



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**ELEKTROEĞİRME NANOFİBER TAKVİYELİ
CAM/EPOKSİ KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK
HIZLI DARBE HASAR DAVRANIŞLARI VE
SONLU ELEMANLAR SİMÜLASYONU**

Fatih METİN

DOKTORA TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

Fatih METİN

06.07.2021

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ELEKTROEĞİRME NANOFİBER TAKVİYELİ CAM/EPOKSI KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZLI DARBE HASAR DAVRANIŞLARI VE SONLU ELEMANLAR SİMÜLASYONU

Fatih METİN

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Ahmet AVCI

2021, 134 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Ahmet AVCI
Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM
Doç. Dr. Mürsel EKREM
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KOCABAŞ
Dr. Öğr. Üyesi Zeynep ÇETİNKAYA**

Bu çalışmada elektroegirme yöntemiyle üretilen saf Polisülfon (PSF), ağırlıkça %1 ve %2 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı hibrit PSF nanofiberlerin cam/epoksi kompozitlerde düşük hızlı darbe davranışına etkileri incelenmiştir. Elektroegirilmiş nanofiber keçeler her bir cam kumaş tabakaları arasına yerleştirilerek vakum destekli el yatırma yöntemiyle nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitler üretilmiştir. Referans cam/epoksi ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitler, malzeme özelliklerinin belirlenmesi için düzlem içi quasi-statik mekanik testlere tabi tutulmuştur. Düzlem dışı düşük hızlı darbe testleri 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Hasarlı numunelerin ön ve arka yüzeyleri fotoğraflanarak darbe hasar alanları ölçülmüştür. Ayrıca 30 J enerji seviyesindeki düşük hızlı darbe testleri sonrası hasarlı numunelerin kesitsel kırılma yüzeyleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe simülasyonları LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. Tabakalar arasına yerleştirilen saf ve hibrit PSF nanofiber keçeler cam/epoksi kompozitlerin çekme ve basma mukavemetlerini artırarak düzlem içi mekanik özelliklerini iyileştirmişlerdir. Nanofiber takviyeli kompozitler artan darbe enerjisiyle birlikte referans kompozite kıyasla darbe hasarı eşik kuvveti değerini artırarak, absorbe edilen enerjiyi ve fiber kırılma alanlarını önemli oranda azaltarak darbe direncinde iyileşme sağlamışlardır. En iyi darbe direnci artışı ağırlıkça %1 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı hibrit PSF nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerde gözlenmiştir. Düşük hızlı darbe testlerinin deneysel ve simülasyon sonuçları kuvvet-zaman, kuvvet-yer değiştirme ve enerji-zaman eğrileri üzerinde karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Simülasyon sonuçları ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Cam/epoksi kompozit, düşük hızlı darbe, elektroegirme, nanofiber, Polisülfon, sonlu elemanlar analizi

ABSTRACT

PhD THESIS

LOW-VELOCITY IMPACT DAMAGE BEHAVIOR AND FINITE ELEMENT SIMULATION OF ELECTROSPUN NANOFIBER REINFORCED GLASS/EPOXY COMPOSITES

Fatih METİN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Metallurgical and Materials Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Ahmet AVCI

2021, 134 Pages

Jury

Prof. Dr. Ahmet AVCI

Assoc. Prof. Dr. Mehmet YILDIRIM

Assoc. Prof. Dr. Mürsel EKREM

Asst. Prof. Dr. Mustafa KOCABAŞ

Asst. Prof. Dr. Zeynep ÇETİNKAYA

In this study, the effects of pure Polysulfone (PSF), 1 wt% and 2 wt% SiC-Fe₃O₄ nanoparticle-doped hybrid PSF nanofibers produced by the electrospinning method on low-velocity impact behavior in glass/epoxy composites were investigated. Nanofiber reinforced glass/epoxy composites were manufactured using a vacuum-assisted hand lay-up method by incorporating the nanofibers between each successive ply. Reference glass/epoxy and nanofiber reinforced glass/epoxy composites were subjected to in-plane quasi-static mechanical tests to determine the material properties. Low-velocity impact tests were performed at 10 J, 20 J, and 30 J energy levels. The front and back surfaces of the damaged specimens were photographed, and the impact damage areas were measured. In addition, after the impact tests at 30 J energy level, the cross-sectional fracture surfaces of the damaged samples were examined by optical microscope and scanning electron microscope (SEM). Low-velocity impact simulations of reference and nanofiber reinforced glass/epoxy composites were carried out using LS-DYNA finite element software. PSF nanofiber interleaving enhanced in-plane mechanical properties by increasing the tensile and compression strengths of glass/epoxy composites. Compared to the reference composite, nanofiber reinforced composites significantly improved the impact resistance by increasing impact damage threshold load, reducing the energy absorbed and the fiber breakage areas with increased impact energy. The best improvement in impact resistance was observed in 1 wt% SiC-Fe₃O₄ doped hybrid PSF nanofiber reinforced glass/epoxy composites. Experimental and simulation results of low-velocity impact tests were presented comparatively on force-time, force-displacement, and energy-time curves. A good agreement was achieved between the simulation and experimental results.

