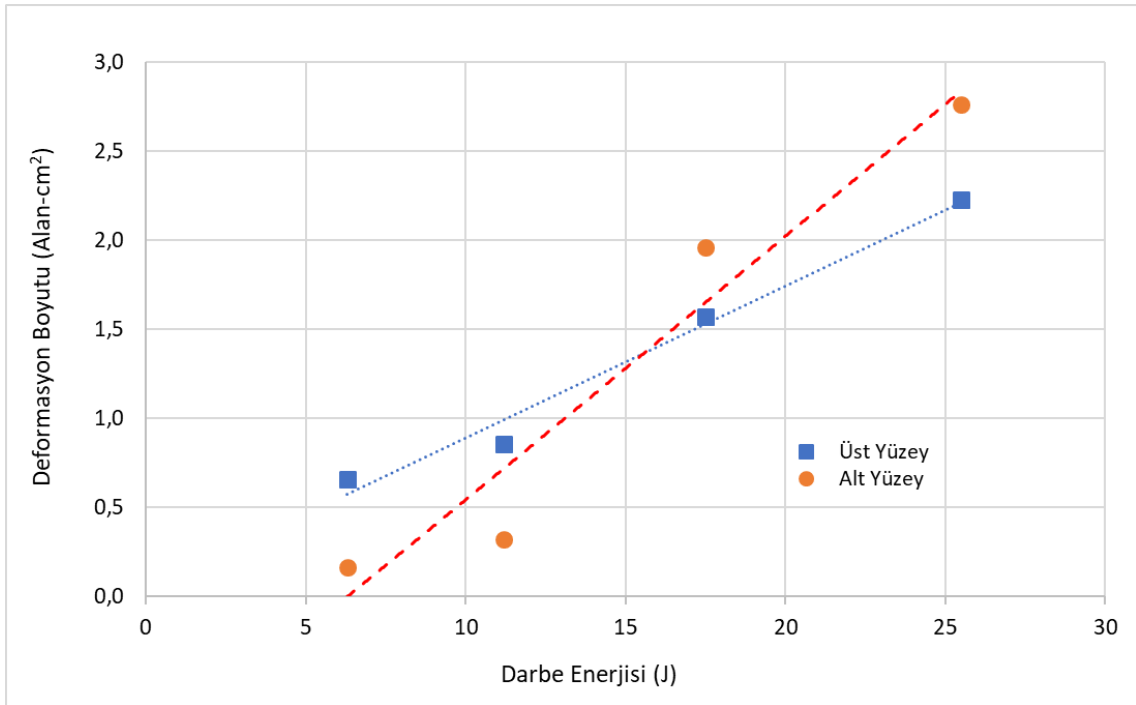
Farklı hızlarda uygulanan DHD testleri sonrasında numunelerin her birinin darbe merkezlerinde oluşan hasar boyut ve şekilleri incelenerek deformasyon boyutları CAD programı vasıtasıyla hesaplanmıştır. Elde edilen verilerden faydalanarak ağırlıkça %3 ÇCKNT içere PVA nano elyaf keçe takviyeli numuneler ve PVA nano elyaf keçe içermeyen numunelerin ön ve arka yüzeylerinde (üst yüzey ve alt yüzey) meydana gelen deformasyonun boyut ve şekillerindeki değişim grafikleri elde edilmiştir.

Şekil 7.12'de verilen grafikte DHD testi hızlardaki değişimin etkisinin ön ve arka yüzeylerde nasıl etkiler gösterdiği verilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere, 1.5 m/sn hızda gerçekleştirilen DHD testi sonucunda ön yüzeyde meydana gelen ortalama hasar alanı 0.66 cm^2 iken ve arka yüzeyde oluşan ortalama hasar alanı 0.16 cm^2 elde edilmiştir

ve arada yaklaşık olarak 4 (dört) kat fark oluşmuştur. Bunun yanında, 2 m/sn hızda uygulanan DHD testi sonucunda ön yüzeyde ortalama hasar alanı 0.85 cm^2 ve arka yüzeyde gelişen ortalama hasar alanı ise 0.32 cm^2 olmuştur. Aradaki fark yaklaşık olarak 2.5 (iki buçuk) kata düşmüştür. Bununla birlikte, 2.5 m/sn hızda gerçekleştirilen darbe testi sonucunda ön yüzeyde gelişen ortalama hasar alanının 1.57 cm^2 ve arka yüzeyde gelişen ortalama hasar alanının 1.96 cm^2 olduğu görülmektedir ve aradaki fark hızla kapanmış ve arka yüzeydeki hasar boyutu ön yüzeyde oluşan hasardan daha fazla hissedilmiştir. darbe hızındaki artış ön ve arka yüzeylerde oluşan hasar boyutları arasındaki fark kapanmış ve 3 m/sn hızda gerçekleştirilen test sonucunda ön yüzeyde oluşan ortalama hasar alanı 2.23 cm^2 iken arka yüzeyde oluşan ortalama hasar alanını ise 2.76 cm^2 olarak gerçekleştirmiştir ve hasar boyutları yaklaşık olarak aynı boyutlarda elde edilmiştir.

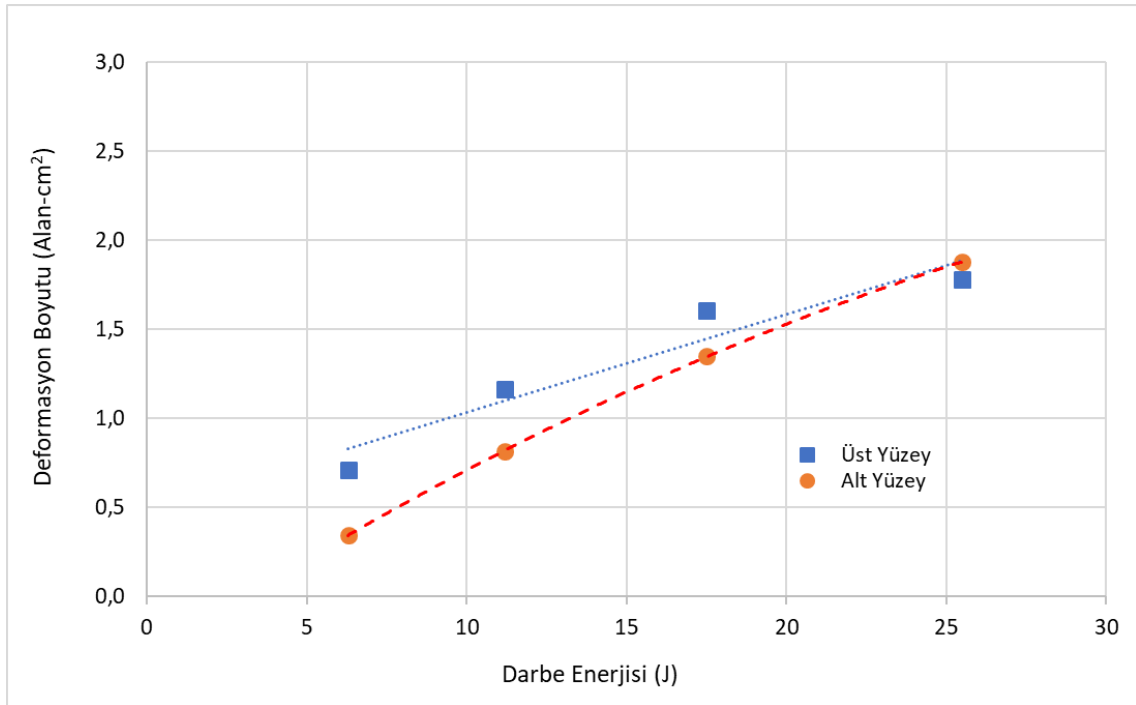
Anlaşıldığı üzere, artan darbe hızlarının PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numuneler üzerindeki etkisinin nasıl değiştiği açıkça gözlemlenmiştir. Darbenin etkisi ilk olarak yüzeyde görülmekte ve düşük hızlarda oluşturulan darbenin etkisi alt tabakalara tam olarak iletilemeden sönümlenmektedir. Darbenin sönümlenmesi esnasında ise yüzeydeki tabakalarda tahribat (deformasyon) oluşmaktadır. Yüksek hızlardaki darbenin etkisi üst katmanlarda daha büyük tahribatlara yol açmakla birlikte tam olarak sönümlenemediğinden dolayı alt tabakalarda da hasar oluşmasına neden olmaktadır. Böylece, düşük hızlarda yapılan testlerin etkisi alt tabakalarda çok az hissedilirken artan hızlarla birlikte darbelerin etkisi numunelerin alt yüzeylerinde de gözlemlendiği üzere en alt tabakalara iletilebilmiştir.

Artan darbe hızları ile arka yüzeyde oluşan darbe alanının ön yüzeydeki darbe alanından büyük olmasının nedeni ise numunede darbe etkisine bağlı olarak darbenin uygulandığı ucun profilinden kaynaklanan darbe temas yüzeyindeki basma yükünün numunenin arka yüzeyinde şekil değişimiyle birlikte yüksek seviyede çekme ve eğilme gerilmelerine yol açmasıdır. Dolayısıyla, numune arka yüzeyinde oluşan gerilmeler kompozit numunede daha fazla hasara yol açmaktadır. Bunun nedeni ise numunelerin basma yüklemelerine kıyasla çekme ve eğilme gerilmelerine karşı daha zayıf olması olarak açıklanabilir.



Şekil 7.12. Numune üst ve alt yüzeylerinde oluşan hasar boyutunun darbe enerjisine bağlı değişimi (PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numuneler)

Şekil 7.13 incelendiğinde farklı hızlardaki darbenin etkisinin ön ve arka yüzeylerde farklı hızlarda oluştuğu net bir biçimde verilmiştir. Buna göre, 1.5 m/sn hızda gerçekleştirilen DHD testi sonucunda ön yüzeyde gelişen ortalama hasar alanının 0.71 cm² ve arka yüzeyde gelişen ortalama hasar alanının 0.35 cm² olduğu görülmektedir ve aradaki fark yaklaşık olarak %100 olmuştur. Bununla birlikte, 2 m/sn hızda gerçekleştirilen test sonucunda ön yüzeydeki ortalama hasar alanının 1.17 cm² ve arka yüzeyde gelişen ortalama hasar alanının 0.82 cm² olduğu görülmektedir ve aradaki fark yaklaşık olarak %50'ye inmiştir. Ancak, darbe hızındaki artışla birlikte ön ve arka yüzeylerde oluşan hasar boyutları arasındaki fark kapanmış ve 3 m/sn hızda gerçekleştirilen test sonucunda ön yüzeyde oluşan ortalama hasar alanı 1.78 cm² iken arka yüzeyde oluşan ortalama hasar alanını ise 1.88 cm² olarak gerçekleştirmiştir ve hasar boyutları yaklaşık olarak aynı boyutlarda elde edilmiştir.



Şekil 7.13. Numune üst ve alt yüzeylerinde oluşan hasar boyutunun darbe enerji bağılı değişimi (%3 ÇCKNT takviyeli PVA nanoelyaf keçe içeren numuneler için)

Buradan artan darbe hızlarının numuneler üzerindeki etkisine PVA nano elyaf keçe takviyesinin katkısı açıkça görülmektedir. Darbenin etkisi ilk olarak yüzeyde görülmekte ve düşük hızlarda oluşturulan darbenin etkisi numunenin merkezine kadar olan tabakalarda belirgin olarak etkilerde bulunmaktadır. Ara yüzeyden sonrasında ise tam olarak iletilemediği tespit edilmiştir. Bu yönüyle PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numunelere benzer bir davranış sergilemektedir ve yüzeydeki tabakalarda tahribat (deformasyon) meydana gelmektedir. Ancak, yüksek hızlardaki darbenin etkisi üst katmanlarda daha büyük tahribatlara yol açmakla birlikte PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numunelerden farklı olarak PVA nano elyaf takviyesi sayesinde alt tabakalarda daha az miktarda hasar oluşmasına neden olmaktadır ve PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numunelere göre hasar gelişim hızı çok daha düşük oranda gerçekleşmiştir.

Sonuç itibariyle, düşük hızlarda yapılan testlerin etkisi alt tabakalarda her iki numune için de az miktarda hissedilirken artan hızlarla birlikte hızla artması beklenen darbelerin etkisi numunelerin alt tabakalara PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numunelere kıyasla çok daha az miktarda iletilebilmiştir. Sonuç itibariyle, nano elyaf keçe takviyesinin darbelerin alt tabakalara aktarılmasını engellediği ve hasar oluşumunu yavaşlattığı tahmin edilmektedir.

7.3.2. Farklı darbe hızlarının numune özelliklerine etkisi

Test sonuçları her bir numune için ayrı ayrı bulunmakla birlikte Tablo 7.3’de özdeş numunelerin aynı test hızları için elde edilen sonuçlarının ortalamaları verilmektedir. Burada, farklı test hızlarında (1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 m/sn) gerçekleştirilen deneyler sonrasında elde edilen veriler ışığı altında uygulanan ortalama darbe enerjisi, ortalama absorbe edilen (sönümlenen) enerjisi ve ortalama iade edilen enerjisi miktarlarının değişimi gösterilmektedir. Tablodaki verilerden açıkça anlaşıldığı üzere, kompozit numuneler üzerinde düşük darbe yüklerinin oluşturulduğu test hızlarında (1.5, 2.0 m/sn gibi) yapılan deneylerde numuneler tarafından sönümlenen enerji miktarlarının iade edilen enerji miktarlarına kıyasla oldukça düşük olduğu görülmektedir. Uygulanan toplam darbe enerjisinin dağılımı oransal olarak detaylı bir biçimde gösterildiği tablodan anlaşıldığı gibi, darbe hızlarındaki artış absorbe edilen enerji miktarlarını yüzdesel olarak artırmakla birlikte iade edilen enerji miktarlarında azalma gözlemlenmiştir. Numunelerin bu davranışlarının ardındaki esas neden kompozit yapının sahip olduğu elastiklik ve rezilyans (direnç) özellikleridir.

Sönümlenen enerji miktarındaki artışın numunelere uygulanan darbe hızlarına bağlı olarak 6.30 J değerinden sırasıyla 11.20 J, 17.50 J ve 25.20 J’e kadar olan darbe enerjisindeki artışa kıyasla çok daha hızlı (eksponansiyel artış) olması dolayısıyla kompozit yapı içerisinde oluşan hasar miktarında da darbe hızına göre yine daha fazla artış (eksponansiyel) gözlemlenmektedir. Sonuç olarak, darbe hızında %100 artış (1.5 m/sn’den 3.0 m/sn hıza çıkış) olmasına rağmen numuneye uygulanan darbe enerjisinde %300 artış (darbe hızlarına göre sırasıyla 6.30 J’den 25.20 J’e) gerçekleşmiştir. Bunun da ötesinde, sönümlenen enerji miktarındaki artış %600 oranında (1.80 J’den 13.67 J’e) bir artış olmakla birlikte iade edilen enerji miktarında sadece %150 (4.50 J’den 11.53 J’e) artış gözlemlenmiştir.

Tablo 7.3. Düşük Hızda Darbe Testi Sonuçları

Numune Adı	1.5m/s 01CNT	1.5m/s 02CNT	1.5m/s 03CNT	1.5m/s EPX	1.5m/s PVA
Toplam Impuls (N.sn)	8037.2±21	7766.3±70	7949.3±62	8038.7±3	8009.3±42
Absorbe Edilen Enerji (J)	%25	%35	%30	%25	%27
İade Edilen Enerji (J)	%75	%65	%70	%75	%73
Temas Rijitliği (N/Sec)	238.5±14	239.7±10	236.3±8	1125.3±14	241.5±11
Eğilme Rijitliği (N/m)	440.2±11	438.3±13	435.6±15	752.4±11	431.6±702
En büyük Kuvvet (N)	2526.9±29	2448.5±39	2454.1±25	3101.5±32	2491.4±43
Numune Adı	2m/s 01CNT	2m/s 02CNT	2m/s 03CNT	2m/s EPX	2m/s PVA
Toplam Impuls (N.sn)	10501.7±98	10275.2±55	10495.6±155	10580.2±34	10435.4±76
Absorbe Edilen Enerji (J)	%35	%38	%33	%34	%36
İade Edilen Enerji (J)	%65	%62	%67	%66	%64
Temas Rijitliği (N/Sec)	650.9±9	648.4±10	650.5±10	1507.1±18	649.2±11
Eğilme Rijitliği (N/m)	561.8±12	565.1±14	562.3±12	720.5±13	563.1±11
En büyük Kuvvet (N)	3585.7±55	3590.3±72	3614.3±36	4160.2±61	3586,6
Numune Adı	2.5m/s 01CNT	2.5m/s 02CNT	2.5m/s 03CNT	2.5m/s EPX	2.5m/s PVA
Toplam Impuls (N.sn)	12670.5±54	12241.1±502	12740.9±46	12672.8±98	12760.9±53
Absorbe Edilen Enerji (J)	%44	%55	%42	%44	%42
İade Edilen Enerji (J)	%56	%45	%58	%56	%58
Temas Rijitliği (N/Sec)	1142.9±13	1148.6±16	1144.5±10	1146.8±12	1152.7±11
Eğilme Rijitliği (N/m)	748±8	747.9±10	750.2±12	747.6±9	751.1±10
En büyük Kuvvet (N)	4702.5±29	4174±291	4733.9±35	4712.7±89	4798.4±32
Numune Adı	3m/s 01CNT	3m/s 02CNT	3m/s 03CNT	3m/s EPX	3m/s PVA
Toplam Impuls (N.sn)	14505.1±160	14564.6±72	14922.9±227	14580.8±676	14746.7±130
Absorbe Edilen Enerji (J)	%56	%56	%53	%55	%51
İade Edilen Enerji (J)	%44	%44	%47	%45	%49
Temas Rijitliği (N/Sec)	1351.4±11	1355.2±13	1364.7±12	1348.6±10	1366.2±12
Eğilme Rijitliği (N/m)	634.1±9	639.2±12	638.9±10	632.9±8	637.5±11
En büyük Kuvvet (N)	5540.8±105	5681±154	5759.4±59	5532.1±258	5845.2±98

Darbe numune üzerine uygulandığı anda sistemin sahip olduğu kinetik enerjinin tamamı kompozit malzeme tarafından absorbe edilemez ve kalan kısım darbe ucunun ve dolayısıyla tüm hareketli sistem kütesinin ani olarak geri tepmesiyle kompozit levha tarafından yayılma etkisiyle iade edilmesine neden olur. Sonuç olarak, hasarın oluşması yalnızca absorbe edilen enerji miktarıyla ilgili bir olaydır ve elastik olarak iade edilen enerji yalnızca ani içsel titreşimlere neden olmakla birlikte numune üzerinde kalıcı hasar oluşumunda rol oynamamaktadır.

Elde edilen verilerden farklı tipteki numunelerin aynı test hızları için elde edilen sonuçlarına göre eğilme ve temas rijitliklerindeki değişimler incelendiğinde tüm

numuneler için yakın sonuçlar elde edilmekle birlikte, 1.5 m/sn ve 2 m/sn darbe hızlarına maruz kalmış PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numunelerin diğerlerine göre çok daha yüksek değerlerde elde edildiği görülmektedir. Bunun nedeni, PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numunelerde nanoelyaf keçe takviyesinin olmamasıyla açıklanabilmektedir.

Aynı tipteki özdeş numunelerin farklı test hızları için elde edilen sonuçları incelendiğinde, eğilme ve temas rijitliklerinde darbe hızlarına bağlı olarak gözle görülür bir artış olduğu anlaşılmaktadır. Bunun nedeni, DHD testleri esnasında numunelerde gelişen hasar mekanizmalarına bağlı olarak artan hasar miktarının numunelerin rijitliklerinde artışa neden olmasıdır. Bununla birlikte, 1.5 m/sn ve 2 m/sn darbe hızlarına maruz kalmış PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numunelerin eğilme ve temas rijitliklerinin diğer hızlarda elde edilen değerlere göre nispeten yüksek olmasının nedeni anlaşılamamıştır.

Eğilme rijitliğindeki değişim darbe esnasında numunelerde oluşan hasar boyutuna bağlı olarak artış gösteren bir özellik olarak ortaya çıkmaktadır. Temas rijitliğindeki değişiminse darbe ucunun numuneye olan nüfuziyeti ile doğrudan ilişkisi olup, nüfuziyet miktarı ise darbe ucunun uyguladığı kuvvet ve sahip olduğu ivmeye bağlı olarak artış göstermektedir. Buna göre, elde ettiğimiz verilerden de anlaşıldığı üzere temas rijitliklerindeki artış darbe ucunun numunelere daha fazla batması olarak açıklanabilir.

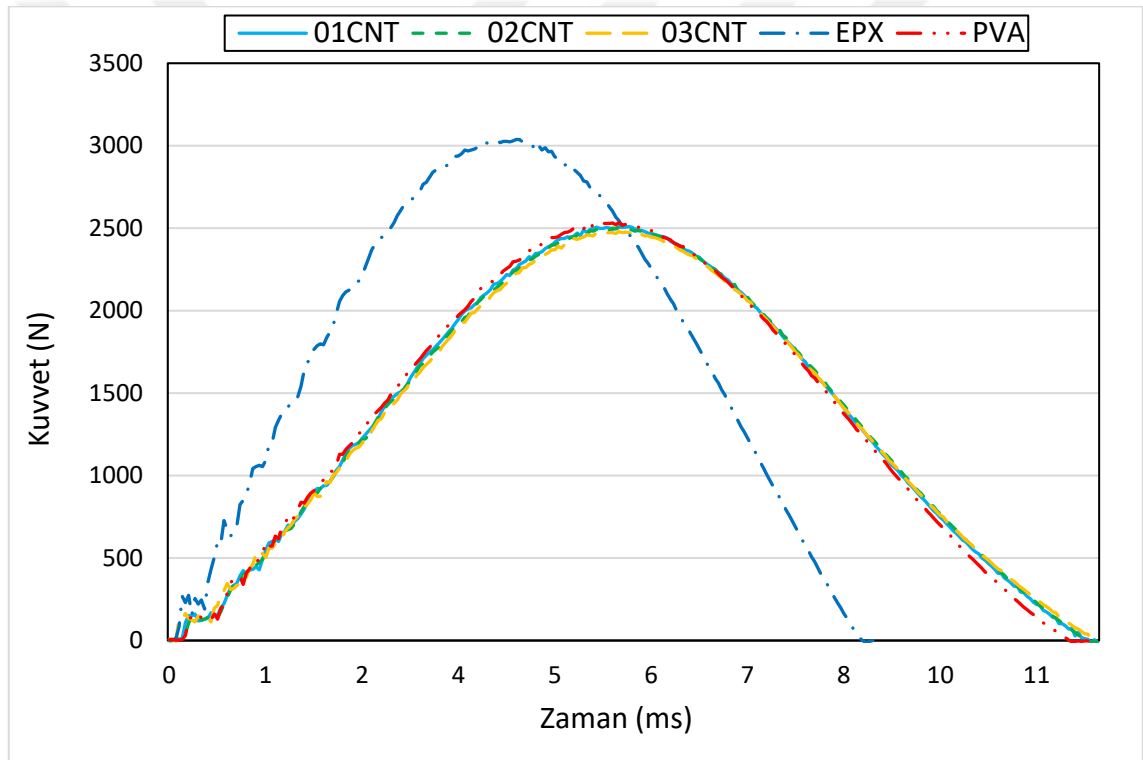
7.3.3. Farklı darbe hızlarında aktarılan kuvvetin zamana bağlı değişimi

Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler ışığı altında aşağıdaki şekillerde gösterildiği üzere farklı hızlarda (1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0m/s) farklı oranlarda ÇCKNT içeren kompozit numunelerimize ait Kuvvet-Zaman Grafikleri elde edilmiştir. Bu grafiklerden, numuneye aktarılan darbe kuvvetinin zamana bağlı olarak değişimi görülmektedir ve dolayısıyla kuvvetin numuneler üzerindeki etkisi anlaşılabilir.

Darbe testlerinde elde edilen Kuvvet-Zaman grafiklerinde etkileşim süresi ve kuvvetin boyutu malzemelerin dinamik davranışlarına etkisini temsil etmektedir. Darbenin oluşturduğu yükün numunelere çok kısa bir süre içerisinde aktarılması ve malzeme tarafından verilen tepki (oluşan reaksiyon) sonrasında elde edilen grafik numunelerin oluşacak olan ani darbeler etkisi altındaki davranış karakteristiğini gözler önüne sermektedir. Yükün çok kısa sürede malzemeye aktarılması darbe etkisinin o denli büyük olması anlamına gelir. Ancak aynı yükün daha uzun sürelerde aktarılması ise

malzeme üzerindeki etkisinin sınırlı miktarda kalmasına neden olacak ve tahribat olasılığını en aza indirecektir.

Şekil 7.14’de 1.5m/s hızda gerçekleştirilen darbe testi sonuçları verilmektedir. Şekilden anlaşıldığı üzere, PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numuneler için elde edilen test sonuçlarında maksimum kuvvetin diğer numunelere göre yaklaşık olarak %20 daha fazla olduğu ve aynı zamanda etkileşim süresinin de %30 daha kısa gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, aynı hızda uygulanan darbe enerjisi PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numuneler üzerinde daha hızlı aktarılmış ve tüm numuneler için uygulanan enerji miktarı sınırlı etkileşim süresinde daha yüksek kuvvetlerin elde edilmesine neden olmuştur.



