

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**NANO KARBON PARTİKÜL İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ  
KOMPOZİT LEVHA ÜRETİMİ VE DARBE DAVRANIŞININ  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**NECATİ ÜZÜMCÜ**

**DENİZLİ, 2017**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**NANO KARBON PARTİKÜL İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ  
KOMPOZİT LEVHA ÜRETİMİ VE DARBE DAVRANIŞININ  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**NECATİ ÜZÜMCÜ**

**DENİZLİ, 2017**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

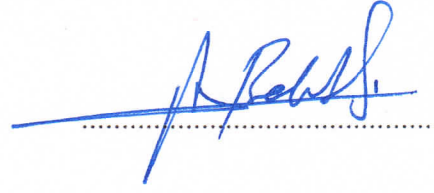
NECATİ ÜZÜMCÜ tarafından hazırlanan “Nano Karbon Partikül ile Güçlendirilmiş Kompozit Levha Üretimi ve Darbe Davranışının İncelenmesi” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 28.06.2017 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

**Prof. Dr. Numan Behlül BEKTAŞ**



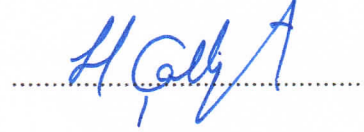
Üye

**Prof. Dr. Osman ASİ**

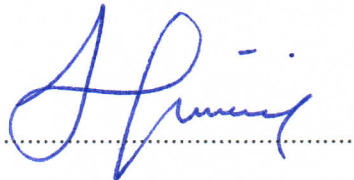


Üye

**Prof. Dr. Hasan ÇALLIOĞLU**



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 05.07/2017. tarih ve 26/17.... sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**



**NECATİ ÜZÜMCÜ**

## ÖZET

**NANO KARBON PARTİKÜL İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ KOMPOZİT  
LEVHA ÜRETİMİ VE DARBE DAVRANIŞININ İNCELENMESİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
NECATİ ÜZÜMCÜ  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. NUMAN BEHLÜL BEKTAŞ)**

**DENİZLİ, 2017**

Bu çalışma kapsamında farklı oranlarda Çoğul Duvarlı Karbon Nanotüp (ÇDKNT) katkılı woven örgülü cam elyaf takviyeli kompozit plakaların üretimi yapılmış ve darbe davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Matris malzemesi olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Nano Karbon etkisini daha iyi araştırmak amacıyla üç farklı nano karbon oranı (0,5-1-2 %) katkısı yapılarak üretilen numuneler katkısız olan numunelerle karşılaştırılmıştır. Deneysel olarak kullanılan tüm numuneler reçine emdirmeye (prepreg) yöntemi kullanılarak Fibermak Mühendislik Makina Kalıp Kompozit Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti.'de üretilmiştir. Üretilen kompozit deney numunelerinin darbe testleri Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Mekanik Araştırmalar Laboratuvarında bulunan Instron marka Dynatup 9250 model numaralı ağırlık düşürme tipi deney cihazında yapılmıştır.

Yapılan testler sonucu kompozit numunelerin darbe karakteristiğine ait birçok grafik elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda kritik enerji seviyesi tanımlanmıştır. Bu enerji seviyesinin altında ve üstünde kompozit numuneler farklı darbe karakteristikleri göstermişlerdir. Bu enerji seviyesinin altında nano karbon katkısının numunelerin mukavemetini arttırdığı ve eğilme rijitliğini pozitif yönde etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca, absorbe ettiği enerjileri kıyaslayacak olursak nano karbon katkılı numunelerin daha fazla enerjiyi absorbe ettiği tespit edilmiştir. Ayrıca kompozitlerin saplanma ve delinme hasar değerleri EPD (Enerji Profili Diyagramı) kullanılarak tespit edilmiştir. Buna ek olarak yapılan darbe testleri sonucu kompozit numunelerde oluşan hasar mekanizmaları incelenmiştir. Kritik enerji seviyelerinin altında nano karbon katkılı olan numunelerde katkısız olan numuneye kıyasla daha az hasar meydana geldiği ve vurucu iz çapının da daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak nano karbon katkılı kompozit levhaların düşük darbe enerji seviyelerinde katkısız olan numuneye göre daha rijit bir yapı olduğu saptanmıştır.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Karbon nanotüpler, Darbe davranışı, Kompozit plaklar, Hasar mekanizması

## **ABSTRACT**

**MANUFACTURING OF COMPOSITE PLATE STRENGTHENED WITH  
NANO CARBON PARTICLE AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION  
OF IMPACT BEHAVIOURS  
MASTER SCIENCE THESIS  
NECATİ ÜZÜMCÜ  
PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
MECHANICAL ENGINEERING  
(SUPERVISOR:PROF. DR. NUMAN BEHLÜL BEKTAŞ)**

**DENİZLİ, 2017**

In this study, woven glass fiber reinforced composite plates with multiple walled carbon nanotube (MWCNT) added at different ratios were produced and the impact behaviour was experimentally investigated. In this scope, three different doped rates (0.5-1-2 % wt.) and three different thicknesses were considered. In order to determine the effect of the carbon nanotube more clearly, the composite specimens were also produced as undoped. All the specimens used in the experiments were manufactured and prepared by fiber impregnation (prepreg) method using Fibermak Engineering Machine Mold Composite Industry and Trade Ltd. Co. Impact tests of the composite test specimens produced were carried out on the weight drop type test machine with Dynatup 9250 model number of Instron brand which is located in Mechanical Engineering Laboratory of Mechanical Engineering Department of Engineering Faculty of Pamukkale University.

As a result of the tests, many graphs about impact characteristics of composite specimens were obtained. The critical energy level is defined in the evaluation of the obtained results. Below this energy level, it was found that the nano-carbon contribution increase the strength of the specimens and affected the bending stiffness in the positive way. Moreover, when compared to the absorbed energy, they were found that nanocarbon doped samples absorbed more energy than the others. In addition, the penetration and perforation damage values of composites were determined using EPD (Energy Profile Diagram). In addition, the damage mechanisms of composite specimens after impact tests have been investigated. In the experiments under critical energy levels, it was found that the nano-carbon doped specimens had less damage than the undoped specimens. In addition, it has been found also that the diameter of the strike tip on the traces left on the specimens is smaller. As a result, it was determined that nano carbon doped composite plates have more rigid structure than the undoped specimens at low impact energy levels.

**KEYWORDS:** Carbon nanotubes, Impact behaviour, Composite plates, Damage mechanism

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>SEMBOL ve KISALTMALAR LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1    Literatür Özeti .....	2
<b>2. KOMPOZİT MALZEMELER</b> .....	<b>6</b>
2.1    Kompozit Malzemelerin Tanımı .....	6
2.2    Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri ve Kullanım Alanları .....	7
2.3    Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması .....	8
2.3.1    Matris Malzemesine Göre .....	8
2.3.1.1    Metal Matrisli Kompozit Malzemeler (MMK) .....	9
2.3.1.2    Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler (PMK) .....	10
2.3.1.3    Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler (SMK) .....	10
2.3.2    Takviye Elemanına Göre .....	11
2.3.2.1    Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	11
2.3.2.2    Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	12
2.3.2.3    Tabakalı Kompozit Malzemeler.....	12
2.3.2.4    Dolgu Kompozit Malzemeler.....	13
2.4    Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri .....	13
2.4.1    El Yatırma Metodu .....	13
2.4.2    Püskürtme Yöntemi .....	14
2.4.3    Vakum Yardımlı Reçine Transfer Metodu (RTM).....	15
2.4.4    Elyaf Sarma Metodu .....	16
<b>3. KOMPOZİT MALZEMELERİN DARBE DAVRANIŞI</b> .....	<b>17</b>
3.1    Kompozit Malzemelerin Darbe Testleri .....	17
3.1.1    Ağırlık Düşürme Metodu.....	17
3.1.2    Izod ve Charpy Sarkaç Metodu .....	18
3.1.3    Balistik Test Metodu.....	19
3.2    Darbe Testi Sonucu Elde Edilen Grafikler .....	19
3.2.1    Kuvvet-deplasman (çökme) grafiği (F-d) .....	19
3.2.2    Kuvvet-zaman grafiği (F-t).....	21
3.2.3    Absorbe edilen enerji-zaman grafiği (E-t) .....	22
3.2.4    Enerji Profili Diyagramı (EPD) .....	23
3.3    Darbe Testi Sonucunda Oluşan Hasar Mekanizmaları.....	24
3.3.1    Matris Kırılması .....	24
3.3.2    Tabakaların Ayrılması (Delaminasyon).....	25
3.3.3    Fiber Kırılmaları .....	26
<b>4. YÖNTEM</b> .....	<b>27</b>
4.1    Nano Karbon Katkılı Kompozit Levhaların Üretimi.....	27
4.2    Darbe Test Cihazı ve Özellikleri .....	32

4.3	Nano Karbon Katkılı Kompozit Numunelere Darbe Testinin Uygulanması.....	33
<b>5.</b>	<b>DENEY SONUÇLARI .....</b>	<b>35</b>
5.1	Darbe Enerjilerine Göre Sonuçların Karşılaştırılması.....	35
5.2	Katkısız ve Nano Karbon Katkılı numunelerin Kuvvet-Deplasman Eğrisine göre Karşılaştırılması .....	41
5.3	Enerji Profil Diyagramına Göre Karşılaştırma.....	43
5.4	Kompozitlerde Oluşan Hasar Mekanizmaları .....	45
<b>6.</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>52</b>
<b>7.</b>	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>54</b>
<b>8.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>58</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Kompozit malzemelerin sınıflandırılması. ....	8
Şekil 2.2: Takviye elemanına göre kompozit malzemeler. ....	11
Şekil 2.3: El yatırma metodu.....	14
Şekil 2.4: Püskürtme yöntemi. ....	15
Şekil 2.5: RTM üretim şeması .....	16
Şekil 2.6: Elyaf sarma prosesi.....	16
Şekil 3.1: Charpy ve Izod testlerinin şematik gösterimi. ....	18
Şekil 3.2: Kuvvet-Deplasman . ....	20
Şekil 3.3: Kuvvet-zaman .....	21
Şekil 3.4: Enerji-zaman.....	22
Şekil 3.5: Enerji profili diyagramı. ....	24
Şekil 3.6: Matris kırığının ilerlemesi. ....	25
Şekil 3.7: Tipik bir delaminasyon örneği.....	25
Şekil 4.1: Cam elyaf kumaşların ebatlandırılması. ....	28
Şekil 4.2: Nano karbon-epoksi reçine karışımının sonikasyon işlemi. ....	29
Şekil 4.3: Cam elyaflara el yatırma metodu ile reçinenin uygulanması. ....	29
Şekil 4.4: Kesilen kumaşların üst üste konulup pres altında levha üretimi. ....	30
Şekil 4.5: Presten çıkan ve üretimi tamamlanan kompozit levhalar. ....	31
Şekil 4.6: Kompozit levhanın su jeti ile kesimi ve darbe numuneleri. ....	31
Şekil 4.7: Darbe test cihazı ve bölümleri. ....	32
Şekil 4.8: Darbe testi IMPULSE yazılımı akış şeması. ....	33
Şekil 4.9: Kompozit numuneye darbe testinin uygulanması.....	34
Şekil 5.1: $E_i=9$ J darbe enerjisi için F-d, F-t ve E-t grafikleri.....	35
Şekil 5.2: $E_i=15$ J darbe enerjisi için F-d, F-t ve E-t grafikleri.....	36
Şekil 5.3: $E_i=21$ J darbe enerjisi için F-d, F-t ve E-t grafikleri.....	37
Şekil 5.4: $E_i=24$ J darbe enerjisi için F-d, F-t ve E-t grafikleri.....	38
Şekil 5.5: $E_i=30$ J darbe enerjisi için F-d, F-t ve E-t grafikleri.....	39
Şekil 5.6: $E_i=39$ J darbe enerjisi için F-d, F-t ve E-t grafikleri.....	40
Şekil 5.7: Kuvvet-deplasman (F-d) eğrileri. ....	41
Şekil 5.8: Enerji profili diyagramı (EPD). ....	43
Şekil 5.9: Farklı oranlar için enerji profili diyagramı (EPD). ....	44
Şekil 5.10: Katkısız numunede $E_i=15$ J darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey. ....	45
Şekil 5.11: % 0,5 CNT katkılı numunede $E_i=15$ J darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey. ....	46
Şekil 5.12: % 1 CNT katkılı numunede $E_i=15$ J darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey. ....	46
Şekil 5.13: % 2 CNT katkılı numunede $E_i=15$ J darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey. ....	47
Şekil 5.14: Katkısız numunede $E_i=30$ J darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey. ....	47
Şekil 5.15: % 0,5 CNT katkılı numunede $E_i=30$ J darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey. ....	48
Şekil 5.16: % 1 CNT katkılı numunede $E_i=30$ J darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey. ....	48

Şekil 5.17: % 2 CNT katkılı numunede $E_i=30J$ darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey. ....	49
Şekil 5.18: Katkısız numunede $E_i=39J$ darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey. ....	49
Şekil 5.19: % 0,5 CNT katkılı numunede $E_i=39J$ darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey. ....	50
Şekil 5.20: % 1 CNT katkılı numunede $E_i=39J$ darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey. ....	50
Şekil 5.21: % 2 CNT katkılı numunede $E_i=39J$ darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey. ....	51

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 4.1: ÇDKNT'ün mekanik özellikleri. ....	27

## SEMBOL ve KISALTMALAR LİSTESİ

<b>ÇDKNT</b>	:	Çoğul duvarlı karbon nanotüp
<b>MWCNT</b>	:	Çoğul duvarlı karbon nanotüp
<b>CNT</b>	:	Karbon nanotüp
<b>COOH</b>	:	Karboksilik asit
<b>Prepreg</b>	:	Reçine emdirilmiş kumaş
<b>Woven</b>	:	Dokunmuş örgülü kumaş
<b>SEM</b>	:	Taramalı elektron mikroskobu
<b>TEM</b>	:	Geçirimli elektron mikroskobu
<b>MMK</b>	:	Metal matrisli kompozitler
<b>PMK</b>	:	Polimer matrisli kompozitler
<b>SMK</b>	:	Seramik matrisli kompozitler
<b>VÇÇ</b>	:	V-çentikli Charpy deneyi
<b>F</b>	:	Kuvvet
<b>v</b>	:	Hız
<b>t</b>	:	Zaman
<b>EPD</b>	:	Enerji profili diyagramı
<b>Ei</b>	:	Darbe enerjisi
<b>Ea</b>	:	Absorbe edilen enerji
<b>BVID</b>	:	Gözle ancak fark edilebilen darbe hasarı
<b>VID</b>	:	Gözle fark edilebilen darbe hasarı
<b>OVID</b>	:	Bariz gözle görülebilen darbe hasarı
<b>DSD</b>	:	Kopmalar sonucu oluşan darbe hasarı
<b>J</b>	:	Joule
<b>kg</b>	:	Kilogram
<b>mm</b>	:	Milimetre

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında ve tamamlanmasında her türlü yardımlarını esirgemeyen, çalışmalarında tavsiye ve yönlendirmeleriyle bana katkı sağlayan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Numan Behlül BEKTAŞ'a çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında darbe testlerinin yapılması ve bu konu hakkındaki bilgi ve yönlendirmeleriyle bana yardımcı olan Arş. Gör. İnan AĞIR'a yardımlarından dolayı teşekkür ederim. Ayrıca, bu tez çalışmasının yapılması ve tamamlanması döneminde bana her zaman yardımcı olan ve desteklerini esirgemeyen Arş. Gör. Emre KORKMAZ ve Arş. Gör M. Alper SARIİPEK'e teşekkür ederim.

Son olarak bana hep moral ve güç veren, maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan aileme sabırlarından dolayı teşekkür ediyorum.

Necati ÜZÜMCÜ

## 1. GİRİŞ

Her geçen gün gelişen modern teknoloji ile birlikte insanlar mükemmel özellikli malzeme arayışlarını sürdürmektedirler. Bu arayışlar günümüzde kompozit malzemelere olan ilgiyi de doğru orantılı bir şekilde arttırmaktadır. Kompozit malzemeler günümüzde havacılık, otomobil, denizcilik ve savunma sanayi gibi birçok mühendislik alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun sebebi yüksek mukavemet, yüksek korozyon direnci, yüksek yorulma dayanımının yanı sıra hafiflik, işlevsellik gibi özellikler gösterilmektedir. İstenilen bu özelliklerin hepsinin bir arada ve bir malzemede olmasının ihtimali yoktur. İşte bu yüzden malzemelerin zayıf taraflarını kapatacak şekilde üstün özelliklerin bir araya gelmesiyle kompozit malzemeler üretilmiştir. Ayrıca malzeme içerisine farklı cins ve oranda partiküller ilave edilerek mekanik özelliklerinin ayarlanabilir olması da kompozit malzemelerin en büyük avantajlarından biridir. İstenilen özelliklere sahip malzemelerin aynı zamanda çalışma esnasında uğrayabilecekleri hasarları bilmek ve buna karşı önlemler almak malzemeler için büyük önem taşımaktadır.

Darbe deneyleri, çoğunlukla günlük hayatımızda karşılaştığımız çekiç darbesi, otomobil çarpışması, araçlarda oluşan küçük tampon darbeleri, yoldaki çukura giren bir araba tekerleği ve kompozit malzemelerin üzerine bakım esnasında düşen bir maddenin darbe etkileri gibi yaşanan gerçek olaylara benzetilmektedir. Ayrıca yapılan mühendislik uygulamalarında kompozit yapının dışarıdan gelecek olan herhangi bir darbe etkisi karşısında nasıl bir davranış gerçekleştirdiğini ve buna karşı önlemlerin alınması için önemlidir. Darbe deneyi uygulandıktan sonra bu sonuca uygun olarak malzeme seçimi yapılır ve hangi darbe enerjisine hangi davranışı göstereceği bilinerek uygulamaya konulur (Şenel ve diğ., 2009)

Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri katkı malzemesinin oranına göre değişmektedir. Buna ek olarak kullanılan elyaf ve matris özellikleri de malzemenin mekanik özellikleri için bir değişkendir. Ayrıca düşük yoğunluk, imalat kolaylığı ve düşük maliyet nedeniyle de mühendislik alanında tercih edilir. Bu gibi özellikler kompozit malzemeler olan ilgiyi de arttırmaktadır. Fakat bunun yanında kompozit yapıların tasarımında en önemli sorunlardan biri de yükleme sonrası yapının gösterdiği duyarlılıktır. Fiber takviyeli polimer kompozitler enine yüklemelerden gelen etkiler altında iç hasarlara karşı özellikle de düşük enerji seviyelerinde rijit olduğu bilinmektedir.

## 1.1 Literatür Özeti

Soliman vd (2012), Çoğul duvarlı karbon nanotüp katkılı woven karbon elyaf takviyeli kompozitlerin düşük darbe hızlarındaki darbe davranışlarını incelemişlerdir. Karbon katkısının etkisini görebilmek için üç farklı (0,5-1-1,5 %) nano karbon oranında kompozit test numuneleri üretmişlerdir. Numune üretiminde kullandıkları nano karbonları –COOH ile fonksiyonelleştirilmiş olarak tercih etmişlerdir. Üretilen bu kompozit numunelerin darbe testlerini beş farklı (15-24-30-60-120 J) enerji seviyesinde ağırlık düşürme tipi Instron CEAST® 9350 darbe cihazında gerçekleştirmişlerdir. Yapılan testler sonucu Hız-Zaman (v-t), Kuvvet-Deplasman (F-d) gibi birçok grafik elde etmişler ve karşılaştırmalar yapmışlardır. Düşük hızlarda daha yüksek oranda pozitif sonuçlar veren nano karbon katkılı kompozitler yüksek hız seviyelerine çıktıkça daha az oranda pozitif sonuçlar vermişlerdir. Sonuç olarak nano karbon katkısının katkısız olana göre saplanma değerini yaklaşık olarak % 50 arttırdığını, fakat saplanma değerinin üstünde nano karbon katkısının negatif yönde etki yaptığını bildirmişlerdir.

Rathore vd (2016), epoksi içerisine karbon nanotüp katkısı ekleyip cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini ve darbe dayanımını araştırmışlardır. Mekanik özelliklerinin belirlenmesinde Weibull analiz yöntemini de kullanmışlardır. Sonuç olarak % 0,1 CNT katkısının çekme dayanımını ve darbe dayanımını arttırdığını bildirmişlerdir.

Taraghi vd (2013), woven kevlar kumaşa ağırlıkça %1'den daha az çoğul duvarlı karbon nanotüp katkısı yaparak ürettikleri kompozit malzemelerin ortam sıcaklığında (27°C) ve düşük sıcaklıkta (-40°C) düşük darbe hızlarında davranışlarını incelemişlerdir. Nano Karbon katkısının optimum değerini bulmak için ağırlıkça üç farklı (0,3-0,5-1 %) oranda kompozit malzeme üretmişlerdir. Yapılan testler sonucu ortam sıcaklığında en iyi sonucun 0,5 % nano karbon katkılı olan numunenin verdiğini tespit etmişlerdir. 0,5 % nano karbon katkısı absorbe edilen enerji miktarını yaklaşık olarak %35 arttırdığını, eğilme rijitliğini ise yaklaşık olarak %15 arttırdığını tespit etmişlerdir. Düşük sıcaklıklarda ise optimum sonucu 0,3 % nano karbon katkılı numunenin verdiğini saptamışlardır. Düşük sıcaklıkta (-40°C) 0,3 % nano karbon katkısı absorbe edilen enerji miktarını yaklaşık olarak %37,5 arttırdığını, eğilme rijitliğini ise yaklaşık olarak %13 arttırdığını tespit etmişlerdir. Sonuç olarak nano karbon katkısının düşük darbe hızları altında her iki koşulda da pozitif yönde etkilediğini bildirmişlerdir.