Keywords: Glass/epoxy composite, low-velocity impact, electrospinning, nanofibers, Polysulfone, finite element analysis

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının planlanması, yürütülmesi ve tamamlanmasında bana yol göstererek ilgi ve desteğini hiçbir zaman esirgemedi katkılarını sunan, derin bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, değerli danışmanım Prof. Dr. Ahmet AVCI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın düzenli olarak sunumunu yaptığım, değerli görüş ve önerilerinden faydalandığım tez izleme komitesi üyeleri Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM'a ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KOCABAŞ'a teşekkür ederim.

Bu çalışma süresince bilgi ve görüşlerine başvurduğum aynı zamanda mekanik testlerin gerçekleştirilmesinde yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Volkan ESKİZEYBEK'e teşekkür ederim.

Kompozit levhaların üretimi ve mekanik testlerin gerçekleşmesinde yardımlarına başvurduğum Prof. Dr. Necati ATABERK'e, Doç. Dr. Mürsel EKREM'e, Yüksek Lisans öğrencileri Ömer ÇOŞKUN ve Rafet YAVUZ'a emeklerinden dolayı teşekkür ederim.

Düşük hızlı darbe testleri için darbe test cihazının kullanabilme imkânı veren Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN'e, darbe testlerinin gerçekleştirilmesi ve sonuçlarının elde edilmesinde yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Ahmet Caner TATAR'a ve Dr. Öğr. Üyesi Okan DEMİR'e, hasarlı numunelerin optik mikroskop görüntülerinin alınmasında yardımlarından dolayı Arş. Gör. Dr. Mehmet Şahin ATAŞ'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasında düşük hızlı darbe testlerinin simülasyonlarını gerçekleştirdiğim LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımının kullanıcı lisansının satın alınmasında ve programın kullanılması aşamasında teknik desteklerinden dolayı BİAS Mühendislik ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her daim maddi ve manevi destekleriyle beni yetiştiren, eğitim hayatımda karşılaştığım her sıkıntıyı ve elde ettiğim her başarıyı benimle paylaşan değerli anneme ve babama, doktora eğitimim süresince beni manevi olarak destekleyen, her daim sabırla ve anlayışla karşılayan sevgili eşime, çalışmalarımı bitirmem sonrasında beraber eğlenceli ve güzel vakit geçirmeyi sabırsızlıkla bekleyen sevgili çocuklarım Eymen Kerem ve Cüneyt Berk'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Fatih METİN
KONYA-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Kompozit Malzemelerin Tanımı ve Sınıflandırılması	3
2.1.1. Takviye elemanına göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	3
2.1.2. Kompozit malzemelerin matris malzemesine göre sınıflandırılması	5
2.2. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	6
2.2.1. Elle tabakalama ve spreycalıplama yöntemleri	6
2.2.2. Vakum torbalama yöntemi.....	7
2.2.3. Otoklav yöntemi	8
2.2.4. Vakum destekli reçine transfer calıplama (VARTM) yöntemi	8
2.3. Polimer Matrisli Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Test Metotları	9
2.3.1. Charpy ve Izod darbe testleri	9
2.3.2. Ankastre giriş darbe testi	10
2.3.3. Ağırlık düşürmeli darbe testi	11
2.4. Düşük Hızlı Darbede Oluşan Hasar Modları	12
2.4.1. Matris çatlağı	13
2.4.2. Delaminasyon	14
2.4.3. Fiber kırılması.....	14
2.4.4. Penetrasyon.....	15
2.5. Elektroeğirme Yöntemiyle Polimer Nanofiber Üretimi	15
2.6. Elektroeğirme Yöntemine Etki Eden Faktörler	16
2.6.1. Polimer solüsyon parametreleri	16
2.6.1.1. Konsantrasyon ve viskozite	16
2.6.1.2. Moleküler ağırlık	17
2.6.1.3. Yüzey gerilimi	18
2.6.1.4. Solüsyon iletkenliği	18
2.6.2. İşlem parametreleri	19
2.6.2.1. Uygulanan voltaj.....	19
2.6.2.2. Besleme hızı.....	19
2.6.2.3. Kollektör ve iğne arası mesafe.....	20
2.6.3. Ortam parametreleri.....	20
2.7. Nanopartikül Katkılarının Polimerik Nanofiberlerin Mekanik Özelliklerine Etkileri	21
2.8. Nanofiberlerin Uygulama Alanları	22
2.9. Tabakalı Kompozitlerde Ara Yüzey Toklaştırma Tekniğı	23