Şekil 7.14. 1.5 m/s hızdaki Darbe Testi sonuç grafikleri (Kuvvet-Zaman Grafikleri)

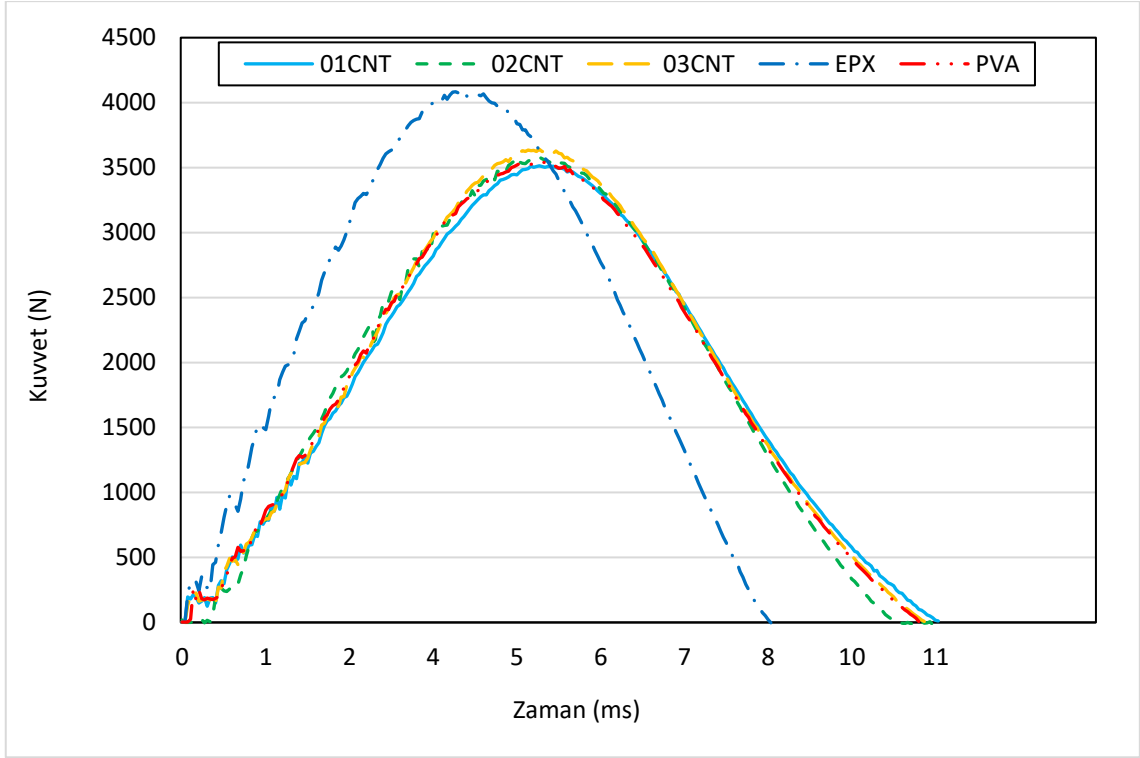
PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numuneler dışındaki numuneler için gerçekleştirilen darbe testlerinden elde edilen sonuçlar kıyaslandığında gerek etkileşim sürelerinin gerekse reaksiyon kuvvetlerinin birbirine oldukça yakın değerlerde elde edildiği anlaşılmaktadır. Bu sonuçlara göre, tabakalı kompozit yapıya ilave edilen nano elyaf keçe takviyesinin darbe testi esnasında uygulanan kuvvetin etkileşim süresini artırarak darbe enerjisinin daha uzun sürede absorbe edilmesine katkı sağladığı ve dolayısıyla elde edilen maksimum kuvvetin de sınırlandırılmasında etkili olduğu

gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, nano keçe takviyesinin tabakalar arası yapışma/birleşme/tutunma üzerinde olumlu etkilerde bulunduğu düşünülmektedir. Numunelerin tarafsız ekseninin tam merkezine yerleştirilen takviye elemanının tabakalar arası tutunma kuvvetini ve aynı zamanda yüzeyler arası sürtünme kuvvetini önemli derecede artırdığı anlaşılmaktadır. Sonuç olarak, nano keçelerin darbe enerjisinin sönümlenmesinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Ancak, nano elyaf keçelerin ihtiva ettiği farklı oranlarda karbon nanotüp içeriğinin etkisi tespit edilememiştir. Bunun nedeni, KNT'lerin tabakalar arası bağlantı (yapışma/tutunma) özelliklerinin güçlendirilmesinde önemsenmeyecek seviyede sınırlı miktarda etkiler oluşturduğu ya da hiç etkili olmadığıdır.

Şekil 7.15'de numunelerimize 2 m/s hızında yapılmış darbe testlerinden elde edilen Kuvvet-Zaman grafikleri verilmiştir. Grafikten anlaşıldığı üzere, elde edilen sonuçlar 1.5 m/s hızında gerçekleştirilen darbe testi sonuçlarına oldukça benzerdir.

PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numuneler için elde edilen test sonuçlarında maksimum kuvvetin diğer numunelere göre yaklaşık olarak %15 daha fazla olduğu ve aynı zamanda etkileşim süresinin de %25 daha kısa gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, nano keçe takviyesinin tabakalar arasında oluşturulan bağlanma mekanizması üzerinde iyileştirici etkiler meydana getirmiş olması ile açıklanabilir.

1.5 m/s hızında elde edilen sonuçlara benzer şekilde, kompozit yapıya eklenen nano elyaf keçe takviyesi darbe testi esnasında uygulanan kuvvetin etkileşim süresini uzatarak darbe enerjisinin daha yavaş bir şekilde sönümlenmesine katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, takviye elemanı maksimum kuvvetin düşmesine neden olmuştur.



Şekil 7.15. 2 m/s hızdaki Darbe Testi sonuç grafikleri (Kuvvet-Zaman Grafikleri)

Nano elyaf keçelerin numunelerin tarafsız ekseninin merkezine yerleştirilmesiyle tabakalar arası tutunma özelliklerini iyileştirdiği ve yüzeyler arası sürtünme kuvvetini artırdığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, nano keçelerin darbe enerjisinin absorbe edilmesinde oldukça etkili olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte, nano elyaf keçelerin ihtiva ettiği farklı oranlarda karbon nanotüp içeriğinin olumlu ya da olumsuz bir etkisi yine tespit edilememiştir.

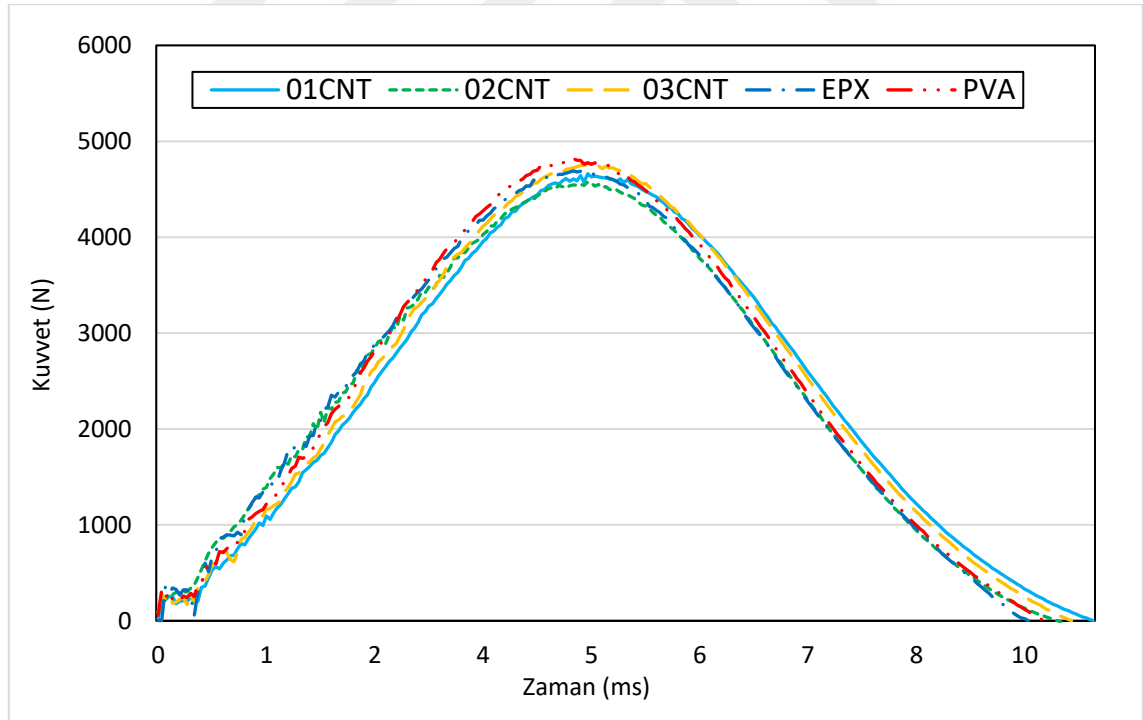
Sonuç olarak, 1.5 m/s hızında gerçekleştirilen testlerde elde edilen değerlere benzer şekilde 2 m/s hızında uygulanan darbe enerjisinin PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numuneler üzerinde daha hızlı aktarıldığı ve tüm numuneler için uygulanan enerji miktarının sınırlı etkileşim süresinde daha yüksek kuvvetlerin elde edilmesine neden olduğu tespit edilmiştir.

Ancak, 2m/s hızında gerçekleştirilen darbe testlerinde elde edilen sonuçlar 1.5 m/s hızında elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında darbe hızının etkisine bağlı olarak etkileşim sürelerinde yaklaşık %10'luk bir düşüş, maksimum kuvvette ise yaklaşık %40 oranında artış gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, numunelere çok kısa bir süre içerisinde yüksek miktarda yük aktarımı gerçekleştirilmiş olması ile açıklanabilir. Numuneye

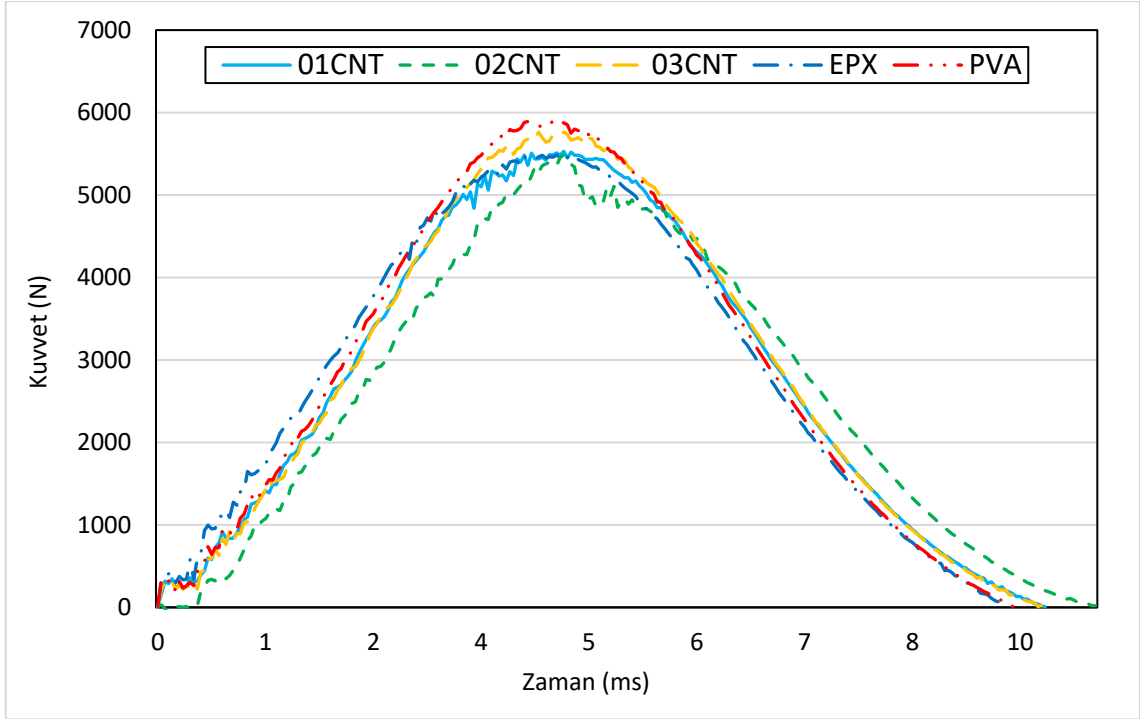
uygulanen darbenin hızındaki artış aynı zamanda numunenin reaksiyon hızında da artışa sebep olmaktadır.

Daha yüksek hızlarda (2.5 m/s ve 3 m/s hızlarında) gerçekleştirilmiş düşük hızda darbe testlerinden elde edilen Kuvvet-Zaman grafikleri Şekil 7.16 ve Şekil 7.17’de verilmiştir. Bu hızlarda uygulanan darbe testlerinin dağılımsal olarak nispeten benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Test sonuçlarından elde edilen bu grafikler incelendiğinde, aynı hızlarda yüklemeler sonucunda tüm numuneler için elde edilen maksimum kuvvetin ve etkileşim sürelerinin oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Ancak 2.5 m/s hızında elde edilen maksimum kuvvet 3m/s için elde edilen değerle kıyaslandığında beklendiği üzere darbe hızı ile orantılı olarak bir miktar (yaklaşık olarak %15) daha düşüktür. Bununla birlikte, etkileşim sürelerinde kayda değer bir değişim gözlenmemiştir. Dolayısıyla, numune üzerine aktarılan kuvvet ve enerji artmakla birlikte numunelerin tepki hızında ihmal edilebilir bir fark oluşmuştur.



Şekil 7.16. 2.5 m/s hızdaki Darbe Testi sonuç grafikleri (Kuvvet-Zaman Grafikleri)



Şekil 7.17. 3 m/s hızdaki Darbe Testi sonuç grafikleri (Kuvvet-Zaman Grafikleri)

1.5 m/s ve 2 m/s hızlarında elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında, gerek kompozit yapıya eklenen nano elyaf keçe takviyesinin gerekse nano keçelerin içeriğindeki KNT'lerin darbe testi esnasında uygulanan kuvvetin etkileşim süresine ya da numuneye aktarılan maksimum kuvvetin büyüklüğüne önemli bir katkı sağlamadığı anlaşılmaktadır.

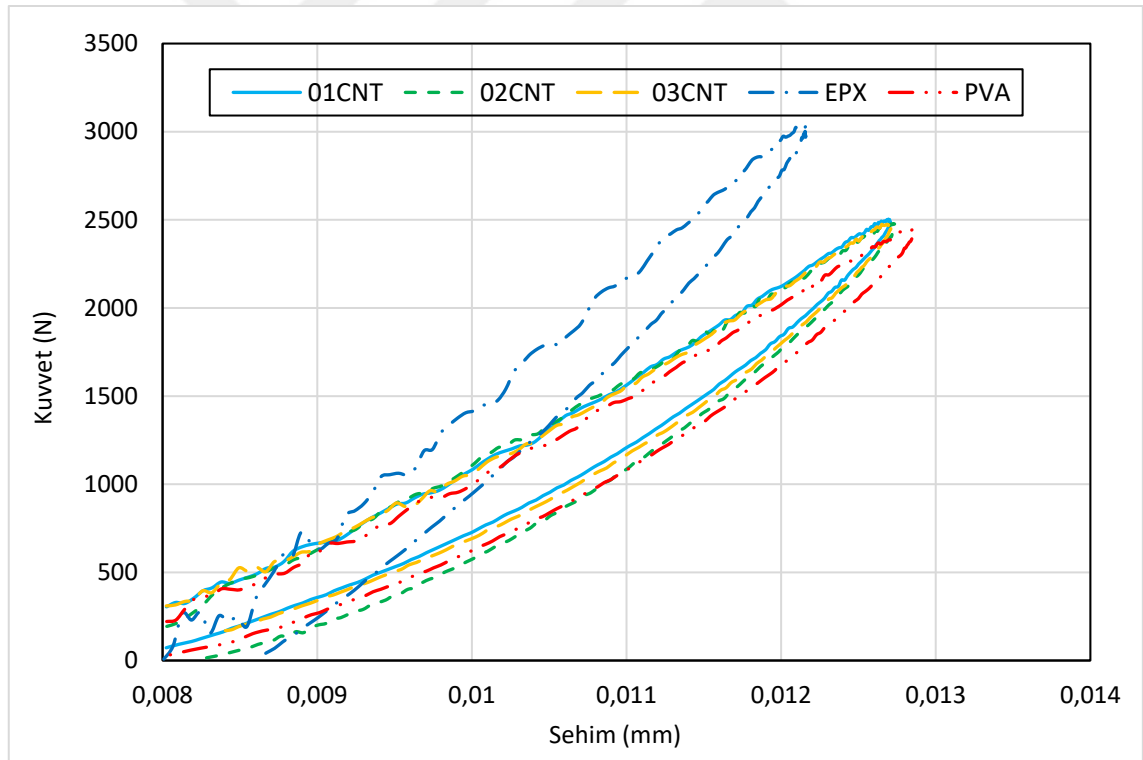
Sonuç itibarıyla, nano keçelerin belirli bir dereceye kadar darbe enerjisinin absorbe edilmesinde etkili olduğu, bununla birlikte yüksek (2.5 m/s ve üzeri) hızlarda uygulanan darbelere maruz kalan numuneler için hissedilir derecede olumlu bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Numunelere uygulanan darbenin hızındaki artış belirli bir limit değere ulaştığında (2.5 m/s) numunenin reaksiyon hızında belirgin bir artış oluşmamaktadır.

7.3.4. Farklı darbe hızlarında aktarılan kuvvetin sehim üzerine etkisi

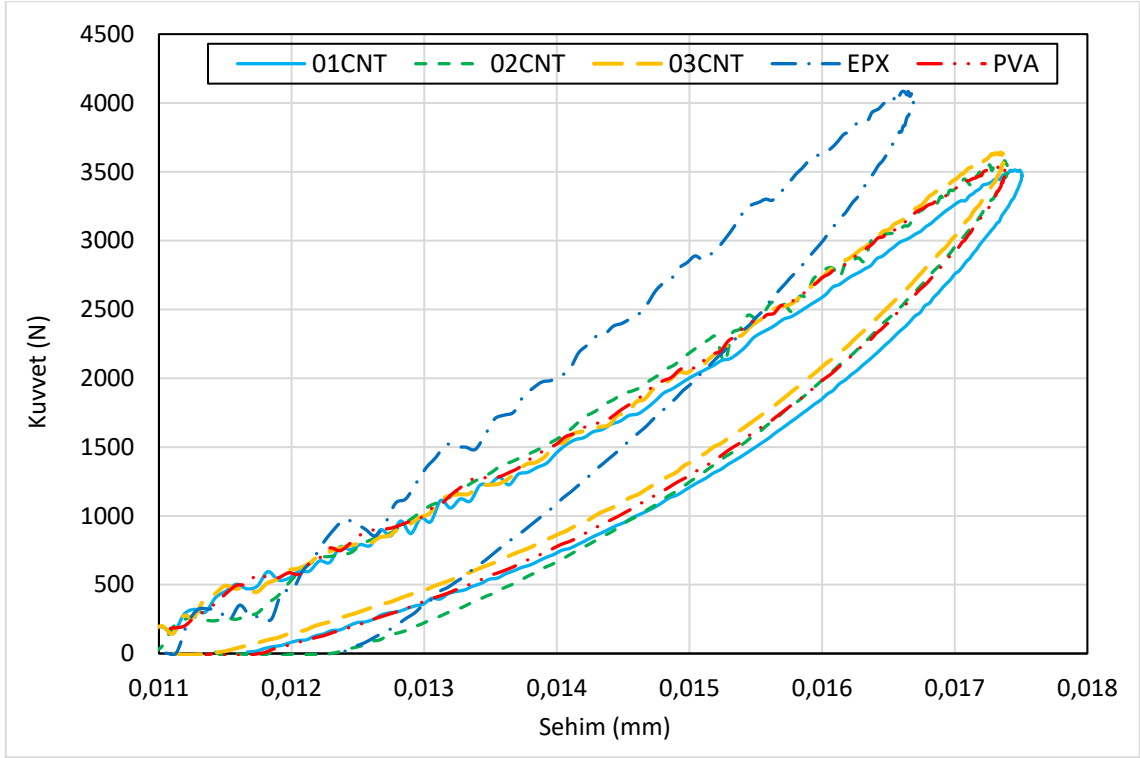
Farklı oranlarda ÇCKNT içeren kompozit numunelerimize belirli hızlarda (1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 m/s) uygulanan DHD testleri sonucunda elde edilen bilgiler kullanılarak elde edilen Kuvvet-Sehim grafikler Şekil 7.18 ve Şekil 7.21 arasında gösterilmektedir. Bu grafiklerden, numuneye aktarılan darbe kuvvetinin etkisi altında çok kısa bir süre içerisinde anlık olarak gelişen elastik şekil değişimi davranışı anlaşılabilir. Yükün numuneler üzerine aktarımı esnasında kompozit yapının nasıl bir reaksiyon sergilediği ve

sehim miktarına bağılı olarak kuvvetin oluşturduğu enerjinin numune üzerine aktarılacak nasıl sönümlendiği ve kalan enerjinin nasıl iade edildiği görülebilmektedir.

Şekil 7.18 ve Şekil 7.19’da verilen 1.5 m/s ve 2 m/s hızlarda gerçekleştirilen darbe testi sonuçlarına baktığımızda, daha önce de ifade edildiği üzere PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numuneler için elde edilen test sonuçlarında en büyük kuvvetin diğer numunelerle kıyaslandığında daha yüksek (~%15-20) olduğu ve aynı zamanda etkileşim süresinin de daha düşük (~%25-30) gerçekleştiği görülmektedir. Bunun yanı sıra, beklendiği üzere 1.5 m/s ve 2 m/s hızlarında gerçekleştirilen testler sonrasında PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numunelerde görülen sehim miktarı da numunelere uygulanan kuvvetin miktarları ile orantılı olarak yaklaşık %5 daha büyük gerçekleşmiştir. Buradan anlaşılacağı üzere, aynı hızda uygulanan darbe enerjisi PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numuneler üzerinde daha fazla elastik şekil değişimine sebebiyet vermiş ve dolayısıyla süreç daha büyük miktarlarda enerji aktarımı ile sonuçlanmıştır.



Şekil 7.18. 1.5m/s hızdaki Darbe Testi sonuç grafikleri (Kuvvet-Sehim Grafikleri)



Şekil 7.19. 2 m/s hızdaki Darbe Testi sonuç grafikleri (Kuvvet-Sehim Grafikleri)

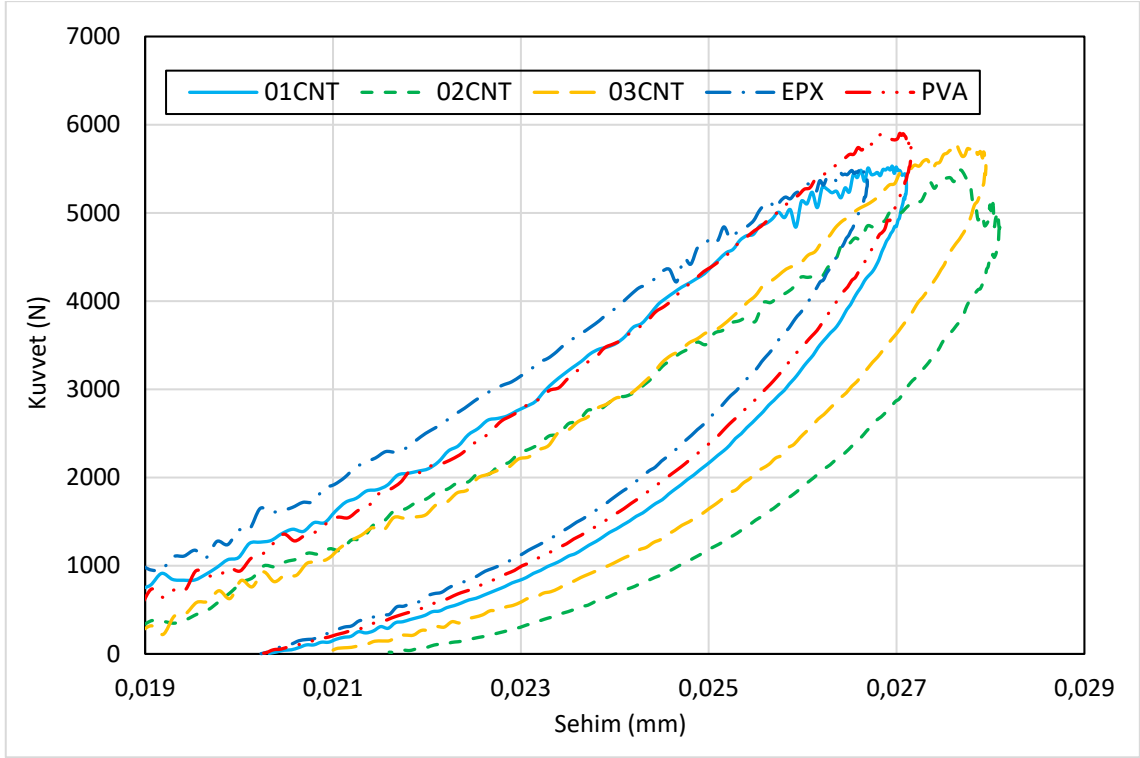
PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numuneler dışındaki nano elyaf keçe ile takviye edilmiş olan numuneler için gerçekleştirilen darbe testlerinden elde edilen veriler sonucunda oluşturulan grafikler incelendiğinde, hem numuneler üzerine aktarılan maksimum kuvvetlerin hem de numunelerde görülen elastik şekil değişimi miktarlarının (sehim miktarı) birbirine yakın değerlerde okunduğu görülmektedir. Sonuç olarak, tabakalı kompozit yapıya ilave edilen nano elyaf keçe takviyesinin darbe testi esnasında aktarılan enerjinin numunelerin daha az miktarlarda sehim yaparak sönmülmesinde olumlu katkıda bulunduğu ve sonuç itibarıyla numunelerin aynı miktardaki enerjiyi daha az elastik şekil değişimleri ile bertaraf etmesinde etkili olduğu anlaşılmaktadır. Bu etkinin ortaya çıkmasındaki en önemli neden takviye elemanının tabakalar arası tutunma kuvvetini ve sonuç itibarıyla yüzeyler arası sürtünme kuvvetini belirgin bir biçimde iyileştirmiş olmasıdır.