Boumbimba vd (2015), woven örgülü cam elyaf kompozitleri katkısız ve M52N adı verilen nano güçlendiriciyle katkılı olarak üretmişler ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Ürettikleri kompozit malzemelerin ayrıca dispersiyonlarını daha net görmek amacıyla SEM analizlerini de yapmışlardır. Katkılı ve katkısız numunelere üç farklı enerji seviyesinde darbe testi uygulayıp bunların karşılaştırılmasını yapmışlardır. Buna göre M52N nano katkısının daha fazla enerjiyi absorbe ettiği ve penetrasyon eşiğini pozitif yönde arttırdığını bildirmişlerdir.

Rahmanian vd (2013), cam elyaf ve karbon fiber kumaşlara karbon nanotüp ekleyerek hazırladıkları numunelerin eğilme mukavemetlerini ve darbe eğilimlerini araştırmışlardır. Ayrıca fiber kumaşların boyutlarının da mekanik özelliklere etkisini de araştırmışlardır. Karbon nanotüp katkılı olan kompozitlerin dağılımlarını incelemek için morfolojik olarak da incelemişlerdir. Bunun için ürettikleri kompozit numunelerin SEM ve TEM görüntülerini almışlar ve araştırmışlardır. Buna göre short fiber-polypropylene (SGF-PP ve SCF-PP) kompozitlere karbon nanotüp ilave edilen numunelerin en iyi mekanik özellikleri ve darbe davranışını gösterdiği sonucunu bildirmişlerdir.



Çallıoğlu vd (2011), woven cam elyaf takviyeli kompozit malzemeyi el yatırma metodu kullanarak üretmişlerdir. Katkısız kompozit malzemenin yanı sıra %10 ve % 20 SiCp seramik karbür partikülleri ilave etmişlerdir. Üretilen numunelere ağırlık düşürme metodu ile 2,5-22,5 J aralığında darbe enerjisi uygulamışlardır. Yapılan darbe testleri sonucu, %10 SiCp seramik partikül katkılı olan numunenin saplanma ve delinme sınırlarının katkısız olan numuneye göre daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Fakat %20 SiCp seramik partikül katkılı olan numunelerin delinme sınırında negatif yönde bir etki yaptığını gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak, en iyi darbe davranışı gösteren %10 SiCp seramik partikül katkılı numune %20 SiCp seramik partikül katkılı olan numuneye göre %37'lik, katkısız olan numuneye göre ise % 6'lık bir artış gösterdiğini bildirmişlerdir.

Rahman vd (2013), E-cam/epoksi karışımına NH<sub>2</sub> ile fonksiyonelleştirilmiş karbon nanotüp katkısı yaparak kompozit üretmişler ve bu kompozitlerin balistik darbe testini incelemişlerdir. Karbon oranını da kendi arasında kıyaslamak için ağırlıkça % 0,3 ve % 0,5 oranında karbon nanotüp eklemişlerdir. Karbon nanotüplerin dağılımını homojen olarak yapmak için sonikatör cihazı kullanmışlardır. Dağılımın homojenliğini incelemek için SEM analizlerini de yapmışlardır. Ayrıca darbe testi uygulanmış numuneler c-scan ile taranmış olup hasar boyutları bilgisayar yardımıyla da incelenmiştir. Sonuç olarak nano karbon katkılı olan numunelerde daha az hasar oluştuğunu, balistik limitleri ve absorbe edilen enerji miktarını pozitif yönde etkilediğini bildirmişlerdir.

Ferreira vd (2015), epoksi-cam elyaf karışımına farklı oranlarda nanokil ve karbon nanotüp ilave edip vakum infüzyon metodu kullanarak kompozit malzeme üretmişlerdir. Ayrıca ürettikleri kompozitlerden TEM görüntüleri, darbe testi uyguladıkları numunelerden de c-scan görüntülerini almışlardır. Nano partikül katkılı olan numunelerde enerji kazanımı (Energy Gain) oranının arttığını tespit etmişlerdir. Fakat nano kil oranı %3 iken maksimum kuvvette yaklaşık olarak %6 bir düşüş gözlemlemişlerdir. Bunun yanı sıra enerji kazanım oranı nano kil katkılı olan numunelerde %7-15 arası değişirken, nano karbon katkılı olan numunelerde de %14-18 arası pozitif bir etki yaptığını bildirmişlerdir.

Zhang vd (2007), çoğul duvarlı karbon nanotüp-polipropilen kompozit birleşimi üretmişlerdir. Bu birleşimin içine aynı oranda fakat farklı uzunluklara sahip karbon nanotüp ilave ederek kompozit üretmişler ve nano karbon boyutunun yük taşıma kapasitesine ve darbe davranışına etkisini incelemişlerdir. Darbe testlerini sadece ortam şartlarında değil dört farklı sıcaklık altında da gerçekleştirmişlerdir. Buna göre, yaptıkları tüm test sıcaklıklarında nano karbon katkılı kompozit numunelerin daha iyi sonuç verdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca nano karbon katkılı numuneleri kendi aralarında karşılaştırdıklarında yük taşıma yeteneği ve kırılma enerjisinin uzun boyutlu olan numunelerin kısa boyutlu numunelere karşın da daha iyi bir sonuç verdiğini bildirmişlerdir.

İçten ve Karakuzu (2009), düz dokunmuş E-cam/epoksi kompozitlerin darbe testlerini yapmışlardır. Kumaşları da farklı yoğunluklar (gevşek ve sıkı) kullanarak ve farklı kürleşme basınçları kullanarak da kompozitlerin üretimlerini gerçekleştirmişlerdir. Buna göre, darbeye maruz bırakılan kompozitler için en önemli hasar mekanizması olan delinme sınırı ve darbe karakteristiklerini belirlemişlerdir. Bunun sonucunda, düşük basınç altında kürleşmesi gerçekleştirilen hücrelerarası boşluklu (gevşek) olan örgü kompozitlerin delinme sınırı, üretilen diğer tip kompozitlere göre daha yüksek bulunduğunu bildirmişlerdir.

Aktaş vd (2009), iki farklı tip cam/epoksi kompozitin çeşitli darbe enerjilerinde darbe testlerini yapmışlar ve kompozitlerde meydana gelen hasar modlarını belirlemişlerdir. Yapılan darbe testleri sonucu darbe karakteristiklerini kuvvet-deplasman ve enerji profili diyagramı metodunu kullanarak incelemişlerdir. Buna göre hasarın boyutu ve şeklinin aynı darbe enerjilerinde hafif farklılıklar gösterdiğini tespit etmişlerdir. Ayrıca düşük darbe enerjilerinde matris kırılmaları ve delaminasyon gözlemlerken, yüksek enerjili darbe testlerinde fiber kırılmalarını gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak matris çatlağı ile başlayan hasar modu darbe enerjisinin artmasıyla, cam elyafın gevrek yapısından dolayı fiber kırılmalarının baskın olduğu bir hasara dönüştüğünü bildirmişlerdir.

## **2. KOMPOZİT MALZEMELER**

### **2.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı**

Kompozit malzemeler yeni bulunan bir malzeme grubu olmayıp, doğada var olan yapılardan hareketle, farklı özelliklere sahip malzemelerin birleştirilmesi sonucu elde edilmektedir (Kayrak, 1999).

Kompozit malzeme, iki ya da daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemedeki toplamak amacıyla, makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak adlandırılmıştır (Şahin, 2009).

Kompozit malzemelerin mühendislikteki asıl önemi, birbirinden farklı iki veya daha çok ögenin oluşturduğu kompozit malzemenin, karışım içindeki her bir ögenin özelliğinden daha üstün bir özelliğe sahip olmasıdır (Smith, 2001).

Yukarıdaki tanımlar gibi birçok kompozit tanımı literatürde mevcuttur. Yani kompozit malzeme en genel anlamda iki veya daha fazla malzemenin makroskobik düzeyde bir araya getirilmesiyle oluşan yeni malzeme olarak tanımlanabilir. Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenler birbiri içerisinde çözünmeyen malzemelerdir. Genel olarak takviye elemanı ve matris yapısından oluşmaktadır. Bu takviye elemanı malzemedeki oluşacak gerilimi taşır ve malzemenin mukavemetini artırır. Matris yapısı ise bu takviye elemanını çevreleyen ve deformasyon esnasında oluşacak kopmaları ve kırılmaları geciktirmektedir.

## 2.2 Kompozit Malzemelerin Genel Özellikleri ve Kullanım Alanları

Kompozit malzemelerin özellikleri metallere göre çok daha avantajlı olmasından dolayı son dönemlerde metal malzemelere kıyasla ön plana çıkmışlardır. Kompozit malzemelerin yoğunluğunun düşük olması özellikle hafif yapılarda büyük bir avantaj sağlamaktadır. Buna benzer birçok avantajı bulunan kompozit malzemelerin bazı dezavantajları da mevcuttur.

Kompozit malzemeler aşağıda verilen avantajlara sahiptirler;

- Yüksek mukavemet
- Yüksek rijitlik
- Yüksek yorulma dayanımı
- Yüksek aşınma direnci
- Titreşim sönümlenme
- Korozyona ve kimyasal etkilere karşı yüksek mukavemet
- Termal ve ısı iletkenlik
- Düşük ağırlık
- Kolay şekillendirme
- Bakım gerektirmeme

Kompozit malzemelerin yukarıda verilen avantajlarının yanında dezavantajları da şunlardır;

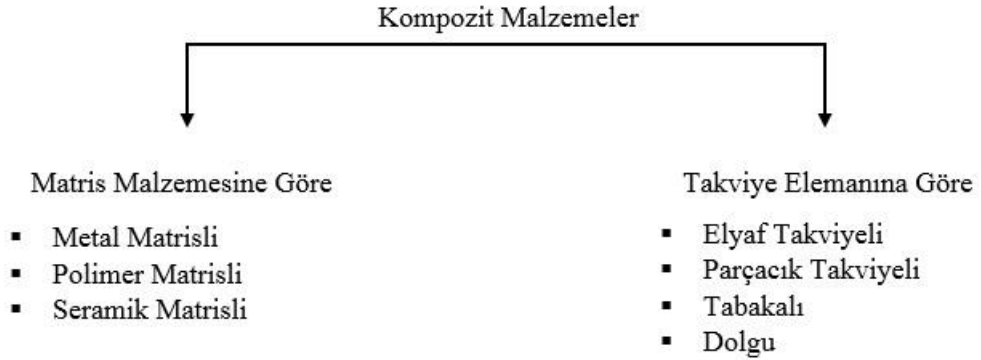
- Metallere göre daha yüksek maliyetli olması
- Farklı doğrultularda farklı mekanik özellikler göstermesi
- Doğal bir malzeme olmadığından dolayı geri dönüşümünün olmaması
- Üretim güçlüğü
- Kırılma uzamasının az olması (Şahin Y., 2009).

Çağımızda kompozit malzemelerin kullanım alanları oldukça geniş boyutlara ulaşmıştır. Kompozit malzemeler havacılık sanayi, otomobil endüstrisi, denizcilik sanayi, inşaat sektörü, sağlık ve müzik sektörü gibi birçok kullanım alanlarına sahiptirler.

Havacılık sanayinde F-14 uçaklarında yatay dengeleyiciler bor epoksi, F/A-18 uçaklarında ise kanat yüzeyleri karbon epoksi kompozitlerinden yapılmıştır. Otomobil endüstrisinde ise kaporta, yan gövde iskeleti, dikiz aynası vb. gibi birçok parçada cam elyaf, karbon elyaf takviyeli kompozitler kullanılmaktadır.

### 2.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerin yapısına bakılacak olursa bir takviye elemanından ve bir matristen meydana geldiği görülmektedir. Bu yüzden kompozit malzemeleri sınıflandıracak olursak matris malzemesine ve takviye elemanına göre sınıflandırabiliriz.



Şekil 2.1: Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.

#### 2.3.1 Matris Malzemesine Göre

Kompozit malzeme içerisinde takviye elemanını belirli bir şekil içerisinde tutacak ve bu elemana bir mukavemet sağlayacak yapıya matris denir. İstenilen özellikteki kompozit malzemenin üretimini yapabilmek için farklı matris kullanılabilir. Bunlar; metal matrisli, polimer matrisli ve seramik matrisli kompozit malzemelerdir.

### 2.3.1.1 Metal Matrisli Kompozit Malzemeler (MMK)

Metal matrisli kompozitler (MMK) adından da anlaşılacağı üzere, matrisi sünek metal olan kompozitlerdir. Bu tür malzemeler, takviyesiz olan metallere göre daha yüksek ortam sıcaklıklarında kullanılabilirler. Ayrıca metal matrisli kompozitler;

- Özgül rijitliği,
- Özgül dayanımı,
- Aşınma dayanımı,
- Sürünme direnci,
- Isıl iletkenliği,
- Boyutsal kararlılığı,
- Yeniden üretilebilirlik,
- Düşük yoğunluk,
- Yüksek elektrik iletkenlik,

gibi özelliklerini de arttırabilirler. Bu malzemelerin polimer matrisli kompozitlere göre daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmesi, alev alma ve bozulma direncine sahip olmaları da birer avantajdır. Fakat, bunun yanında maliyetinin polimer matrisli kompozitlere göre yüksek olması kullnımlarını sınırlandırmaktadır.

Otomobil üreticileri de son zamanlarda MMK'leri otomobillerde kullanmaya başlamışlardır. Örneğin, bazı motor parçaları, alüminyum oksit veya karbon elyaf ile dayanımı arttırılmış alüminyum alaşımı matrise sahiptir. Metal matrisli kompozitler ayrıca kardan mili, denge çubuğu ve aktarma organlarında da sıkça kullanılmaktadır (Callister, 2014).

Metal matrisli kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak fiber malzemeler kullanılmaktadır. Bundan dolayı kompozit malzemeler takviye elemanının ismiyle anılırlar (Ekinci, 2007).

### **2.3.1.2 Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler (PMK)**

Polimer matrisli kompozitler (PMK) metal matrisli ve seramik matrisli kompozit yapılara göre daha az maliyetli ve daha kolay üretilebilir malzemelerdir. Fakat, Elatisite modüllerinin ve çalışma sıcaklığının düşük olması bu malzemelerin dezavantajlarıdır. Yapı olarak incelenecek olursa da metal ve seramik matrisli malzemelere göre daha karmaşık yapıya sahiptirler.

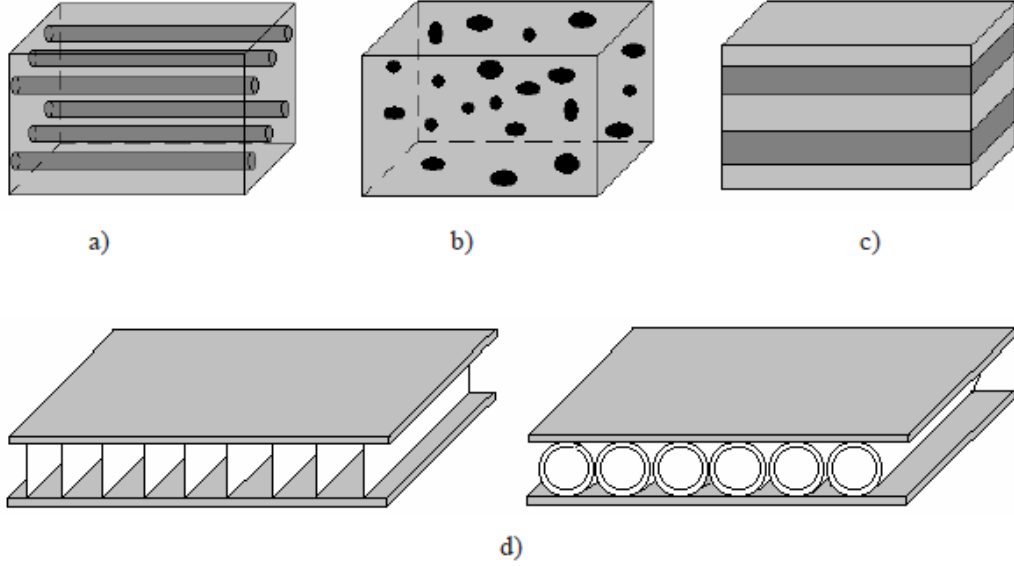
PMK'leri grup olarak inceleyecek olursak termoset ve termoplastikler olarak iki gruba ayrılırlar. Eğer bir uygulamada PMK kullanılacak olursa orada dikkat etmemiz gereken en önemli iki faktör sıcaklı ve nemdir. Takviye elemanı olarak PMK'lerde en çok kullanılan malzemeler cam fiber ve karbon fiberdir. Bunun yanında bor fiber ve kevlar fiber de takviye elemanı olarak kullanılabilirler. (Ekinci, 2007).

### **2.3.1.3 Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler (SMK)**

Seramik malzemeler doğal olarak oksidasyona ve yüksek sıcaklıklardaki bozulmalara karşı dayanıklıdır. Fakat bu malzemelerin en önemli dezavantajı gevrek kırılma eğilimleridir. Eğer bu gevrek kırılma eğilimleri olmasaydı, özellikler otomobil ve hava araçlarında gaz türbini parçaları gibi yüksek sıcaklık ve yüksek gerilmenin söz konusu olduğu uygulamalarda sıklıkla kullanılabilirlerdi. Bu yüzden seramiklerin kırılma tokluğu değeri düşüktür. Ancak, seramiklerin kırılma tokluğu değerleri, parçacık, elyaf veya visker formundaki bir seramik malzemenin diğer bir seramik içine gömüldüğü yeni nesil SMK'ler ile önemli derecede arttırılmıştır (Callister, 2014).

### 2.3.2 Takviye Elemanına Göre

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan reçine malzemeleri bir elemanla takviye edilmelidirler. Takviye elemanına göre kompozit malzemeler üç ana başlıkta toplanabilir. Bunlar; elyaf takviyeli, parçacık takviyeli ve tabakalı kompozit malzemelerdir.



Şekil 2.2: Takviye elemanına göre kompozit malzemeler (Sorucu, 2007).

#### 2.3.2.1 Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler

Fiberlere değişik kaynaklarda lifler veya elyaflar da denilmektedir. Bu malzemeler matris malzemenin içinde yer alıp kompozit malzemelerin en önemli mukavemet elemanlarıdır. Mühendislikte kullanılan malzemelerin çoğu fiber formunda üretildiklerinde mukavemet ve rijitlikleri kütle hallerindeki değerlerinden çok üstünde olabilmektedir. Örneğin, karbon fiberlerin çekme mukavemeti kütle halindeki grafitten 50 kat, rijitliği 3 kat daha yüksektir (Eren, 2007).

Elyaf formunun seçimi, kompozit malzemenin üretim metodu ve kompozit malzemenin uygulanma alanı göz önünde bulundurularak yapılır. Örneğin; yapısal uygulama alanlarında filament veya uzun lifler kullanılırken, yapısal olmayan uygulama alanlarında kısa lifler daha ön plana çıkmaktadır. Üretim yöntemlerinde



ise enjeksiyon ve baskı kalıplamada kesikli lifler tercih edilirken, elyaf sarma, profil çekme, rulo sarımda filament lifler tavsiye edilir (Şahin, 2009 ve Mazumdar, 2002).

Bu kompozit tipi ince elyafların matris yapısının içerisinde yer almasıyla oluşmuştur. Elyafların matris içindeki yerleşim düzeni kompozit yapının mukavemetini belirleyen en önemli faktörlerden biridir. Uzun boyutlu elyafların matris içerisinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaf doğrultusunda daha yüksek mukavemet elde edilirken, elyafa dik doğrultuda ise daha düşük mukavemet değerleri elde edilir. Düzlem boyutta yerleştirilmiş elyaf takviyelerle her iki yönde de aynı mukavemet elde edilirken, matris yapısında homojen bir biçimde dağılmış kısa elyaflarla ise izotrop bir yapının oluşması mümkün olmuştur (Sorucu, 2007).

### **2.3.2.2 Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler**

Malzemenin mekanik özelliklerinde iyileştirme sağlayan küçük granül veya nano boyuttaki dolgu maddesi ilavesiyle şekillendirilerek üretilir. Bir veya iki boyutlu makroskobik boyuttaki partiküllerin veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen çok küçük boyutlu mikroskobik partiküllerin matris fazı ile birlikte oluşturdukları yapılarıdır. Büyük veya küçük boyutlu partiküller kompozit malzemenin özellikleri üzerinde farklı şekilde etki ederler (Eren, 2007).

### **2.3.2.3 Tabakalı Kompozit Malzemeler**

Tabakalı kompozit malzemeler en az iki tabakadan oluşurlar. Fakat, dayanım ve mekanik özelliklerin önem taşıdığı durumlarda, malzemenin istenen özelliklere sahip olabilmesi için en az üç veya daha fazla tabaka kullanılması gerekmektedir. Bu tabakaları oluşturan yapılar farklı malzemeler olabileceği gibi, aynı tür malzemelerden de oluşabilmektedir. Tabakalı kompozit malzemelerin üretiminde, tabaka malzemesi olarak her türlü yapıda malzeme kullanılabilir. Burada en önemli unsur birbirlerinin özelliklerini pozitif yönde etki edecek bir kompozisyonun oluşturulmasıdır (Eren, 2007).