2.10. Nanofiber Takviyesinin Tabakalı Kompozitlerde Mekanik Özelliklere ve Darbe Davranışına Etkisi.....	26
2.11. Tabakalı Kompozitlerde Darbe Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi.....	32
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	38
3.1. Malzemeler	38
3.2. Elektroeğirme Yöntemiyle Nanofiberlerin Üretimi.....	38
3.3. Referans ve Nanofiber Takviyeli Cam/Epoksi Kompozit Üretimi.....	42
3.4. Kompozit Levhalardan Test Numunelerinin Elde Edilmesi.....	43
3.5. Nanofiber Keçelerin Çekme Özelliklerinin Belirlenmesi.....	44
3.6. Kompozit Levhaların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi.....	45
3.6.1. Çekme testi	46
3.6.2. Basma testi.....	47
3.6.3. Düzlem içi kayma mukavemeti ve kayma modülünün belirlenmesi.....	47
3.6.4. Tabakalar arası kayma mukavemetinin belirlenmesi.....	48
3.6.5. Kompozit levhada cam fiber hacim oranı ve yoğunluğun belirlenmesi	49
3.7. Ağırlık Düşürmeli Darbe Testi	51
3.8. Elektroeğrilmiş Nanofiberlerin ve Düşük Hızlı Darbe Sonrası Kompozit Levhaların Hasarlı Yüzeylerinin Görüntü Analizleri	53
4. MODELLEME VE SİMÜLASYON.....	54
4.1. Vurucu ve Kompozit Tabakaların Sonlu Elemanlar Modeli	54
4.2. Kompozit Malzemede Hasarın Modellenmesi	56
4.2.1. Hasar başlangıcı.....	56
4.2.2. Hasar gelişimi	57
4.2.3. Delaminasyon	59
4.3. Malzeme modeli için gerekli malzeme özelliklerinin belirlenmesi.....	60
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	61
5.1. Elektroeğrilmiş Nanofiberlerin SEM ve TEM Analizleri.....	61
5.2. Nanofiber Keçelerin Çekme Testleri	63
5.3. Kompozit Levhaların Mekanik ve Fiziksel Özellik Testleri Sonuçları	65
5.3.1. Çekme testi	65
5.3.2. Basma testi.....	69
5.3.3. Düzlem içi kayma mukavemeti ve kayma modülü.....	71
5.3.4. Tabakalar arası kayma mukavemeti	73
5.3.5. Kompozit levhalarda yoğunluk ve cam fiber hacim oranı.....	74
5.3.6. Sonlu elemanlar modeli için kompozit levhaların malzeme özellikleri	75
5.4. Ağırlık Düşürmeli Darbe Testi	75
5.4.1. Kuvvet-zaman eğrileri	76
5.4.2. Kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	80
5.4.3. Enerji-zaman eğrileri	82
5.5. Düşük Hızlı Darbe Testleri Sonrası Hasar Bölgelerinin İncelenmesi	84
5.6. Düşük Hızlı Darbe Testleri Sonrası Kırılma Yüzeylerinin Optik Mikroskop ve SEM Görüntüleri.....	89
5.7. Düşük Hızlı Darbe Testlerinin Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçları.....	95
5.7.1. Kuvvet-zaman eğrileri	99

5.7.2. Kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	104
5.7.3. Enerji-zaman eğrileri	109
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	112
6.1. Sonuçlar	112
6.2. Öneriler	114
KAYNAKLAR	116
ÖZGEÇMİş	124