Şekil 7.20 ve Şekil 7.21’de verilen 2.5 m/s ve 3 m/s hızlarda gerçekleştirilen darbe testi sonuçlarına baktığımızda, daha düşük hızlarda gerçekleştirilen darbe test sonuçlarından bağımsız olarak gerek PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numuneler için gerekse diğer numunelerde elde edilen test sonuçlarında en büyük kuvvetin diğer numunelerle kıyaslandığında neredeyse aynı seviyelerde olduğu ve aynı zamanda

etkileşim sürelerinin de benzer gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca, düşük hızlarda elde edilen testlerden farklı olarak 2.5 m/s ve 3 m/s hızlarında gerçekleştirilen testler sonrasında PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numunelerde görülen sehim miktarının diğer numunelere kıyasla ve diğer numuneler kendi arasında uygulanan kuvvetin miktarlarına göre gözardı edilebilecek miktarlarda düşük seviyelerde değişim göstermektedir. Bu sonuçlardan yola çıkılarak, nano elyaf keçe takviyesinin darbe hızlarındaki değişimle numunelerin davranışlarına belirli bir hıza kadar (2.5 m/sn) etkide bulunduğu ancak bu hızda ve daha yüksek hızlardaki DSB testlerinde önemli bir etkide bulunmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 7.20. 2.5 m/s hızdaki Darbe Testi sonuç grafikleri (Kuvvet-Sehim Grafikleri)



Şekil 7.21. 3 m/s hızdaki Darbe Testi sonuç grafikleri (Kuvvet-Sehim Grafikleri)

DHD test sonuçlarının tamamı değerlendirildiğinde ise, nano elyaf keçe takviyesinin tabakalar arası yapışma özelliklerinin geliştirilmesinde oldukça etkili olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, nano elyaf keçelerin içeriğinde bulunan farklı oranlarda karbon nanotüp miktarının olumlu ya da olumsuz bir etkisi tespit edilememiştir. Sonuçlara tümüyle bakıldığında, KNT'lerin nano keçeler içerisinde bulunmasının yüzey özelliklerinin ve dolayısıyla tabakalar arası bağlantı (yapışma/tutunma) özelliklerinin iyileştirilmesinde etkili olmadığı şeklinde yorum yapılabilmektedir. Ancak, belirli derecedeki etkilerin ihmal edilebilir seviyelerde kalmış ve dolayısıyla gözlemlenememiş olması da muhtemeldir.

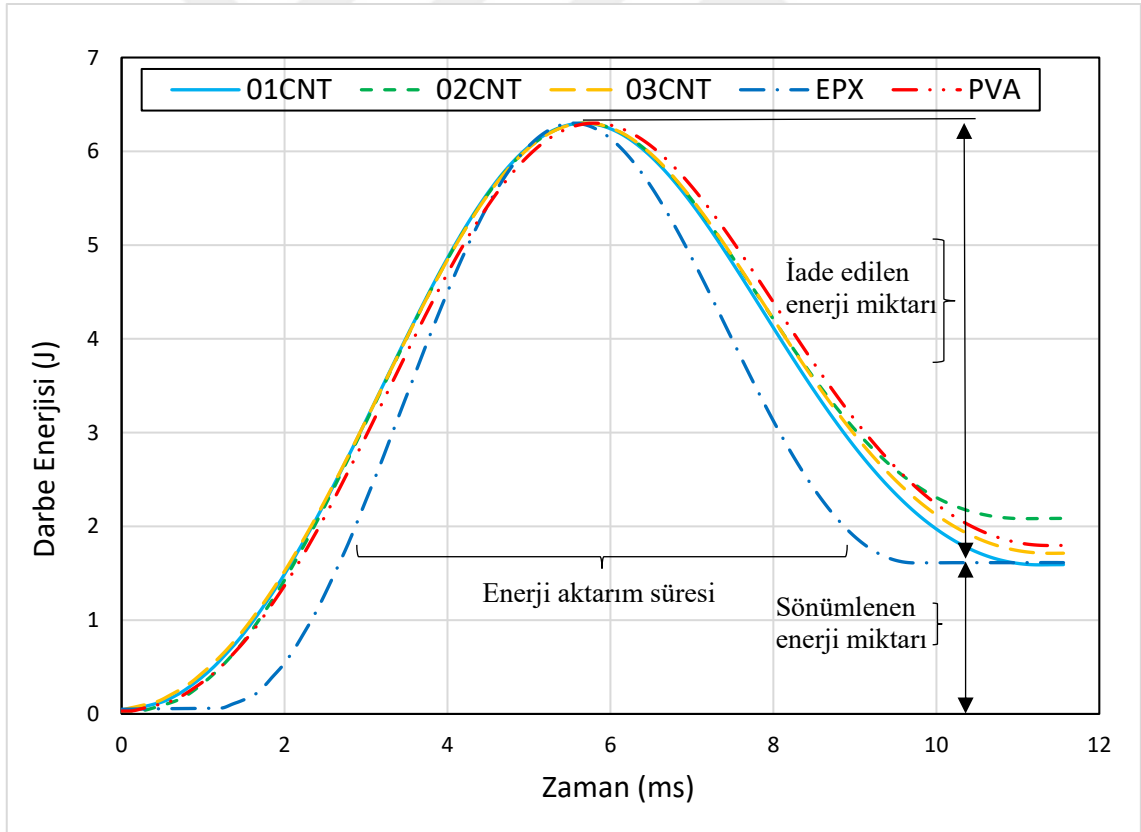
Tüm Kuvvet-Sehim grafiklerinde elde edilen eğimlerden anlaşıldığı üzere düşük hızda darbe testleri esnasında hiçbir numunede delaminasyon oluşumu gözlemlenmemektedir.

7.3.5. Farklı darbe hızlarında aktarılan enerjinin zamana bağlı değişimi

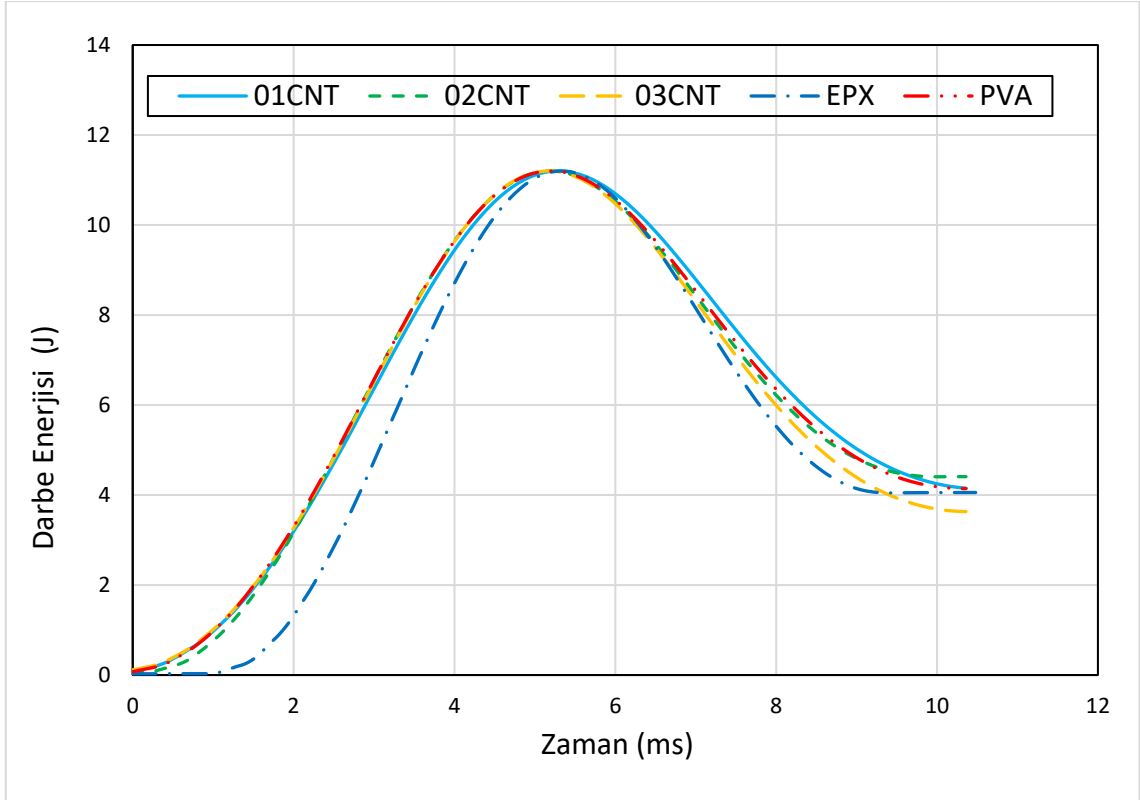
Aşağıda Şekil 7.22 ve Şekil 7.25 arasında verilen 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 m/s hızlarında farklı oranlarda ÇCKNT içeren kompozit numunelerimize ait darbe testi sonuç grafikleri numuneye aktarılan darbe enerjisinin zamana bağlı olarak bulunmasına imkan tanır.

Her bir numune tipi için 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 m/sn hızlarında yapılan DHD testi esnasında numuneler üzerine uygulanan darbe enerjisi, absorbe edilen (sönümlenen) enerji ve iade edilen enerji miktarlarının değişimi Enerji-Zaman grafiklerinde verilmektedir.

Şekil 7.22 ve Şekil 7.23’de verilen grafiklerdeki verilerden anlaşıldığı üzere, kompozit numuneler üzerinde 1.5 m/sn ve 2.0 m/sn gibi düşük hızlarda darbe yüklerinin oluşturulduğu testlerde PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numunelerin üzerine aktarılan darbe enerjisinin diğer numunelere kıyasla daha kısa bir sürede etki ettiği görülmektedir. Buradan, PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numunelerin üzerine gelen darbe enerjisi karşısında diğer numunelere göre daha büyük hasarlara uğrayacağı sonucuna varılabilir. Bunun nedeni, aynı enerji miktarının çok kısa süre içerisinde aktarılması dolayısıyla darbe etkisinin daha şiddetli hissedilmesi ve daha büyük hasar etkileri meydana getirmesidir.

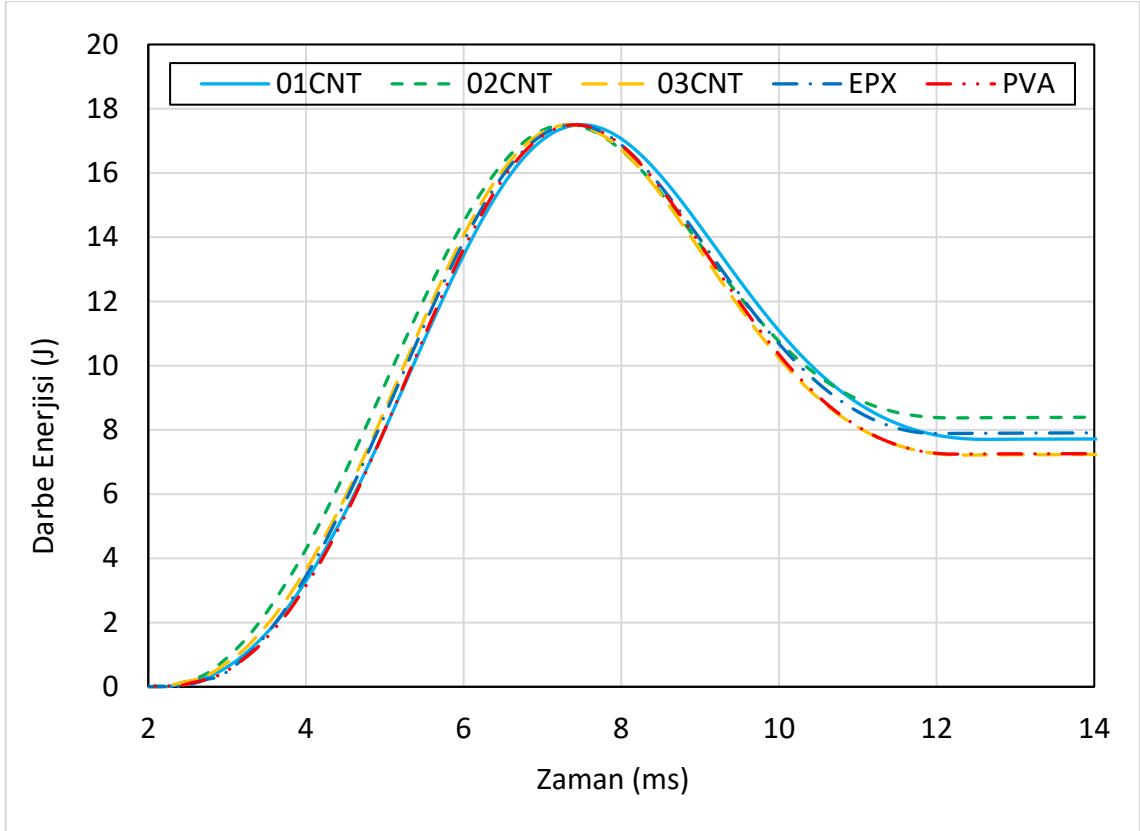


Şekil 7.22. 1.5m/s hızdaki Darbe Testi sonuç grafikleri (Enerji-Zaman Grafikleri)

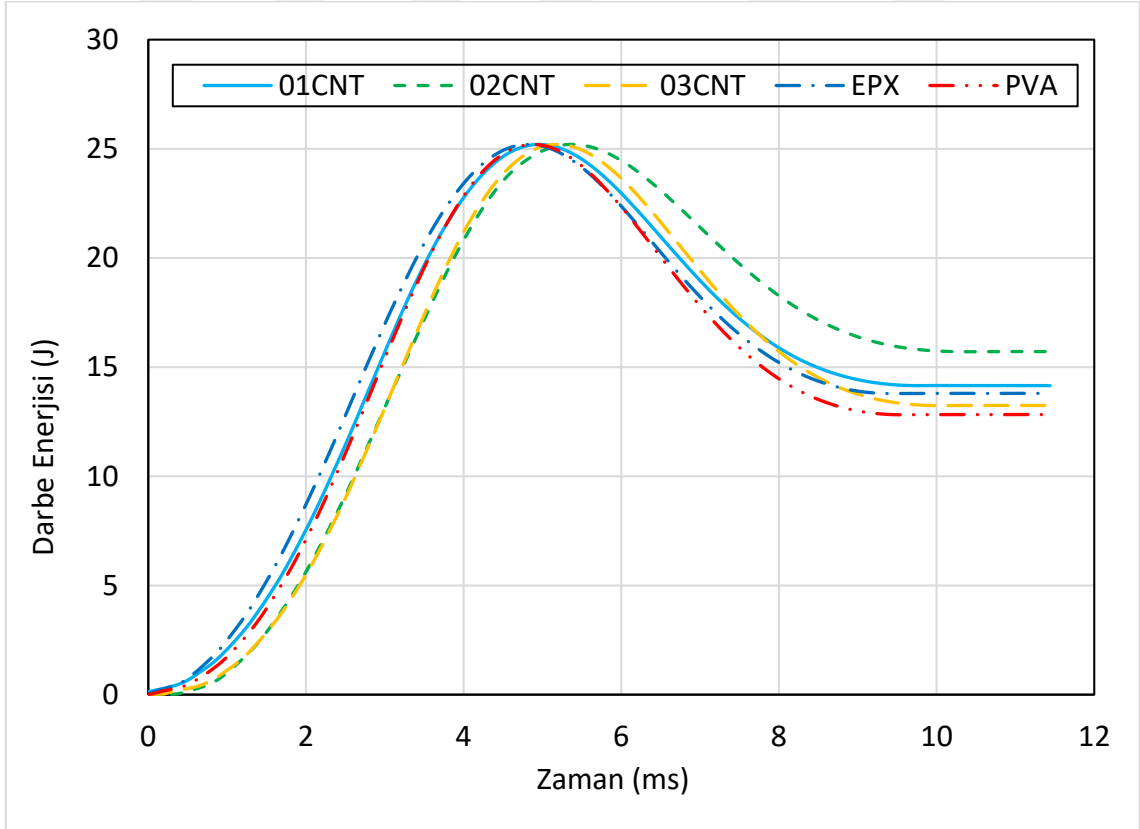


Şekil 7.23. 2 m/s hızdaki Darbe Testi sonuç grafikleri (Enerji-Zaman Grafikleri)

Diğer hızlar (2.5 m/sn ve 3.0 m/sn) için elde edilen değerlerin gösterildiği Şekil 7.24 ve Şekil 7.25'de verilen grafiklerdeki eğriler incelendiğinde ise numune üzerine aktarılan darbe enerjilerinin etkilerine karşı numunelerin tepkilerinin benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 7.24. 2.5m/s hızdaki Darbe Testi sonuç grafikleri (Enerji-Zaman Grafikleri)



Şekil 7.25. 3 m/s hızdaki Darbe Testi sonuç grafikleri (Enerji-Zaman Grafikleri)

Verilen tüm Enerji-Zaman grafikleri incelendiğinde, %2 oranında ÇCKNT içeren PVA nanoelyaf keçe takviyeli numunelerin (02CNT) absorbe ettikleri enerji miktarının diğer numunelere kıyasla daha fazla olduğu ve dolayısıyla iade edilen miktarların daha düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, bu numunelerde oluşan hasar miktarının diğerlerine göre daha fazla olması beklenmektedir. Diğer hızlar (2.5 m/sn ve 3.0 m/sn) için elde edilen değerlerin gösterildiği grafiklerdeki eğriler incelendiğinde ise numune üzerine aktarılan darbe enerjilerinin etkilerine karşı numunelerin tepkilerinin benzer olduğu görülmektedir.

Verilen tüm Enerji-Zaman grafikleri incelendiğinde ise, %2 oranında ÇCKNT içeren PVA nanoelyaf keçe takviyeli numunelerin (02CNT) absorbe ettikleri enerji miktarının diğer numunelere kıyasla daha fazla olduğu ve dolayısıyla iade edilen miktarların daha düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, bu numunelerde oluşan hasar miktarının diğerlerine göre daha fazla olması beklenmektedir.

7.4. Darbe Sonrası Basma (DSB) Testi Sonuçları

7.4.1. Standart DSB testi aparatıyla yapılan çalışmalar

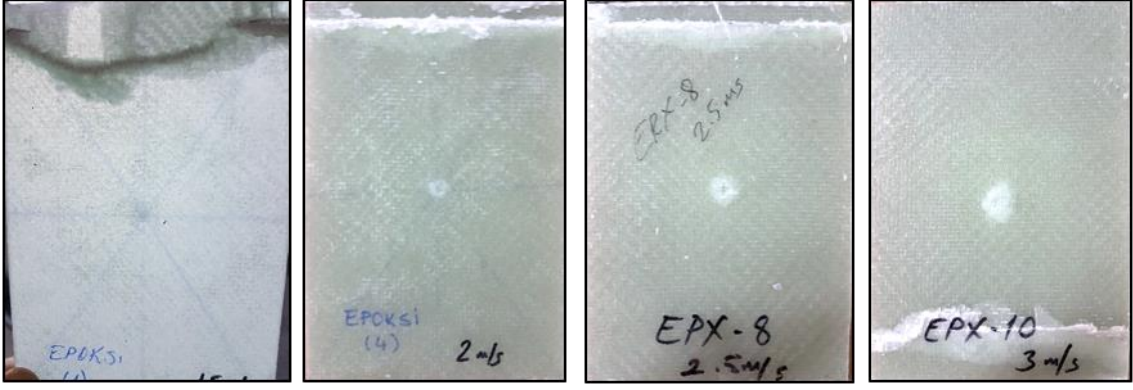
ASTM D 7137 Darbe Sonrası Basma Testi standardında verilen boyutlarda imal edilmiş test cihazı kullanılarak yapılan test sonucunda elde edilen veriler Tablo 7.4'de verilmiştir.

Elde edilen veriler incelendiğinde, en büyük gerilme ve şekil değiştirme değerlerinin değişiminde darbe hızlarına bağımlı herhangi bir lineerlik görülmemektedir ve net bir uyumsuzluk söz konusu olmuştur. Bunun başlıca nedeni DSB Testleri sonucunda numunelerde görülen hasar gelişimlerinin beklenmeyen bir biçimde gelişmesidir.

Tablo 7.4. Standart Aparatla yapılan DSB Testlerinden elde edilen veriler

Numune Adı	En büyük Gerilme (N/mm ²)	En Büyük Şekil Değişimi (mm)	Darbe Hızları (m/sn)
EPOKSİ-1	77.48	2.04	1.5
EPOKSİ-2	152.98	3.33	1.5
EPOKSİ-3	188.67	2.92	1.5
EPOKSİ-4	121.96	2.45	2.0
EPOKSİ-5	179.75	2.81	2.0
EPOKSİ-6	127.30	3.82	2.0
EPOKSİ-7	77.53	1.80	2.5
EPOKSİ-8	117.08	2.45	2.5
EPOKSİ-9	134.53	2.25	2.5
EPOKSİ-10	94.02	2.57	3.0
EPOKSİ-11	133.04	3.24	3.0

Farklı hızlarda darbe uygulanmış PVA nanoelyaf keçe takviyesiz test numunelerinde DSB Testleri sonucunda gözlenmiş olan tipik hasarlar Şekil 7.26'da görülmektedir ve verilen hasar gelişimlerinden de anlaşıldığı gibi, elde edilen test sonuçları değerlendirildiğinde gözlemlenen hiçbir hasarın darbe merkezinden ya da darbe merkezine yakın bir noktadan geçmediği görülmüştür. Bunun nedeni ilk bakışta numunelere uygulanan darbe hızlarının yetersiz olması olarak düşünülmüştür ancak daha sonra numunelerin elastik yapısı göz önüne alındığında basma aparatının uygun olmadığı anlaşılmıştır.



Şekil 7.26. Farklı hızlarda darbe almış numunelere DSB Testleri uygulanması sonucu görülen hasarlar

DSB Testleri esnasında numunede meydana gelen şekil değişimleri sonucunda numunelerin orta kısmında ileri derecede şişkinlik (bombelenme) ve burkulma olduğu gözlemlenmiştir. Bu tür şekil değişimleri numuneler üzerine uygulanan yüklemenin ilk başta istenen şekilde basma gerilmelerine ancak belirli bir noktadan itibaren kayma gerilmelerine neden olması olarak açıklanabilir. Numune üzerindeki kayma gerilmeleri numune üzerinde oluşturulan darbe merkezine uzak bir bölgede mukavemet açısından daha zayıf özellikler sergilenen yerlerde ani hasarlara yol açmaktadır.

Sonuç olarak elde edilen veriler değerlendirildiğinde, numune üzerinde farklı hızlarda oluşturulmuş darbeler altında numunelerin darbeye karşı oldukça dayanıklı olduğunu göstermekle birlikte test esnasında darbe görmemiş gibi davranışlar sergilemesine ve yalnızca darbe gören kısım için değil numunenin tamamı üzerinde fikir sahibi olmamızı sağlamaktadır.

Bunun sonucunda, standart basma aparatı yerine bizim numunelerimiz için daha uygun olarak tasarlanmış ve daha uzun alt ve üst kayar plakalara sahip olan yeni bir aparatla devam edilmesi kararlaştırılmıştır.

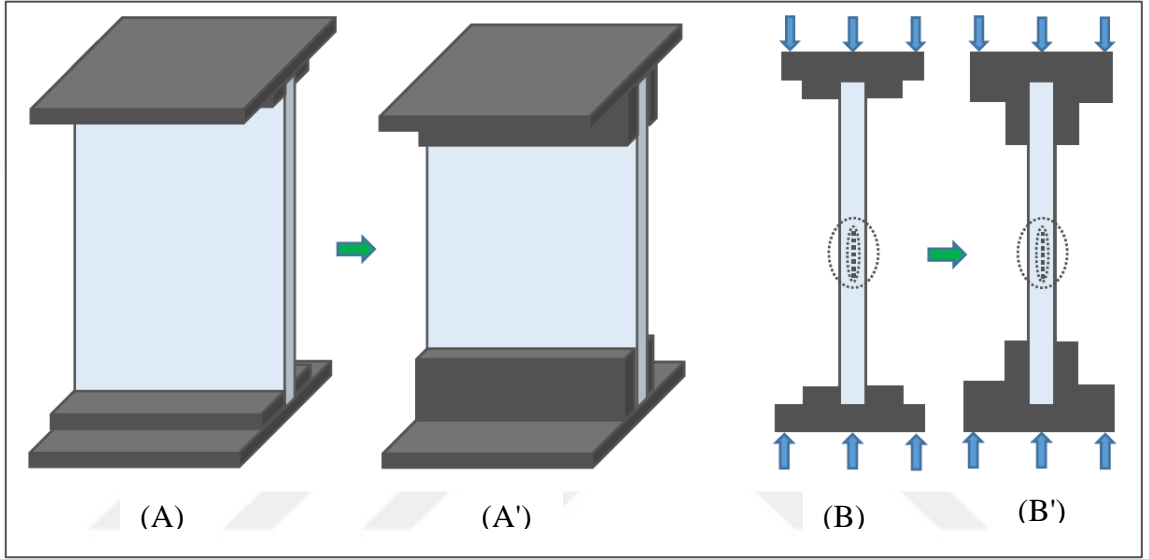
7.4.2. Yenilenen test aparatıyla yapılan çalışmalar

Daha önce PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numunelere uygulanmış olan DSB testlerinden alınan derslerden yola çıkarak yeni bir basma aparatı ile çalışmalara devam edilmiştir.