#### **2.3.2.4 Dolgu Kompozit Malzemeler**

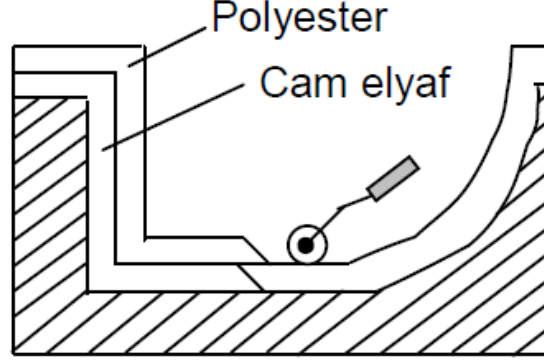
Dolgu kompozit malzemeler, hafif ancak yüksek rijitlik ve dayanıma sahip kiriş veya panellerin tasarımında kullanılan yapısal kompozitler sınıfında yer alırlar. Dolgu kompozit malzemeler sandviç paneller olarak da adlandırılmaktadır. Dolgu malzemeleri genellikle, polimer köpük, ahşap ve petek yapıdır. En yaygın olarak kullanılan yapı petek yapısıdır. Bu yapıda birbirine kilitlenen altıgen hücreler şeklinde şekillendirilmiş ince folyolar, yüzey düzlemine dik olacak şekilde yönlendirilmiştir. Petek yapının mukavemeti ve rijitliği, hücre boyutu, hücre cidar kalınlığı ve yapının imal edildiği malzemeye bağlıdır (Callister, 2014).

### **2.4 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri**

Kompozit malzeme üretim metotları yaygın olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar; termoset kompozitler için üretim metotları ve termoplastik kompozitler için üretim metotlarıdır. Kompozit malzemelerin istenilen özelliklerde üretimi için birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemlerden birkaçı şunlardır;

#### **2.4.1 El Yatırma Metodu**

Düşük ve orta hacimli temas kalıplama olup, kayık teknesi, tanklar, bina panelleri ve sandık gibi büyük boyutlu yapısal parçaları için yaygın olarak kullanılan en basit tekniktir. Bu teknikte, genellikle keçe veya dokuma biçimindeki elyaf, hazırlanan bir kalıp üzerine veya içine yerleştirilir ve elyaf ıslatması sağlanır. İstenilen kalınlık elde edilene kadar bu işleme devam edilerek çok tabakalı bir malzeme oluşturulur. Reçine içinde kalan hava bir rulo yardımı ile çıkartılır. Sertleştirici oda sıcaklığında reçineyi sertleştirir. El yatırma tekniğinde polyeşter ve epoksi en çok kullanılan reçine çeşitleridir.



Şekil 2.3: El yatırma metodu (Deniz, 2005).

Kalıptan çıkarılan son ürün belli bir sertliğe sahip olmalıdır. Sertleşme polimerizasyon süresinin sonuçlanmasına bağlıdır.

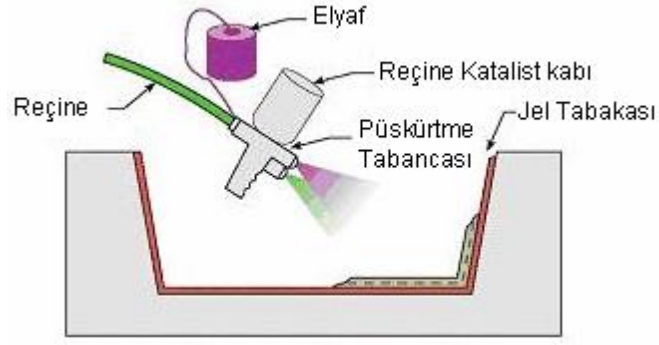
**Jelleşme:** Katalizör ve hızlandırıcı katılan reçinenin pıhtılaşması olayıdır. Jelleşme süresi 5 - 10 dakikadır.

**Sertleşme:** Reçinenin pıhtılaştıktan sonra kalıptan çıkarılarak 3 - 4 saatlik sürede meydana gelen olaydır.

**Olgunlaşma:** Üretilen kompozit malzemenin maksimum ulaşabileceği sertliktir. Kullanılan katkı maddelerine, katalizör ve hızlandırıcıya bağlı olarak birkaç saatten birkaç haftaya kadar değişen süreler olabilir. Olgunlaşma süresini kısaltmak için özel fırınlar da kullanılabilir. 20 °C'de iki hafta, 80 °C'de 2 saat olgunlaşma süresi olur (Deniz, 2005).

#### 2.4.2 Püskürtme Yöntemi

Püskürtme yöntemi elle yatırma yönteminin aparatla yapılanı olarak kabul edilebilir. Kırpılmış elyaflar kalıp yüzeyine, içine sertleştirici katılmış reçine ile birlikte özel bir tabanca ile püskürtülür. Elyafın kırılma işlemi tabanca üzerinde bulunan ve bağımsız çalışan bir kırıcı sayesinde yapılır (Sorucu, 2007).

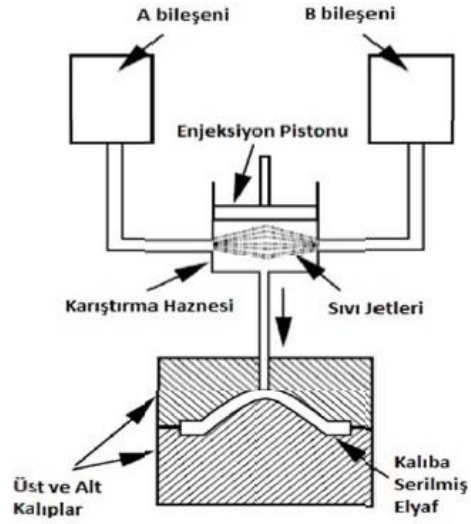


Şekil 2.4: Püskürtme yöntemi (Arıcasoy, 2006).

Ürününün katılaştırılması genellikle oda sıcaklığında veya ısı kullanılarak yapılır. Ana malzemeyi püskürtmeden önce kalıp içerisine silikon sürülür daha iyi yüzey elde edilir. Reçine olarak polyesterler kullanılır. Bu metot parça karışıklığı fazla ise faydalıdır. Bu tekniğin avantajı ise basit, maliyeti düşük olması, taşınabilir teçhizat ve parça boyutu sınırlaması olmamasıdır (Deniz, 2005).

### 2.4.3 Vakum Yardımlı Reçine Transfer Metodu (RTM)

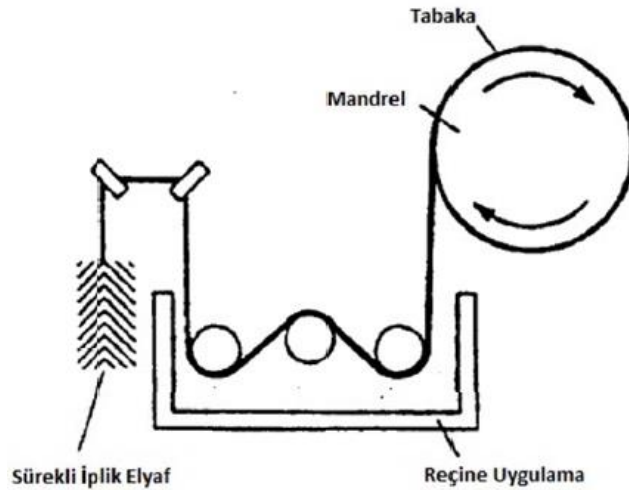
Bu kompozit malzeme üretim yönteminde elle yatırma metoduna göre daha hızlı üretim ve uzun ömüre sahip olmanın yanı sıra iki parçalı kalıp kullanmak gereklidir. RTM yöntemi genellikle jelkotlu veya jelkotsuz her iki yüzeyinde pürüzsüz olması istenen yapılarda kullanılır. Takviye elemanı olarak kuru keçe, kumaş veya ikisinin de bir arada olduğu kombinasyon kullanılır. Takviye malzemesi ilk olarak kalıp boşluğu doldurulacak şekilde kalıba yerleştirilir ve kapatılır. Elyaflar matris içinde geç eriyen reçinelerle örtülerek kalıp içerisinde sürüklenmesi engellenir. Reçine belirli bir basınç altında kalıba pompalanır. Bu süreç daha fazla bir zaman ister. Matris enjeksiyonu en fazla 80°C'ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir. Bu yöntemde içerideki havanın dışarıya atılması ve reçinenin elyafa iyi dağılması ve emdirilmesi için vakum kullanılabilir. Elyafın kalıba yerleştirilmesi süre olarak uzun sayılabilecek bir işçilik ortaya çıkarır. Kalıp kapalı olduğu için zararlı gazların ortamdaki varlığı azalır ve gözeneksiz bir malzeme elde edilebilir (Arıcasoy, 2006).



Şekil 2.5: RTM üretim şeması (Mazumdar, 2002).

#### 2.4.4 Elyaf Sarma Metodu

Bu yöntem özel yapıya sahip ürünlerin seri üretimi için uygun bir metottur. Elyaf sarma yöntemi sürekli elyaf liflerinin reçine ile emdirildikten sonra bir makara yardımıyla çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılma işlemidir. Sürekli beslenen liflerin farklı açılarla kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklere sahip malzemeler elde edilebilir. Gerekli sayıda elyaf katının sarılmasından sonra ürün sertleşir. Ardından döner kalıp malzemeden ayrılır. Bu yöntemle yapılan ürünlerin geometrik şekilleri genellikle silindirik, borular, araba şaftları, uçak su tankları, yat direkleri, dairesel basınç tanklarıdır(Arıcasooy, 2006).



Şekil 2.6: Elyaf sarma prosesi (İnançer, 2015).

### **3. KOMPOZİT MALZEMELERİN DARBE DAVRANIŞI**

#### **3.1 Kompozit Malzemelerin Darbe Testleri**

Kompozit malzemelerin darbe davranışlarını belirlemek için herhangi bir standart test tekniği veya yaygın bir şekilde kabul edilen bir teknik mevcut değildir. Birçok test tekniği kompozitlerin darbe davranışlarını belirlemek için kullanılırlar. Tüm bu farklılıklara rağmen kompozit malzemelerin darbe karakteristiğinin belirlenmesi için genel olarak üç metot kullanılmaktadır. Bunlar;

- I. Ağırlık düşürme metodu,
- II. Izod ve Charpy sarkaç metodu,
- III. Balistik test metodu

##### **3.1.1 Ağırlık Düşürme Metodu**

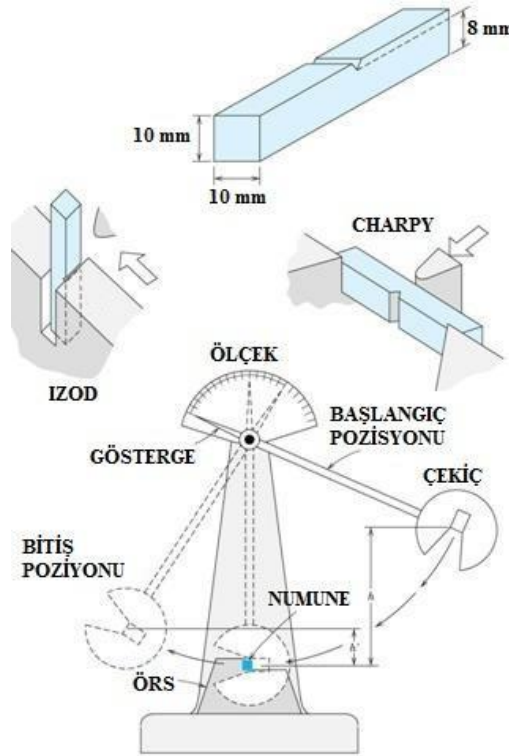
Ağırlık düşürme testleri yaygın olarak kullanılmakla birlikte değişik tasarımlara hizmet etmektedir. Genellikle bir ağırlık grubuna bağlı vurucu uç, belli bir yükseklikten serbest olarak bırakılır. Tekrarlı çarpmayı önlemek için belirli mekanik aksamla donatılırlar (Adams, 2009).

Ağırlık düşürmeli darbe test metodu Izod ve Charpy test metotları yerine malzemelerin dinamik özelliklerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir metottur. Izod ve Charpy test metotlarında darbenin limiti belli iken, Ağırlık düşürmeli darbe test metodunda numuneye çarpma hızı ve darbe enerjisi istenilen şekilde ayarlanabilir ve istenilen ağırlığın istenilen yükseklikten numune üzerine düşürülmesi sağlanabilir. Ayrıca bu metot ile numuneye saplanma, delinme ve tekrarlı darbe testleri de yapılabilir (Sayer, 2009).

### 3.1.2 Izod ve Charpy Sarkaç Metodu

Charpy ve Izod olmak üzere tasarlanan iki standart test tekniği günümüzde darbe enerjisini ölçmek için yaygın olarak kullanılan yöntemlerdendir. V-çentikli Charpy (VÇC) deneyi Amerika’da en yaygın olanıdır. Her iki deney metodunda da numuneler V-çentik işlenmiş kare kesitli çubuk şeklindedir. Yük, sabit bir h yüksekliğinden serbest bırakılan sarkaç şeklindeki çekicinin numuneye çarpmasıyla darbe şeklinde uygulanır. Yüksek hızda çarpmanın etkisiyle numune, gerilme yığılma noktası olan çentikli kısımdan kırılır. Hareketine devam eden sarkaç, başlangıçtaki h yüksekliğinden daha alçak olan bir h’ yüksekliğine erişir. Bu iki yükseklik farkından hesaplanan enerji, numunenin kırılması için harcanan enerjidir ve darbe enerjisinin ölçüsüdür (Callister, 2014).

Bu iki test tekniği genel anlamda birbirine çok benzerler. En büyük farklılıkları ise numunenin deney düzeneğine yerleştirilme şekli ve açılan çentiğin darbe noktasına göre konumudur. Her iki deney metodu Şekil 3.1’ de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Charpy ve Izod testlerinin şematik gösterimi (Karaca, 2010).

### **3.1.3 Balistik Test Metodu**

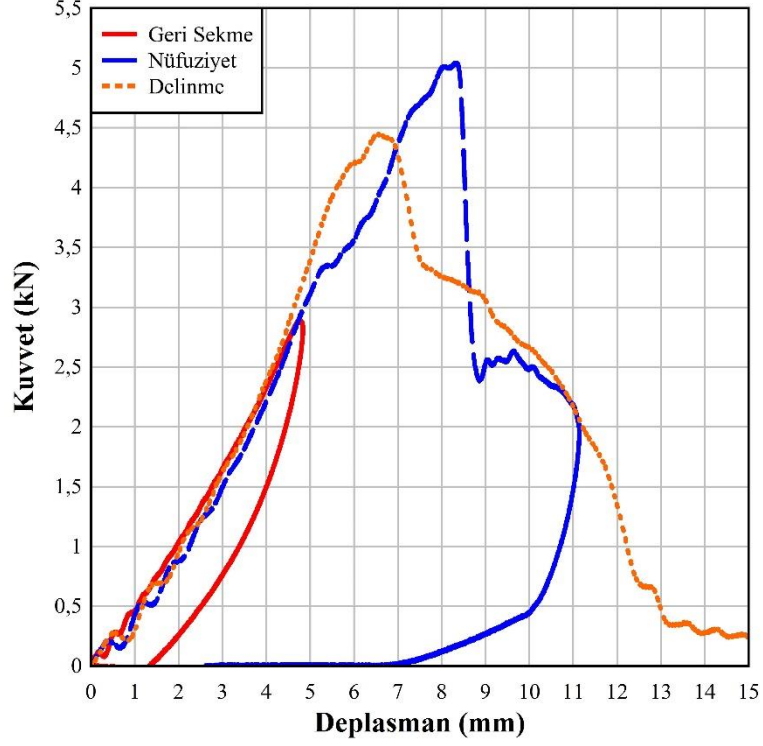
Genellikle balistik deneylerde mermi kullanılmaktadır. Özellikle askeri alanda bu çalışmalar yapılmış olup, çelik yelekler ve zırhlı araç malzemeleri üzerinde testler gerçekleştirilmektedir. Balistik testlerde, balistik standartlarının öngördüğü çaptaki mermilerle, mermi hızı kullanılan barutu ayarlamak suretiyle gerçekleştirilen atışlarda, zırhın balistik performansını elde etmek mümkün olmaktadır (Evcı,2010).

## **3.2 Darbe Testi Sonucu Elde Edilen Grafikler**

### **3.2.1 Kuvvet-deplasman (çökme) grafiği (F-d )**

Kuvvet-deplasman (F-d) eğrileri darbe testinde kompozit levhalara ait darbe davranışını belirlemede kullanılan grafiklerdendir. Her bir eğri yüklemeye bir artma kısmına ve yükten boşaltmada da bir azalma kısmına sahiptir. Bununla beraber darbe enerjisi altında oluşan bu eğriler kapalı tip ve açık tip eğri olarak iki kısma ayrılır. Kuvvet-deplasman eğrisinde yüklemeye kısmının eğimi numunenin darbe yüküne karşı göstermiş olduğu direnci gösterir ve eğilme rijitliği olarak adlandırılır. Kapalı tip eğri vurucunun numuneye temas etmesinden sonra vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesiyle oluşan eğrilerdir. Yani uygulanan darbe enerjisinin büyük bir kısmı numune tarafından absorbe edilmiş ve absorbe edilmeyen enerjide vurucunun geri sekmesi için kullanılmıştır. Eğer düşüş kısmında oluşan eğri açık tip bir eğri ise bu numunenin delindiğine işarettir. Darbe enerjisi daha da arttırıldığında vurucu numuneye saplanır (penetration), numune kalınlığı boyunca hareket eder ve sonunda da numuneyi delerek alt yüzeyden çıkar yani delinme (perforation) olayı gerçekleşmiş olur.



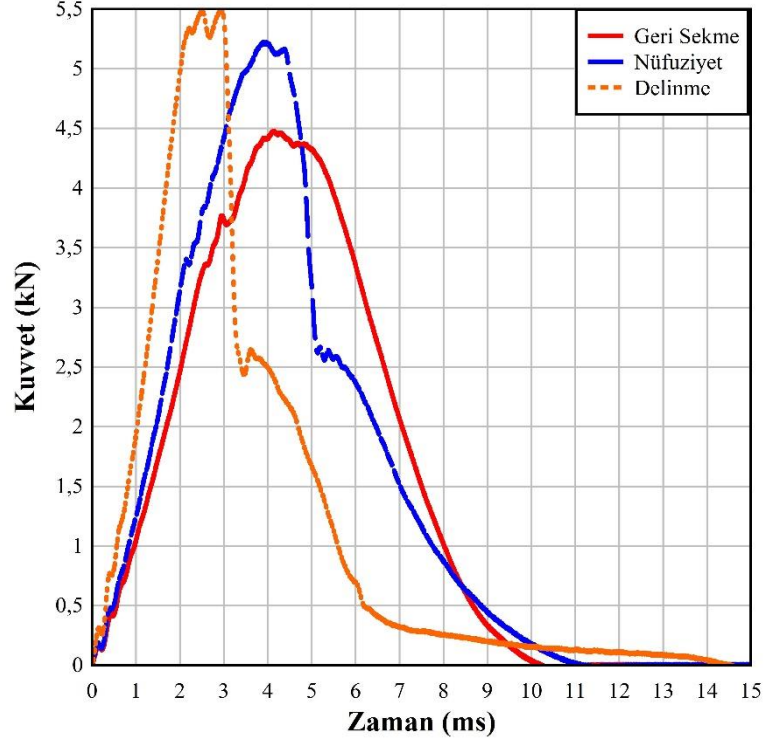


Şekil 3.2: Kuvvet-deplasman grafiği.

Darbe enerjisinin artmasıyla kuvvet maksimum noktaya gelir ve bu noktaya pik kuvvet denir. Kısmi hasarlı dolayısıyla kısmi geri sekmeli durumlarda grafiğin iniş kısmında geri sekme olana kadar yer değiştirmenin arttığı görülür. Darbe enerjisinin artmasıyla hasarlı kısım daha çok artar ve geri sekme gitgide düşer. Bu durum Şekil 3.2’de nüfuziyet eğrisinde görülebilmektedir. Darbe enerjisi iyice arttığında eğri açık eğriye dönüşür, yer değiştirme maksimuma ulaşır ve geri sekme gözlenmez. Bu durum Şekil 3.2’de delinme eğrisinde görülmektedir. Nüfuziyet eğrisinde görüldüğü üzere eğrinin son ucu delinme eğrisine yakındır bu durum delinmeye yakın bir nüfuziyet olduğunu gösterir. Ayrıca bu eğrilerin altında kalan alan darbe süresince yutulan enerjiye karşılık gelmektedir. Burada her bir numuneye ait yutulan enerji değerleri tespit edildikten sonra, kompozit plağa ait absorbe edilen enerji-darbe enerjisi (enerji profili diyagramı) çizilebilir (Sayer, 2009).

### 3.2.2 Kuvvet-zaman grafiği (F-t)

Şekil 3.3'de numune yzeyinden geri sekme, saplanma ve delinme gibi uç duruma ait kuvvet-zaman (F-t) grafiği verilmektedir.