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Numunenin ilk kesit alanı (mm^2)
$a(t)$	: t anındaki anlık ivme (m/s^2)
$\delta(t)$	: t anındaki yer değiştirme (m)
E	: Elastisite modülü (GPa)
E_a	: Absorbe edilen enerji (Nm)
$F(t)$	: t anındaki temas kuvveti (N)
m	: Vurucunun kütlesi (kg)
σ_1	: Fiber yönünde etki eden gerilme bileşeni (MPa)
σ_2	: Matris yönünde etki eden gerilme bileşeni (MPa)
S_{12}	: Düzlem içi kayma mukavemeti (MPa)
τ_{12}	: Düzlem içi kayma gerilmesi (MPa)
X_T	: Fiber yönündeki çekme mukavemeti (MPa)
X_C	: Fiber yönündeki basma mukavemeti (MPa)
Y_T	: Matris yönündeki çekme mukavemeti (MPa)
Y_C	: Matris yönündeki basma mukavemeti (MPa)
$v(t)$	: t anındaki anlık hızı (m/s)
v_i	: t_i anındaki anlık hızı (m/s)

Kısaltmalar

AC	: Aseton
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu)
CDM	: Continuum damage mechanics (Sürekli ortam hasar mekaniği)
DCB	: Double cantilever beam (Çift ankastre kiriş)
DMA	: Dynamic mechanical analysis (Dinamik Mekanik Analiz)
DMAC	: Dimetil Asetamid
DMF	: Dimetilformamid
ILSS	: Interlaminar shear strength (Tabakalar arası kayma mukavemeti)
MWCNT	: Çok cidarlı karbon nanotüp
PA	: Poliamid
PAN	: Poliakrilonitril
PBI	: Polibenzimidazol
PCL	: Polikaprolakton
PEO	: Polietilen oksit
PLGA	: Poli laktik-ko-glikolik asit
PSF	: Polisülfon
PVA	: Polivinil Alkol
PVDF	: Poliviniliden Florür
PBI	: Polibenzimidazol
SWCNT	: Tek cidarlı karbon nanotüp
SEM	: Scanning electron microscope (Taramalı elektron mikroskobu)
TEM	: Transmission electron microscope (Geçirimli elektron mikroskobu)
VARTM	: Vacuum assisted resin transfer molding (Vakum destekli reçine transfer kalıplama)

1. GİRİŞ

Fiber takviyeli polimer kompozitlerin 1950'lerde havacılık endüstrisinde kullanılmaya başlanmasından sonra sürekli geliştirilerek günümüzde otomotiv, deniz araçları, spor ekipmanları, askeri uygulamalar, altyapı uygulamaları, biyomedikal uygulamalar gibi birçok endüstri alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin bu kadar yaygın kullanım alanlarına sahip olmaları geleneksel metalik malzemelere kıyasla yüksek rijitlik, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci, ısı izolasyonu gibi üstün özelliklere sahip olmalarından kaynaklanmaktadır (Mallick, 2007; Sridharan, 2008).

Fiber takviyeli polimer kompozitler böyle üstün düzlem içi mekanik özelliklere sahip olmalarına rağmen; bağlayıcı reçinece zengin tabakalar arası bölgede zayıf kayma mukavemeti ve tokluğa sahip olmalarından dolayı düzlem dışı düşük hızlı darbe hasarı senaryolarına hassastırlar. Günümüzde ağırlığının %50'den fazlası fiber takviyeli polimer kompozitlerden oluşan yolcu uçaklarından örnek vermek gerekirse bakım esnasında çekiç gibi ağır el aletinin düşmesi, uçakların iniş ve kalkışlarda tekerlerden fırlatılan taş ve asfalt parçaları, uçağa kuş veya kuş sürüsünün çarpması gibi durumlarda kompozit yapıların yüzeyleri hasar alabilmektedir. Bu darbe hasarları, fiber takviyeli kompozitlerin anizotropik ve heterojen yapısı nedeniyle darbe şiddetinin derecesine göre kompozitte farklı hasar modlarına sebep olmaktadır. Darbenin şiddetine bağlı olarak ve çarpan cismin malzemede meydana getirdiği girinti ölçüsünde sırasıyla tabaka içi matris çatlağı, tabakalar arası ayrılma (delaminasyon), fiber kırılması, penetrasyon (saplanma) hasar modları meydana gelebilmektedir. Kompozitte tabaka içi bölgede meydana gelen ilk hasar matris çatlamasıdır. Kullanım esnasında tabaka içindeki matris çatlağı büyüyerek ve tabakalar arası bölgeye ulaşarak aniden delaminasyona sebep olur. Oluşan delaminasyon kompozit yapıda rijitlik kaybı, hasar bölgesinde yerel düzensizlikler ve yerel gerilme yığılmalarına sonrasında ise kompozitin tamamen yapısal hasarına yol açmaktadır. Bu yüzden fiber takviyeli kompozitlerin düşük hızlı darbe hasarlarında delaminasyon en yaygın görülen hasar modlarından biridir (Abrate, 2011; Mouritz, 2012; Silberschmidt, 2016; Palazzetti ve Zucchelli, 2017).