Darbe Sonrası Basma Testlerini gerçekleştirdiğimiz aparat sağlıklı sonuçlar elde edebilmemiz için numunelerin burkulmasına imkân vermeden uygulanan darbe sonucunda gelişen hasar kaynaklı kırılma ve hasar modları geliştirmesini temin etmelidir.

Yenilenen test aparatı sonradan eklenen 4 (dört) adet destek plakaya sahiptir ve numuneye uygulanan basma kuvvetinin dikey eksen boyunca aktarılmasını sağlar ve numune üzerinde herhangi bir kayma gerilmesi oluşturmaz.

Şekil 7.27’de şematik olarak gösterildiği üzere kayar plakalarda yapılan modifikasyon öncesi ve sonrasına ait görsellerde farklar görülmektedir. İkinci durumda L şeklinde imal edilmiş olan kayar üst ve alt kayar plakaların numuneye temas eden kısımları numunenin burkulmasını önleme dışında herhangi bir yük uygulamazlar.



Şekil 7.27. DSB Testlerinde kullanılan üst ve alt kayar plakaların önceki (A-B) ve sonraki (A' - B') halleri

ASTM D 7137 Darbe Sonrası Basma Testi standardında verilen boyutlarda imal edilmiş test cihazına yenilenmiş üst ve alt kayar plakaları monte edilerek devam edilen testler sonucunda elde edilen veriler Tablo 7.5 ve Tablo 7.8 arasında verilmiştir.

Burada verilen hasar modları;

KM: Kenardan merkeze yönelmiş hasar

ÜB: Numunenin darbe merkezine uzak mesafede üst bölgede oluşan hasar

AB: Numunenin darbe merkezine uzak mesafede alt bölgede oluşan hasar

EF: Numunenin üst ya da alt kenarında basma aparatının temas yerinde ezilme şeklinde gelişen hasar

DL: Delaminasyon oluşumu

olarak kodlanmıştır.

Artı (+) işareti testin başarılı bir biçimde sonuçlandığını, eksi (-) işareti ise testin başarısız olduğunu ifade eder.

Elde edilen verilerden anlaşılacağı üzere, gerilme ve şekil değiştirme verilerinin değişiminde herhangi bir lineerlik görülmemekle birlikte son iki numunede elde edilen sonuçlar çıkarılarak elde edilen sonuçlar kıyaslandığında sonuçların nispeten uyumlu ve birbirine yakın olduğu görülmektedir. Ancak, gerilme değerinde görülen artışla numunenin şekil değişimi arasında korelasyon olduğu elimizdeki sınırlı verilerle ifade edilemez.

Bununla birlikte, başarısız kabul edilen 3, 8 ve 10 numaralı numunelerin hasar mekanizmaları birbirine çok benzer şekilde gelişmiştir ve hasarın oluştuğu maksimum gerilme miktarı birbirine çok yakındır. Buradan yola çıkacak olursak, numunelerin merkezinden uzakta oluşan hasarların net bir gerilme değerinde meydana geldiği söylenebilir.

Tablo 7.5. Yenilenen aparatla yapılan DSB Testlerinden elde edilen veriler (PVA içeren numuneler için)

Numune Adı	En Büyük Gerilme (N/mm ²)	En Büyük Şekil Değişimi (mm)	Darbe Hızları (m/sn)	Hasar Oluşum Modu
E+PVA-1	136.7	2.37	1.5	KM +
E+PVA-2	133.1	2.23	1.5	KM +
E+PVA-3	140.2	2.41	1.5	ÜB -
E+PVA-4	130.5	2.48	2.0	KM +
E+PVA-5	151.9	2.29	2.0	KM +
E+PVA-6	144.6	2.33	2.0	KM +
E+PVA-7	144.6	2.34	2.5	KM +
E+PVA-8	140.2	2.45	2.5	AB -
E+PVA-9	132.7	2.91	2.5	KM +
E+PVA-10	139.7	2.53	3.0	ÜB -
E+PVA-11	76.4	1.92	3.0	KM -
E+PVA-12	5.6	0.17	3.0	EF -

Tablo 7.6. Yenilenen aparatla yapılan DSB Testlerinden elde edilen veriler
(%1 ÇCKNT içeren numuneler için)

Numune Adı	En Büyük Gerilme (N/mm ²)	En Büyük Şekil Değişimi (mm)	Darbe Hızları (m/sn)	Hasar Oluşum Modu
01CNT-1	127.7	2.80	1.5	ÜB -
01CNT-2	134.2	2.51	1.5	ÜB +
01CNT-3	129.0	2.54	1.5	ÜB -
01CNT-4	134.8	3.15	2.0	EF -
01CNT-5	101.1	2.74	2.0	ÜB -
01CNT-6	120.3	2.42	2.0	ÜB -
01CNT-7	136.8	2.68	2.5	KM +
01CNT-8	85.0	1.90	2.5	ÜB -
01CNT-9	142.4	2.94	2.5	ÜB -
01CNT-10	126.3	2.74	3.0	ÜB -
01CNT-11	94.4	1.81	3.0	EF -

Tablo 7.7. Yenilenen aparatla yapılan DSB Testlerinden elde edilen veriler
(%2 ÇCKNT içeren numuneler için)

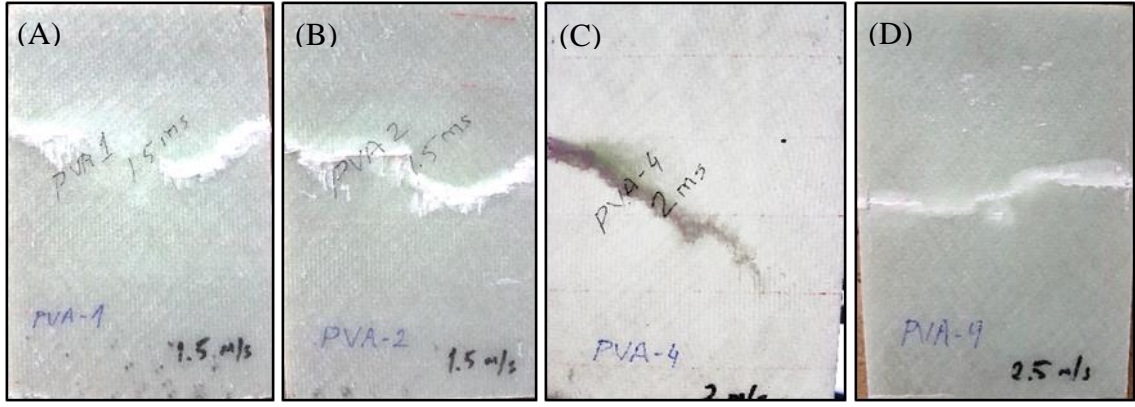
Numune Adı	En Büyük Gerilme (N/mm ²)	En Büyük Şekil Değişimi (mm)	Darbe Hızları (m/sn)	Hasar Oluşum Modu
02CNT-1	83.3	2.88	1.5	EF -
02CNT-2	71.6	2.26	1.5	KM +
02CNT-3	82.4	1.72	1.5	KM +
02CNT-4	126.3	2.23	2.0	KM +
02CNT-5	74.8	1.18	2.0	KM +
02CNT-6	100.1	1.88	2.0	KM +
02CNT-7	38.5	1.06	2.5	DL -
02CNT-8	57.4	1.31	2.5	DL -
02CNT-9	81.5	1.24	2.5	KM +
02CNT-10	77.0	1.30	3.0	KM +
02CNT-11	93.7	1.23	3.0	KM +
02CNT-12	101.9	1.30	3.0	KM +

Tablo 7.8. Yenilenen aparatla yapılan DSB Testlerinden elde edilen veriler
(%3 ÇCKNT içeren numuneler için)

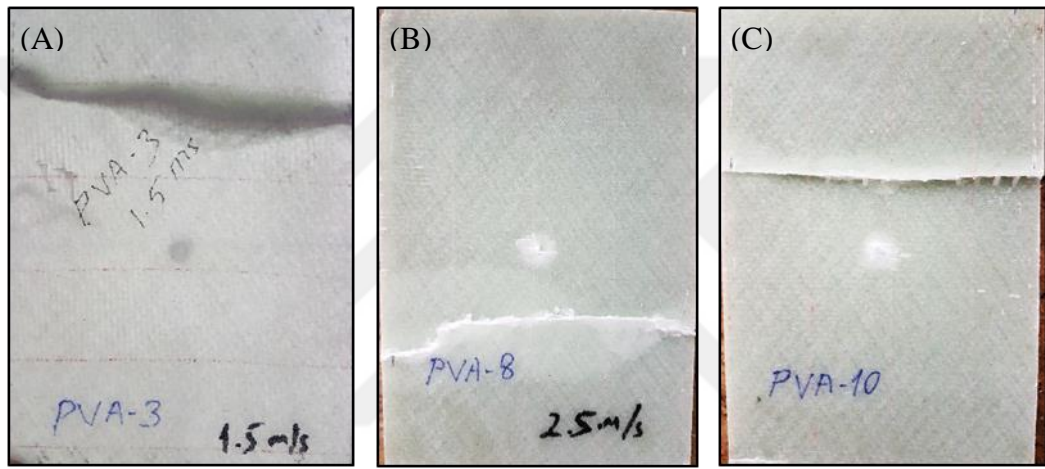
Numune Adı	En Büyük Gerilme (N/mm ²)	En Büyük Şekil Değişimi (mm)	Darbe Hızları (m/sn)	Hasar Oluşum Modu
03CNT-1	115.6	2.49	1.5	KM +
03CNT-2	123.9	2.49	1.5	KM +
03CNT-3	131.8	2.17	1.5	KM +
03CNT-4	132.4	2.13	2.0	KM +
03CNT-5	111.9	2.22	2.0	KM +
03CNT-6	130.0	2.17	2.0	KM +
03CNT-7	122.9	2.19	2.5	KM +
03CNT-8	124.4	1.97	2.5	KM +
03CNT-9	121.8	2.07	2.5	KM +
03CNT-10	110.1	1.93	3.0	KM +
03CNT-11	117.0	2.16	3.0	KM +
03CNT-12	124.6	2.00	3.0	KM +

Aynı zamanda aşağıda gösterilen numunelerden hasarın oluştuğu kısımların lokasyonu ve hasar gelişim mekanizmalarının benzerliği ile hasarların oluştuğu en büyük gerilme değerlerinin benzerlik gösterdiği de bir gerçektir. Bunun başlıca nedeni, numunelerde görülen hasar gelişimlerinin belirli gerilme değerlerinde benzerlik göstermesidir. Sonuç olarak, numunelerin hasar gelişim karakterizasyonu DSB Testlerinde oluşturulan gerilme miktarıyla ilişkilidir.

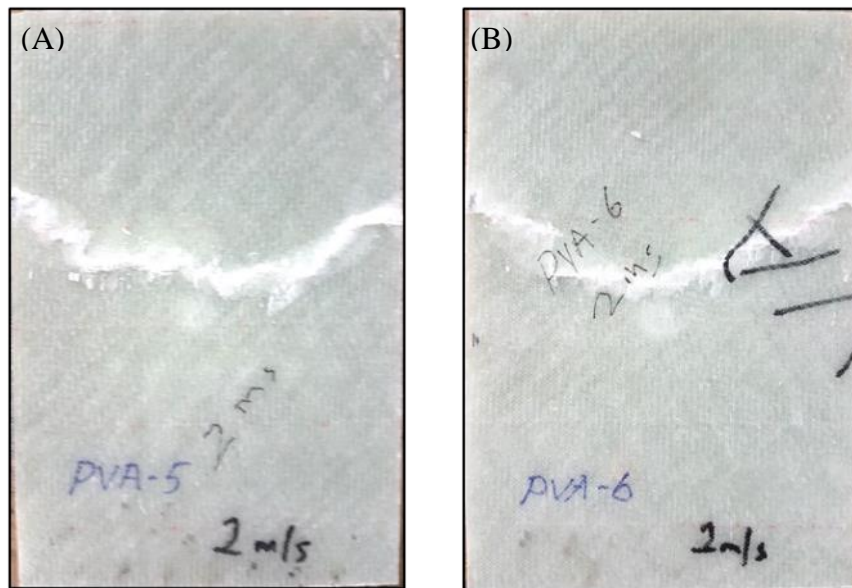
PVA içeren test numunelerinin hasar davranışı üzerine darbe hızlarındaki değişimin herhangi bir etkisi olmadığı saptanmıştır. Yani numunelerdeki hasar gelişiminin ya da gerilme değerlerinin oluşturulan darbe miktarıyla herhangi bir ilişkisi gözlenmemiştir. PVA içeren test numuneleri üzerinde yapılan DSB Testleri sonucunda gözlemlenmiş olan tipik hasarlar benzerlik gösterdiği hasar mekanizmalarına göre gruplandırılarak Şekil 7.28, Şekil 7.29 ve Şekil 7.30'da verilmiştir.



Şekil 7.28. Yakın gerilme değerlerinde benzer hasar mekanizmalarının oluşması (A ve B: 1.5 m/s, C: 2 m/s, D: 2.5 m/s hızda darbeye maruz kalmış PVA nanoelyaf keçe takviyeli numunelerde görülen benzer hasar gelişimleri)



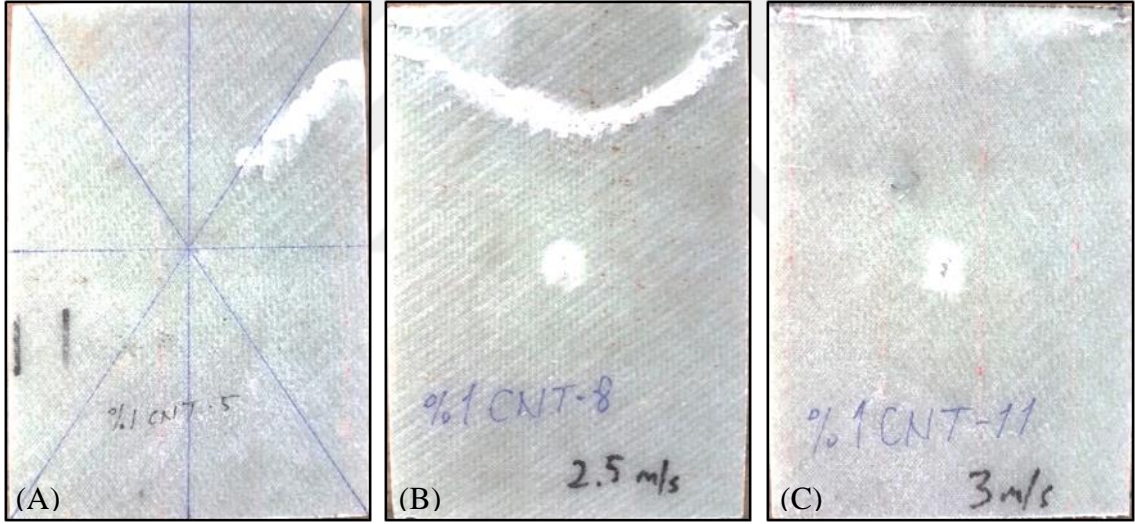
Şekil 7.29. Yakın gerilme değerlerinde benzer hasar mekanizmalarının oluşması (A: 1.5 m/s, B: 2.5 m/s, C: 3 m/s hızda darbeye maruz kalmış PVA nanoelyaf keçe takviyeli numunelerde görülen benzer hasar gelişimleri)



Şekil 7.30. Yakın gerilme değerlerinde benzer hasar mekanizmalarının oluşması (A ve B: 2 m/s hızda darbeye maruz kalmış PVA nanoelyaf keçe takviyeli numunelerde görülen benzer hasar gelişimleri)

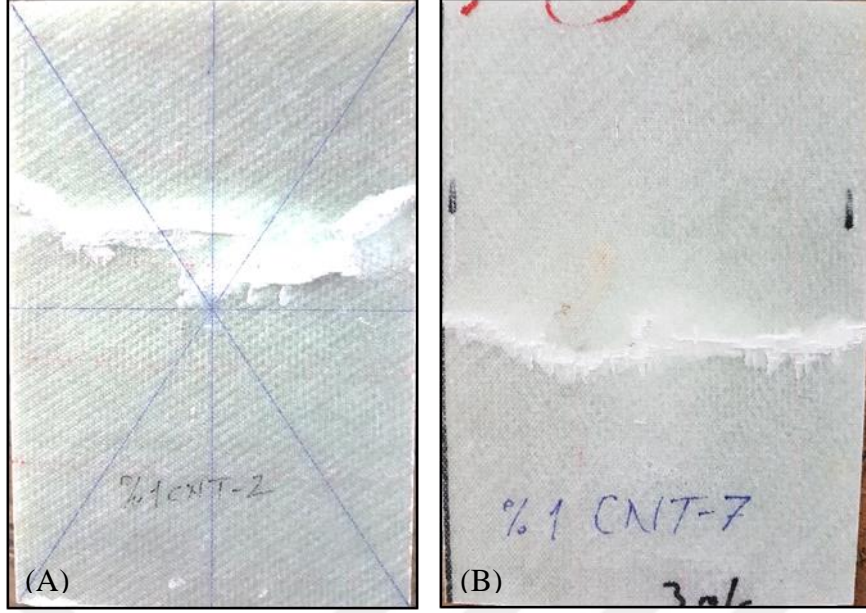
Tablo 7.6’da verilen %1 ÇCKNT içeren numuneler için elde edilen Test sonuçları dikkate alındığında oluşan hasar modlarının birçoğunun beklenmeyen bir şekilde geliştiği görülmektedir ve testlerin başarısız olduğu anlaşılmaktadır ancak yine de elde edilen gerilme değerleri üç numune (5, 8 ve 11 no’lu numuneler) dışında birbirine çok yakındır.

Çalışmalarda toplanan verilerden anlaşıldığı gibi, gerilme ve şekil değiştirme verilerinde Şekil 7.31’de gösterilen 5, 8 ve 11 numaralı üç numune için elde edilen sonuçlar çıkarılarak elde edilen sonuçlar kıyaslandığında sonuçların nispeten uyumlu ve birbirine yakın olduğu görülmektedir. Numunelerin gerilme değerlerinde görülen artışla şekil değişimi arasında nispeten lineer bir değişim gözlemlendiği söylenebilir ancak sınırlı sayıdaki verilerle bu konuda kesin bir kanıya varmak zordur. Elde edilen değerlerin üç numune dışında ortalaması alındığında ortalama gerilme 121 N/mm^2 ve ortalama uzama ise 2.64 mm olarak bulunur.



Şekil 7.31. DSB Tesleri ile hasar oluşumunda başarısız sonuçlar alınan numuneler (A: 2 m/s, B: 2.5 m/s, C: 3 m/s hızda darbeye maruz kalmış %1 ÇCKNT içeren PVA nanoelyaf keçe takviyeli numunelerde görülen benzer hasar gelişimleri)

Bununla birlikte, Şekil 7.32’de verilen başarılı kabul edilen 2 ve 7 numaralı numunelerin hasar mekanizmaları birbirine çok benzer şekilde gelişmiştir ve hasarın oluştuğu maksimum gerilme miktarı birbirine çok yakındır. Buradan yola çıkacak olursak, numunelerin merkezindeki hasar bölgesinden geçen hasar gelişimlerinin net bir gerilme değerinde meydana geldiği söylenebilir.



Şekil 7.32. Yakın gerilme değerlerinde benzer hasar mekanizmalarının oluşması (A: 1.5m/s ve B: 3m/s hızda darbeye maruz kalmış %1 ÇCKNT içeren PVA nanoelyaf keçe takviyeli numunelerde görülen benzer hasar gelişimleri)

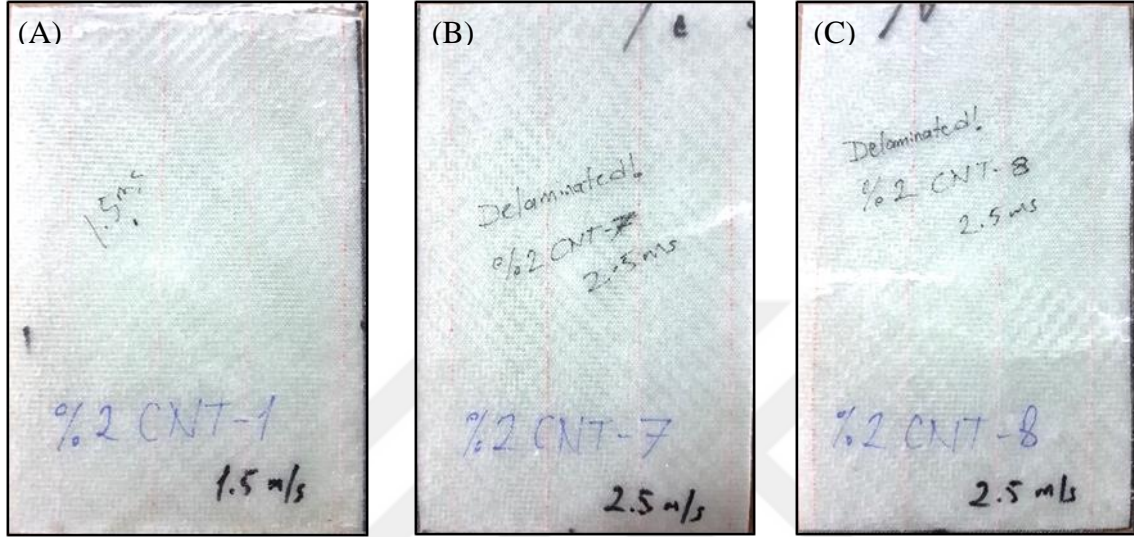
Numunelerin geneline bakıldığında hasarların oluştuğu kısımların lokasyonları ve hasar gelişim mekanizmalarının farklılığı dikkat çekmektedir. Ancak çoğu numunede hasarların oluştuğu maksimum gerilme değerlerinin yakın olduğu da bir gerçektir. Sonuç olarak, numunelerin hasar gelişim karakterizasyonu DSB Testlerinde oluşturulan gerilme miktarıyla ilişkili olduğu gözlenmemiştir.

Numunelere düşük hızlı darbe testleri ile uygulanan farklı hızlardaki darbelerin hasar oluşumuna etkisi saptanmamıştır. Dolayısıyla, numunelerin darbe dayanımlarının yüksek olduğu ve darbeler sonucunda mukavemet değerlerinde öngörülebilir bir azalma olmadığı söylenebilir.

Ağırlıkça %2 ÇCKNT içeren numuneler için elde edilen Tablo 7.7’de verilen değerlerden yola çıkarak oluşan hasar modlarının birçoğunun başarılı olduğu görülmektedir ve yalnızca üç numune (1, 7 ve 8 numaralı) için başarısız sonuçlanmıştır. Sonuç olarak, elde edilen gerilme ve uzama değerlerin bu üç numune dışında birbirine çok yakın olduğunu söyleyebiliriz.

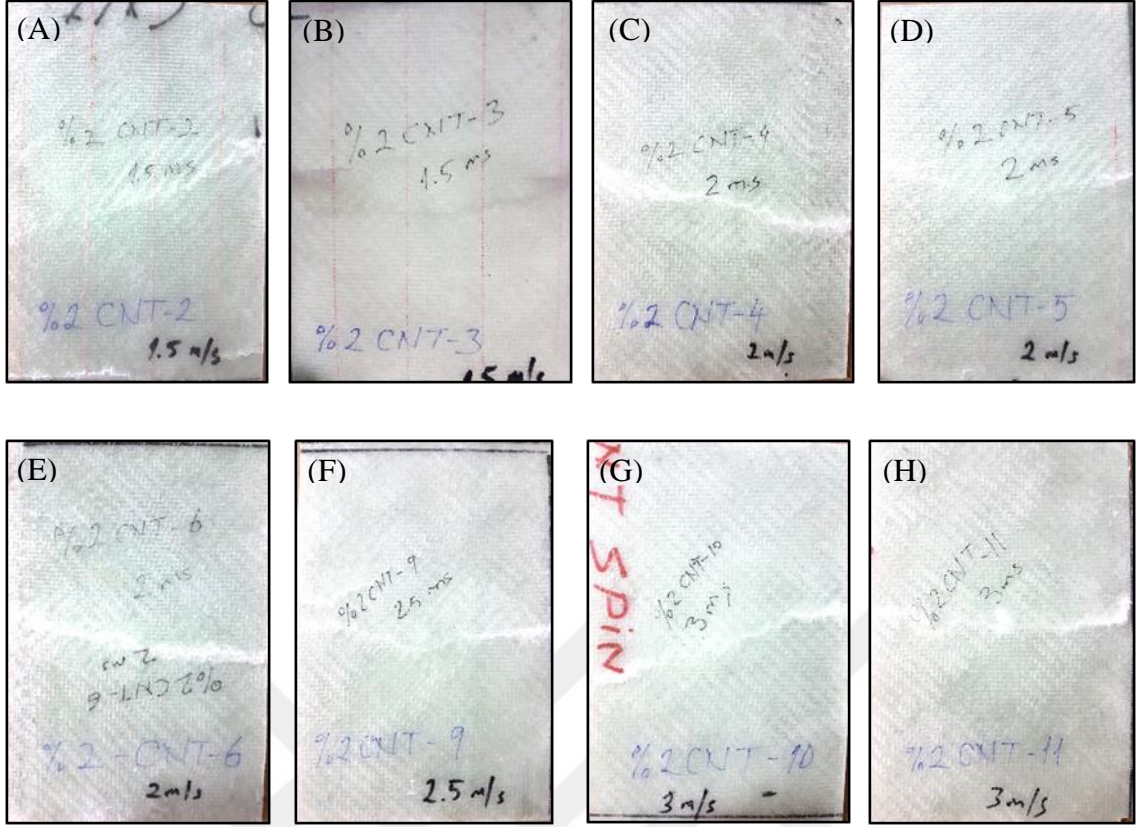
Çalışmalarda elde edilen verilere göre gerilme ve şekil değiştirme verilerinde Şekil 7.33’de gösterilen 1, 7 ve 8 numaralı üç numune için elde edilen sonuçlar çıkarılarak elde edilen veriler kıyaslandığında sonuçlar birbirine yakındır. Yine de numunelerin gerilme değerlerinde görülen artışla şekil değişimleri arasında uyum gözlemlenmemiştir.