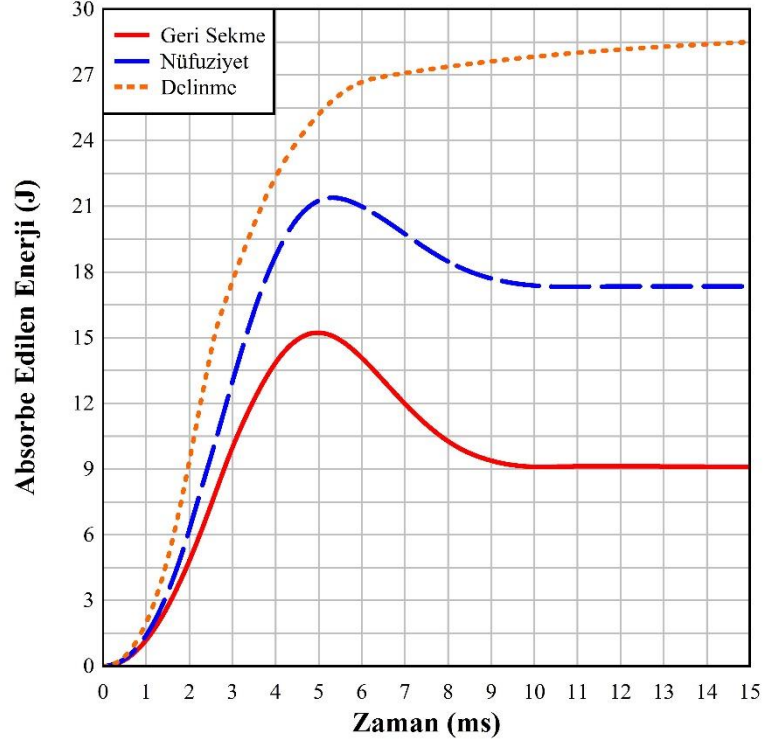


Şekil 3.3: Kuvvet-zaman grafiği.

Şekilde de görüldüğü gibi düşük darbe enerjili testlerde (örneğin geri sekme eğrisi gibi), eğri parabolik bir eğridir ve dağa benzeyen bir Őekle sahiptir. Uygulanan darbe enerjisinin artmasıyla meydana gelen kuvvet de artmakta ve saplanma ve delinme eğrilerinde de görüldüğü üzere maksimum kuvvet değeri de hemen hemen sabit bir değer olmaktadır. Numunede delinme meydana geldiğinde kuvvetin sıfır olması gerekir ama Őekilden de görüleceği üzere vurucu ve numune arasında sürtünme meydana geldiğinden eğrinin uç kısmı yatay eksene paralel ilerlemiştir ve eğri kapanmamıŐtır (Sayer, 2009).

### 3.2.3 Absorbe edilen enerji-zaman grafiği (E-t)

Farklı darbe enerjileri için, absorbe edilen enerji-zaman değişimi grafikleri de Şekil 3.4 deki gibi olmaktadır.



Şekil 3.4: Enerji-zaman grafiği.

Absorbe edilen enerji, kuvvet-çökme (F-d) eğrisinin altında kalan alan hesabı ile yapılmaktadır. Vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi durumunda vurucunun sahip olduğu enerjinin hepsi numune tarafından absorbe edilemez ve absorbe edilemeyen darbe enerjisi de vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi için harcanır. Vurucunun numuneye saplanması durumunda ise vurucunun sahip olduğu darbe enerjisinin hepsi numune tarafından absorbe edilir ve eğrinin son kısmı Őekilden de görüldüğu üzere hemen hemen yatay olarak devam eder.

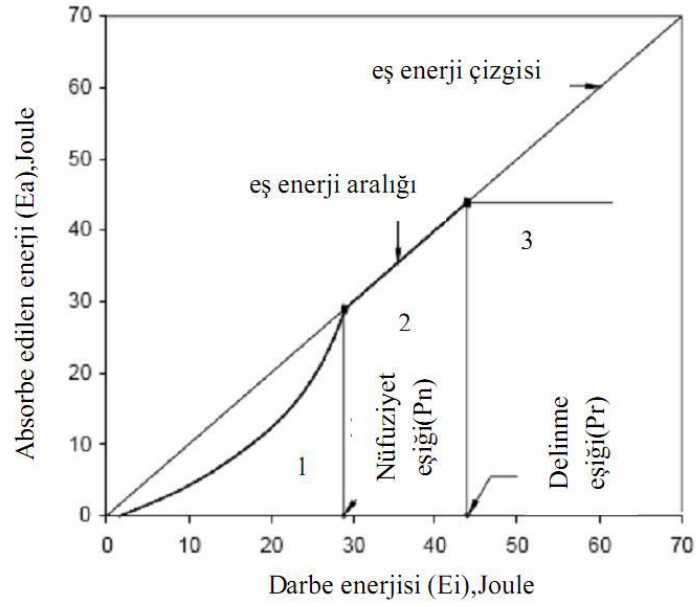
Vurucunun numuneyi delip geçmesi durumunda ise, vurucu ile numune arasındaki sürtünme kısmının altında kalan alanın da darbe cihazının programı tarafından hesaplanan absorbe edilen enerji miktarına katılmasından dolayı eğrinin yukarı doğru yönlendiği Şekil 3.4'de görülmektedir. Bu sürtünme kısmının altında kalan alanın toplam absorbe edilen enerji miktarından çıkarılması gerekir. Buna göre, numune tarafından absorbe edilen enerji değeri ise şekilde görülen paralel kesikli çizginin yaklaşık olarak denk geldiği enerji değeridir (Sayer, 2009).

### 3.2.4 Enerji Profili Diyagramı (EPD)

Kompozit malzemelerin darbe davranışları incelenirken göz önünde bulundurulmuş parametrelerden en önemlileri darbe enerjisi ( $E_i$ ) ve absorbe edilen enerjidir ( $E_a$ ). Bu iki parametre arasındaki ilişkiyi gösteren diyagrama enerji profili diyagramı denir (Liu, 2000).

Bu enerji profili diyagramının şeklini çarpan uç ve numune ile ilişkili bir takım parametreler belirler. Kompozit yapıyı meydana getiren bileşenler, lif geometrisi, numunelerin kalınlık ve tabaka dizilişi ve çarpan ucun geometrisi gibi faktörler buna örnek olarak verilebilir. Şekil 3.5'de bir enerji profili diyagramı (EPD) şematik olarak verilmiştir. Diyagram genel olarak 3 ana bölgeye ayrılabilir.

- I. Çarpan ucun numuneye saplanmadığı, çarpma sonrası geri sıçramanın gerçekleştiği bölgedir. Bu bölgede eş enerji çizgisi ile deney verileri arasındaki fark yutulmayan artık enerjiye karşılık gelmektedir.
- II. Çarpan ucun numuneye nüfuz etmeye başladığı ve darbe enerjisi değerine bağlı olarak farklı derinlikte numuneye saplanıp kaldığı aralıktır. Bu bölgede darbe enerjisinin tamamına yakını numune tarafından yutulduğu için deney verileri eş enerji çizgisinin neredeyse üzerinde yer alırlar.
- III. Bu bölgede çarpan uç delinme eşiğinden daha büyük bir enerjiye sahiptir. Bu bölgede darbe enerjisinin arttırılması meydana gelen hasar miktarını çok fazla değiştirmedikinden yutulan enerji miktarı hemen hemen sabit kalmaktadır (Karakuzu, 2007).



Şekil 3.5: Enerji profili diyagramı (Karakuzu, 2007).

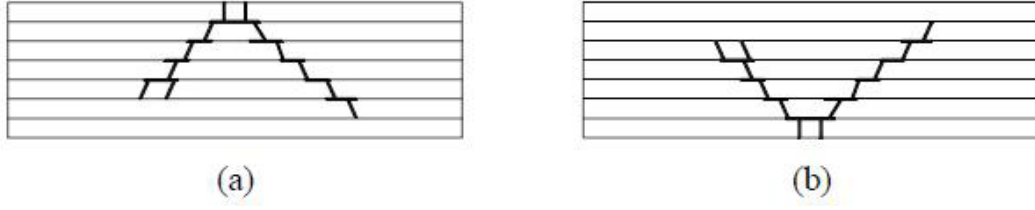
### 3.3 Darbe Testi Sonucunda Oluşan Hasar Mekanizmaları

Tabakalı kompozit malzemelerin darbe testi sonucunda oluşan hasar mekanizmaları genel olarak gözle görülebilmektedir. Bu yüzden oluşan hasarlar makroskobik olarak tespit edilmektedir.

#### 3.3.1 Matris Kırılması

Matris kırılması daha çok epoksi gibi gevrek olan malzemelerde görülür. Matris elyaftan daha az şekil değişimine sahip olduğundan darbeleri kırılma matrisme başlayacaktır. Matris kırığı tabaka lif yönlenme açılarına bağlıdır. Matris kırığı hasarlı tabakadaki lif yönlenme açısına paralel yayılır ve oluşumu kompozit levhanın rijitliğini azaltır (Evcı, 2010).

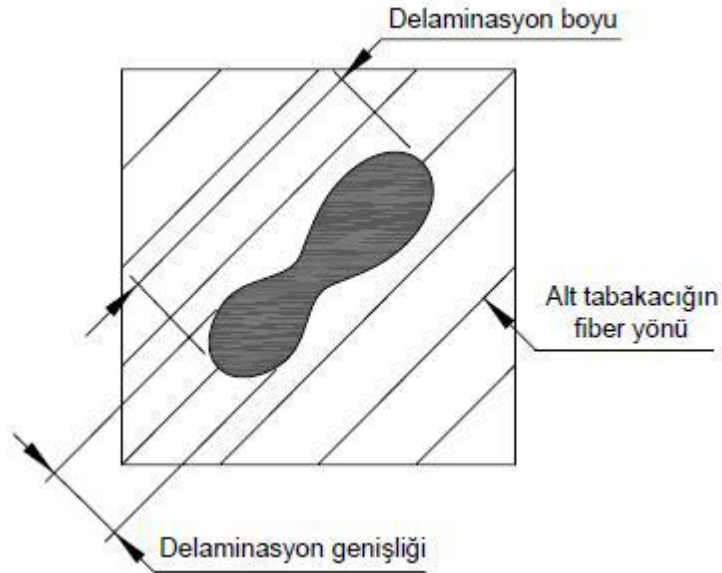
Kalın kompozitlerde; yüksek ve lokal temas gerilmelerinden dolayı matris kırılması vurucunun çarptığı ilk tabakada meydana gelir. Bu durumda, hasar ağacın dalları şeklinde olup levhanın üst tabakasından alt tabakaya doğru ilerler. İnce kompozitlerde ise levhanın eğilmesi nedeniyle matris kırılması en alt tabakada oluşur. Bu durumda yine hasar ağaç dalları şeklindedir. Fakat hasar ilerlemesi bu sefer alt tabakadan üst tabakaya doğru olur (Karakuzu ve diğ., 2007).



Şekil 3.6: Matris kırığının ilerlemesi (a) Kalın ve (b) ince levhalar için (Karakuzu ve diğ., 2007).

### 3.3.2 Tabakaların Ayrılması (Delaminasyon)

Delaminasyon, aynı katman grubundaki tabakalar arasında değil, farklı fiber oryantasyonlarına sahip tabakalar arasında matris bakımından zengin bölgede meydana gelen bir kırılmadır. Tabakalı kompozit malzemede katmanlar arasındaki farklı fiber yönelmelerinden dolayı bu katmanların eğilme rijitlikleri farklılık gösterir. Delaminasyonun en önemli sebebi; tabakalar arasındaki bu eğilme rijitlik farklılığı ve eğilme kaynaklı gerilmelerdir. Matris kırılması delaminasyonun başlaması açısından gerekli bir faktördür. Matris kırılması ve delaminasyon arasında sıkı sıkıya bir ilişki mevcuttur. Delaminasyonlar, tabakalar arası ara yüzey bölgesinde meydana gelirler. Deneysel çalışmalar delaminasyonun farklı lif yönlerine sahip birbirine komşu iki tabaka arasında meydana geldiğini göstermektedir. En büyük delaminasyon en alt ara yüzeyde meydana gelirken üst ara yüzeylere gidildikçe delaminasyon küçülür (Karakuzu ve diğ., 2007).



Şekil 3.7: Tipik bir delaminasyon örneği (Karakuzu ve diğ., 2007).

### 3.3.3 Fiber Kırılmaları

Hasar mekanizmalarından bir diğeri olan fiber kırılmaları, genellikle matris kırılması ve delaminasyonlardan sonra meydana gelir. Fiber kopmasına neden olan en önemli iki faktör;

- I. Yüksek lokal gerilmeler ve nüfuziyetin yaratmış olduğu etkilerdir (esas olarak kesme kuvvetleri tarafından idare edilen etkiler). Bu olay çarpan cismin hemen altında gerçekleşir.
- II. Yüksek eğme gerilmeleridir. Bu olay ise, darbeye maruz kalmayan yüzde meydana gelir (Karaca, 2010).

Levhanın tamamen hasara uğraması ancak tüm fiberlerin kırılması ile mümkün olur. Keskin uçlu bir vurucu, kör uçlu bir vurucuya göre daha fazla fiber kırılması meydana getirecektir. Fiber kırılması başladığında levhanın yük taşıma kapasitesi tamamen bitmemiştir. Çünkü levhanın diğer tabakacıklarında yükü taşıyabilecek fiberler hala vardır. Yük taşıma kapasitesinin tamamen bitmesi levhanın tüm fiberlerinin hasara uğraması ile olur (Evcı, 2010).

Darbe hataları, inceleme ölçütleri ve hasara sebep olan enerji seviyesi ile belirlenir. İnceleme ölçütü aşağıdaki durumlar için uygulanır:

- Özel Hassas Muayene Metotları (Ultrasonik, radyografi)
- Gözle Ancak Görülebilen Darbe Hasarı (BVID): X mm'den (projelere göre değişmektedir) derin olmayan durum olarak belirtilir. Hasar görmüş parça kırılma yükü değerini uzun süre koruyabilmelidir.
- Gözle Görülebilen Darbe Hasarı (VID) : Gözlemlene süresince hasar büyümemelidir. Hasar görmüş parça limit yük değerini uzun süre koruyabilmelidir.
- Bariz Görülebilen Darbe Hasarı (OVID) : Uzak mesafeden dahi fark edilebilen hasarlardır. Hasar görmüş parça limit yük değerini uzun süre taşıyabilmelidir.
- Kopmalar Sonucu Oluşan Hasar (DSD) : Tamir edilemez hasarlardır. İnış anına kadar olan yükleri koruyabilmelidir (Karaca, 2010).

## 4. YÖNTEM

### 4.1 Nano Karbon Katkılı Kompozit Levhaların Üretimi

Çok duvarlı karbon nanotüp (nano karbon) katkılı cam elyaf takviyeli kompozit levhalar 400 x 400 mm ölçülerinde ve ağırlıkça üç farklı nano karbon katkı oranında (0,5-1-2 %) üretilmiştir. Kompozit levhalar, nano karbon katkısının darbe davranışına etkisini inceleyebilmek ve karşılaştırmak için katkısız olarak da üretilmiştir.

Kompozit levhalarda fiber malzemesi olarak ağırlığı 200 gr/m<sup>2</sup> olan, 400 tex oranında woven örgülü (E-cam) cam elyaf kumaşı kullanılmıştır. Kullanılan kumaşın elastisite modülü 81500 MPa'dır. Levhalarda matris malzemesi olarak ise ARALDİT marka epoksi, ARADUR marka sertleştirici ve FİBERMAK marka pre-preg katalizörü kullanılmıştır. Epoksi reçinenin elastisite modülü 3300 MPa, çekme dayanımı ise 80 MPa'dır. Tüm bu malzemelerin temini ve kompozit levhaların üretimi İzmir'de faaliyet gösteren Fibermak Kompozit tarafından yapılmıştır. Katkı malzemesi olarak kullanılan karbon nanotüpler -OH bağlantılı (fonksiyonelleştirilmiş) olarak temin edilmiş olup sahip olduğu özellikler Tablo 4.1'de verilmiştir.

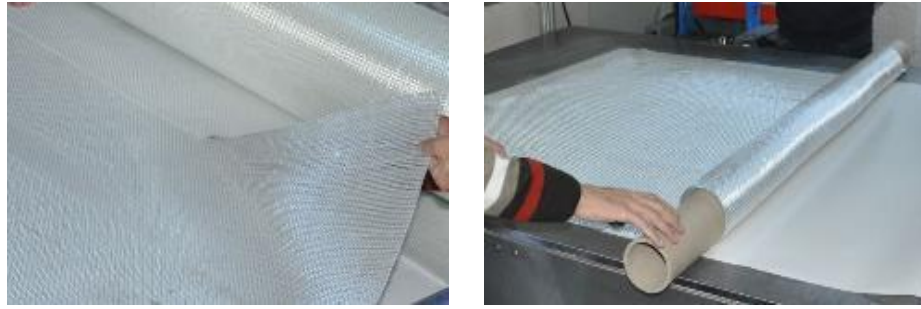
**Tablo 4.1:** ÇDKNT'ün mekanik özellikleri.

Saflık	%98
-OH İçeriği	Ağırlıkça %1,76
Dış Çap	10-20 nm
İç Çap	5-10 nm
Uzunluk	0,5-2,0 µm
Yoğunluk	0,22g/cm <sup>3</sup>
Elektrik İletkenliği	>100S/cm



Kompozit levhalar pre-preg yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Pre-preg reçine emdirilmiş işleme hazır kompozit kumaşlar için kullanılan terimdir. Dokunmuş ya da tek yönlü cam, karbon veya aramid kumaşlar üzerine reçine sisteminin emdirilmesi ve yarı kürleştirilmesi sonucu ürün hazırlanmaktadır. Pre-preg'ler kurlenme için gerekli reçine ve aktivatör sistemlerini içerdiği için ek reçine işçiliğine gerek duyulmadan serime hazır haldedir.

Üretim aşamasında ilk olarak cam elyaf 125x125 cm boyutlarında ebatlandırılmıştır. Ebatlandırılan cam elyaf kumaşlar, reçine emdirilme işlemi esnasında birbirlerine yapışmaması için silikonlu kâğıt üzerine serilmiştir.



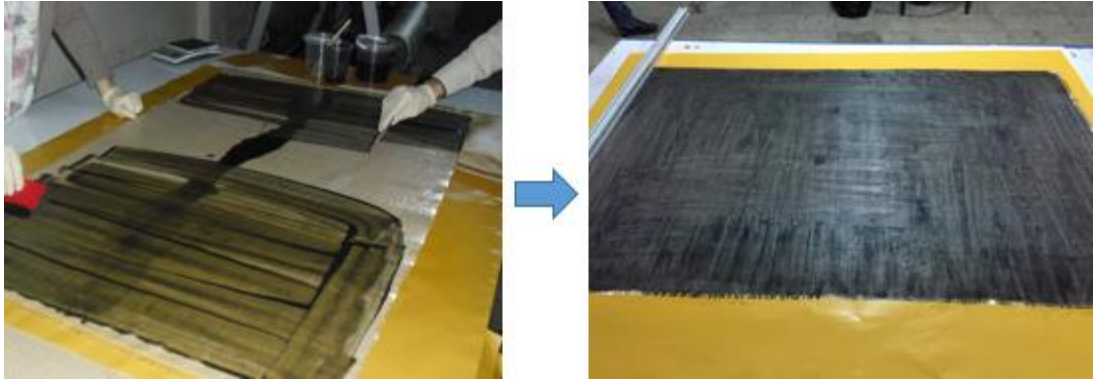
Şekil 4.1: Cam elyaf kumaşların ebatlandırılması.

Cam elyaf kumaşların kesim işlemi tamamlandıktan sonra ilk olarak katkısız kompozit levhalar üretilmiştir. Daha sonra nano karbon ve epoksi karışımı hazırlama işlemine başlanmıştır. Bu karışımlara ağırlıkça %0,5, %1 ve %2 nano karbon partiküller hassas terazi yardımıyla ilave edilmiştir. Hazırlanan karışımlar Labo markalı soğutmalı su sirkülatörünün özel cam beherine koyulmuştur. Karışıma hazır hale gelen nano karbon-epoksi karışımı Hielscher UP-400S marka ultrasonik karıştırıcı yardımıyla karıştırılmıştır. Bu soğutma sistemi karışımın sıcaklığının ani olarak artmaması ve buna bağlı olarak epoksi reçinenin kurlaşmaması için önem arz etmektedir. Bunun için nano karbon-epoksi karışımı sık sık dijital bir sıcaklık ölçer yardımıyla kontroller yapılmıştır.



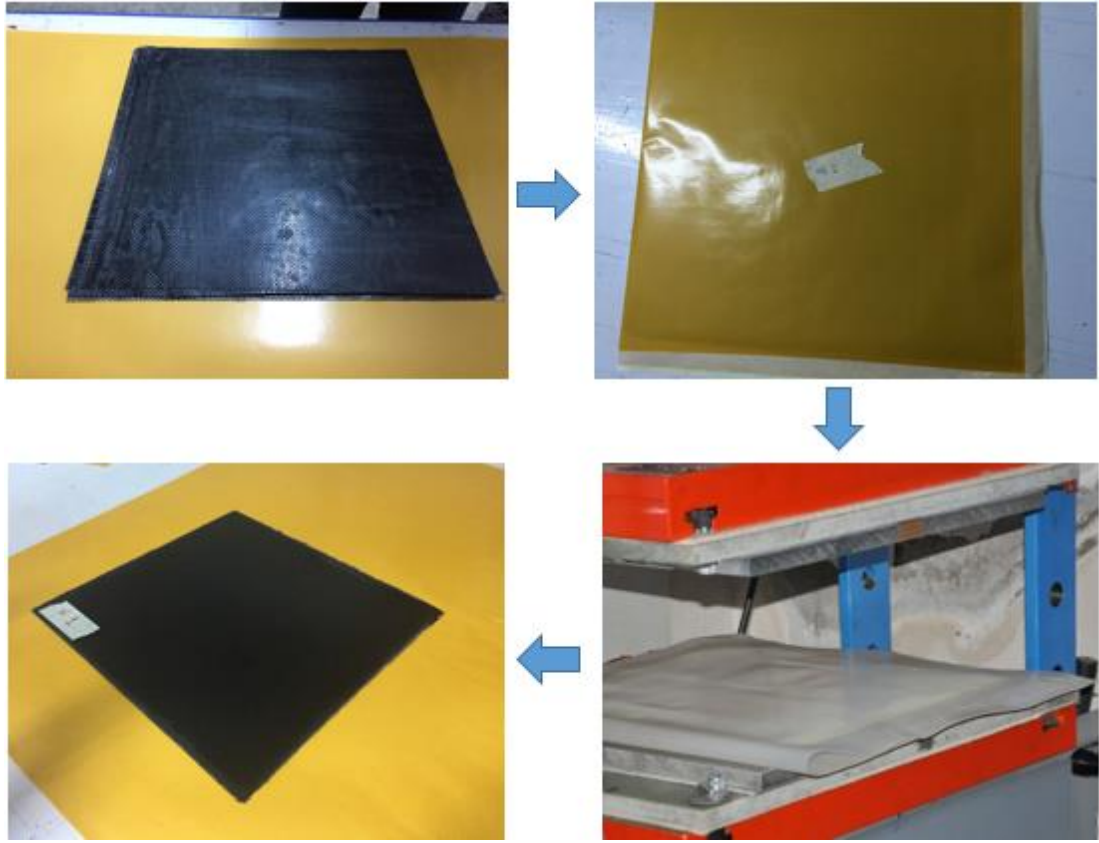
Şekil 4.2: Nano karbon-epoksi reçine karışımın sonikasyon işlemi.