Tabakalı kompozitlerde delaminasyonu önlemek için yıllardır yapılan birçok çalışmada birçok yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler matris toklaştırma, tabakalandırma sırasını optimize etme, tabakaların kalınlık boyunca dikişi, örgü kumaş kullanımı, kenar kapağı takviyesi olarak adlandırılır (Zucchelli ve ark., 2011). Fakat

delaminasyonu engellemek için bu yöntemler üretim maliyeti ve ağırlık artışı ile birlikte düzlem içi mekanik özelliklerin yitirilmesine sebep olmaktadır (Akangah ve Shivakumar, 2012). Son yıllarda partikül(Hojo ve ark., 2006) , film(Sohn ve ark., 2000), ve nanofiber(Dzenis ve Reneker, 2001; Li ve ark., 2008a) formundaki polimerlerin tabakalar arasına yerleştirilerek tabakalar arası kırılma tokluğunu arttırmayı amaçlayan farklı yöntemler tanıtılmıştır. Elektroegirme yöntemiyle üretilen polimerik nanofiberler nanometre ölçüsünde çaplara, yüksek gözenekli çok ince kalınlığa ve geniş yüzey alanı/hacim oranı gibi üstün özelliklere sahip olmalarıyla tabakalı kompozitlerin zayıf ara yüzeylerinin tokluğunun artırılmasında uygulanan en çekici yöntemlerden biri haline gelmiştir(Huang ve ark., 2003; Molnár ve ark., 2014). Yapılan çalışmalarda kullanılan PA6(De Schoenmaker ve ark., 2013), PAN(Molnár ve ark., 2014; Eskizeybek ve ark., 2018), PVDF(Saghafi ve ark., 2015b), PVA(Beylergil ve ark., 2016), PSF(Li ve ark., 2008a; Li ve ark., 2008b; Li ve ark., 2015; Metin ve Avcı, 2021) gibi polimerik nanofiberler fiber takviyeli polimer kompozitlerin düzlem-içi mekanik özelliklerinde(De Schoenmaker ve ark., 2013; Beylergil ve ark., 2016), tabakalar arası kırılma tokluğunda (Li ve ark., 2008a; Li ve ark., 2008b; Saghafi ve ark., 2015c; Daelemans ve ark., 2016), ve darbe direncinin artırılmasında (Shivakumar ve ark., 2009; Akangah ve ark., 2010; Akangah ve Shivakumar, 2012; Palazzetti ve ark., 2013; Molnár ve ark., 2014; Saghafi ve ark., 2015a; Daelemans ve ark., 2016; Daelemans ve ark., 2018; Goodarz ve ark., 2019; Saghafi ve ark., 2019) önemli iyileşmeler sağlamışlardır.

Bu tez çalışmasında elektroegirme yöntemiyle üretilen PSF nanofiberler ve SiC-Fe₃O₄ hibrit PSF nanofiberler ile 8 tabakalı cam/epoksi kompozitlerin ara tabakalarına uygulanarak cam/epoksi kompozitlerin darbe direncini artırmak amaçlanmıştır. Ayrıca LS-DYNA'da kompozitlerin nümerik modellerinin oluşturulup, düşük hızlı darbe davranışlarının simülasyonları gerçekleştirilmiştir. LS-DYNA'da kullanılan MAT 54 kompozit malzeme modeli özelliklerini tanımlamada gerekli olan mekanik ve fiziksel özellikler her bir kompozit için ilgili ASTM standardına göre belirlenmiştir. Aynı zamanda saf ve hibrit nanofiber takviyesinin kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklere etkileri birbirleriyle kıyaslanarak yorumlanmıştır. Farklı enerji seviyelerinde gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testlerinde saf PSF nanofiberlere kıyasla darbe direncinin daha da artırılmasına yönelik iki farklı oranda nanofiberlere eklenen SiC-Fe₃O₄ nanopartiküllerin darbe direncindeki pozitif etkileri darbe test sonuçları, hasarlı numunelerin yüzey fotoğrafları ve kesit kırılma yüzeyi mikroskop görüntüleriyle karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kompozit Malzemelerin Tanımı ve Sınıflandırılması