Ayrıca, bu numunelerden ikisinde (7 ve 8) delaminasyon (tabakalar arası ayrılma) görülmüştür. Bunun başlıca nedenleri (1) üretim esnasında yaşanan olumsuzluklara bağlı olarak tabakalar arası bağların yeterince kuvvetli olmaması ve (2) vakumlama için uygulanan basınç değerinin yetersiz kalması sonucunda numune kalınlıklarının fazla olmasıdır.



Şekil 7.33. Başarısız hasar mekanizmalarının geliştiği numuneler (A: 1.5 m/s, B ve C: 2.5 m/s hızda darbeye maruz kalmış %2 ÇCKNT içeren PVA nanoelyaf keçe takviyeli numunelerde görülen benzer hasar gelişimleri)

Başarılı kabul edilen diğer tüm numuneler için Şekil 7.34'de verilen görsellerden de anlaşılacağı üzere, hasar gelişim mekanizmaları kenardan merkeze doğru (KM) olmuştur.



Şekil 7.34. DSB Testleri ile hasar oluşumunda başarılı sonuçlar alınan numuneler (A ve B: 1.5 m/s, C, D ve E: 2 m/s, F: 2.5 m/s, G ve H: 3 m/s hızda darbeye maruz kalmış %2 ÇCKNT içeren PVA nanoelyaf keçe takviyeli numunelerde görülen benzer hasar gelişimleri)

Hasar mekanizmalarının birbirine çok benzer bir biçimde gelişmiş olmasının ve hasarın oluştuğu maksimum gerilme miktarının birbirine nispeten yakın olmasının nedeni numunelere uygulanan darbe testlerinin numune merkezinde mukavemet kaybına sebep olması olarak açıklanabilir. Ancak farklı hızlardaki darbeler sonucunda malzemelerin yapısal dayanımlarında darbe hızlarına bağlı bir düşüş gözlemlenmemiştir. Yani darbe hızları arttığı durumlarda dahi numuneler, hasarın geliştiği gerilme seviyesi göz önüne alındığında benzer oranlarda dayanımlar sergilemişlerdir. Bu sonuçlara göre, numunelerin merkezinde oluşturulan hasarlar DSB testleri esnasında gelişen hasar mekanizmalarının tetiklenerek hasar bölgesinden geçen kırılmaların oluşmasına neden olmakla birlikte numunelerin dayanımları üzerinde net bir etki yaratmamaktadır.

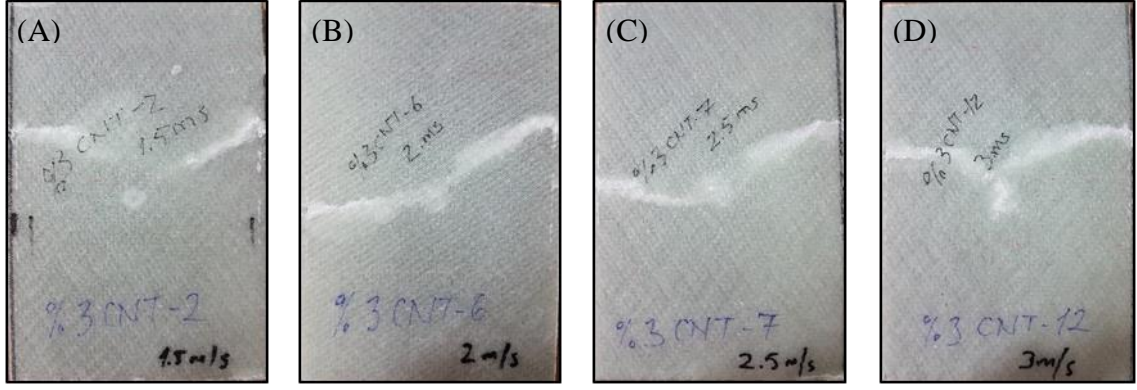
Numunelerin hasar öncesi şekil değişim değerlerine bakacak olursak elde edilen verilerin birbirine uzak olduğu anlaşılır. Yani her ne kadar numune üzerinde oluşturulan gerilmeler yakın olsa dahi numunelerin şekil değiştirme (kısalma) miktarında lineer bir değişim gözlenmemiştir. Ancak, numuneler uygulanan darbe hızlarının değişimine bağlı olarak DSB Testlerinde elde edilen şekil değişim miktarları arasında bir ters orantı

olduğunu söyleyebiliriz. Test sonuçlarından elde edilen Tablo 7.7’de verilen değerler kıyaslandığında, darbe hızlarının şekil değişimi üzerine olumsuz yansıdığı ve darbe hızındaki artışın yaklaşık aynı oranda numunelerin şekil değişimini kısıtladığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, numunedeki gerilme miktarları üzerinde benzer bir ilişki kurulamaması ve nedeninin saptanamamış olması üzerinde daha detaylı bir analiz yapma ihtiyacı ortaya çıkarmaktadır.

Ağırlıkça %3 ÇCKNT içeren numuneler için Tablo 7.8’de verilmiş olan değerler analiz edildiğinde ve en büyük gerilme değerlerinde numunede görülen uzama miktarının değişimi incelendiğinde gerçekleştirilen tüm DSB testlerinin başarılı bir şekilde sonuçlandığı anlaşılmaktadır. Test sonuçlarına göre oluşan hasar modlarının tamamı kenardan merkeze (KM) doğru gelişim göstermiştir ve başarısız herhangi bir test sonucuyla karşılaşmamıştır. Sonuç olarak, elde edilen tüm veriler analiz için uygun ve kullanılabilir kalitededir.

Yapılan DSB testlerinden elde edilen veriler incelendiğinde sonuçların nispeten uyumlu ve birbirine yakın olduğu görülmektedir. Ölçülen gerilme değerleri 110-132 N/mm² aralığında değişir ve oldukça benzer olmakla birlikte elde edilen şekil değişimi ile arasında bir ilişkiden söz etmek zordur. Gerilme değerlerinin ortalaması alındığında 122 N/mm² ortalama gerilme ve uzama değerleri dikkate alındığında ise 2.17 mm ortalama uzama miktarı elde edilir.

Şekil 7.35’de görselleri verilen DSB Testleri uygulanmış numunelerde tek tip hasar gelişimi gözlemlenmiştir. Hasar mekanizmalarının birbirine çok benzer bir biçimde gelişmiş olmasının ve hasarın oluştuğu maksimum gerilme miktarının birbirine nispeten yakın olmasının nedeni ağırlıkça %3 ÇCKNT içeren numunelerde görüldüğü şekilde uygulanan darbe testlerinin boyutu önemsenmeksizin numune merkezinde diğer kısımlara göre hissedilir bir derecede mukavemet kaybına sebep olması olarak açıklanabilir. Bununla birlikte, farklı hızlardaki darbeler sonucunda malzemelerin yapısal dayanımlarında darbe hızlarına bağlı bir düşüş gözlemlenmemiş olması, yani darbe hızları arttığı durumlarda dahi numunelerin benzer oranlarda dayanımlar sergilemiş olmalarının nedeni tam olarak anlaşılamamıştır.



Şekil 7.35. DSB Testleri ile hasar oluşumunda başarılı sonuçlar alınan numuneler (A: 1.5 m/s, B: 2 m/s, C: 2.5 m/s, D: 3 m/s hızda darbeye maruz kalmış %3 ÇCKNT içeren PVA nanoelyaf keçe takviyeli numunelerde görülen benzer hasar gelişimleri.

Elde edilen veriler, DSB Testleri esnasında gelişen hasar mekanizmalarının numunelerin merkezinde oluşturulan hasarlar tarafından etkilenecek kırılmaların hasar bölgesinden gelişmesine neden olduğunu göstermektedir. Ancak, hasarların geliştiği gerilme seviyesi göz önünde bulundurulduğunda numunelerin dayanımları üzerinde net bir etki yaratmadığı anlaşılmaktadır.

Alınan sonuçlar irdelendiğinde, DSB Testleri esnasında numune üzerinde oluşan gerilme değerlerinin yakın olduğu görülebilir ancak hasar öncesi şekil değişim değerleri verilerinin birbirine çok yakın değerler olmadığı görülmektedir. Bu da numunelerin şekil değiştirme (kısalma) miktarında gerilmelere bağlı bir korelasyon olmadığını ifade eder. Bununla birlikte, numunelere uygulanan farklı hızlardaki darbe testlerinin DSB Testleri esnasında gözlemlenen şekil değişim miktarlarına direkt olarak bir etkide bulunduğu çok net anlaşılmaktadır. Tablo 7.5’de sunulmuş olan değerler, darbe hızlarındaki artışın şekil değişimi üzerinde negatif etkisi olduğunu ve numunelerin şekil değişiminin ters orantılı olarak yaklaşık aynı oranda değiştiği görülmektedir. Ağırlıkça %2 ÇCKNT içeren numuneler için de ifade edilen, gerilme değerlerinin değişen darbe hızlarına göre herhangi bir doğrusal ya da dolaylı olarak ilişkisi kurulamamıştır.

7.4.3. DSB testi Kuvvet – Yer Değiştirme ilişkisi

Çalışmalarımızda farklı oranlarda (ağırlıkça %1, 2, 3) ÇCKNT takviyeli PVA nano keçe barındıran [0/90] oryantasyonda 10 tabaka cam elyaf kumaş içeren standart numune boyutlarında (100mm x 150mm) kompozit levhalar kullanılmaktadır ve numune kalınlıkları 3mm ile 4mm arasında değişmektedir. Cihazın ilerleme hızı 1.25mm/dak olarak ayarlanmış ve deney esnasında numune üzerine uygulanan kuvvetin numunede

oluşan aksenal şekil değişimine (numune boyunda basma yönünde kısalma) göre değişimi tüm numuneler için sırasıyla Şekil 7.36 ve Şekil 7.40 arasında gösterilmektedir.

Şekil 7.36’de görüldüğü üzere, farklı darbe hızlarında DHD testleri uygulanan nanoelyaf keçe içermeyen numunelerin DSB testleri esnasında benzer davranışlar sergiledikleri gözlemlenmiştir. Numunelere uygulanan darbe hızlarındaki artışın elde edilen en büyük kuvvet ve yer değiştirme miktarı üzerindeki etkisi de net bir biçimde görülmektedir.

Daha önceki bölümde Şekil 6.10’de verilen Darbe Sonrası Basma Testi Hasar Gelişim Evreleri Grafiği ile açıklanan bölgeler tüm numuneler için aşağıda verildiği şekilde gözlemlenmiştir.

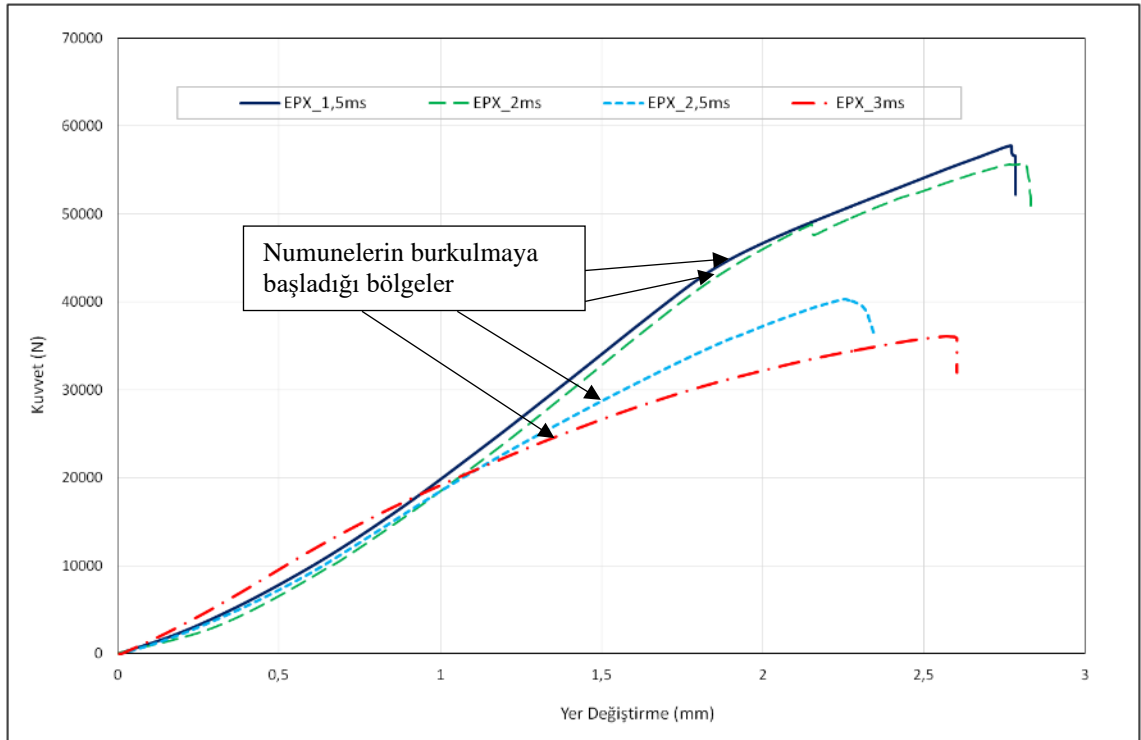
Birinci bölgede, numunelerde gelişen şekil değişimi matriks malzeme tarafından kontrol edilmektedir ve uygulanan kuvvet ve elde edilen şekil değişiminde lineer bir artış elde edilmiştir. Belirli bir kuvvete kadar numuneler üzerine uygulanan yükler sonucunda kompozit malzemede oluşan basma gerilmesi ilk aşamada matriks malzeme üzerinde yoğunlaşmıştır. Darbe hızlarının düşük olduğu 1.5m/s ve 2m/s hızlarda DHD testi gerçekleştirilen numuneler için elde edilen eğrilerde bu kuvvetin 30 kN’un üzerinde olduğu görülmektedir. Darbe hızlarının yüksek olduğu 2.5m/s ve 3m/s hızlarda DHD testi gerçekleştirilen numuneler için elde edilen eğrilerde ise kuvvetin 20 kN civarında elde edildiği anlaşılmaktadır. Bunun nedeni, artan darbe hızları sonucunda matriks malzemede oluşan hasar boyutunun artış göstermesi ve dolayısıyla numunelerin dayanımını düşürmesidir. Bu bölgede gerilme matriks malzeme üzerinde yoğunlaşmaktadır ve cam elyafların test sonucuna herhangi bir etkisi bulunmamaktadır.

İkinci bölgede numuneler üzerindeki gerilmeler belirli bir seviyeye çıkmıştır ve artık matriks malzemenin basma yüklerine karşı koyamadığı anlaşılmaktadır. Bunun sonucunda numunede şekil değişimleri, eğilmeler ve sonrasında da burkulmalar meydana gelmiştir. Yük altındaki numunelerde oluşan gerilmelerin belirli bir seviyeye çıkması nedeniyle şekil değişimine zorlanarak elastik burkulmaya maruz kalmışlardır. Bu değerlerin darbe hızlarının düşük olduğu 1.5m/s ve 2m/s hızlarda DHD testi gerçekleştirilen numuneler için elde edilen eğrilerde bu kuvvet aralığının 30-60 kN arasında ve darbe hızlarının yüksek olduğu 2.5m/s ve 3m/s hızlarda DHD testi gerçekleştirilen numuneler için ise kuvvet aralığının 20-40 kN aralığında elde edildiği

görülmektedir. Bu bölgede elastik şekil değişimi görülmekle birlikte matriks malzemede ve takviye elemanlarında numunenin bütünselliğini etkilemeyecek kadar küçük boyutlarda kırılmalar meydana gelmektedir. Gerilme altındaki yapının kendisine denge aradığı bu bölge, yani “Elastik Burkulma Noktası” (ayrılma noktası - beforcation point), hem basma hem de eğilme gerilmelerinin etkili olduğu aralıktır.

Elastik Burkulma Noktası’na gelindiğinde Kuvvet-Yer Değiştirme grafiklerinde verilen eğrilerde görülen lineerliğin değişmeye başladığı görülmektedir. Bu bölgeye gelindiğinde numunelerin orta kısımlarında eğilme gerilmelerine bağlı olarak bariz bir şekil değişimi (eğilme) meydana gelir.

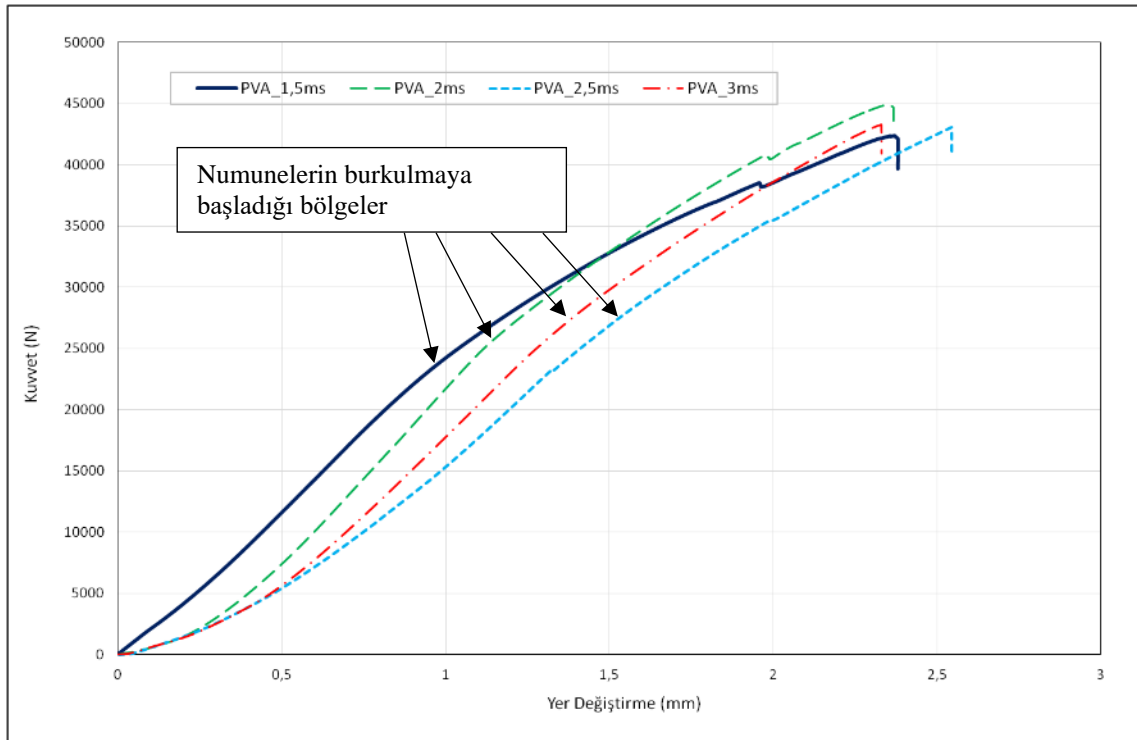
Üçüncü bölgede ise numune üzerinde oluşan gerilmeler artık ne matriks malzeme ne de takviye elemanları tarafından taşınamayacak kadar artmıştır. Belirli bir değere ulaşıldığında malzemede elastik şekil değişiminin bittiği ve kalıcı hasarların oluştuğu gözlemlenmiştir. Basma gerilmesinden daha çok eğilme gerilmeleri etkili olduğu bu bölgede, darbe hızlarındaki artıştan kaynaklanan noktasal hasar büyüklüğü dolayısıyla numunelerin kalıcı hasar gördüğü değerlerde %40 civarında bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Elastik Burkulma Noktasından itibaren basma ve eğilme gerilmesinin birleşimi olarak görülen gerilmeler ortaya çıkmıştır ve hasar oluşumu (kırılma-kopma) da bu iki gerilmenin etkisinde gerçekleşmiştir.



Şekil 7.36. Farklı hızlarda DSB test sonuçları
(PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numuneler için Kuvvet – Yer değiştirme Grafiği)

Şekil 7.37 ve Şekil 7.40 arasındaki grafikler incelendiğinde, farklı darbe hızlarında DHD testleri uygulanan nanoelyaf keçe içeren numunelerin DSB testleri esnasında benzer davranışlar sergiledikleri anlaşılmaktadır. Ancak, numunelere uygulanan darbe hızlarındaki artışın elde edilen en büyük kuvvet ve yer değiştirme miktarı üzerindeki etkisi tespit edilememiştir. Bununla birlikte, Şekil 7.36 ile verilen nanoelyaf keçe içermeyen EPX numunelere uygulanan DSB testi sonuçlarıyla kıyaslandığında, nanoelyaf keçe takviyesinin etkisi net bir biçimde gözlenmiştir.

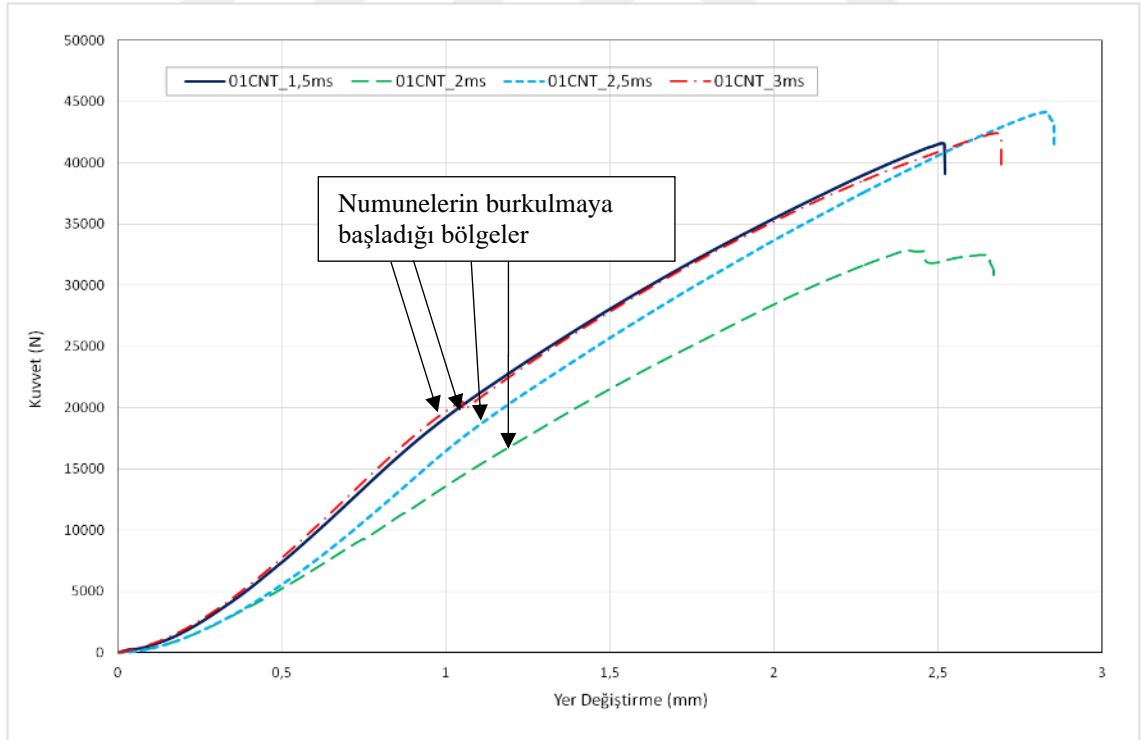
Şekil 7.37’de verilen grafikte verilen PVA nanoelyaf keçe takviyesi olan numunelerde gözlemlenen hasar gelişimlerine benzer gelişimler diğer numuneler için de elde edilmiştir. Her 3 hasar gelişim evresi tüm numuneler için benzer aralıklarda elde edilmiştir. Eğrilerden elde edilen veriler incelendiğinde, darbe hızlarındaki değişimin elde edilen en büyük kuvvet ve şekil değişimleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır. Bunun nedeni, artan darbe hızları sonucunda matriks malzemede oluşan hasar boyutunun artış göstermesiyle birlikte bu artışın numunelerin dayanımı üzerinde belirgin derecede bir etkide bulunmamasıdır. Sonuç itibarıyla, testler sonucunda elde edilen grafiklerde her bir farklı tür numunenin darbe hızlarından bağımsız bir şekilde hasar gelişimleri sergilediği ve gözlemlenen hasar gelişim evrelerinin gerçekleştiği gerilme aralıklarının da oldukça benzer değerlerde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.37. Farklı hızlarda DSB test sonuçları (PVA için Kuvvet – Yer değiştirme Grafiği)

Sonuç olarak, Şekil 7.37’de farklı hızlarda DSB test sonuçlarından elde edilen PVA nanoelyaf keçe içeren numuneler için elde edilen Kuvvet – Yer değiştirme Grafiği incelendiğinde birinci bölgenin bitip ikinci bölgenin başladığı yer, yani basma gerilmesi altında meydana gelen lineer elastik şekil değişiminin sona erdiği ve numunede burkulmaların başladığı Elastik Burkulma Noktası, 24-27 kN aralığında elde edilmiştir. İkinci bölgenin bittiği ve üçüncü bölgenin, yani numunelerde basma ve eğilme gerilmesinin birleşimi olarak görülen gerilmelerin neden olduğu hasar oluşumunun (kırılma-kopma) gerçekleştiği yerin, 42-45 kN aralığında elde edildiği gözlemlenmiştir.