Nano karbon-epoksi karışımı yaklaşık olarak 45-60 dakika arası sonikasyon işlemine tabi tutulmuştur. Sonikasyon işlemi neticesinde elde edilen homojen karışım özel pre-preg aktivatörlerin de ilavesi ile hazır hale gelmiştir. Hazırlanan bu nano karbon-epoksi karışımı daha önce masaya serilmiş olan cam elyaf kumaşların üzerine el yatırma metodu kullanılarak emdirilmiştir. Daha sonra reçine emdirilen bu kumaş 15 gün boyunca havalandırılarak reçinenin cam elyafa tam olarak emmesi, oluşan hava kabarcıklarının ortamdaki uzaklaştırılması ve kumaşın daha iyi bir şekilde jelleşmesi sağlanmıştır.



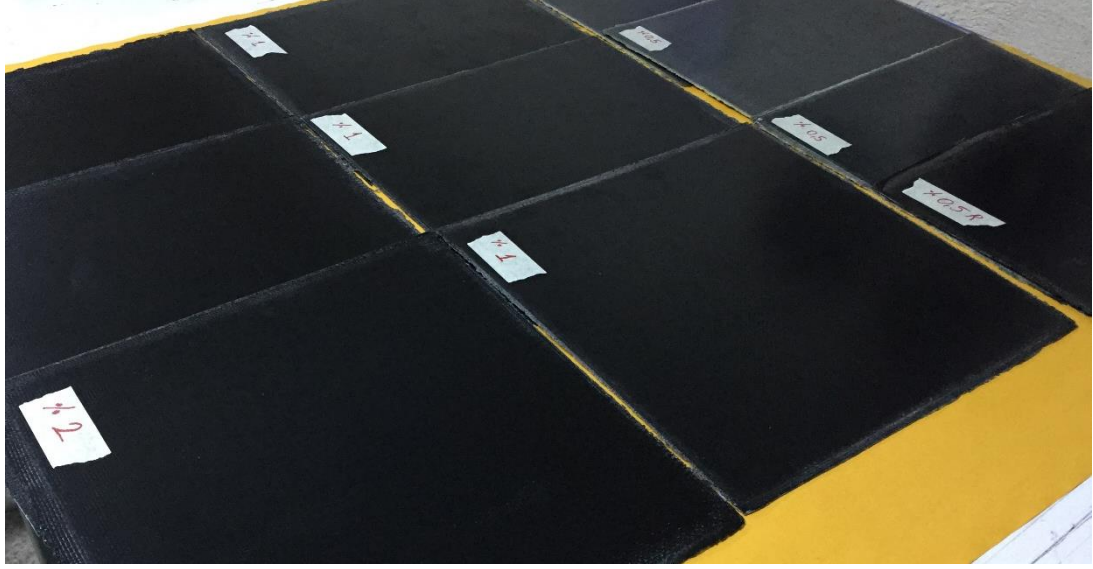
Şekil 4.3: Cam elyaflara el yatırma metodu ile reçinenin uygulanması.

15 gün sonunda reçine emdirilmiş cam elyaf kumaşlar 40x40 cm boyutlarında ebatlandırılmıştır. Bu ebatla kesilmesinin nedeni ısıtıcı presin kalıplarının bu ebatla olmasıdır. 2 mm kalınlık elde etmek için 16 tabaka reçine emdirilmiş kumaş silikonlu kâğıttan ayrılarak üst üste yerleştirilmiştir. Üst üste konularak istenilen kalınlıkta hazırlanan kumaşlar tekrar yanmaz silikon kâğıt ile kaplanarak presleme işlemine hazır hale getirilmiştir. Daha sonra kompozit levhalar hidrolik preste 120°C sıcaklığında 5 bar basınç altında iki saat süresince kürleme işlemine tabi tutulmuştur. İki saat kürleme işlemi sonrasında presin ısıtıcı sistemi kapatılarak iki saat soğuması beklenmiştir. Bu bekleme süresinin amacı kompozit levhanın ani sıcaklık değişimine maruz kalmasını ve levhanın yüzeysel çarpılmasını önlemektir.



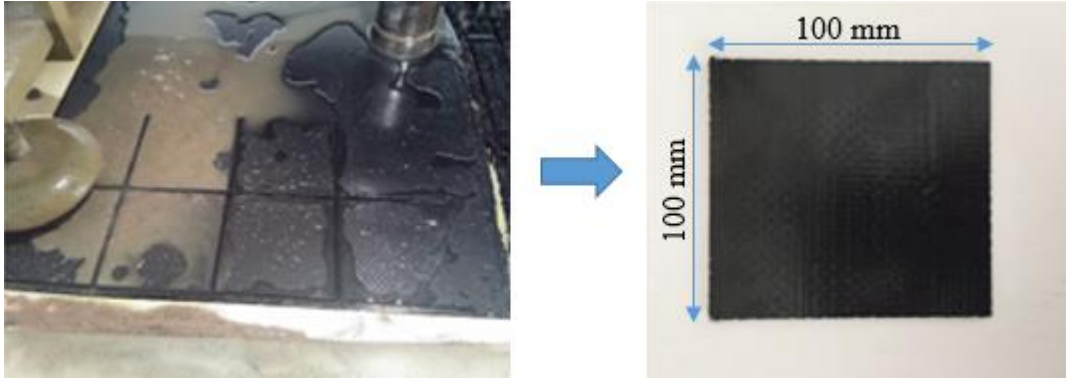
Şekil 4.4: Kesilen kumaşların üst üste konulup pres altında levha üretimi.

Tüm yapılan bu işlemler sonucu 40x40 cm boyutlarında kompozit levhaların üretimi tamamlanmıştır. Üretilen levhaların karışmaması için üstelerine nano karbon yazılı etiketler yapıştırılmıştır.



Şekil 4.5: Presten çıkan ve üretimi tamamlanan kompozit levhalar.

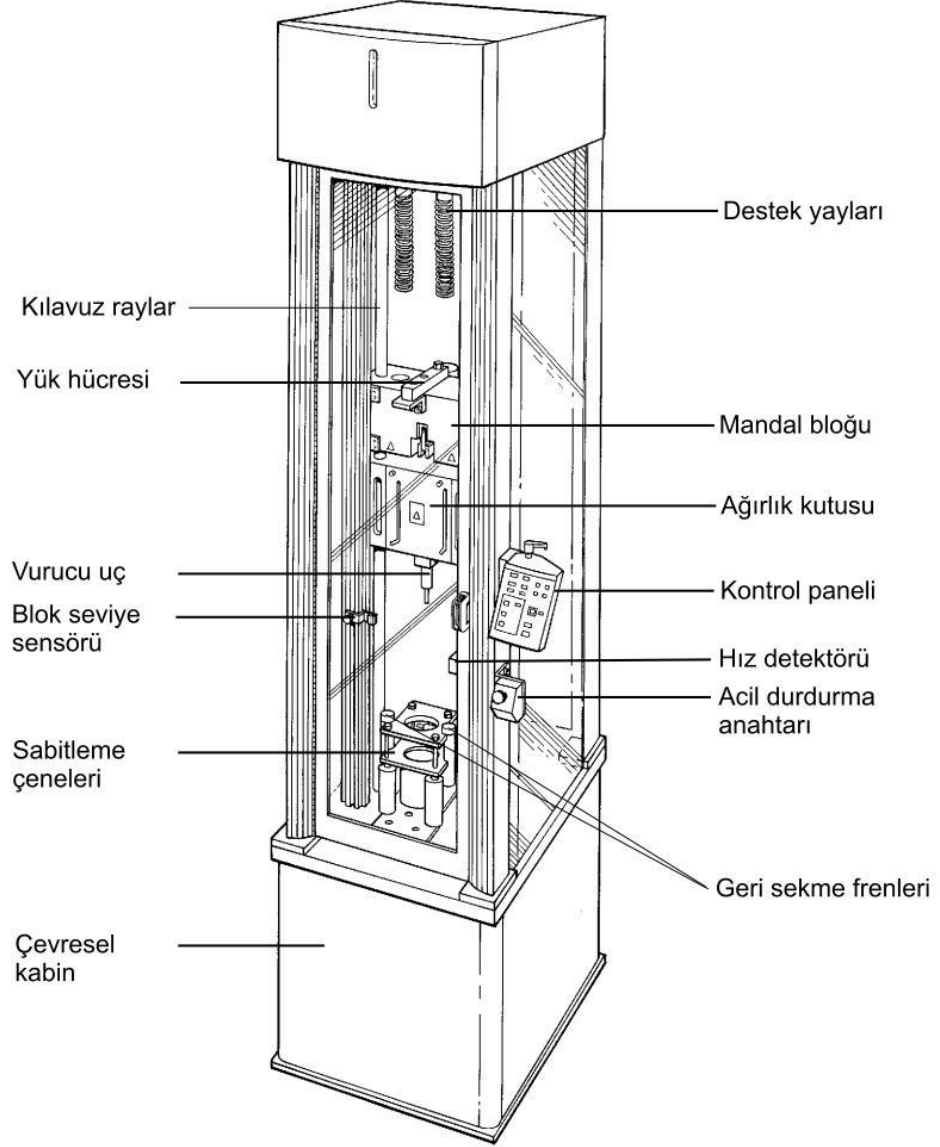
Üretilen tüm kompozit levhaların kesim işlemleri su jeti kesimi ile yapılmıştır. Su jeti aşındırıcı bir kum yardımıyla su ile kesim yapan bir metottur. Su jeti kesimi hem kompozit levhaların yüzeylerine zarar vermeyen hem de kesim yaparken ısınma problemi olmayan bir kesme yöntemidir. Su jeti kesimi tamamlanan numune darbe testine hazır hale gelmiştir.



Şekil 4.6: Kompozit levhanın su jeti ile kesimi ve darbe numuneleri.

## 4.2 Darbe Test Cihazı ve Özellikleri

Üretilen kompozit plakaların darbe davranışlarının belirlenmesinde Instron-Dynatup 9250 HV model darbe test cihazı kullanılmıştır. Test cihazı yer tipi, ağırlık düşürme prensibine göre çalışan ve sistem kontrollü darbe test cihazıdır.

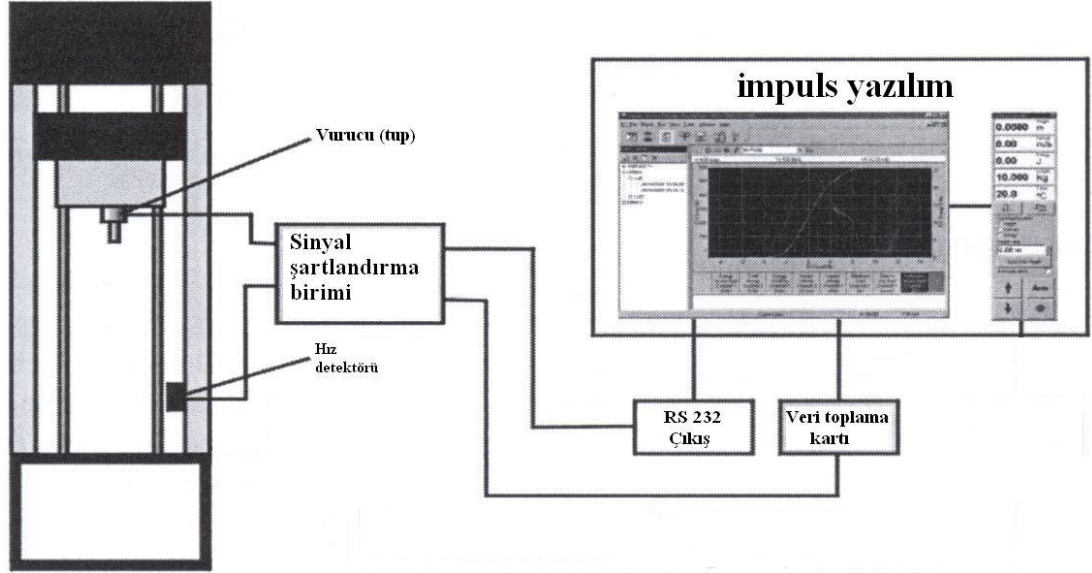


Şekil 4.7: Darbe test cihazı ve bölümleri.

Sistem kontrollü Dynatup 930-I impuls veri toplama yazılımı tarafından sağlanmaktadır. Ayrıca cihaz düşen ağırlığın yükseklik, hız ve enerji gibi istenilen girdileri kontrollü olarak numune üzerine düşürülmesine olanak tanımaktadır.



Vurucu numuneye darbenin yapılmasını ve yük sinyallerinin üretilmesini sağlar. Darbe testinden sonra vurucu tarafından oluşturulan yük sinyalleri, sinyal şartlandırma birimi aracılığı ile verileri bilgisayara bağlı veri toplama kartına gönderilir. Bu veri toplama kartı da verileri, IMPULSE adlı veri yazılımına aktararak test sonuçlarının grafik olarak elde edilmesini sağlar.



Şekil 4.8: Darbe testi IMPULSE yazılımı akış şeması (Sayer, 2009).

### 4.3 Nano Karbon Katkılı Kompozit Numunelere Darbe Testinin Uygulanması

Darbe testine başlanmadan önce hız detektörünün doğru pozisyon alması testin doğru yapılabilmesi ve doğru sonuç elde etme açısından oldukça önemlidir. Bunun için yapılan işlemler şu şekildedir;

- Numune, bağlantı çenelerine yerleştirilir,
- Vurucu ucu numuneye değene kadar yaklaştırılır,
- Hız detektör bağlantı vidaları sökülür,
- Hızı detektörü yukarı aşağı hareket ettirilerek, hız detektör bayrağının kenarının hız sensörünün orta ekseninden 5-6 mm aşağısına gelecek şekilde ayarlanır,
- Hız detektörü sabitlenir.

Tüm bu işlemlerin ardından test cihazı darbe testi yapılmasına hazır hale gelmektedir. Yapılan tüm darbe testleri için vurucu, üzerindeki ağırlıkla beraber toplam ağırlık 6,32 kg ve vurucu uç çapı ise yarı küresel olarak 12,7 mm'dir.

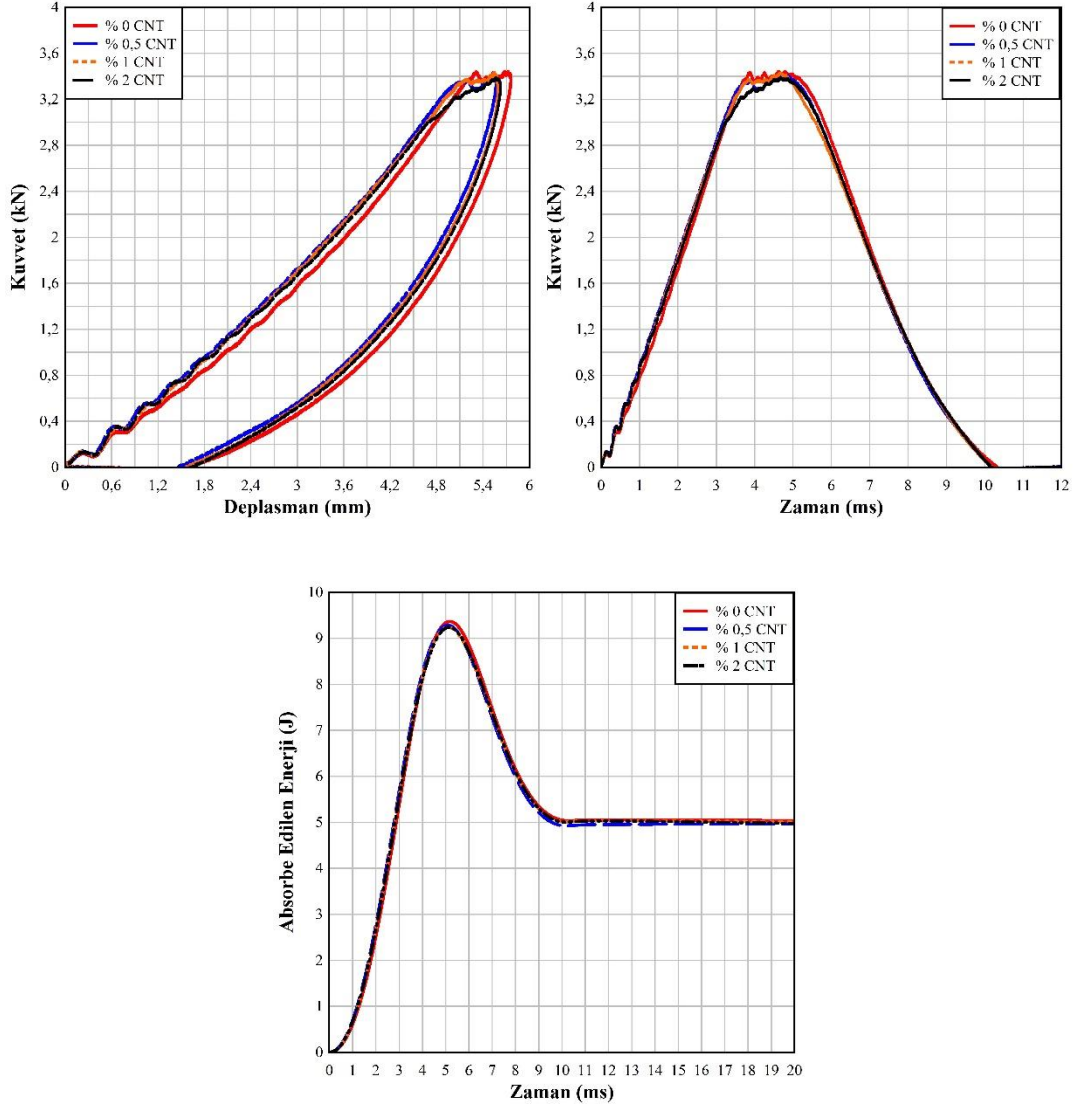


Şekil 4.9: Kompozit numuneye darbe testinin uygulanması.

Kompozit numunelere 3 ile 39 J arasında 3 J'lük artan darbe enerjisiyle numuneler delinene kadar oda sıcaklığında testler gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.9). Delinme gerçekleşene kadar testlerin yapılmasının nedeni hasar tespit eşiğinin belirlenmesidir. Yapılan darbe testleri sonucu darbe cihazından kompozit levhaların darbe davranışlarını gösteren birçok grafik elde edilebilmektedir. Bu grafikler, kompozitlerin darbe davranışına ait vurucunun numune yüzeyinden geri sekmesi (rebounding), vurucu ucunun numuneye saplanması (penetration) ve vurucunun numuneyi delip geçmesi (perforation) gibi durumların anlaşılmasını sağlamaktadır.