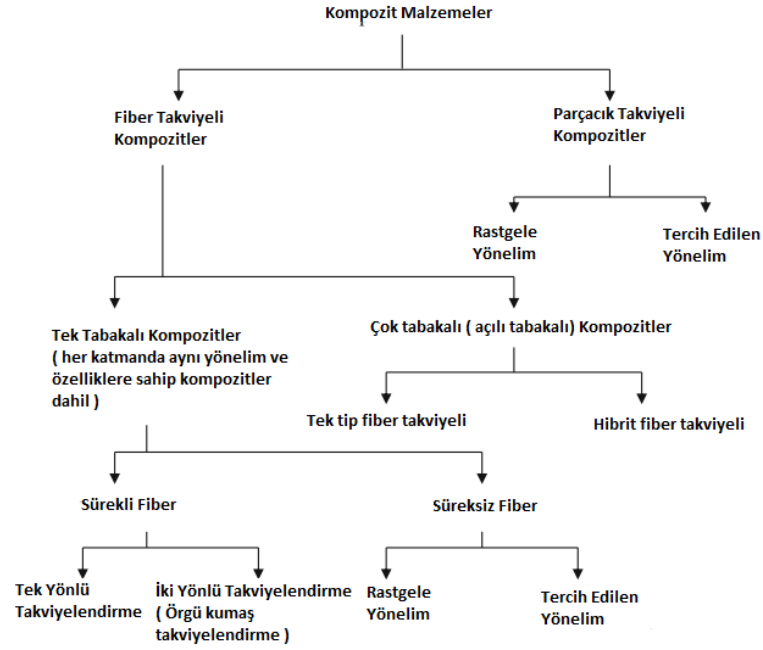
Kompozit malzemeler daha üstün ve istenilen özelliklere sahip yeni bir malzeme elde etmek için iki veya daha fazla malzemenin makro boyutta birleşimidir. Genel olarak ifade edilecek olursa bir kompozit malzemenin bileşenleri malzemeyi bir arada tutan ve bağlayıcı rolü üstlenen matris fazı ile takviye elemanı olarak adlandırılan saçınmış fazdan oluşur.

Plastikler kolay üretilebilirliği ve ucuz maliyetleri dolayısıyla birçok uygulamada karşımıza çıkar. Fakat birkaç GPa'a sahip düşük elastisite modülleri ve 50 MPa dan az olan dayanımları sebebiyle özellikle yük taşıyan uygulamalarda kullanılamazlar. Örneğin, yaklaşık 70 GPa elastisite modülüne ve 3000 MPa çekme mukavemetine sahip olan cam fiberlerin takviyesiyle oluşturulan polimer matrisli bir kompozit, 30 GPa'dan fazla elastisite modülü ve 1000 MPa'dan daha fazla çekme dayanımına sahip olmasıyla yük taşıyan uygulamalarda kullanılır bir özelliğe kavuşur. Kompozit malzemelerin özelliklerinin belirlenmesinde bileşenlerin özellikleri, matris ve takviye elemanının bağlı oranları, takviye elemanının geometrisi, malzeme içerisindeki dağılımı ve yönelimi çok önemli rol oynamaktadır. Bu yüzden matris ve takviye elemanının uygun kombinasyonu ve bağlı oranıyla istenilen özelliklerde ve kullanım şartlarına uygun kompozit malzeme elde etmek mümkündür (Balasubramanian, 2013).

Kompozit malzemeler takviye elemanına göre ve matris malzemesine göre iki ana grupta sınıflandırılabilir.

2.1.1. Takviye elemanına göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Saçınmış faz olarak adlandırılan takviye elemanı matris malzemesinin mekanik özelliklerini iyileştirir. Çoğu durumda takviye elemanı matris malzemesinden daha sert, daha mukavemetli ve daha rijittir. Bununla birlikte seramik matris içerisinde sünek metal takviyesi gibi bazı harici durumlar mevcuttur (Matthews ve Rawlings, 1999). Takviye elemanına göre kompozit malzemeler fiber takviyeli ve parçacık takviyeli olarak iki ana gruba ayrılır (Şekil 2.1).