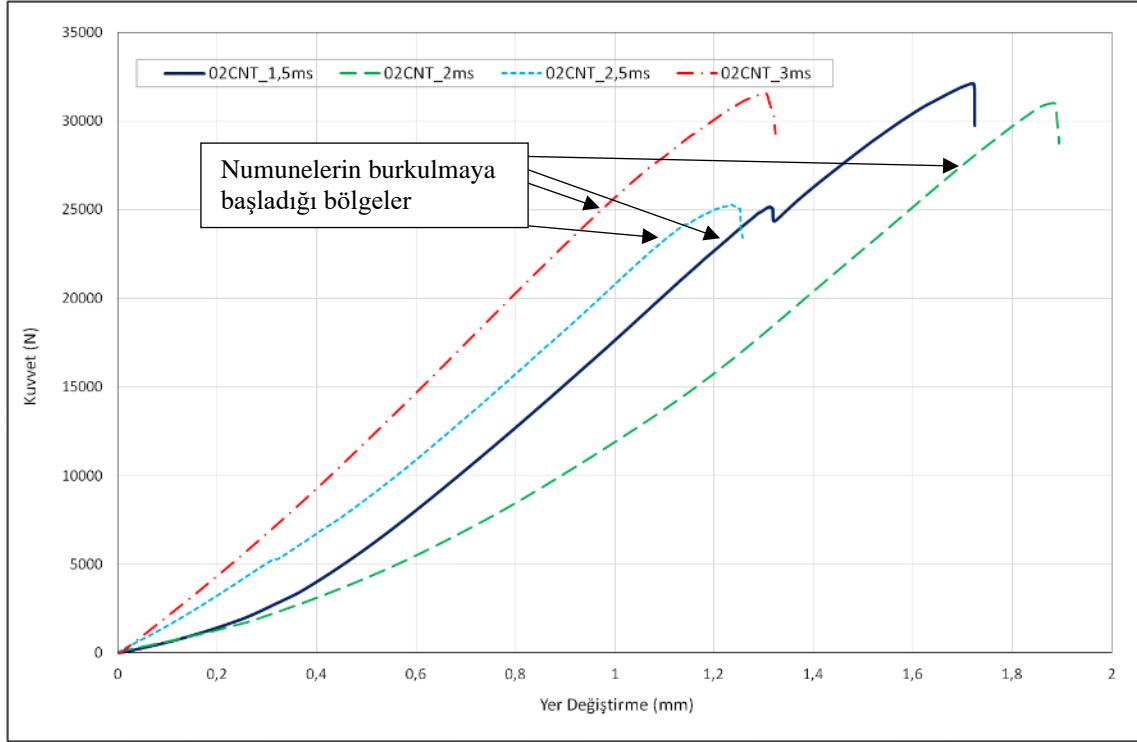
Benzer şekilde hasar gelişimlerinin sergilendiği diğer numuneler için elde edilen grafikler incelendiğinde yaklaşık olarak aynı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Farklı hızlarda DSB test sonuçlarından elde edilen PVA nanoelyaf keçe ve %1 ÇCKNT içeren numuneler için elde edilen Kuvvet – Yer değiştirme Grafiği (Şekil 7.38) eğrilerinde Elastik Burkulma Noktası 17-20 kN aralığında gözlemlenmiştir. Ayrıca, hasar oluşumunun (kırılma-kopma) gerçekleştiği yer 2m/s DHD alan numune hariç tutulduğunda 42-44 kN aralığında çok yakın değerlerdedir.



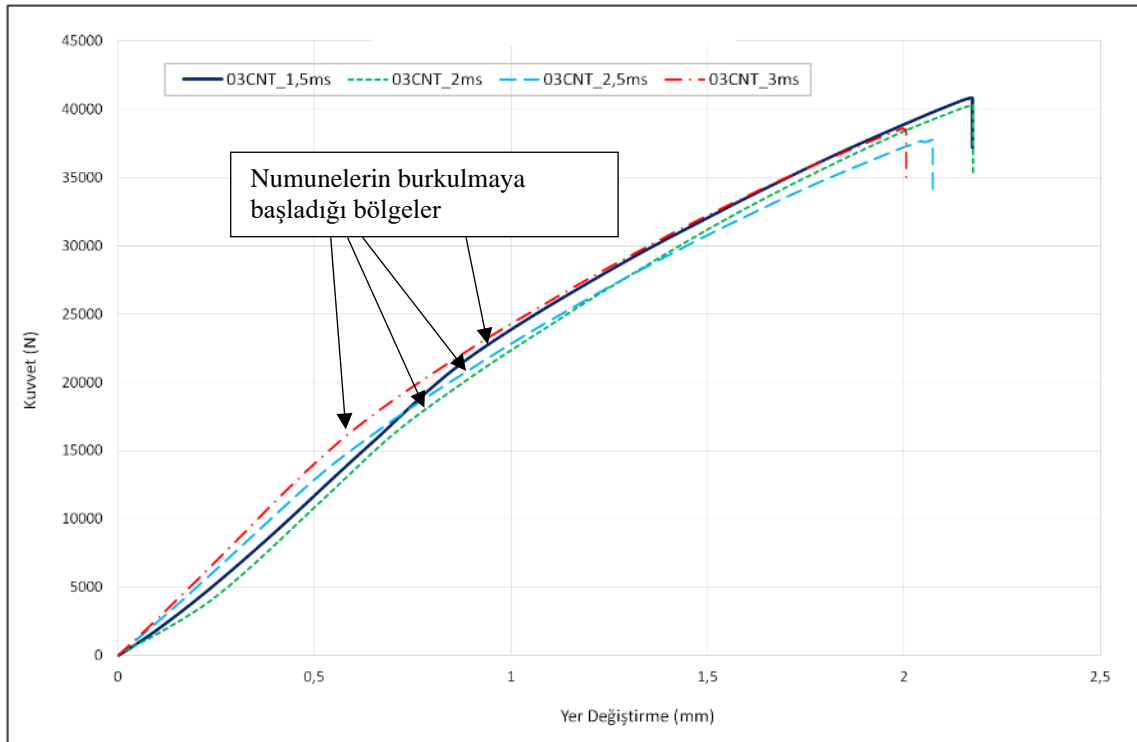
Şekil 7.38. Farklı hızlarda DSB test sonuçları (%1 ÇCKNT için Kuvvet – Yer değiştirme Grafiği)

Son olarak, %2 ve %3 oranlarda ÇCKNT içeren PVA nanoelyaf takviyeli numuneler için elde edilen Kuvvet – Yer değiştirme Grafikleri (Şekil 7.39 ve Şekil 7.40)

incelendiğinde gerek Elastik Burkulma Noktalarının gerekse hasar oluşumunun (kırılma-kopma) gerçekleştiği gerilme değerlerinin oldukça yakın değerlerde elde edildiği gözlemlenmiştir.



Şekil 7.39. Farklı hızlarda DSB test sonuçları (%2 ÇCKNT için Kuvvet – Yer değiştirme Grafiği)



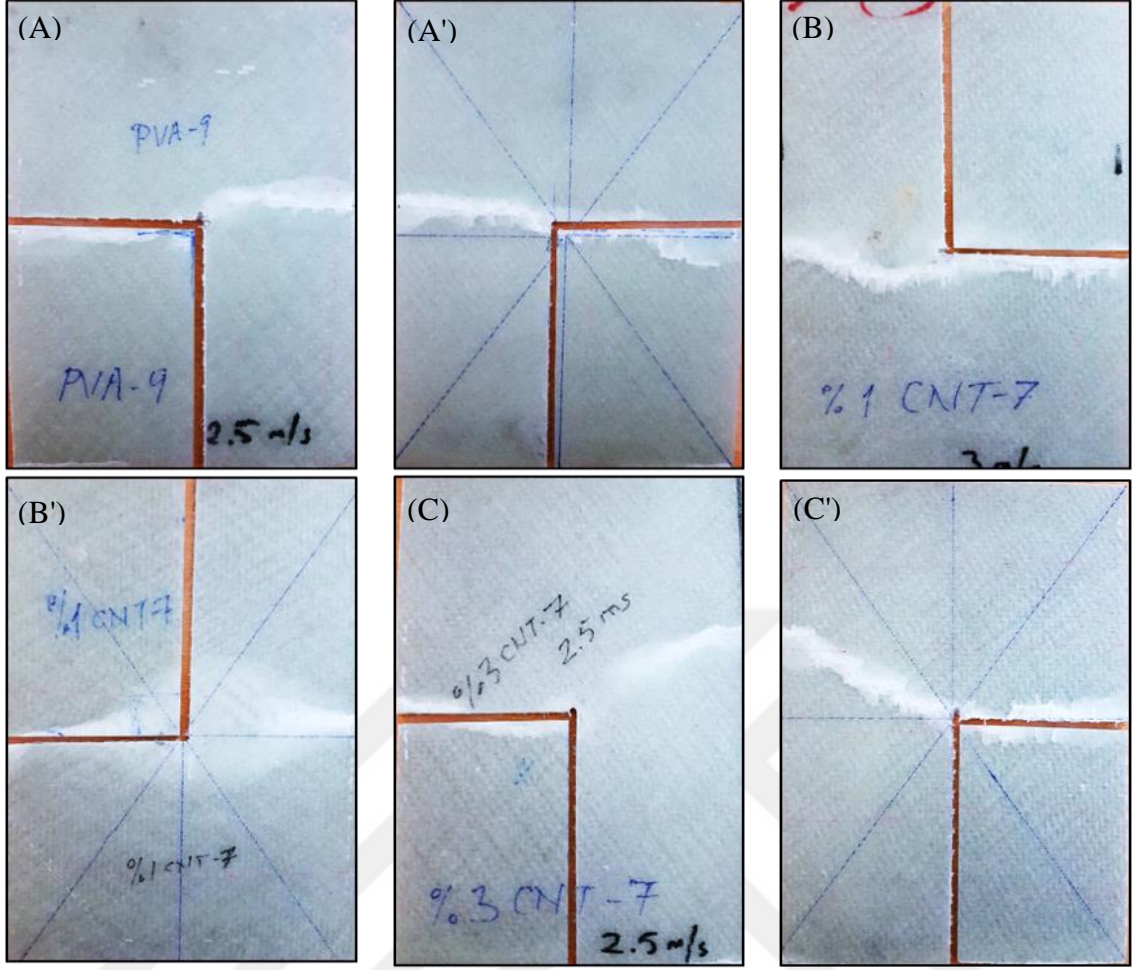
Şekil 7.40. Farklı hızlarda DSB test sonuçları (%3 ÇCKNT için Kuvvet – Yer değiştirme Grafiği)

Sonuç itibariyle, DSB testlerinin sonuçlarının tamamı kendi aralarında kıyaslandığında, numunelerin içeriğindeki PVA nanoelyaf keçe takviyesinin (ÇCKNT içersin ya da içermesin) numunelerin mukavemetine olumlu katkı sağladığı anlaşılmaktadır. Ancak, PVA nanoelyaf keçe içeriğindeki ÇCKNT ilavesinin miktarındaki değişimin test sonuçları üzerinde etkisinin ya hiç olmadığı ya da yapılan testlerde tespit edilemeyecek kadar düşük seviyelerde katkı sağlamış olabileceği sonucuna varılmıştır.

7.5. Hasar Görmüş Numunelerin Analizleri

Çalışmalarımızda uygulanan standart mekanik testler sonrasında hasar gören numunelerde ne tür hasar-kırılma mekanizmaları geliştiğini anlamak için çeşitli analizler yapılmıştır.

Standart boyutlardaki numunelerin öncelikle görsel olarak muayenesi yapılmıştır ve hasar bölgeleri, büyüklükleri, hasar başlangıç ve gelişim yönleri, uzunlukları ve çeşitleri incelenmiştir. Hasar mekanizmalarını ve hasar esnasında ne tür kırılmaların gerçekleştiğini anlayabilmek amacıyla numuneler Şekil 7.41’de gösterildiği üzere hasarın oluştuğu ve gelişim gösterdiği doğrultu boyunca ve aynı zamanda hasarı tetiklediği düşünülen darbe merkezine doğru kesilmiştir. Kesilen numunelerin hasarlı yüzeyleri farklı kalınlıklardaki zımparalarla parlatılmak suretiyle optik mikroskop altında incelenmiştir.



Şekil 7.41. Hasar görmüş numunelerin incelenmesi amacıyla kesilmesi (A ve A': 2.5m/s hızda darbeye maruz kalmış PVA nano keçe takviyeli, B ve B': 3m/s hızda darbeye maruz kalmış %1 ÇCKNT içeren PVA nano keçe takviyeli, C ve C': 2.5 m/s hızda darbeye maruz kalmış %3 ÇCKNT içeren PVA nano keçe takviyeli numunelerin ön ve arka yüzeylerinin görünümü)

7.5.1. Mikroyapı analizleri

Kesik yüzeylerin incelenmesi için (1) 10 kat tabakalar arası hasar gelişimini gözlemlemek amacıyla dijital ve (2) hangi tür hasar gelişimlerinin görüldüğünü anlayabilmek amacıyla optik olan iki ayrı mikroskop kullanılmıştır. Mikroskoplardan alınan görüntüler 10 kata kadar dijital ve 100 kata kadar optik mikroskop yardımıyla büyütülmüş görüntüler olup kırılma yüzeylerinde kompozit yapıyı oluşturan tüm katmanlar (matriks malzeme, cam elyaflar, nano-elyaf keçeler) görüntülenmiştir. Böylece hasar mekanizmalarının gelişimleri ve türleri detaylı olarak incelenerek tespit edilebilmiştir.

Kesilmiş ve zımpara ile parlatılarak tüm katmanların görüntülenebilmesi için hazırlanmış olan parçaların incelenen kısımları öncelikle farklı hızlarda hasar görmüş

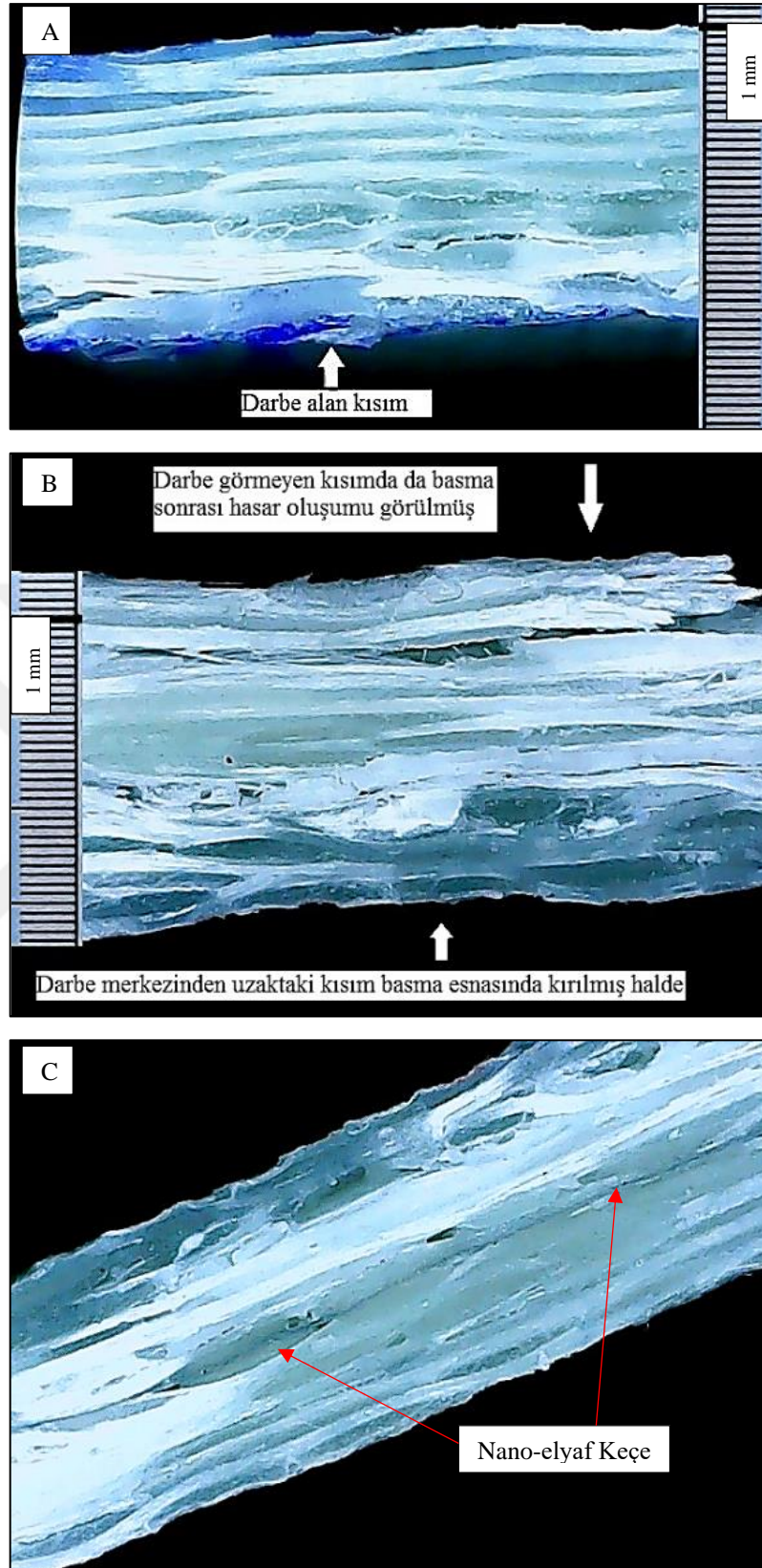
olan darbe merkezleri, sonrasında hasar oluşan yüzeyler ve son olarak da hasar görmemiş olan yüzey her iki yönden görüntüler alınarak analiz edilmiştir.

7.5.2. Numune yüzeylerinin dijital mikroskop incelemesi

Kesilen numunelerin yüzeyleri dijital mikroskop altında incelendiğinde kompozit malzemeyi oluşturan tüm katmanlar net olarak görülebilmektedir (Şekil 7.42). Görsellerden anlaşılacağı üzere kompozit numune 3 (üç) katmandan oluşmaktadır:

- 1) Matriks Malzeme (Epoksi)
- 2) Cam Elyaf (5+5 Kat)
- 3) Nano-elyaf Keçe (kompozit levhanın merkezinde tek kat)

DHD ve DSB testleri sonrası hasar gören numunelerin Şekil 7.42’de verilen dijital mikroskop görüntüleri incelendiğinde darbe merkezi ve darbe merkezi uzağındaki hasar gelişimleri açıkça görülebilmektedir. Aynı zamanda verilen görüntülerde ağırlıkça %3 ÇCKNT barındıran PVA nanoelyaf keçe takviyeli kompozit numunenin merkezindeki nanoelyaf keçe de net bir biçimde görüntülenmiştir.



Şekil 7.42. DHD ve DSB testleri sonrası hasar gören numunelerin dijital mikroskop görüntüleri: A) Darbe merkezi, B) Darbe merkezi uzağında hasar gelişimi, C) %3 ÇCKNT barındıran nanoelyaf keçe (10X)

7.5.3. Hasar görmemiş yüzeylerin optik mikroskop incelemesi

Kesilen numunelerin hasar görmemiş yüzeyleri optik mikroskop altında incelenmiş kompozit malzemeyi oluşturan tüm katmanlar net olarak Şekil 7.43 ve Şekil 7.44'de görülebilmektedir.

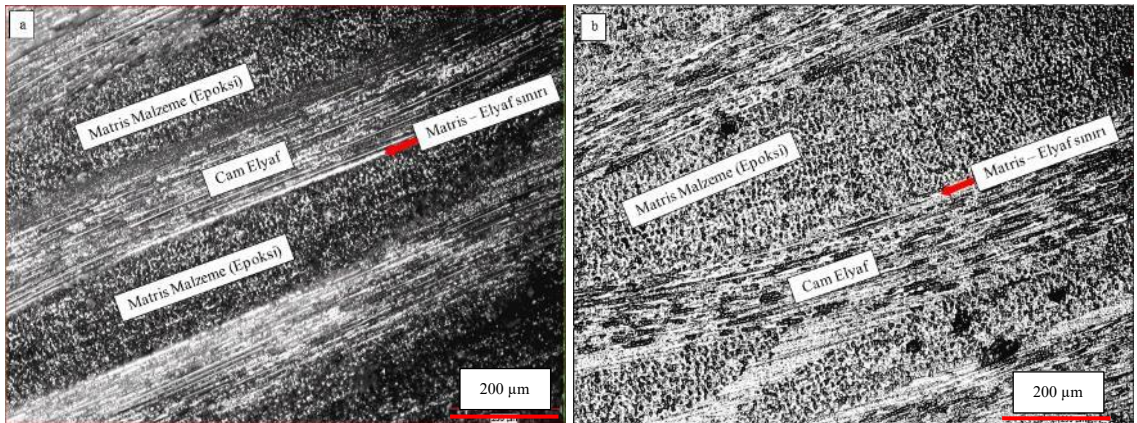
Verilen şekillerden anlaşılacağı üzere kompozit numune 3 (üç) katmandan oluşmaktadır:

- 1) Matriks Malzeme (Epoksi): Koyu renkli katmanlar
- 2) Cam Elyaf: Açık renkli katmanlar
- 3) Nano-elyaf Keçe

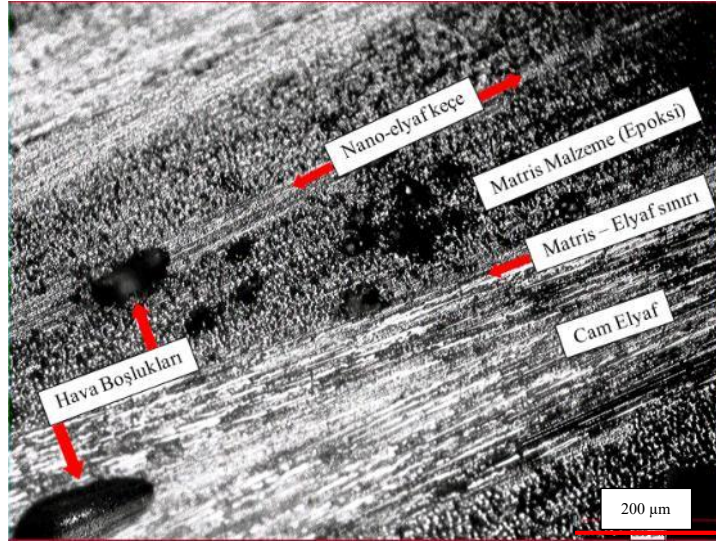
Optik mikroskop görüntülerinde ayrıca matriks malzeme ile cam elyaf sınırları da net olarak anlaşılmaktadır. Aynı zamanda numune üretiminde giderilemeyen hava kabarcıklarından kaynaklanan boşluk kusurları da gözlemlenmiştir.

Numunelerin yüzey görüntülerinin analizleri yapıldığında kompozit yapıyı oluşturan katmanların birbirine sağlıklı bir biçimde tutunduğu ve yüzeyler arasında sıkı bir yapışma gerçekleştiği belirlenmiştir.

Görüntülerde saptanan hava boşluklarının kompozit yapının mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebileceği düşünülmektedir ancak bu etkinin hata miktarının düşük olması sebebiyle sınırlı ya da göz ardı edilebilir düzeyde olduğu tahmin edilmiştir.



Şekil 7.43.(a - b): Nano-elyaf keçe içermeyen bir numunenin optik mikroskop görüntüsü ve kompozit malzemeyi oluşturan tüm katmanlar (100X)



Şekil 7.44. % 1 oranda ÇCKNT takviyeli Nano-elyaf keçe içeren bir numunenin hasar görmemiş yüzeyinin optik mikroskop görüntüsü ve kompozit malzemeyi oluşturan tüm katmanlar (100X)

7.5.4. Hasar görmüş yüzeylerin optik mikroskop incelemesi

Kesilen numunelerin hasar görmüş yüzeyleri kompozit malzemeyi oluşturan tüm katmanlar ve ne tür hasarların oluştuğunu anlamak için optik mikroskop altında görüntülenmiştir. Oldukça net olarak elde edilen görüntüler incelenerek analiz edilmiştir.

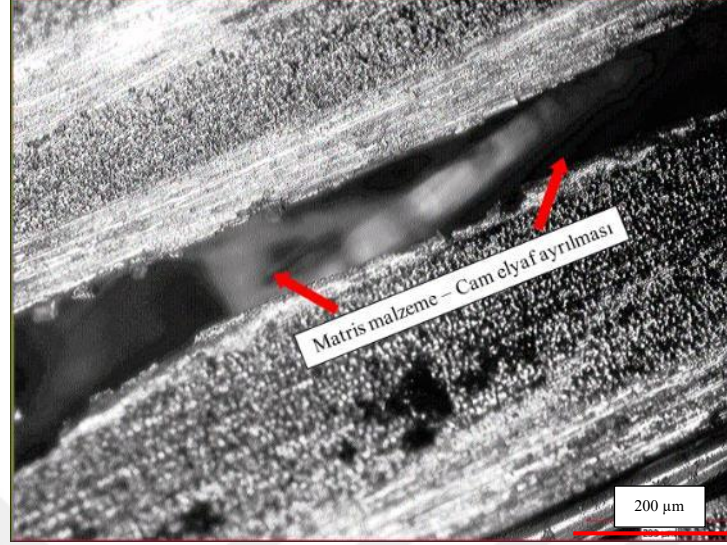
Kompozit numuneler üzerinde yapılan analizler sonrasında temel olarak 4 (dört) farklı hasar oluşumu gözlemlenmiştir:

- 1) Matriks malzeme (Epoksi) hasarları
- 2) Cam elyaf hasarları
- 3) Matriks malzeme (Epoksi) – Cam elyaf ayrılması
- 4) Nanoelyaf keçe hasarları
- 5) Üretim kusurları (hava boşluğu, yapışma sorunları vs.) kaynaklı hasarlar.