## 5. DENEY SONUÇLARI

### 5.1 Darbe Enerjilerine Göre Sonuçların Karşılaştırılması

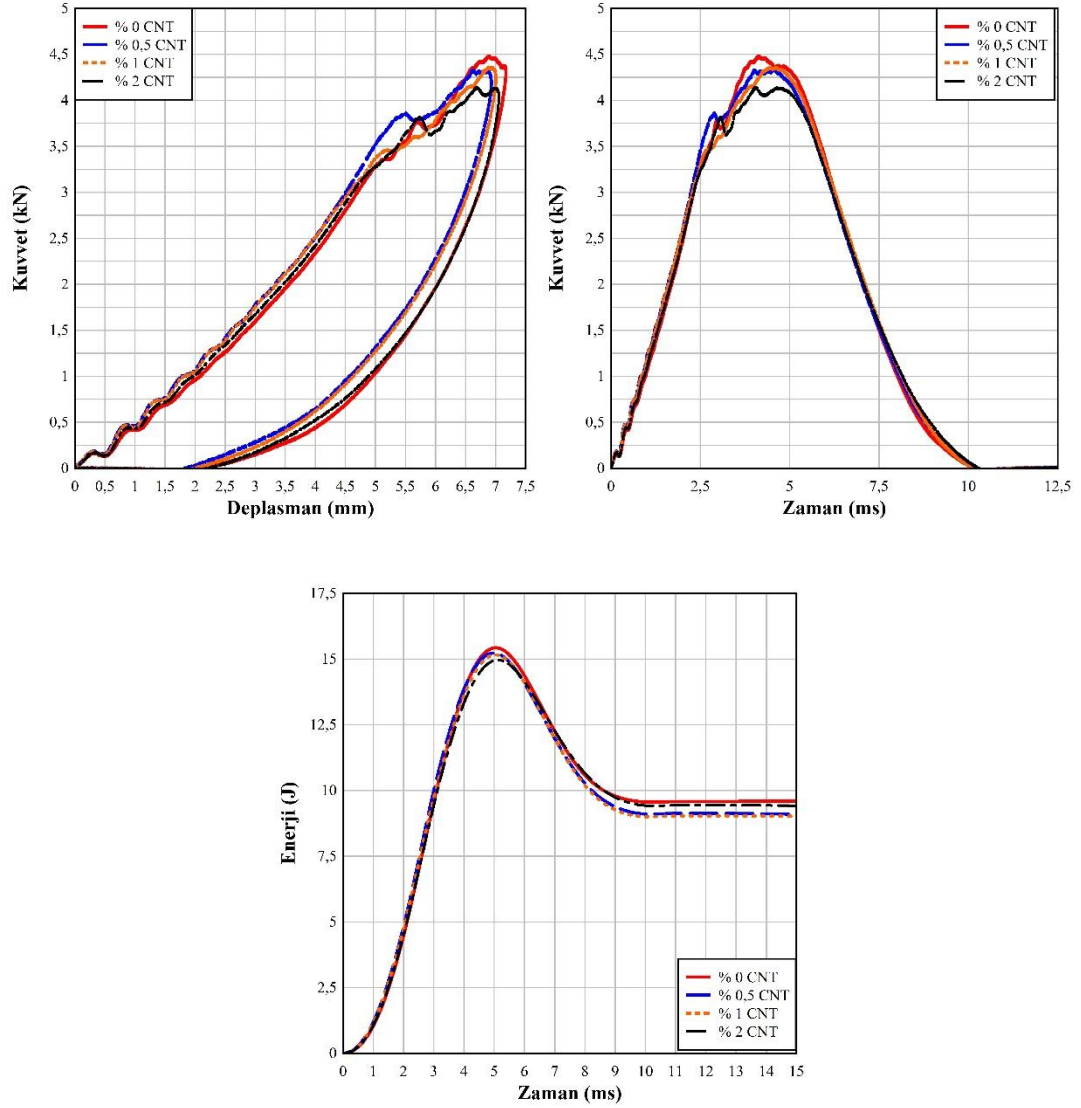


Şekil 5.1:  $E_i=9$  J darbe enerjisi için F-d, F-t ve E-t grafikleri

Şekil 5.1’de numunelere  $E_i=9$  J darbe enerjisi uygulandığında elde ettiğimiz kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman ve absorbe edilen enerji-zaman grafikleri görülmektedir. Kuvvet-deplasman eğrilerine bakacak olursa dört oranda da kapalı tip eğri oldukları yani herhangi bir hasara uğramadıkları gözlemlenmiştir.



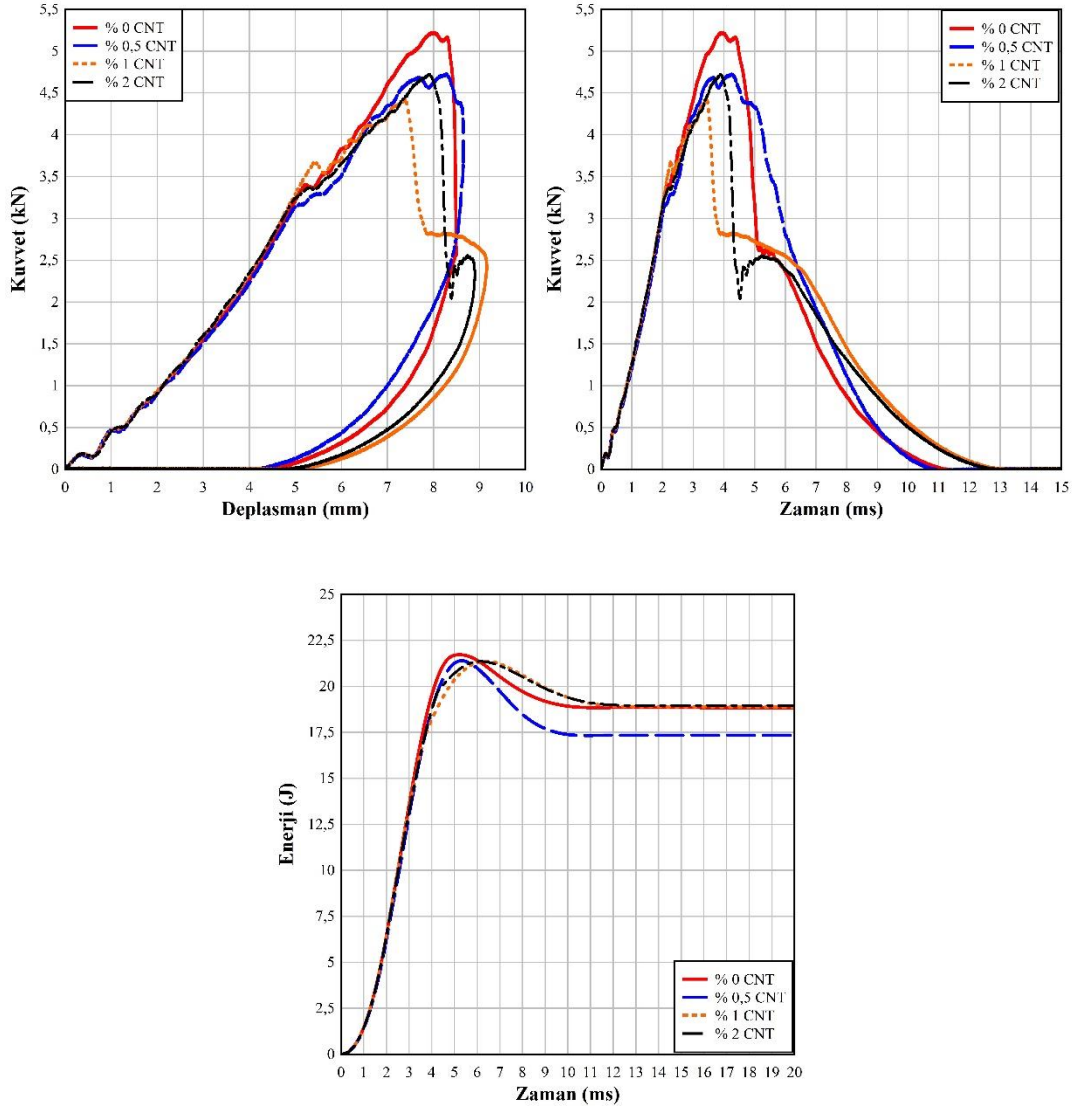
Kendi aralarında incelenecek olursa nano karbon katkılı olan numunelerin katkısız olan numuneye göre eğimlerinin yani eğilme rijitliği değerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Kuvvet-zaman ve absorbe edilen enerji-zaman grafiklerine bakacak olursak her iki grafikte de eğrilerin birbirine çok yakın oldukları ve uygulanan darbe enerjisine karşı hemen hemen benzer özellik gösterdikleri görülmüştür.



Şekil 5.2:  $E_i=15$  J darbe enerjisi için F-d, F-t ve E-t grafikleri.

Şekil 5.2’de numunelere  $E_i=15$  J darbe enerjisi uygulandığında elde ettiğimiz kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman ve absorbe edilen enerji-zaman grafikleri görülmektedir. Kuvvet-deplasman ve kuvvet-zaman eğrilerine bakıldığında

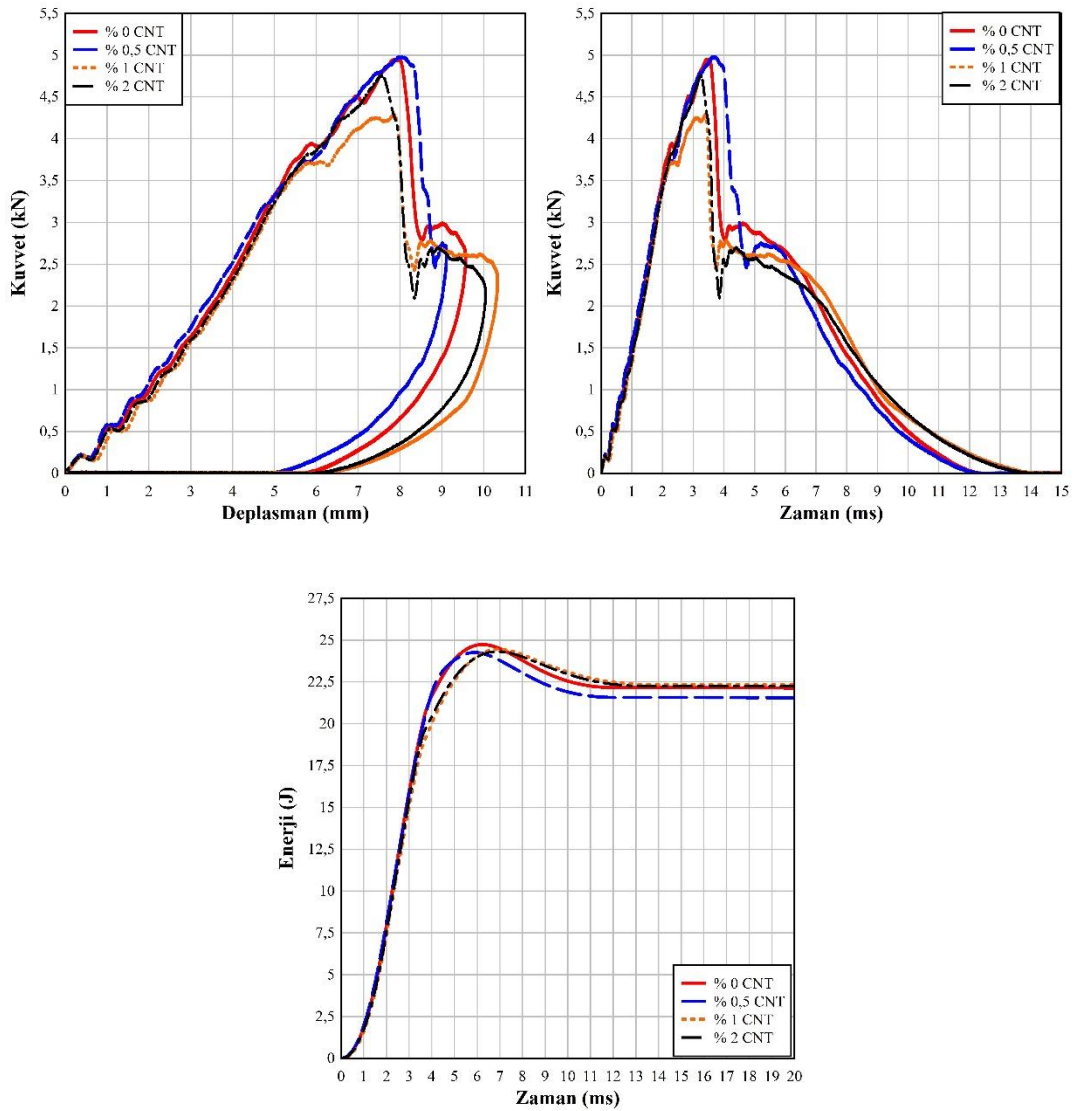
numunelerde hafif hasarların meydana geldiği anlaşılmaktadır. Eğilme rijitliğinin yine katkılı olan numunelerde daha iyi olduğu fakat aradaki farkın kapandığı gözlemlenmektedir. Enerji-zaman grafiği incelendiğinde ise katkılı olan numuneler daha az enerjiyi absorbe ettikleri ve katkısız olan kompozit numuneye göre daha fazla enerjiyi geri sekme için kullandıkları tespit edilmektedir.



Şekil 5.3:  $E_i=21$  J darbe enerjisi için F-d, F-t ve E-t grafikleri

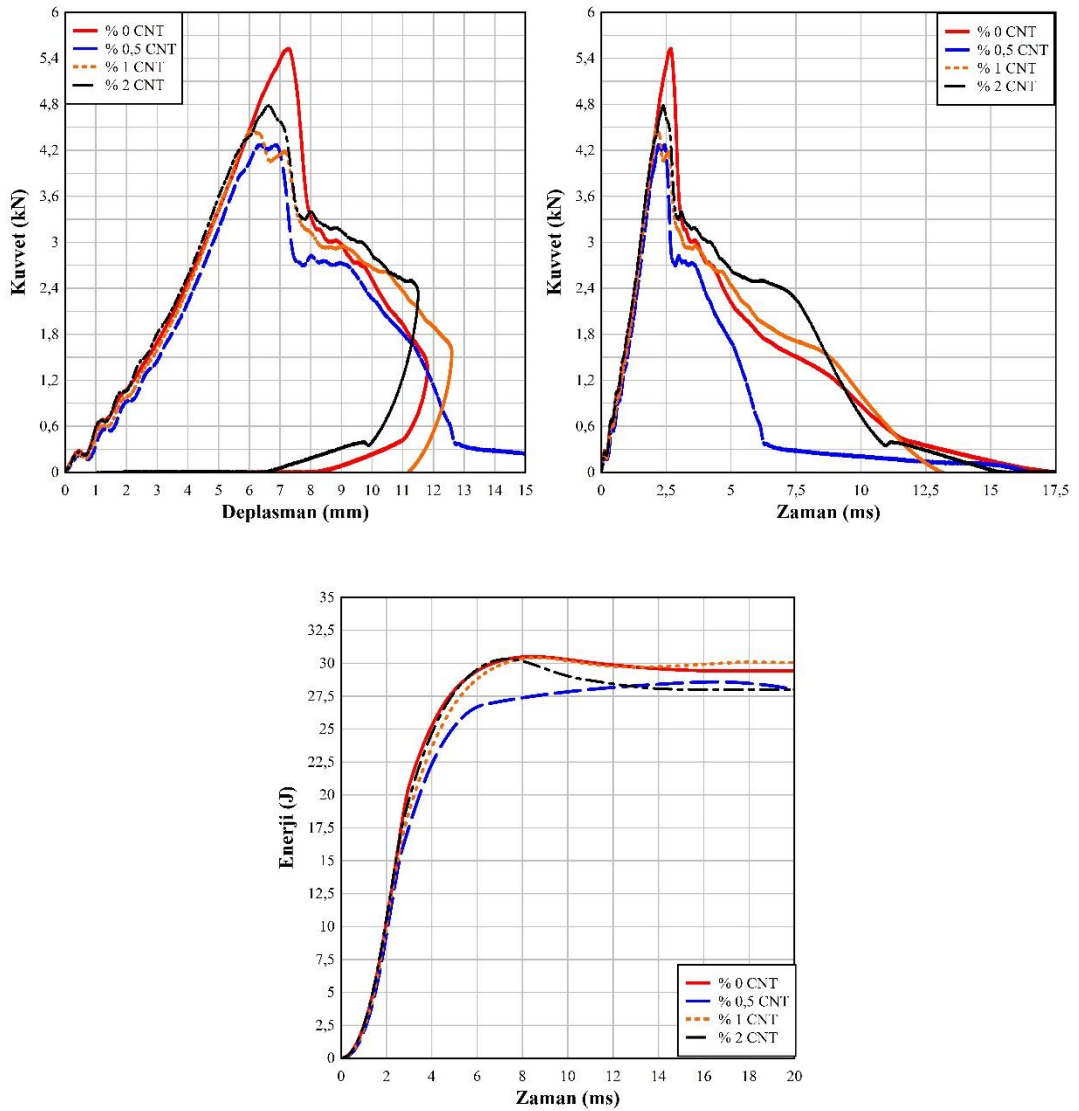
Nano karbon katkılı kompozitlere yapılan darbe testleri sonucu  $E_i=21$  J darbe enerjisi değeri *kritik enerji seviyesi* olarak tanımlanmıştır. Bu tanımın yapılmasının nedeni bu değer altında ve üstünde kompozit numunelerin farklı karakter göstermesidir.

$E_i=21$  J darbe enerjisi vurulan numunelere ait grafikler Şekil 5.3'te çizdirilmiştir. Kuvvet-deplasman eğrileri incelendiğinde eğrilerin hala kapalı tip eğri oldukları ve numunelerde sadece mini hasar mekanizmalarının oluştuğu tespit edilmektedir. Bu darbe enerjisi değerinde ağırlıkça % 0,5 CNT katkı numunenin diğer katkı oranlı numunelerden daha pozitif sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir. Bu katkı oranının mekanik özellikler bakımından da en iyi sonuçlar verdiği de yapılan literatür çalışmalarında görülmektedir. % 0,5 CNT katkı numune diğer katkı ve katkısız numunelere nazaran daha az enerjiyi absorbe etmiş ve daha az hasara uğramıştır.



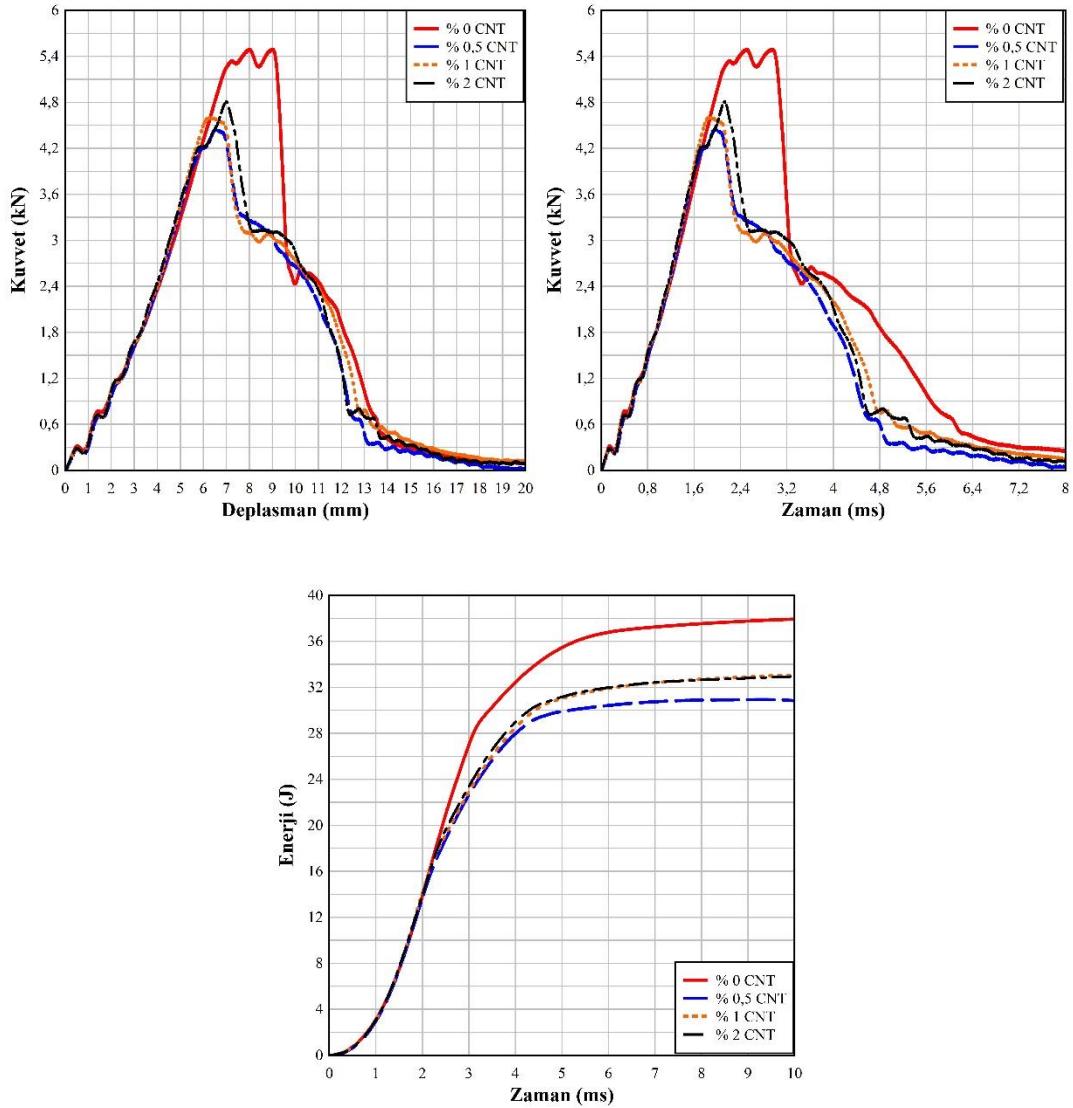
Şekil 5.4:  $E_i=24$  J darbe enerjisi için F-d, F-t ve E-t grafikleri.

Darbe enerjisi  $E_i=24$  J değeri numuneye uygulandığında elde edilen grafikler Şekil 5.4'te verilmektedir. Kuvvet-deplasman eğrileri incelenecek olursa darbe testi uygulanan tüm numunelerde hasar oluştuğu gözlemlenmektedir. Bu hasarların henüz matris kırılmaları ve delaminasyonlar olduğu da tespit edilmiştir. Enerji-zaman grafiği Şekil 5.4 ve 5.3 karşılaştırıldığında ağırlıkça % 0,5 CNT oranlı kompozit numunenin absobe ettiği enerji artmış ve diğer kompozitlerin eğrilerine yaklaşmıştır. Buradan da kompozit numunelerin hemen hemen fiber kopma sınırlarına geldikleri ve delinme sınırına yaklaştıkları tahmin edilmektedir.



Şekil 5.5:  $E_i=30$  J darbe enerjisi için F-d, F-t ve E-t grafikleri.