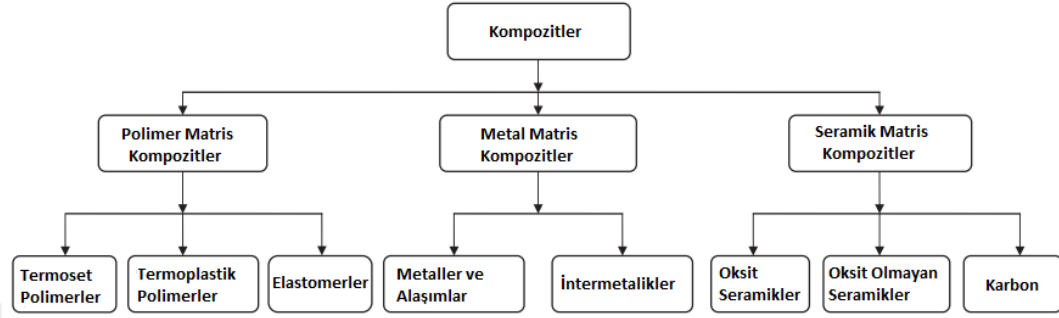
Şekil 2.1. Takviye elemanına göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Kar, 2016)

Fiber takviyeli kompozitler tek tabakalı veya çok tabakalı olarak üretilebilirler. Yaygın olarak kullanılan fiberler cam, karbon, bor, aramid, silisyum karbür, alümina olarak sıralanabilir. Çok tabakalı kompozitler her tabakada tek tip fiber takviyeli ve hibrit fiber takviyeli olarak sınıflandırılabilir. Her bir tabakada veya farklı tabakalama konfigürasyonlarıyla iki veya daha fazla farklı tip fiberlerin kullanılması hibrit kompozit olarak adlandırılmaktadır. Hibrit kompozitler de genel olarak cam/aramid, cam/karbon ve aramid/karbon takviyesiyle üretilirler (Balasubramanian, 2013).

Parçacık takviyeli kompozitlerde parçacıklar neredeyse tüm yönlerde eşit büyüklüklere sahiptirler. Parçacık şekilleri küresel, kübik, levha, düzenli veya düzensiz şekilli olabilmektedir. Uygulamalarda genellikle parçacıklar matris içerisinde rastgele bir dağılım göstermektedir (Matthews ve Rawlings, 1999). Çoğu parçacık takviyeli kompozitlerde matris içerisindeki parçacıklar kompozitin mukavemet artışını sağlamaz sadece kompozitin fonksiyonel ve termal özellikler gibi fiziksel özelliklerinde modifikasyon için yer almaktadır. Bununla birlikte bir metal matris içerisindeki ince parçacıklar dislokasyon hareketlerini engelleyerek kompozit yapının mukavemet artışını sağlayabilirler (Balasubramanian, 2013).

2.1.2. Kompozit malzemelerin matris malzemesine göre sınıflandırılması

Kompozit malzemeler matris malzemesine göre polimer matrisli kompozitler, metal matrisli kompozitler ve seramik matrisli kompozitler olarak üç ana grupta sınıflandırılmaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Matris malzemesine göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Balasubramanian, 2013)

Polimer matrisli kompozitlerde matris malzemesi termoset polimerler, termoplastik polimerler veya elastomerler olabilir. Termoset polimerler (Epoksi, polyester, vinil ester, poliamid reçineler) üretim avantajından dolayı en yaygın kullanılan matris malzemeleridir. Bununla birlikte termoplastik polimerler (Poliamid 6.6, Polipropilen, Polietilen) de yüksek tokluk değerlerine sahip olmalarından dolayı uygulamalarda giderek önem kazanmaktadır. Polimer matris kompozitler yüksek mukavemet ve yüksek rijitliğe sahip fiber takviyesiyle çok iyi mekanik özelliklere sahip olabilmektedir. Üstün özelliklere sahip olmalarıyla çevre ortam şartlarında kullanılmak amacıyla metalik malzemelerin yerini alabilmektedirler (Balasubramanian, 2013).

Metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi genel olarak düşük yoğunluklu olan alüminyum, titanyum ve bu metallerin alaşımları tercih edilirken bazı uygulamalarda bakır ve kobalt kullanılabilir. Metal matrisli kompozitler 1200 °C'ye kadar olan sıcaklıklardaki ortam şartlarında çalışabilirken, çalışma şartlarındaki ana problem korozyon dirençlerinin zayıf olmasıdır. Üretim avantajından dolayı takviye elemanı olarak genellikle parçacık veya süreksiz fiberler tercih edilmektedir (Balasubramanian, 2013).

Seramik matrisli kompozitlerde oksit ve oksit olmayan seramik malzemeler kompozit yapıda matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bazen de karbon özellikle yüksek sıcaklıklarda seramik olarak değerlendirilmekte ve matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Karbon matrisli kompozitlerin uygulamaları gün geçtikçe artmaktadır

ve stratejik malzemeler olarak değerlendirilmektedir. Seramik matrisli kompozitler 1200 °C ve üzerindeki ortam sıcaklıklarında rahatlıkla kullanılabilir. Bununla birlikte çoğu seramik matrisli kompozitler yüksek sıcaklıklarda işlenebildiğinden dolayı üretim maliyetleri yüksektir (Balasubramanian, 2013).