Tüm görüntülerde gözlemlenmiş olan hasarlar işaretlenerek hasarların nedenleri ve hasar boyutlarının numunelerin özellikleri ne tür etkilerde bulunduğu anlaşılmasına çalışılmıştır.

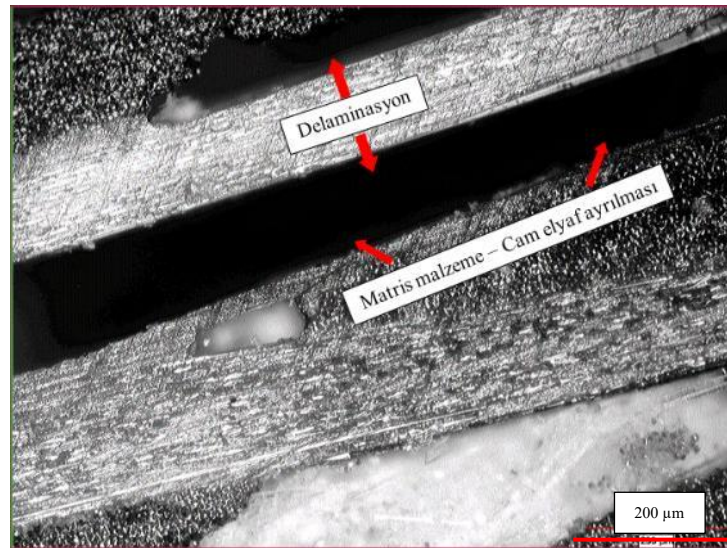
Şekil 7.45’de verildiği üzere, matriks malzeme ile cam elyafın ayrılması olayının nedeni DHD testleri esnasında gelişen delaminasyonların ya da bunu tetikleyen darbenin etkisinin DSB testleri sonucunda tam olarak ayrılmaya yol açması olarak yorumlanmıştır. Ancak bu hasar mekanizmasının gelişmesinde üretim esnasındaki muhtemel üretim hatalarının da payı bulunabilir. Bunun yanında şekilde görüldüğü üzere cam elyafın kendi

içinde de hasar meydana gelmesi epoksi ile tam anlamıyla ıslanmamış olması anlamına gelebilir.

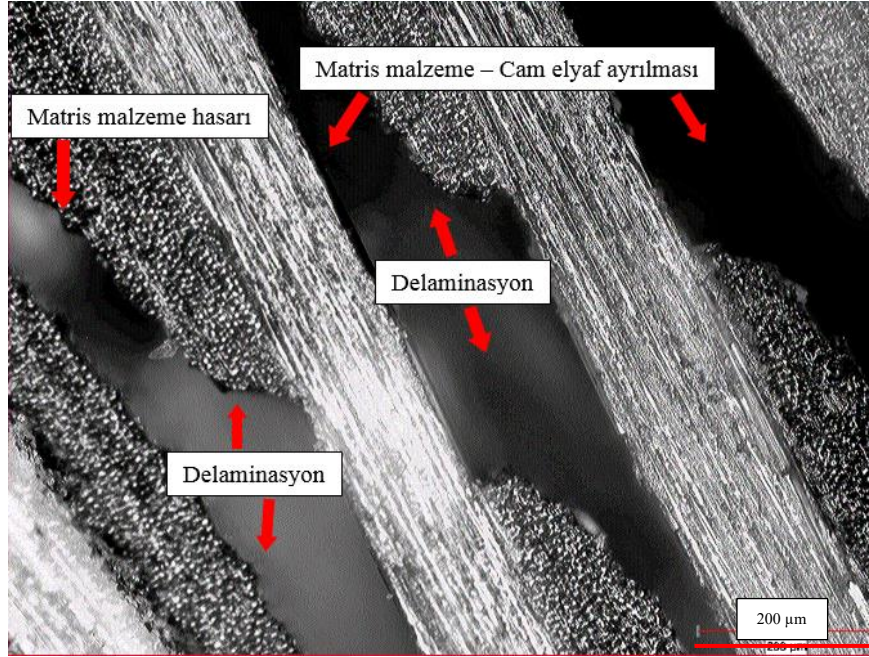


Şekil 7.45. %1 oranda ÇCKNT takviyeli Nano-elyaf keçe içeren bir numunenin hasar görmüş yüzeyinin optik mikroskop görüntüsü ve Matris malzeme (Epoksi) – Cam elyaf ayrılması hasar gelişimi (100X)

Şekil 7.46 ve Şekil 7.47’de verilen görüntüler incelendiğinde matris malzeme (Epoksi) ile cam elyafların ayrılması yoluyla gelişen hasarların hem pürüzsüz bir şekilde ayrılma hem de matris malzemenin kendi içinde hasara uğraması ile birlikte parçalı olarak geliştiği anlaşılmıştır. Pürüzsüz bir hasar gelişiminin nedeni üretim esnasında cam elyafların başarılı bir şekilde ıslatılamaması, parçalı hasar gelişimlerinin nedeni ise numunelerin maruz kaldığı DSB yüklemelerinin DHD esnasında oluşmuş olan epoksi hasarlarını tetikleyerek kırılmalar olarak açığa çıkması olarak tahmin edilmektedir.

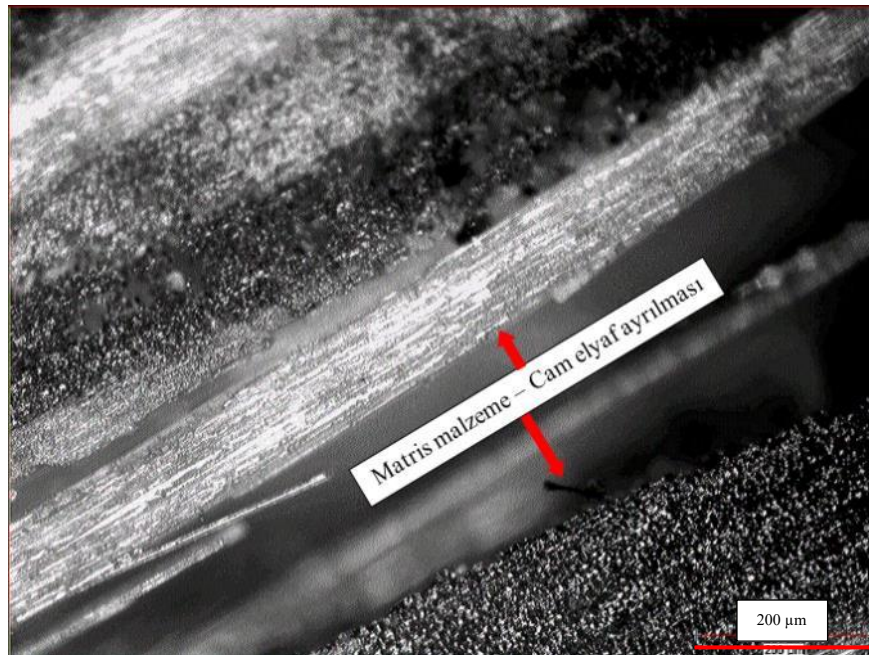


Şekil 7.46. %1 oranda ÇCKNT takviyeli Nano-elyaf keçe içeren bir numunenin hasar görmüş yüzeyinin optik mikroskop görüntüsü ve Matris malzeme (Epoksi) – Cam elyaf ayrılması (delaminasyon) hasar gelişimi (100X)



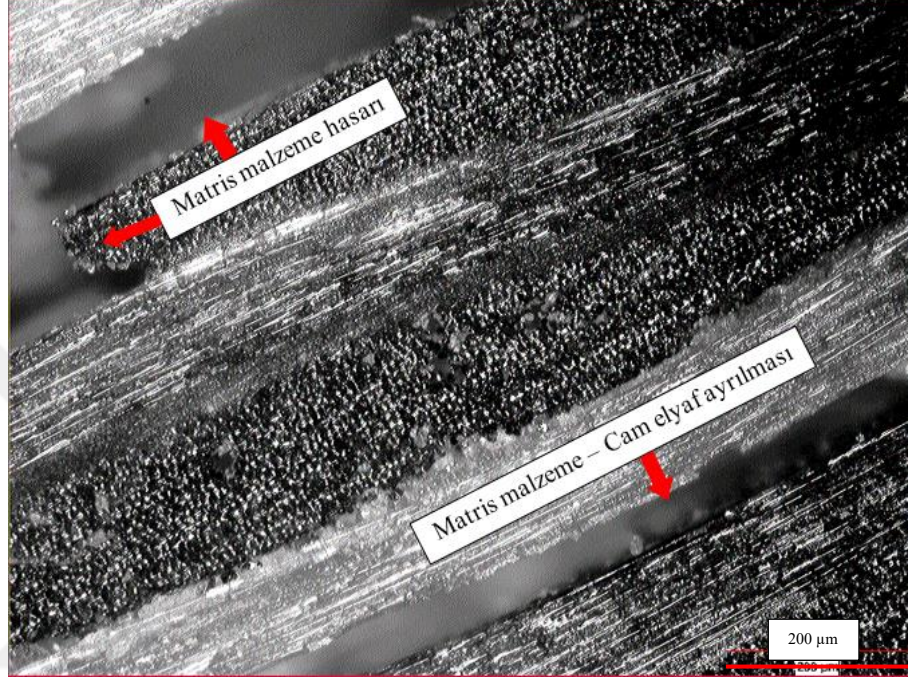
Şekil 7.47. %2 oranda ÇCKNT takviyeli Nano-elyaf keçe içeren bir numunenin hasar görmüş yüzeyinin optik mikroskop görüntüsü ve Matris malzeme (Epoksi) – Cam elyaf ayrılması (delaminasyon) hasar gelişimi (100X)

Şekil 7.48’de verilmiş olan görüntüler incelendiğinde, matris malzeme ile cam elyafın eş zamanlı hasar gelişimi görülmektedir. Başarılı bir şekilde birbirine tutunmuş olan cam elyaf ve epoksi matris malzeme numuneler üzerine uygulanan darbe ve basma yüklerinin sonucunda deforme olmuş ve sonuç olarak cam elyafların epoksiden ayrılırken bir miktar kırılmasına neden olmuştur.



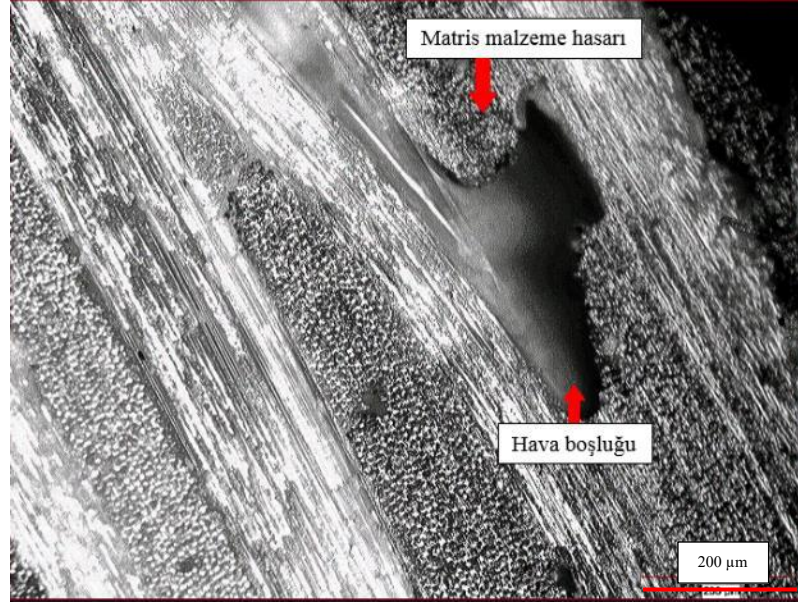
Şekil 7.48. %1 oranda ÇCKNT takviyeli Nano-elyaf keçe içeren bir numunenin hasar görmüş yüzeyinin optik mikroskop görüntüsü ve Matris malzeme (Epoksi) – Cam elyaf ayrılması hasar gelişimi (100X)

Şekil 7.49’da verilen optik mikroskop görüntüsünde de benzer şekilde matris malzeme ile cam elyafın eş zamanlı hasar gelişimi görülmektedir. Bununla birlikte, epoksi matriks malzeme hasarı çok daha net görülebilmektedir. Cam elyafların matriks malzemeden ayrılması esnasında hasar başlangıcı görülmekle birlikte bariz bir hasar gelişimi gözlemlenmemiştir.



Şekil 7.49. %1 oranda ÇCKNT takviyeli Nano-elyaf keçe içeren bir numunenin hasar görmüş yüzeyinin optik mikroskop görüntüsü ve Matriks malzeme hasarı ve Matriks malzeme (Epoksi) – Cam elyaf ayrılması hasar gelişimleri (100X)

Şekil 7.50’de verilen görüntüde üretim esnasında oluşmuş hava boşluğunun matriks malzeme hasarını tetiklediği anlaşılmaktadır. Ancak, numunelerde az miktarda gözlemlenen hava boşluklarının kompozit malzemenin dayanımına olumsuz etkisinin çok sınırlı olduğu görülmüştür. Sonuç itibariyle, üretim hatalarından kaynaklanan kusurların numunelerin geneline bakıldığında ihmal edilebilir seviyelerde olduğu ve üretim kalitesinin yeterli derecede iyi elde edildiği anlaşılmaktadır.



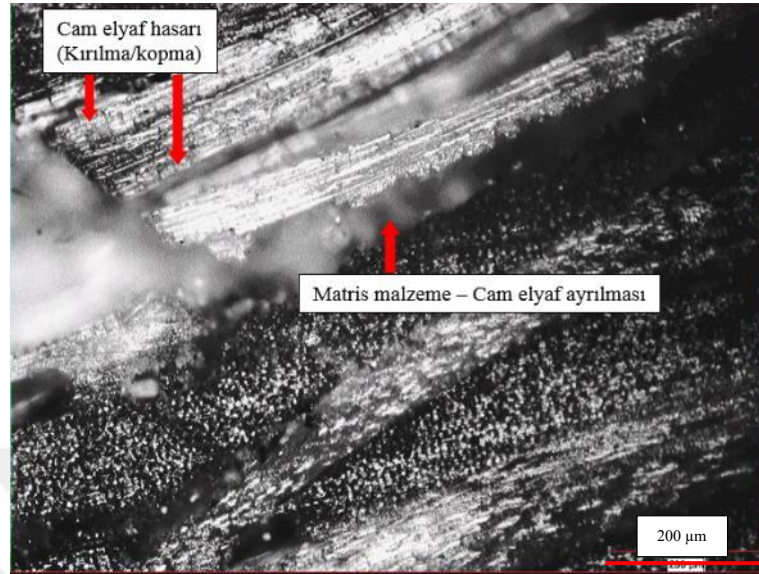
Şekil 7.50. %3 oranda ÇCKNT takviyeli Nano-elyaf keçe içeren bir numunenin hasar görmüş yüzeyinin optik mikroskop görüntüsü ve Matris malzeme hasarı ve Matris malzeme (Epoksi) – Cam elyaf ayrılması hasar gelişimleri (100X)

Şekil 7.51’de verilen görüntüde %1 oranda ÇCKNT takviyeli nanoelyaf keçe içeren bir numunenin darbe merkezinden geçen kırılmaya ait kısmın optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Burada, cam elyafın hasar gelişimi çok net bir biçimde görülebilmektedir. Bu bölgede gelişen hasarın nedeni, DHD esnasında maruz kalınan darbenin büyüklüğünün de etkisiyle zayıflayan darbe merkezinin DSB testleri esnasında merkezden geçen bir hasar gelişimi ile tam olarak deforme olması olarak açıklanabilir.



Şekil 7.51. %1 oranda ÇCKNT takviyeli Nano-elyaf keçe içeren bir numunenin darbe merkezinden geçen kırılmaya ait kısmın optik mikroskop görüntüsü ve Cam elyafın hasar gelişimi (100X)

Benzer şekilde gelişen bir hasara uğrayan Şekil 7.52’de verilen PVA nanoelyaf keçe içeren numunede cam elyaf hasarına (kırılma/kopma) ve eş zamanlı olarak matriks malzeme hasar gelişimi gözlemlenmiştir.



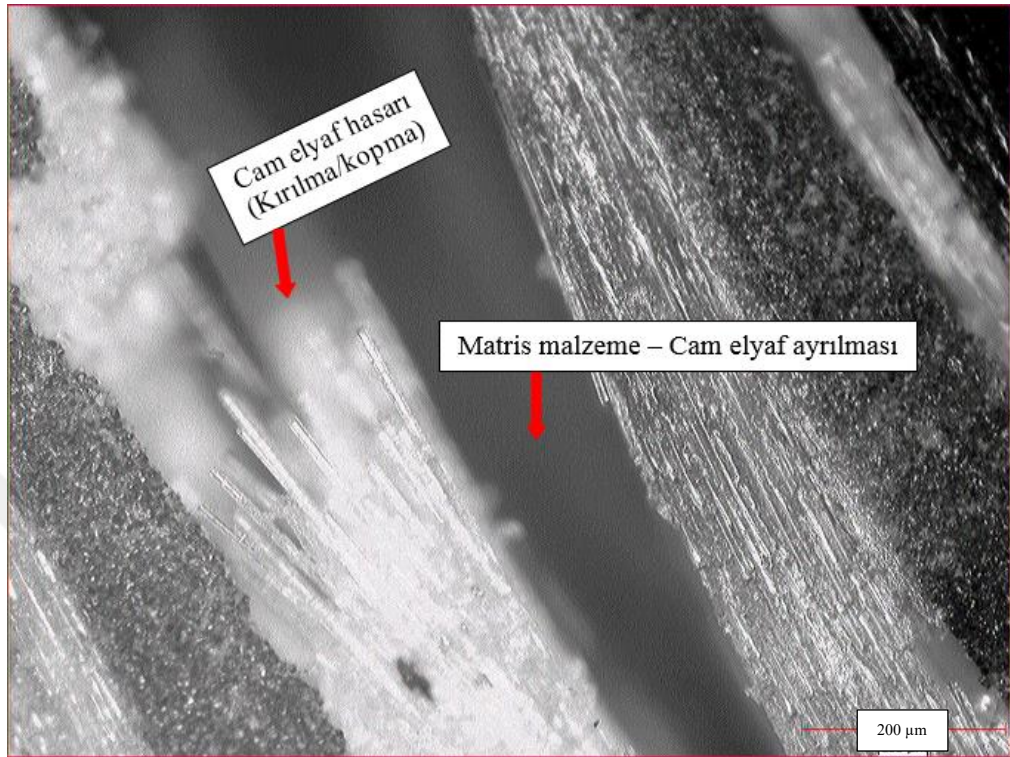
Şekil 7.52. PVA Nano-elyaf keçe içeren bir numunede Cam Elyaf Hasarına (kırılma/kopma) ve matriks malzemede hasar gelişimine ait optik mikroskop görüntüsü (100X)

Şekil 7.53’de verilen PVA nanoelyaf keçe içeren numuneye ait optik mikroskop görüntüsü incelendiğinde, cam elyaf hasarı (kırılma/ kopma/ saçaklanma) gelişimi net bir biçimde görülmektedir. Bu hasarın nedeni, DSB yüklerine maruz kalan numunenin ani bir biçimde hasara uğraması olarak tahmin edilmektedir. Kırılma, kopma ve saçaklanma gelişimi görülen cam elyafın hasarın geliştiği bölgede olması nedeniyle aşırı derecede deforme olduğu anlaşılmaktadır.

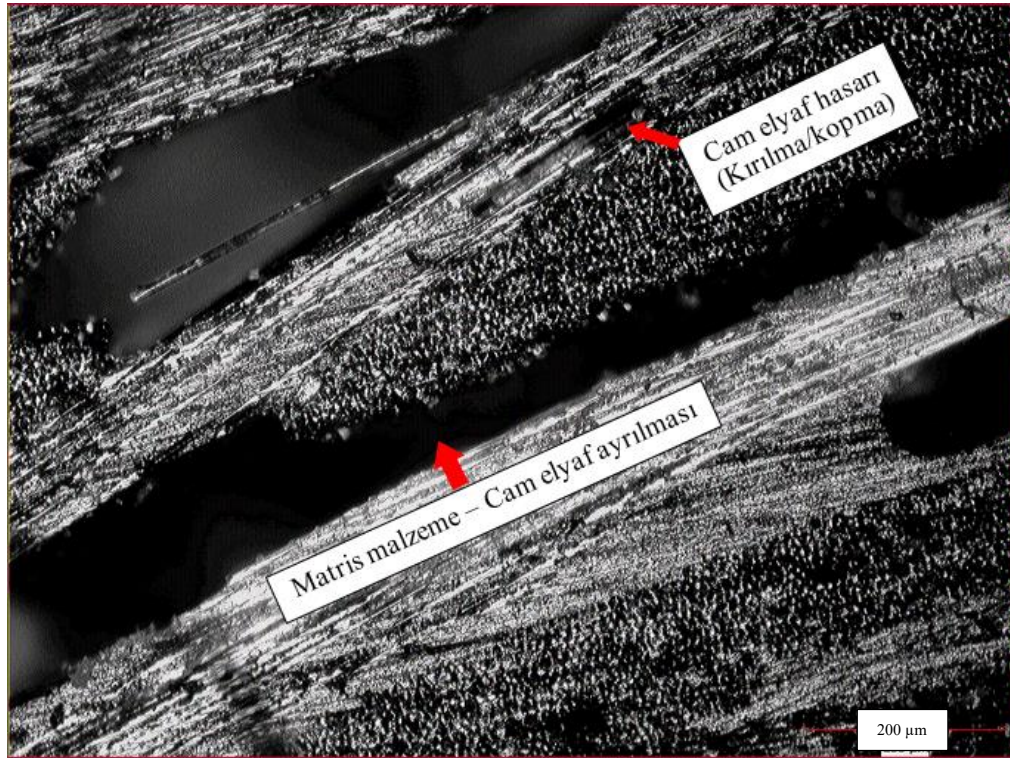


Şekil 7.53. PVA Nano-elyaf keçe içeren bir numunede Cam Elyaf Hasarı (kırılma/ kopma/ saçaklanma) ve Delaminasyon hasar gelişimine ait optik mikroskop görüntüsü (100X)

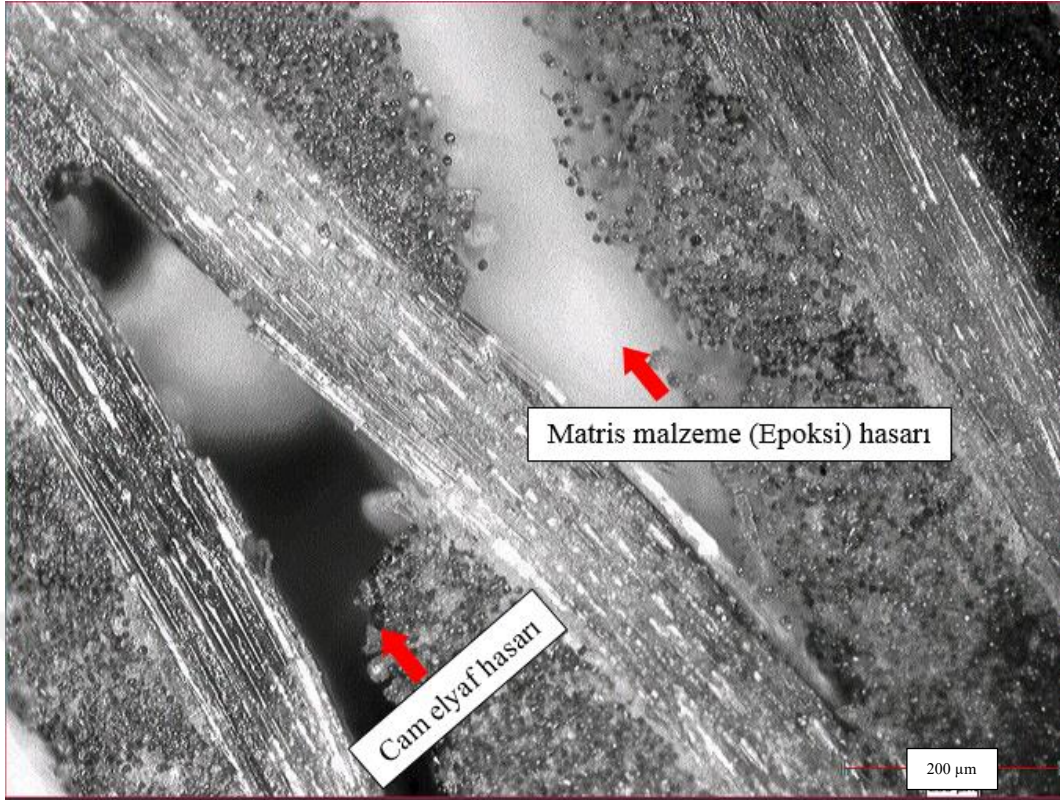
Şekil 7.54 ve Şekil 7.57 arasında verilmiş olan görüntülerde de benzer hasar gelişimleri net bir biçimde görülebilmektedir.