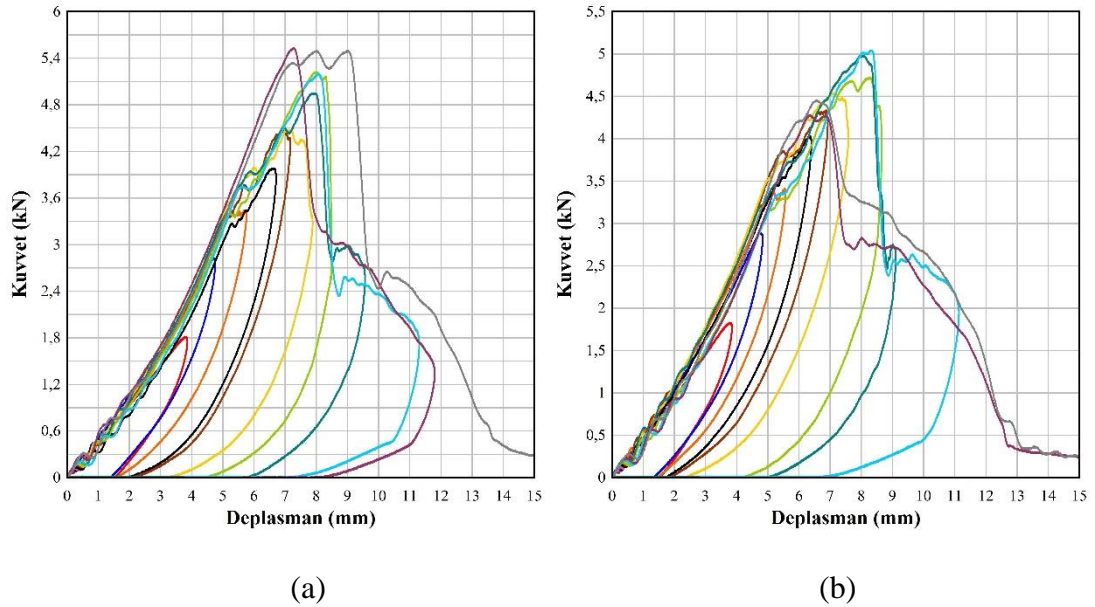
Şekil 5.5’de  $E_i=30$  J darbe enerjisi uygulanan kompozit numunelere ait darbe grafikleri gösterilmektedir. Kuvvet-deplasman eğrileri incelendiğinde Katkısız, %1 ve %2 nano karbon katkılı kompozitlerin eğileri kapalı tip eğri olduğu görülmektedir. % 0,5 nano karbon katkılı olan kompozite ait eğri ise açık tip eğri olduğu, yani numunenin delindiği tespit edilmiştir. Aynı şekilde kuvvet-zaman ve enerji-zaman grafikleri de incelendiğinde aynı yorumları yapmak mümkündür. Enerji-zaman grafiğine bakılacak olursa eğrinin yukarı doğru yönlendiği görülmektedir. Bu numunenin delindiğini göstermektedir. Düşük darbe enerji seviyelerinde en iyi davranışı gösteren % 0,5 nano karbon katkılı numunenin yüksek darbe enerji seviyelerinde ilk delinen numune olması katkı malzemesi olarak kullanılan CNT’nin kompoziti gevreklettiği olarak düşünülmektedir.



Şekil 5.6:  $E_i=39$  J darbe enerjisi için F-d, F-t ve E-t grafikleri.

$E_i=39$  J darbe enerjisi vurulan numunelere ait grafikler Şekil 5.6'da çizdirilmiştir. Tüm grafikler incelendiğinde darbe testi uygulanan bütün numunelerde delinme olayının gerçekleştiği net bir biçimde görülmektedir. Kuvvet-deplasman eğrilerinin hepsinin açık tip eğri olması, kuvvet-zaman grafiğinde bütün eğrilerin yatay eksene paralel bir şekilde gitmesi ve enerji-zaman grafiğinde eğrilerin hepsinin yukarıya doğru yönelmesi numunelerde delinme olayının gerçekleştiğini göstermektedir. Buna bağlı olarak numunelerin hepsinde delinme olayı gerçekleştiği için darbe testi bu enerji seviyesine kadar yapılmıştır. Yani kompozit numunelere vurulan son darbe enerjisi 39 J enerji değeridir.

## 5.2 Katkısız ve Nano Karbon Katkılı numunelerin Kuvvet-Deplasman Eğrisine göre Karşılaştırılması



Şekil 5.7: Kuvvet-deplasman (F-d) eğrileri a)Katkısız ve b)% 0,5 CNT katkı.

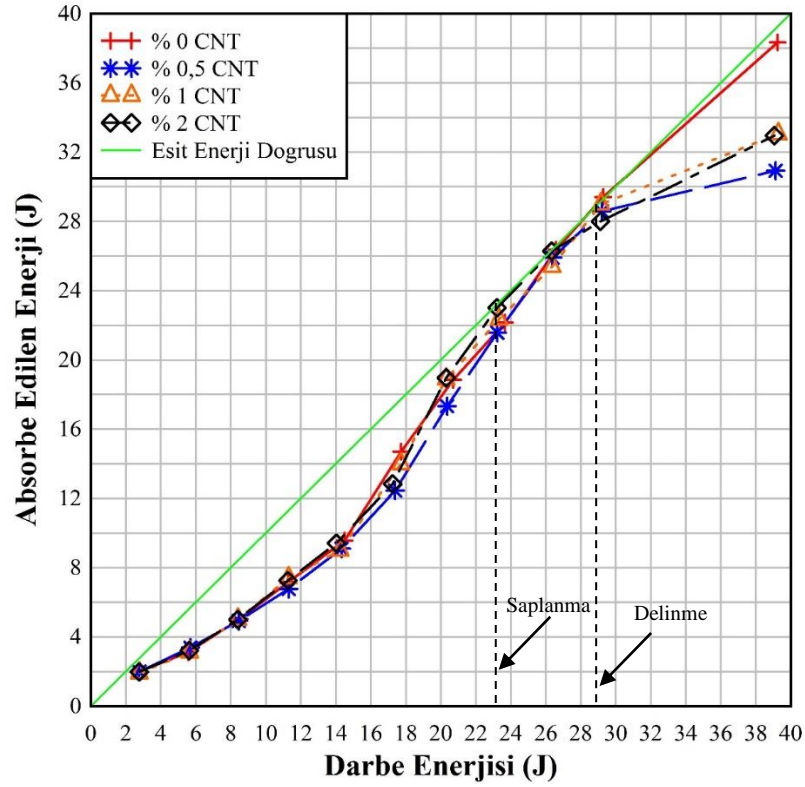
Şekil 5.7'de katkısız ve % 0,5 CNT (nano karbon) katkı olan numunelere artan darbe enerjisine ait kuvvet-deplasman eğrileri verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi her bir eğride bir artış yani yükleme, ulaştığı bir maksimum kuvvet değerine ve yükten düşüş yani azalma kısmı görülmektedir.

Şekil 5.7(a)'daki grafik incelendiğinde 3-30 J arasındaki eğrilerin her biri kapalı tip eğrilerdir. Yani numunede matris kırılması ve delaminasyon gibi hasarlar meydana gelmiş, fakat saplanma ve delinme gibi hasar mekanizmaları gerçekleşmemiştir.  $E_i=39$  J darbe enerjisi uygulandığında eğri açık tip eğriye dönüşmüş olup numunede ya saplanma ya da delinme hasarı meydana geldiği gözlemlenmektedir.

Şekil 5.7(b)'de ise % 0,5 CNT katkılı numuneye ait kuvvet-deplasman grafiği verilmiştir. Yine bu numunelere de katkısız olan numunelerle aynı enerji seviyelerinde darbe yükü uygulanmıştır. Bu grafikteki eğriler incelendiğinde 3-27 J arasındaki darbe enerji seviyelerinde eğri kapalı bir tip eğri olduğu görülmektedir. 30 J ve 39 J enerji seviyelerine bakıldığında eğriler açık tip eğrilere dönüşmüştür. Buradan yola çıkılarak % 0,5 CNT katkılı olan numune 30 J değerinde delinme hasarına uğradığı tespit edilmiştir.

Bu iki grafik göz önüne alınarak karşılaştırıldığında, katkısız olan numunenin % 0,5 CNT katkılı olan numuneye göre % 7 daha fazla yük taşıdığı tespit edilmiştir. Kritik enerji seviyesi olarak belirlenen 21 J seviyesinin altında katkılı olan numunenin eğilme rijitliği değerinin daha iyi olduğu fakat bu seviyenin üstünde darbe karakterinin değiştiği gözlemlenmiştir. Bu değişiklik Şekil 5.7'de net bir şekilde görülmektedir.

### 5.3 Enerji Profil Diyagramına Göre Karşılaştırma



Şekil 5.8: Enerji profili diyagramı (EPD).

Darbe yüküne maruz bırakılan kompozitler için yapılan deneysel çalışmalar, numunenin delinme sınırının en önemli hasar kademesi olduğunu göstermektedir (Liu vd 1998). Buna göre, nano karbon katkılı kompozitlerin darbe davranışlarının enerji absorbe edebilme yeteneği, vurucunun numuneye saplanma değeri ve numunenin delinme değerleri olarak enerji profili diyagramından değerlendirilmektedir. Darbe testi uygulanan tüm numunelere ait enerji profili diyagramları Şekil 5.8’de çizdirilmiştir.

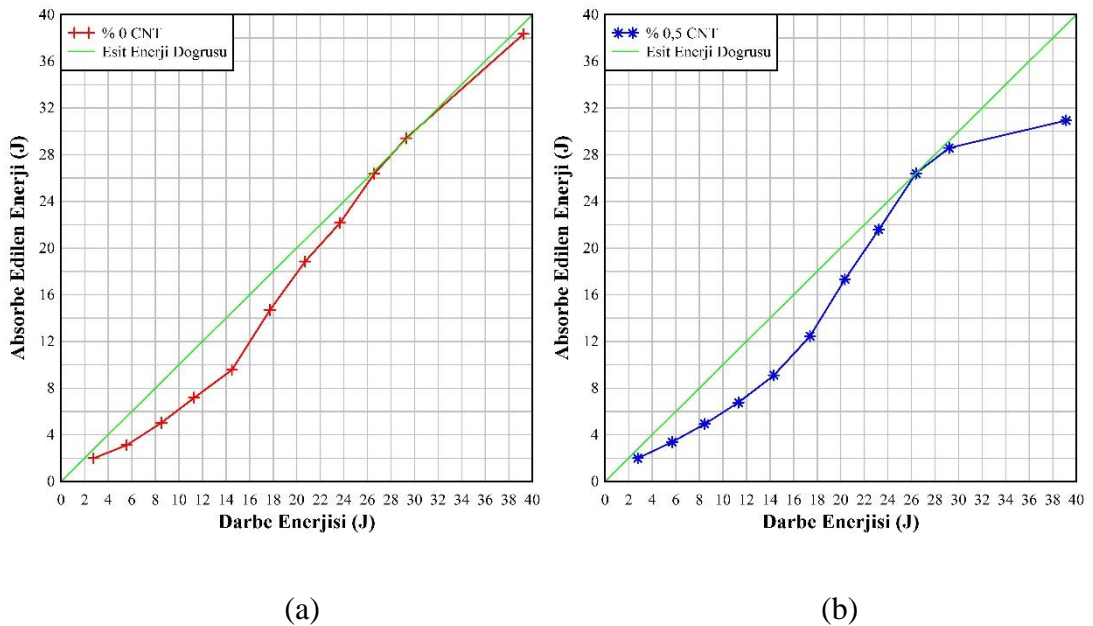
Şekil 5.8’de , % 0,5 CNT katkılı kompozit numunenin fazla enerjisinin diğer kompozit numunelere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Fazla enerji, darbe enerjisi ve absorbe edilen enerji arasındaki fark olarak tanımlanabilir. Yani fazla enerji yapılan darbe testi sonucu vurucuda kalan enerjidir. Eğriler detaylı olarak incelendiğinde kritik enerji seviyesi olarak tanımlanan 21 J değerine kadar nano karbon katkılı olan numunelerin fazla enerjisinin daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Fakat bu kritik enerji seviyesinde eğriler birbiri içerisine girmiş, bu kritik enerji



seviyesinin üstünde de katkısız olan numunenin fazla enerjisinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni nano karbon katkısının kompozit yapıyı gevrekletirmesi olarak düşünülmektedir. Bu da kompozit yapının delinme sınırını aşağıya doğru çekmesine sebep olmaktadır.

Düşük darbe enerji seviyelerindeki fazla enerji değerleri incelenecek olursa, % 0,5 CNT katkılı olan numunede katkısız olan numuneye oranla yaklaşık olarak % 12 daha çok fazla enerji kalmaktadır. Bu oran % 1 CNT katkılı olan kompozit numunede % 9 ve % 2 CNT katkılı olan kompozit numunede ise % 6'dır. Buradan da yola çıkarak düşük darbe enerji seviyelerinde nano karbon katkılı olan numunelerin katkısız olan numuneye göre daha sağlam bir yapı oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Yüksek darbe enerji seviyelerinde ise nano karbon katkılı kompozitlerin fazla enerjileri, katkısız olan numuneye göre negatif yönde ilerlemiştir. Yani kritik enerji seviyesi olarak tanımlanan 21 J enerji seviyesinin üstünde Şekil 5.8'de görüldüğü gibi nano karbon katkılı kompozitler eşit enerji doğrusuna katkısız olana nazaran daha fazla yaklaşmışlardır. Kompozit numunelerin eşit enerji doğrusuna yaklaşmaları malzemede hasar mekanizmalarının da oluşmasına sebebiyet vermektedir. Bu yüzden numune eğrilerinin eşit enerji doğrusuna ne kadar uzak ise o kadar az hasar meydana gelmektedir.

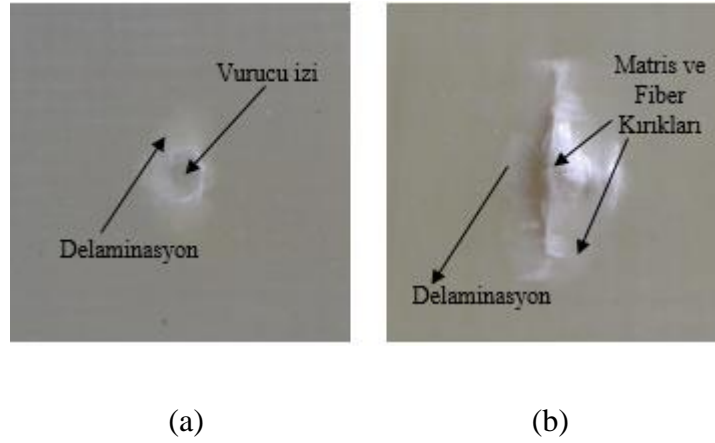


Şekil 5.9:Farklı oranlar için enerji profili diyagramı (EPD) a)Katkısız ve b)% 0,5 CNT katkılı.

Şekil 5.9'da katkısız ve % 0,5 CNT katkılı olan numunelerin enerji profili diyagramı (EPD) saplanma ve delinme sınırlarını daha net inceleyebilmek için ayrı ayrı çizdirilmiştir. Şekil 5.9a incelendiğinde katkısız numuneye ait eğri görülmektedir. Burada katkısız numunenin saplanma sınır değerinin yaklaşık 27 J, delinme sınır değerinin ise yaklaşık 33 J olduğu tespit edilmiştir. Şekil 5.9b incelendiğinde ise % 0,5 CNT katkılı kompozit numunenin saplanma sınır değerinin yaklaşık 26 J, delinme sınır değerinin de yaklaşık olarak 29 J olduğu tespit edilmiştir.

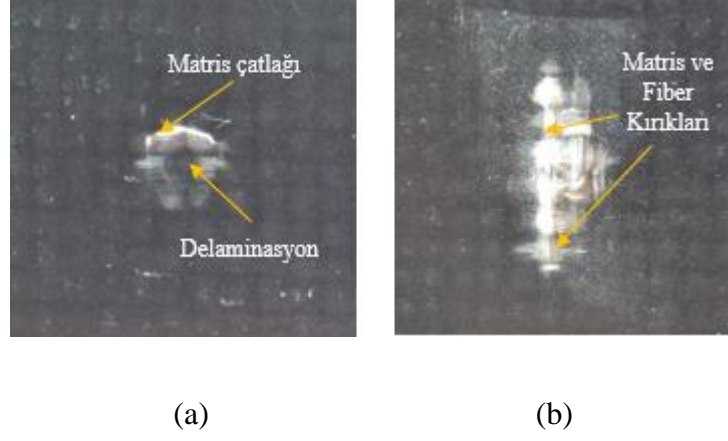
#### 5.4 Kompozitlerde Oluşan Hasar Mekanizmaları

Darbe testi uygulanan numunelerin test sonrasında fotoğrafları çekilmiş ve oluşan hasar mekanizmaları makroskobik olarak incelenmiştir.



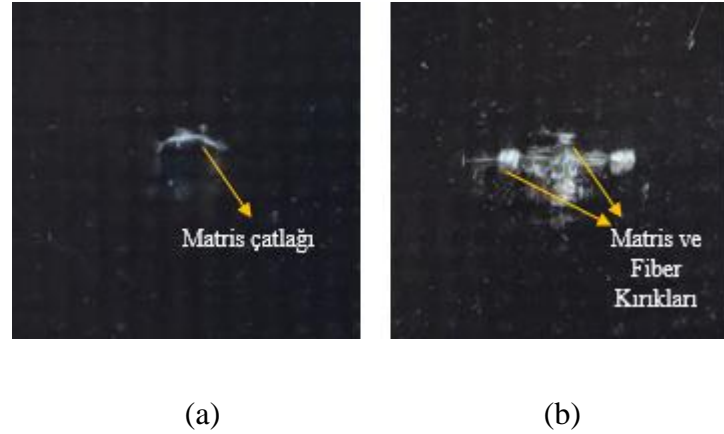
Şekil 5.10: Katkısız numunede  $E_i=15J$  darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey.

Şekil 5.10 (a) ve (b)'de 15 J darbe enerjisi değerinde katkısız numunede oluşan hasar mekanizmaları görülmektedir. Numunenin üst yüzeyinde darbe uygulayan vurucu izi ve delaminasyonlar tespit edilmiştir. Alt yüzey incelenecek olursa da delaminasyon, fiber ve matris kırıkları net bir şekilde görülmektedir.



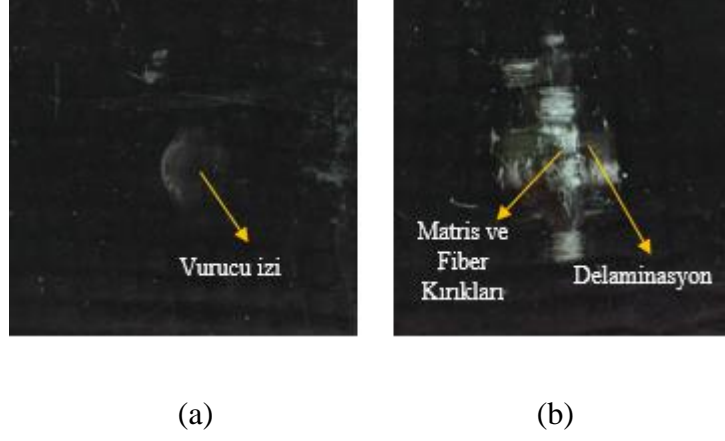
Şekil 5.11: % 0,5 CNT katkılı numunede  $E_i=15J$  darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey.

Şekil 5.11 (a) ve (b)'de 15 J darbe enerjisi değerinde % 0,5 CNT katkılı numunede oluşan hasar mekanizmaları görülmektedir. Numunenin üst yüzeyinde matris çatlağı ve bazı delaminasyonlar gözlenmektedir. Alt yüzey incelenecek olursa da fiber ve matris kırıklarının olduğu net bir şekilde görülmektedir.



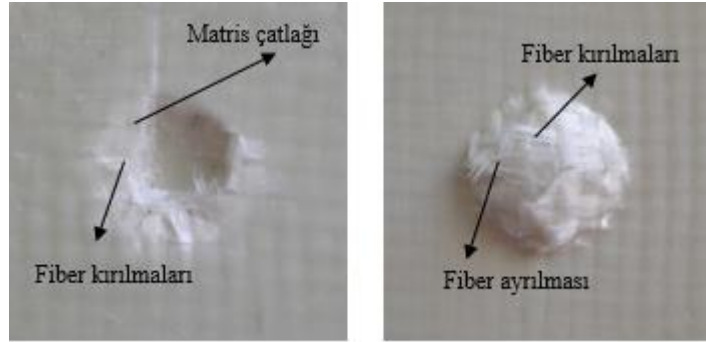
Şekil 5.12: % 1 CNT katkılı numunede  $E_i=15J$  darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey.

Şekil 5.12 (a) ve (b)'de 15 J darbe enerjisi değerinde % 1 CNT katkılı numunede oluşan hasar mekanizmaları incelenmiştir. Numunenin üst yüzeyinde matris çatlağı gibi hasarlar gözlemlenirken, alt yüzeyinde ise fiber ve matris kırıklarının olduğu gözlemlenmiştir.



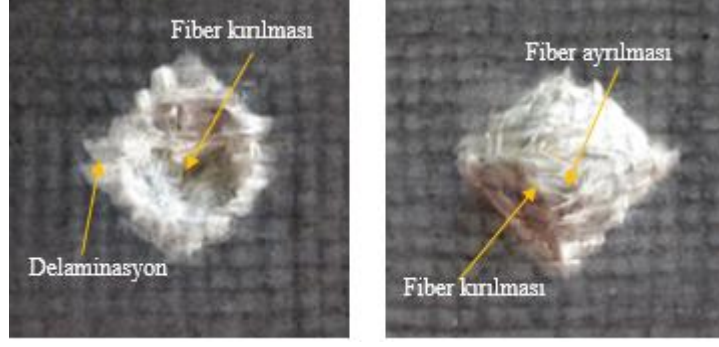
Şekil 5.13: % 2 CNT katkılı numunede  $E_i=15J$  darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey.

Şekil 5.13 (a) ve (b)'de 15 J darbe enerjisi değerinde % 2 CNT katkılı numunede oluşan hasar mekanizmaları incelenmiştir. Numunenin üst yüzeyinde vurucu izi ve bazı delaminasyonlar gözlemlenmiştir. Alt yüzeyinde ise fiber ve matris kırıklarının ve delaminasyonların oluştuğu tespit edilmiştir.



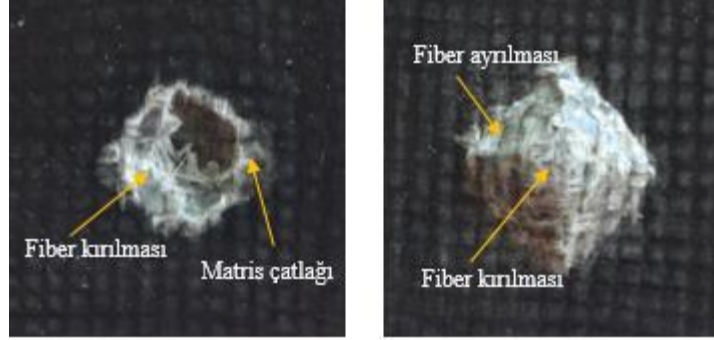
Şekil 5.14: Katksız numunede  $E_i=30J$  darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey.

Şekil 5.14 (a) ve (b)'de 30 J darbe enerjisi değerinde katksız numunede oluşan hasar mekanizmaları görülmektedir. Numunede 15 J'e oranla daha fazla hasarın oluştuğu ve daha fazla çökmenin meydana geldiği gözlemlenmiştir. Numunenin üst yüzeyinde fiber kırılmaları ve matris çatlakları tespit edilmiştir. Alt yüzey incelenecek olursa da fiber kırılmaları ve ayrılmaları görülmektedir. Ayrıca vurucunun numuneye daha fazla girdiği ve çökmenin arttığı gözlemlenmiştir.



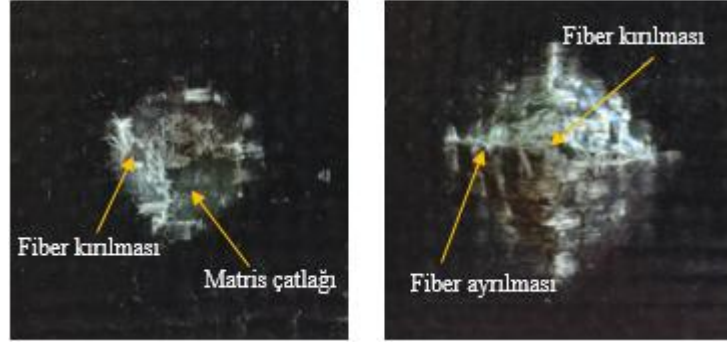
Şekil 5.15: % 0,5 CNT katkılı numunede  $E_i=30J$  darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey.

Şekil 5.15 (a) ve (b)'de 30 J darbe enerjisi değerinde % 0,5 CNT katkılı numunede oluşan hasar mekanizmaları görülmektedir. Numunenin üst yüzeyinde fiber kırılmaları, matris çatlakları ve bazı delaminasyonlar tespit edilmiştir. Alt yüzey incelenecek olursa da fiber kırılmaları ve ayrılmaları görülmektedir. Ayrıca vurucunun numuneye daha fazla girdiği ve çökmenin arttığı gözlemlenmiştir. Katkisız numune ile kıyaslanacak olursa çökmenin daha fazla olduğu görülmüştür.



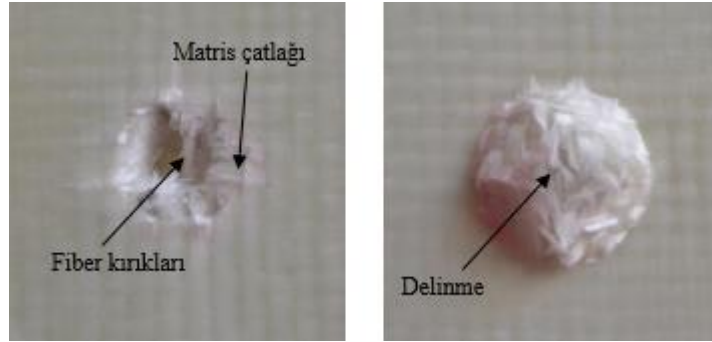
Şekil 5.16: % 1 CNT katkılı numunede  $E_i=30J$  darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey.

Şekil 5.16 (a) ve (b)'de 30 J darbe enerjisi değerinde % 1 CNT katkılı numunede oluşan hasar mekanizmaları görülmektedir. Numunenin üst yüzeyinde fiber kırılmaları ve matris çatlakları tespit edilmiştir. Alt yüzey incelendiğinde ise fiber kırılmaları ve ayrılmaları görülmektedir. Ayrıca vurucunun numuneye saplandığı da grafikler aracılığı ile tespit edilmiştir.



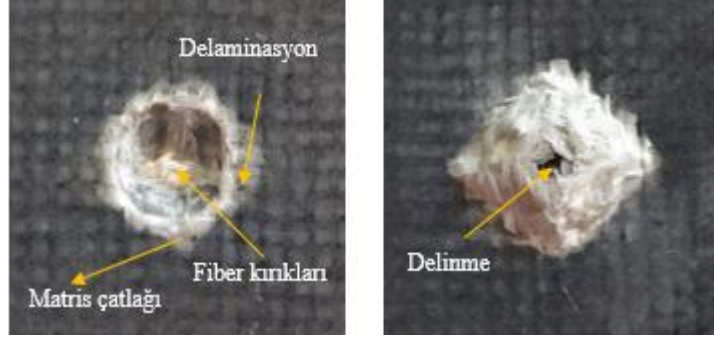
Şekil 5.17: % 2 CNT katkılı numunede  $E_i=30J$  darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey.

Şekil 5.17 (a) ve (b)'de 30 J darbe enerjisi değerinde % 2 CNT katkılı numunede oluşan hasar mekanizmaları görülmektedir. Numunenin üst yüzeyinde diğer numunelere benzer bir şekilde fiber kırılmaları ve matris çatlakları tespit edilmiştir. Alt yüzey incelendiğinde ise fiber kırılmaları ve ayrılmaları görülmektedir. Ayrıca vurucunun numuneye daha fazla girdiği ve çökmenin arttığı gözlemlenmiştir. Diğer numuneler ile kıyaslanacak olursa çökmenin daha fazla olduğu ve % 1 CNT katkılı numunede de olduğu gibi saplanmanın gerçekleştiği tespit edilmiştir.



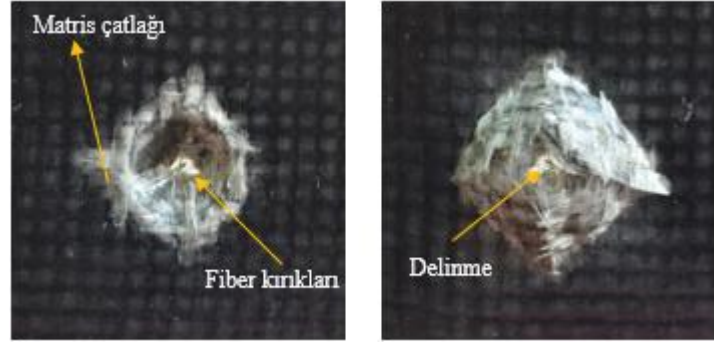
Şekil 5.18: Katkısız numunede  $E_i=39J$  darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey.

Şekil 5.18 (a) ve (b)'de 39 J darbe enerjisi değerinde katkısız numunede oluşan hasar mekanizmaları görülmektedir. Numunenin üst yüzeyinde fiber kırılmaları ve matris çatlakları tespit edilmiştir. Alt yüzey incelenecek olursa da fiber kırılmaları ve ayrılmaları görülmektedir. Ayrıca vurucunun numuneyi delip geçtiği fotoğraflardan net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.19: % 0,5 CNT katkılı numunede  $E_i=39J$  darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey.

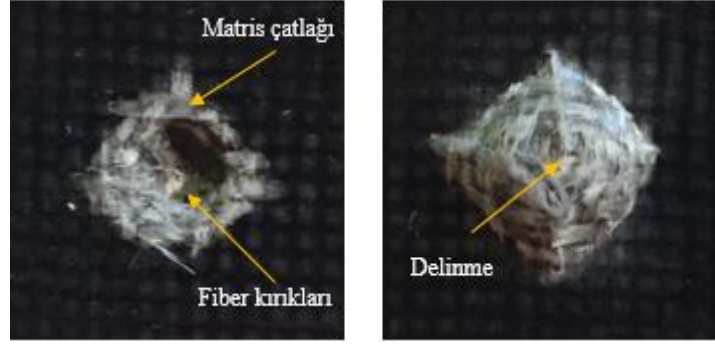
Şekil 5.19 (a) ve (b)'de 39 J darbe enerjisi değerinde % 0,5 CNT katkılı numunede oluşan hasar mekanizmaları görülmektedir. Numunenin üst yüzeyinde fiber kırılmaları, matris çatlakları ve bazı delaminasyonlar tespit edilmiştir. Alt yüzey incelenecek olursa da fiber kırılmaları ve ayrılmaları görülmektedir. Numunenin bu darbe enerjisi değerinde delindiği saptanmıştır.



Şekil 5.20: % 1 CNT katkılı numunede  $E_i=39J$  darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey.

Şekil 5.20 (a) ve (b)'de 39 J darbe enerjisi değerinde % 1 CNT katkılı numunede oluşan hasar mekanizmaları incelenmektedir. Numunenin üst yüzeyinde fiber kırılmaları, matris çatlakları ve delinme hasarının olduğu tespit edilmiştir. Alt yüzey incelenecek olursa da fiber kırılmaları, ayrılmaları ve delinmenin meydana geldiği görülmektedir.





Şekil 5.21: % 2 CNT katkılı numunede  $E_i=39J$  darbe enerjisindeki hasarlı numune fotoğrafları (a) üst yüzey, (b) alt yüzey.

Şekil 5.21 (a) ve (b)'de 39 J darbe enerjisi değerinde % 2 CNT katkılı numunede oluşan hasar mekanizmaları incelenmektedir. Numunenin üst yüzeyinde fiber kırılmaları, matris çatlakları ve delinme hasarının olduğu tespit edilmiştir. Alt yüzey incelenecek olursa da fiber kırılmaları, ayrılmaları ve delinmenin meydana geldiği görülmektedir. Diğer numuneler ile kıyaslanacak olursa ve darbe grafikleri göz önün alındığında delinme hasarının ilk bu numunede gerçekleştiği tespit edilmiştir.



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kompozit levhaların üretiminde E-camı woven dokuma örgülü kumaşlar kullanılmıştır. Ayrıca katkı malzemesi olarak kullanılan karbon nanotüp (CNT) epoksi reçine karışımına üç farklı (% 0,5-1-2) oranda ilave edilmiştir. Karbon nanotüpün malzeme üzerinde etkisini daha iyi tespit edebilmek ve inceleyebilmek için ayrıca katkısız kompozit levha üretimi de gerçekleştirilmiştir. Matris malzemesi olarak ARALDİT marka epoksi, ARADUR marka sertleştirici ve FİBERMAK marka pre-preg katalizörü kullanılmıştır. Darbe testi uygulanan tüm kompozit levhalar, FİBERMAK LTD. ŞTİ. tarafından “Pre-Preg Yöntemi” uygulanarak üretilmiştir.

Üretilen kompozit levhaların darbe testleri Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Mekanik Araştırmalar Laboratuvarında bulunan INSTRON marka 9250 HV model ağırlık düşürme tipi darbe test cihazında yapılmıştır. Yapılan tüm darbe testleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Vurucu uç 12,7 mm çapında ve yarı küresel bir geometriye sahip olup üzerindeki kütle ile beraber toplam ağırlığı 6,32 kg'dır. Darbe test numunelerinin ebatları 100 x 100 mm kar biçimindedir. Darbe testi kompozit numunelere, enerji seviyesi 3 J'den itibaren 3'er J artışla numuneler delininceye kadar uygulanmıştır. Yapılan darbe testleri sonucu karbon nanotüp katkılı kompozit numunelerin darbe davranışları hakkında aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur.

- ❖ Yapılan darbe testleri sonucu kompozit numuneler için kritik enerji seviyesinin 21 J olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi bu enerji seviyesinin altında ve üstünde kompozit numunelerin farklı darbe davranışları göstermesidir.
- ❖ Kritik enerji seviyesinin altında (<21J) karbon nanotüp katkılı olan numuneler katkısız olan numuneye göre daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca eğilme rijitliği değerinin de katkılı olan numunelerde daha iyi olduğu görülmüştür.

- ❖ Kritik enerji seviyesinin üstünde (>21J) katkısız olan numunelerin karbon nanotüp katkılı olan numunelere göre yük taşıma kapasitesi ve eğilme rijitliği değerleri bakımından daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.
- ❖ Kompozit numunelerin bu iki farklı enerji seviyesinde iki farklı darbe davranışı göstermesinin sebebi karbon nanotüp katkısı olarak düşünülmektedir. Yani karbon nanotüp katkısı bir yandan kompozitin mekanik özelliklerinin arttırırken, bir yandan da yapıyı gevrekletmektedir. Katkısız olan numune karbon nanotüp katkılı olan numunelere oranla daha az gevrek bir yapıdadır. Bu yüzden yüksek enerji seviyelerinde katkısız olan numune elastikliğini kullanmaktadır.
- ❖ 9 J enerji seviyesine kadar tüm kompozitlerin absorbe ettikleri enerji değerleri hemen hemen aynıdır. 9-21 J arasında ise karbon nanotüp katkılı olan numunelerin darbe enerjisini daha iyi absorbe ettikleri görülmektedir. 21-39 J arasında ise katkısız olan numunenin enerjiiyi daha iyi absorbe ettiği tespit edilmiştir. Fakat, katkısız olan kompozit numunenin saplanma ve delinme sınır değerinin daha iyi olduğu tespit edilmiştir.
- ❖ Düşük enerji seviyelerinde karbon naotüp katkılı kompozit numunelerde oluşan delaminasyon alanı ve vurucunun etkilediği iz çapı, katkısız numunelere göre daha küçüktür.
- ❖ Nano karbon katkılı olan numunelerin enerji absorbe etme değerleri daha yüksek iken katkısız olan numunenin taşıdığı yük kapasite değeri daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yani yük taşıma kapasitesi tercih edilen durumlarda katkısız olan numune, enerjiiyi absorbe edilmesi istenen durumlarda ise nano karbon katkılı olan numune tercih edilmelidir.
- ❖ Sonuç olarak, katkı malzemesi olarak kullanılan karbon nanotüplerin kompozit levhayı düşük darbe enerji seviyelerinde yük taşıma kapasitesini arttırdığı ve yapıyı daha rijit bir hale getirdiği tespit edilmiştir.

## 7. KAYNAKLAR

Adams, R.D., “Adhesive Bonding”, CRC Press. Woodhead Publishing Limited, 143-187, (2009).

Ağır, İ., “Kıvrımsız Dikişli Cam Elyaf Kumaşlardan Üretilen Kompozit Plakların Darbe Davranışının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Denizli, (2012).

Aktaş, M., Atas, C., İçten, B.M., ve Karakuzu, R., “An experimental investigation of the impact response of composite laminates”, *Composite Structures*, 87(4), 307-313, (2009).

Arıcasoy O., “Kompozit Sektör Raporu”, İstanbul Ticaret Odası Yayınları, İstanbul, Aralık, (2006).

Boumbimba, R. M., Froustey, C., Viot, P., and Gerard, P., “Low velocity impact response and damage of laminate composite glass fibre/epoxy based tri-block copolymer”, *Composites Part B: Engineering*, 76, 332-342, (2015).

Callister W.D. ve Rethwisch D.G., “Malzeme Bilimi ve Mühendisliği”, Çeviri Editörü, Prof. Dr. Kenan Genel, Nobel Yayınları, Ankara, 251, (2014).

Ceyhun, V. ve Turan, M., “Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı”, *Mühendis ve Makine*, 516: 19-25, (2003).

Çallıoğlu, H., Sayer, M., and Demir, E., “Impact behavior of particles filled-glass/polyester composite plates”, *Polymer Composites*, 32(7), 1125-1133, (2011).

Deniz M.E., “Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri ve Isıl İşleme Presleme Tekniğini Kullanarak Kompozit Malzeme Üretecek Bir Düzeneğin Tasarım ve İmalatı”, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Şanlıurfa, (2005).

Ekinci, V.Ş., “Alümina Takviyeli Alüminyum Matriksli Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2007).

Eren, Y., “Kompozit Yapıların Darbe Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, (2007).

Evcı, C., “Seramik Kompozit Zırh Sistemlerinin Darbe ve Balistik Özelliklerinin Belirlenmesi”, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2010).

Ferreira, M., Santos, C., Capela, C., and Costa, M., “Impact response of nano reinforced mat glass/epoxy laminates.”, *Fibers and Polymers*, 16(1), 173, (2015).

İçten, B.M. ve Karakuzu, R., “Effects of weaving density and curing pressure on impact behavior of woven composite plates”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27(10), 1083-1092, (2008).

İnançer G., “ Farklı Takviye Mazlemeli Plastik Kompozitlerin Darbe Davranışına Çevrenin Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2015).

Karaca, D., “Farklı Kalınlık ve Oryantasyon Yüzdelerindeki Tabakalı Kompozit Levhaların Düşük Hızlı Darbe Enerjileri Altında Davranışlarının Deneysel İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2010).

Karakuzu, R., İçten, B.M., Aktaş, M., Toparlı, M., Ataş, C., ve Arman, Y., “Kompozit plaklarda sıcaklığın darbe davranışına etkisi”, TÜBİTAK MAG Proje 104M426, 2007: 1-69, (2007).

Kayrak, M.A., “Havacılık Kompozitleri ve Mukavemet-Maliyet Analizleri”, Sivil Havacılık Yüksek Okulu Yayınları, No.09, Eskişehir, 1, 12-13, 69, (1999).

Liu D., Raju, B.B., and Dang, X., “Size effects on impact response of composite laminates”, *International Journal of Impact Engineering*, 21 (10): 837-854, (1998).

Liu, D., Raju, B. B. and Dang X., “Impact perforation resistance of laminated and assembled composite plates”, *International Journal of Impact Engineering*, 24, (6–7), 733-746, (2000).

Mazumdar, S.K., “Composites Manufacturing: Material, Product and Process Engineering”, CRC Press, Boca Raton London New York Washington, D.C, 24, (2002).

Rahman, M., Hosur, M., Zainuddin, S., Vaidya, U., Tauhid, A., Kumar, A., Trovillion J. and Jeelani, S., “Effects of amino-functionalized MWCNTs on ballistic impact performance of E-glass/epoxy composites using a spherical projectile”, *International Journal of Impact Engineering*, 57, 108-118, (2013).

Rahmanian, S., Thean, K. S., Suraya, A. R., Shazed, M. A., Salleh, M. M. and Yusoff, H. M., “Carbon and glass hierarchical fibers: influence of carbon nanotubes on tensile, flexural and impact properties of short fiber reinforced composites”, *Materials & Design*, 43, 10-16, (2013).

Rathore, D. K., Prusty, R. K., Kumar, D. S., and Ray, B. C., “Mechanical performance of CNT-filled glass fiber/epoxy composite in in-situ elevated temperature environments emphasizing the role of CNT content”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 84, 364-376, (2016).

Sayer, M., “Hibrit kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi”, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, (2009).

Smith, W.F., “Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, üçüncü basım” Çeviri Editörü, Nihat G. Kınıkoğlu, Literatür Yayınları, İstanbul, 724, (2001).

Soliman, E.M., Sheyka, M.P., and Taha, M. R., “Low-velocity impact of thin woven carbon fabric composites incorporating multi-walled carbon nanotubes”, *International Journal of Impact Engineering*, 47, 39-47, (2012).

Sorucu, A., “Orthotropic Malzemelerde Çatlak İlerlemesi ve Kırılma Tokluğu Tayini”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2007).

Şahin, Y., “Kompozit Malzemelere Giriş”, Gazi Kitapevi, Ankara, 1, 8, 40, 87, (2009).

Şenel, M., Kırılı, A. ve Kurşun, A., “Düşük Hızlı Darbe Deney Düzenegi İçin Geri Sekme (Rebound) Frenleme Ve Kontrol Sistemi”, Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, (2009).

Taraghi, I., Fereidoon. A., and Taheri-Behrooz, F., “Low-velocity impact response of woven Kevlar/epoxy laminated composites reinforced with multi-walled carbon nanotubes at ambient and low temperatures”, *Materials & Design*, 53, 152-158, (2014).

Zhang, H., & Zhang, Z., “Impact behaviour of polypropylene filled with multi-walled carbon nanotubes”, *European polymer journal*, 43(8), 3197-3207, (2007).

## 8. ÖZGEÇMİŞ



Adı Soyadı : Necati ÜZÜMCÜ

Doğum Yeri ve Tarihi : Nazilli – 28.07.1990

Lisans Üniversite : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Elektronik posta : necatiuzumcu20@gmail.com

İletişim Adresi : Gerzele Mah. 520 Sk. No:9/8 DENİZLİ