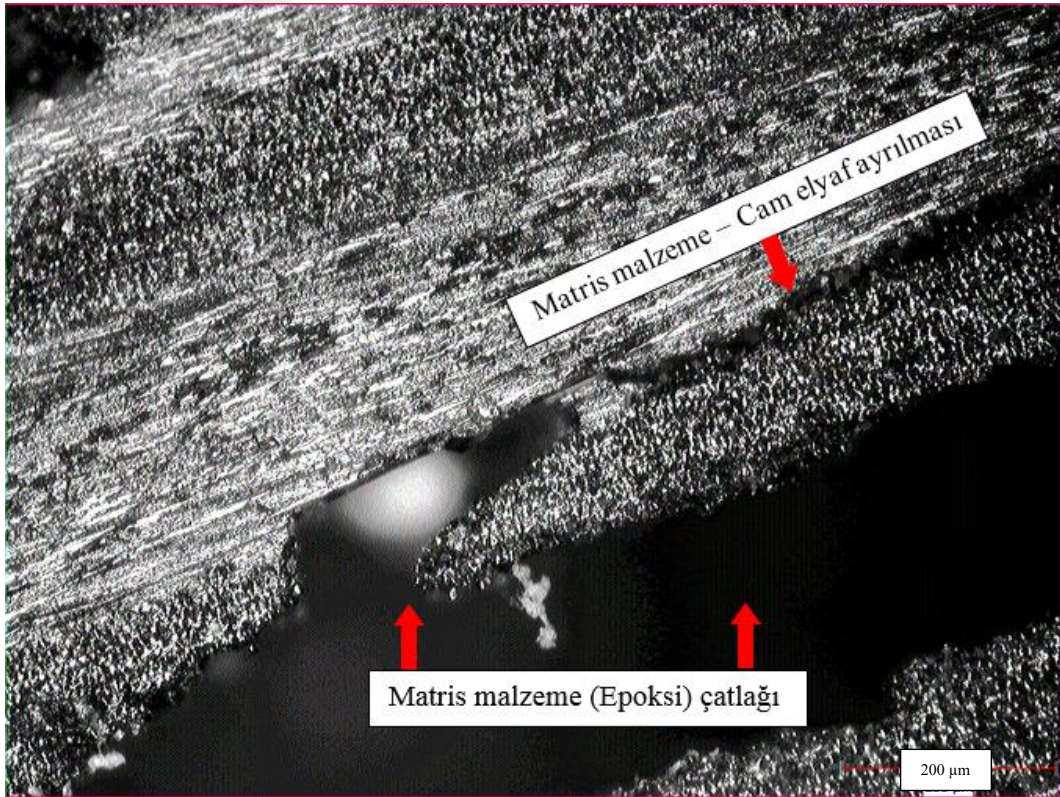
Şekil 7.54. %2 oranda ÇCKNT takviyeli Nano-elyaf keçe içeren bir numunenede ve cam elyafın hasar gelişimi (kırılma/kopma) optik mikroskop görüntüsü (100X)



Şekil 7.55. %2 oranda ÇCKNT takviyeli Nano-elyaf keçe içeren bir numunenede cam elyafın hasar (kırılma/kopma) ve delaminasyon gelişimi optik mikroskop görüntüsü (100X)



Şekil 7.56. %2 oranda ÇCKNT takviyeli Nano-elyaf keçe içeren bir numunenin hasar görmüş yüzeyinin optik mikroskop görüntüsü ve Matris malzeme (Epoksi) ve Cam elyaf hasarı (100X)



Şekil 7.57. %2 oranda ÇCKNT takviyeli Nano-elyaf keçe içeren bir numunenin hasar görmüş yüzeyinin optik mikroskop görüntüsü ve Matris malzeme hasarı ve Matris malzeme (Epoksi) - Cam elyaf ayrılması hasar gelişimleri (100X)

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmalarımızda, oda sıcaklığında elektro-eğirme yöntemiyle üretilmiş farklı oranlarda (ağırlıkça %1, %2 ve %3) Çok Cidarlı Karbon Nanotüp (ÇCKNT) takviyeli Polivinil Alkol (PVA) nano keçe ve cam elyaf içeren epoksi matrisli kompozit levhaların üretimi yapılarak kompozit yapıların mekanik özellikleri ve kırılma davranışları standart mekanik deneyler yardımıyla tayin edilmiştir. Testler sonucunda kompozit levhaların mekanik davranışları incelenmiş ve mukavemet değerleri belirlenerek elde edilen sonuçlar mukayese edilmiştir.

Üretimi yapılan kompozit levhaların her birinin davranışı yapılan testler yardımıyla incelenmiş ve mukavemet değerleri belirlenerek elde edilen sonuçlar hem ÇCKNT takviyeli PVA nano keçe barındırmayan kompozit levhaların davranışlarıyla hem de farklı oranlarda ÇCKNT içeren kompozit levhaların mukavemet değerleri ile kendi aralarında kıyaslanarak karşılaştırılması yapılmıştır.

Hedeflenen amaçlar doğrultusunda, üretilen kompozit levhaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için standartlara uygun boyutlarda kesilerek sabit yük altında gerçekleştirilen testler;

1. ASTM D 3039 standardına uygun olarak Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler için “Çekme Testi”,
2. Darbe öncesinde ve farklı hızlarda darbelerle maruz kalmış halde olmak üzere, darbenin malzemenin eğilme mukavemetine etkisini görmek amacıyla tekrarlanan ASTM D 7264’e uygun olarak “Üç Noktadan Eğilme Testi”,
3. Farklı hızlarda (1.5, 2, 2.5 ve 3 m/sn hızlarında) darbelerin malzemede oluşturacağı hasarları incelemek amacıyla yapılmış olan ASTM D 7136’ya uygun olarak “Düşük Hızda Darbe Testi”,
4. Farklı hızlarda darbelerle maruz kalmış numunelerimizin basma dayanımlarını ve oluşacak olan hasar mekanizmalarını incelemek üzere yapılan ASTM D 7137’ye uygun olarak “Darbe Sonrası Basma Testi”

gibi mekanik testlerden oluşmaktadır.

Üç Noktadan Eğilme Testi ile elde edilen veriler, grafikler ve tablolar incelendiğinde farklı hızlardaki darbelerin numunenin eğilme rijitliğine etkileri sınırlı kalmıştır. Beklendiği üzere, artan darbe hızlarıyla numunelerde oluşan hasar büyüklüğüne bağlı olarak belirli derecede (ortalama %5-6 aralığında) mukavemet düşüşü görülmekle birlikte bu düşüş oldukça düşük seviyelerdedir. Numunelerin merkezlerinde

oluşturulan hasar numunenin eğilme direncinde önemli miktarda bir etkide bulunmamaktadır. Buradan, hasarın lokal olması dolayısıyla ve numunenin kalanına herhangi bir ciddi deformasyon etkisi oluşturmaması nedeniyle eğilme mukavemeti değerlerinde ihmal edilebilir derecede azalma meydana getirdiği sonucuna varılmıştır.

Ancak, kompozit levha kalınlığının nispeten fazla olduğu %2 oranında ÇCKNT içeren numuneler için durumun farklı olduğu gözlemlenmiştir. Test sonuçlarından alınan verilerden, 3 m/sn hızında darbelere maruz kalan numunelerde ortalama %12 mukavemet düşüşü (13.9 GPa'dan 12.2 GPa değerine) olduğu tespit edilmiştir. Mukavemet kaybının temel nedeni numunelerde delaminasyon (tabakalar arası ayrılma) meydana gelmesi olarak yorumlanmıştır. Bununla birlikte, diğer test sonuçlarında da karşılaşıldığı üzere, malzemenin rijitlik değerindeki bu düşüşün büyük ölçüde darbe testinde ya da eğme testleri esnasında uygulanan yüklerden bağımsız olup doğrudan kalınlığa bağlı olarak gelişen bir durumdan kaynaklandığı anlaşılmıştır.

Düşük Hızda Darbe Testi sonuçları incelendiğinde, beklendiği üzere darbe hızlarındaki artışın numuneler üzerinde oluşan hasar büyüklüklerinde (alan, mm²) darbe hızlarına ve dolayısıyla numunelere aktarılan darbe enerjisine bağlı olarak eksponansiyel artışlara neden olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerin ön yüzeylerinde yine darbe hızlarının büyüklüğüne bağlı olarak matriks hasarları ve delaminasyon miktarlarında artış görülmüştür. Numunelerin arka yüzeylerinde ise yalnızca matriks hasarlarının geliştiği saptanmıştır.

PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numuneler için elde edilen test sonuçlarında maksimum kuvvetin diğer numunelere göre ortalama %20 fazla olduğu ve aynı zamanda etkileşim süresinin de yaklaşık olarak %30 daha kısa gerçekleştiği gözlemlenmiştir. PVA nanoelyaf keçe takviyesiz numuneler dışındaki numuneler için gerçekleştirilen darbe testlerinden elde edilen sonuçlar kıyaslandığında gerek etkileşim sürelerinin gerekse reaksiyon kuvvetlerinin birbirine oldukça yakın değerlerde elde edildiği anlaşılmaktadır.

Bu sonuçlara göre, tabakalı kompozit yapıya ilave edilen nano elyaf keçe takviyesinin darbe testi esnasında uygulanan kuvvetin etkileşim süresini artırarak darbe enerjisinin daha uzun sürede absorbe edilmesine katkı sağladığı ve dolayısıyla elde edilen maksimum kuvvetin de sınırlandırılmasında etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, nano elyaf keçe takviyesinin tabakalar arası yapışma/birleşme/tutunma özellikleri üzerinde olumlu etkilerde bulunmasıdır.

Numunelerin tarafsız ekseninin tam merkezine yerleştirilen takviye elemanının tabakalar arası tutunma kuvvetini ve aynı zamanda yüzeyler arası sürtünme kuvvetini önemli derecede artırdığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla, nano keçelerin darbe enerjisinin sönmelenmesinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Ancak, nano elyaf keçelerin ihtiva ettiği farklı oranlarda karbon nanotüp içeriğinin etkisi tespit edilememiştir. Bunun nedeni, KNT'lerin tabakalar arası bağlantı (yapışma/tutunma) özelliklerinin güçlendirilmesinde ihmal edilebilir derecede düşük seviyede etkiler oluşturduğu anlaşılmıştır.

Kompozit yapıya eklenen nano elyaf keçe takviyesi genel olarak tabakalar arasında oluşturulan bağlanma mekanizması üzerinde iyileştirici etkiler meydana getirmiştir. Bunun temel nedeni, darbe testi esnasında uygulanan kuvvetin etkileşim süresinin uzatılarak darbe enerjisinin daha yavaş bir şekilde sönmelenmesine neden olduğu ile açıklanabilir. Dolayısıyla, nano keçelerin darbe enerjisinin absorbe edilmesinde oldukça etkili olduğu anlaşılmıştır. Bununla birlikte, nano elyaf keçelerin ihtiva ettiği farklı oranlarda karbon nanotüp içeriğinin etkisinin sınırlı düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç itibariyle, nano keçelerin darbe enerjisinin absorbe edilmesinde belirli bir dereceye kadar etkili olduğu, bununla birlikte yüksek hızlarda uygulanan darbelere maruz kalan numuneler için hissedilir derecede olumlu bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Numunelere uygulanan darbenin hızındaki artış belirli bir limit değere ulaştığında numunenin reaksiyon hızında belirgin bir artış oluşmamaktadır.

Ancak nano keçelerin darbelerin numunelerin arka yüzüne aktarılmasının büyük oranda önüne geçtiği ve dolayısıyla arka yüzeyde gelişen hasarın minimize edilmesinde etkili olduğu net bir biçimde tespit edilmiştir.

Darbe Sonrası Basma Testinden elde edilen sonuçlar analiz edildiğinde, testler esnasında numune üzerinde oluşan gerilmelerin tüm numuneler için benzer olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, hasar öncesi şekil değişim değerleri verilerin birbirine çok yakın değerlerde olmadığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla, numunelerin şekil değiştirme (kısalma) miktarında gerilmelere bağlı bir uyum gözlemlenmemiştir.

Ancak, numunelere uygulanan farklı hızlardaki darbe testleri sonucunda gözlemlenen şekil değişim miktarlarındaki farklılıklar bulunduğu görülmüştür. Darbe hızlarındaki artış şekil değişimi üzerinde negatif etkide bulunmuş ve numunelerin şekil

değişimi ile ters orantılı olarak etki gösterdiği anlaşılmıştır. Ağırlıkça %2 ÇCKNT içeren numuneler için de ifade edilen, gerilme değerlerinin değişen darbe hızlarına göre etkisi sınırlı kalmıştır.

Tüm bu yapılan testler ve analizler sonrasında, farklı oranlardaki ÇCKNT takviyeli PVA nanoelyaf keçelerin malzemenin mekanik özelliklerin iyileştirilmesi açısından ne tür etkiler gösterdiği anlaşılmıştır.

Sonuç olarak, farklı miktarlarda ÇCKNT içeren nanoelyaf keçe takviyeli kompozit levhalar ile hiç nanoelyaf keçe içermeyen numuneler için elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmış ve PVA nanoelyaf keçe takviyesinin etkinliği ve ÇCKNT içeriğinin değişiminin kompozit numunelerin mekanik özelliklerine ne tür etkilerde bulunduğu tespit edilmiştir.

Bundan sonraki yapılacak olan çalışmalarda, farklı oryantasyonlarda kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin tayin edilerek alternatif oryantasyonların etkisiyle çalışmalarımızda alınan sonuçların kıyaslanması ve teyit edilmesi üzerine çalışmalar yapılabilir. Böylece, alternatif kompozit malzemeler geliştirme yolunda yeni yaklaşımlar geliştirilebilir.

KAYNAKÇA

- Aktaş, A., Aktaş, M. ve Turan, F., 2013, The effect of stacking sequence on the impact and post-impact behavior of woven/knit fabric glass/epoxy hybrid composites, *Composite Structures*, 103, 119-135.
- Aldajah, S., Alawsi, G. ve Rahmaan, S. A., 2009, Impact of sea and tap water exposure on the durability of GFRP laminates, *Materials & Design*, 30 (5), 1835-1840.
- Au - Leach, M. K., Au - Feng, Z.-Q., Au - Tuck, S. J. ve Au - Corey, J. M., 2011, Electrospinning Fundamentals: Optimizing Solution and Apparatus Parameters, *JoVE* (47), e2494.
- Bauer, F., Decker, U., Ernst, H., Findeisen, M., Langguth, H., Mehnert, R., Sauerland, V. ve Hinterwaldner, R., 2006, Functionalized inorganic/organic nanocomposites as new basic raw materials for adhesives and sealants Part 2, p.
- Bordes, M., Davies, P., Cognard, J.-Y., Sohier, L., Sauvart-Moynot, V. ve Galy, J., 2009, Prediction of long term strength of adhesively bonded steel/epoxy joints in sea water, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29 (6), 595-608.
- Černý, I. ve Mayer, R. M., 2010, Evaluation of static and fatigue strength of long fiber GRP composite material considering moisture effects, *Composite Structures*, 92 (9), 2035-2038.
- Daelemans, L., Cohades, A., Meireman, T., Beckx, J., Spronk, S., Kersemans, M., De Baere, I., Rahier, H., Michaud, V., Van Paepegem, W. ve De Clerck, K., 2018, Electrospun nanofibrous interleaves for improved low velocity impact resistance of glass fibre reinforced composite laminates, *Materials & Design*, 141, 170-184.
- Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G. ve Saito, R., 1995, Physics of carbon nanotubes, *Carbon*, 33 (7), 883-891.
- Ekrem, M., 2017, Mechanical properties of MWCNT Reinforced polyvinyl alcohol nanofiber mats by electrospinning method, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 4 (2), 190-200.
- Geng, Y., Liu, M. Y., Li, J., Shi, X. M. ve Kim, J. K., 2008, Effects of surfactant treatment on mechanical and electrical properties of CNT/epoxy nanocomposites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39 (12), 1876-1883.
- Haynes, R. A. B., Steven E ; Lawrence, Bradley D, 2016, Compression After Impact and Bend Fatigue Results of Glass/Epoxy Composites with Compliant Interlayer and Needling Interlaminar Enhancements.
- Hirsch, A., 2002, Functionalization of single-walled carbon nanotubes, *Angewandte Chemie International Edition*, 41 (11), 1853-1859.
- Iijima, S., 1991, Helical Microtubes of Graphite Carbon, p.
- Ismail, K. I., Sultan, M. T. H., Shah, A. U. M., Jawaid, M. ve Safri, S. N. A., 2019, Low velocity impact and compression after impact properties of hybrid bio-composites modified with multi-walled carbon nanotubes, *Composites Part B: Engineering*, 163, 455-463.
- Jindal, P., Sain, M. ve Kumar, N., 2015, Mechanical Characterization of PMMA/MWCNT Composites Under Static and Dynamic Loading Conditions, p.
- K Leach, M., Feng, Z.-Q., Tuck, S. ve M Corey, J., 2011, Electrospinning Fundamentals: Optimizing Solution and Apparatus Parameters, p.
- Kasaliwal, G. R., Villmow, T., Pegel, S. ve Pötschke, P., 2011, 4 - Influence of material and processing parameters on carbon nanotube dispersion in polymer melts, In: Polymer-Carbon Nanotube Composites, Eds: McNally, T. ve Pötschke, P.: Woodhead Publishing, p. 92-132.

- Ke, K., Wang, Y., Luo, Y., Yang, W., Xie, B.-H. ve Yang, M.-B., 2012, Evolution of agglomerate structure of carbon nanotubes in multi-walled carbon nanotubes/polymer composite melt: A rheo-electrical study, *Composites Part B: Engineering*, 43 (8), 3281-3287.
- Kotnarowska, D., 2010, Epoxy coating destruction as a result of sulphuric acid aqueous solution action, *Progress in Organic Coatings*, 67 (3), 324-328.
- Li, Y., Moon, K.-s. J. ve Wong, C., 2010, Nano-conductive adhesives for nano-electronics interconnection, In: Nano-bio-electronic, Photonic and MEMS Packaging, Eds: Springer, p. 19-45.
- Lionetto, F., Calò, E., Di Benedetto, F., Pisignano, D. ve Maffezzoli, A., 2014, A methodology to orient carbon nanotubes in a thermosetting matrix, *Composites Science and Technology*, 96, 47-55.
- Loos, M., 2015a, Processing of Polymer Matrix Composites Containing CNTs, In, Eds, p. 171-188.
- Loos, M., 2015b, Chapter 7 - Applications of CNTs, In: Carbon Nanotube Reinforced Composites, Eds: Loos, M., Oxford: William Andrew Publishing, p. 189-205.
- Loos, M. R. ve Manas-Zloczower, I., 2015, Chapter 9 - Reinforcement Efficiency of Carbon Nanotubes—Myth and Reality, In: Carbon Nanotube Reinforced Composites, Eds: Loos, M., Oxford: William Andrew Publishing, p. 233-246.
- Lu, K., Lago, R., Chen, Y., Green, M., Harris, P. ve Tsang, S., 1996, Mechanical damage of carbon nanotubes by ultrasound, *Carbon*, 34 (6).
- Ma, P.-C., Siddiqui, N. A., Marom, G. ve Kim, J.-K., 2010, Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: a review, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41 (10), 1345-1367.
- Ma, P., Liu, M., Kim, J. ve Tang, B., 2009, Development of electrically conducting nanocomposites by employing hybrid fillers of carbon nanotubes and carbon black, *ACS Appl Mater Interfaces*, 1, 1090-1096.
- Mukhopadhyay, K., Dwivedi, C. D. ve Mathur, G. N., 2002, Conversion of carbon nanotubes to carbon nanofibers by sonication, *Carbon*, 8 (40), 1373-1376.
- Petrie, E. M., 2013, Adhesives in the Marine Industry, *Metal Finishing*, 6 (111), 47-49.
- Poodts, E., Minak, G. ve Zucchelli, A., 2013, Impact of sea-water on the quasi static and fatigue flexural properties of GFRP, *Composite Structures*, 97, 222-230.
- Ravari, F., Omrani, A., Rostami, A. A. ve Ehsani, M., 2012, Ageing effects on electrical, morphological, and mechanical properties of a low viscosity epoxy nanocomposite, *Polymer Degradation and Stability*, 97 (6), 929-935.
- Richardson, M. O. W. ve Wisheart, M. J., 1996, Review of low-velocity impact properties of composite materials, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 27 (12), 1123-1131.
- S. Jeong, J., S. Moon, J., Jeon, S.-Y., H. Park, J., Alegaonkar, P. S. ve B. Yoo, J., 2007, Mechanical properties of electrospun PVA/MWNTs composite nanofibers, p.
- Safri, S., Sultan, M. T. H., Yidris, N. ve Mustapha, F., 2014, Low velocity and high velocity impact test on composite materials - A review, p.
- Safri, S. N. A. B., Sultan, M. T. H. ve Jawaid, M., 2019, 7 - Damage analysis of glass fiber reinforced composites, In: Durability and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites, Eds: Jawaid, M., Thariq, M. ve Saba, N.: Woodhead Publishing, p. 133-147.
- Sancaktar, E. ve Kuznicki, J., 2011, Nanocomposite adhesives: mechanical behavior with nanoclay, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31 (5), 286-300.

- Sandler, J., Shaffer, M., Prasse, T., Bauhofer, W., Schulte, K. ve Windle, A., 1999, Development of a dispersion process for carbon nanotubes in an epoxy matrix and the resulting electrical properties, *Polymer*, 40 (21), 5967-5971.
- Schrand, A. M. ve Tolle, T. B., 2006, Chapter 18 - Carbon nanotube and epoxy composites for military applications, In: Carbon Nanotechnology, Eds: Dai, L., Amsterdam: Elsevier, p. 633-675.
- Sousa, J., Correia, J., Gonilha, J., Cabral-Fonseca, S., Firmo, J. ve Keller, T., 2018, Durability of adhesively bonded joints between pultruded GFRP adherends under hygrothermal and natural ageing, p.
- Teo, W.-E. ve Ramakrishna, S., 2009, Electrospun nanofibers as a platform for multifunctional, hierarchically organized nanocomposite, *Composites Science and Technology*, 69 (11-12), 1804-1817.
- Thodsaratpreeyakul, W., Uawongsuwan, P., Kataoka, A., Negoro, T., Inoya, H. ve Hamada, H., 2018, Damage behavior of low velocity impact test on glass fiber reinforced poly (ethylene terephthalate) composites, *Materials Today: Proceedings*, 5 (3, Part 2), 9569-9578.
- Thostenson, E. T., Ren, Z. ve Chou, T.-W., 2001, Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review, *Composites Science and Technology*, 61 (13), 1899-1912.
- Thostenson, E. T. ve Chou, T.-W., 2006, Processing-structure-multi-functional property relationship in carbon nanotube/epoxy composites, *Carbon*, 44 (14), 3022-3029.
- Turgunov, M. A., Oh Oh, J. ve Ho Yoon, S., 2014, Surface Modification of Multiwall Carbon Nanotubes by Sulfuric Acid and Nitric Acid, p.
- Uyar, T., Balan, A., Toppare, L. ve Besenbacher, F., 2009, Electrospinning of cyclodextrin functionalized poly(methyl methacrylate) (PMMA) nanofibers, *Polymer*, 50 (2), 475-480.
- Varelidis, P., Kominos, N. ve Papaspyrides, C., 1998, Polyamide coated glass fabric in polyester resin: interlaminar shear strength versus moisture absorption studies, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 29 (12), 1489-1499.
- Vipulanandan, C. ve Liu, J., 2002, Glass-fiber mat-reinforced epoxy coating for concrete in sulfuric acid environment, *Cement and Concrete Research*, 32 (2), 205-210.
- Watson, K. A. ve Connell, J. W., 2006, Chapter 19 - Polymer and carbon nanotube composites for space applications, In: Carbon Nanotechnology, Eds: Dai, L., Amsterdam: Elsevier, p. 677-698.
- Xin, B.-J. ve Chen, W., 2015, Morphology, Structure and Properties of Electrospun Multi-Walled Carbon Nanotube/Polysulfonamide Composite Nanofibers, p.
- Zhai, L. L., Ling, G. P. ve Wang, Y. W., 2008, Effect of nano-Al₂O₃ on adhesion strength of epoxy adhesive and steel, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28 (1), 23-28.
- Zhang, F., Yang, X., Xia, Y., Zhou, Q., Wang, H.-P. ve Yu, T.-X., 2015a, Experimental study of strain rate effects on the strength of adhesively bonded joints after hygrothermal exposure, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 56, 3-12.
- Zhang, T., Yan, Y., Li, J. ve Luo, H., 2015b, Low-velocity impact of honeycomb sandwich composite plates, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35 (1), 8-32.
- Zhou, W. P., wu, Y., Wei, F., Luo, G. H. ve Qian, W. Z., 2005, Elastic deformation of multiwalled carbon nanotubes in electrospun MWCNTs-PEO and MWCNTs-PVA nanofibers, p.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : ÜNAL ÖZTEN
Uyruğu : T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi : ÇORUM / 1984
Telefon : 0541 361 7750
Faks :
E-Posta : unalozten@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı	İlçe	İl	Bitirme Yılı
Lise	: 75. YIL Y.D.A LİSESİ /	ÇANKAYA /	ANKARA	2002
Üniversite	: SELÇUK ÜNİVERSİTESİ /	SELÇUKLU /	KONYA	2007
Yüksek Lisans	: TEKSAS A&M ÜNİVERSİTESİ /	TEKSAS /	ABD	2010
Doktora	:			

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2010 – Devam	TÜRKİYE PETROLLERİ A.O.	Makine Mühendisi

UZMANLIK ALANI

Açık Deniz Petrol ve Doğal Gaz Platformlarının Tasarım, İmalat ve Yerleştirilmesi
 Yüzeç Üretim Tesislerinin Tasarım ve İmalatı
 Üretim Sahalarının İşletilmesi ve Optimizasyonu
 Ham Petrol Üretimi ve Taşıılması

YABANCI DİLLER

İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR*

Production Optimization and Morphology Analysis of MWCNT Reinforced Poly
 Methyl Methacrylate (PMMA) Nanofibers by Electrospinning