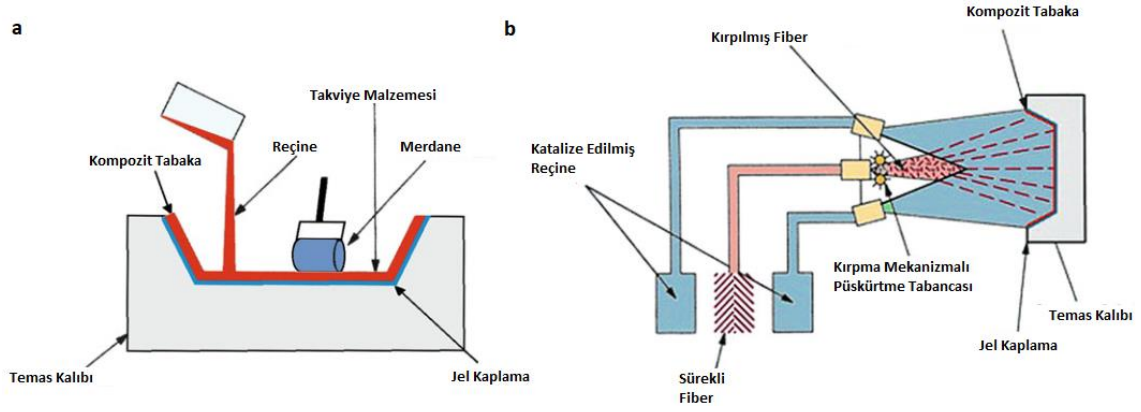
2.2. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Genel olarak polimer matrisli kompozit malzemelerin üretim prosesleri çok yüksek sıcaklık ve basınç gerektirmediği için metal ve seramik matrisli kompozit malzemelerle karşılaştırıldığında daha kolay uygulanabilirlik dolayısıyla da daha yaygın kullanım alanına sahiptir. Polimer matrisli kompozitlerin üretilmesinde nihai ürünün kalitesi, özelliği, miktarı ve üretim maliyeti gibi parametreler göz önünde bulundurularak çok geniş üretim yöntemi seçenekleri mevcuttur. Bu üretim yöntemlerinden yaygın olarak kullanılan birkaç tanesine kısaca aşağıda bahsedilmiştir.

2.2.1. Elle tabakalama ve sprej kalıplama yöntemleri

Elle tabakalama ve sprej kalıplama yöntemleri en basit kompozit üretim yöntemlerindendir. Elle kalıplama yönteminde takviye malzemesi örneğin dokuma kumaş cam veya karbon fiber jel kaplanmış kalıp üzerine yerleştirilir (Şekil 2.3a). Üzerine reçine dökülerek veya püskürtülerek reçinenin kumaşı tam olarak ıslatması sağlanır. Merdane reçine ile ıslatılmış kumaş üzerinde gezdirilerek kompozit tabaka içerisinde hapsolan hava kabarcıklarının giderilmesi sağlanır. İşlem tabakalama sayısı tamamlanıncaya kadar devam eder. Tekne gövdesi gibi büyük parçalar bu yöntemle üretilir. Polyester ve epoksi reçine bu üretim yönteminde yaygın olarak kullanılan matris malzemeleridir ve genellikle oda sıcaklığında kürlenebilir.

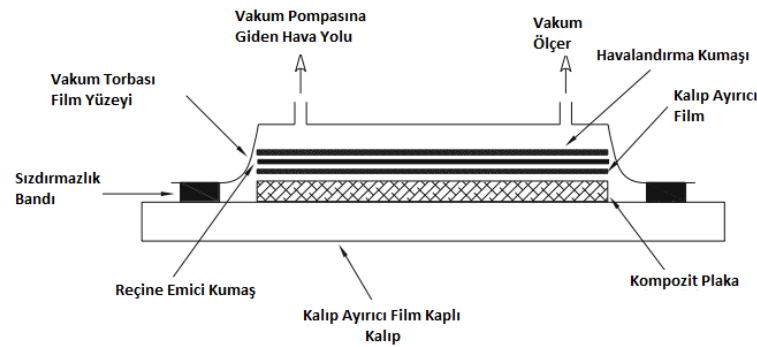
Sprej kalıplama tekniğinde sürekli fiberle beslenen kırpma mekanizmasında kırılan fiberler püskürtme tabancısının içerisinden geçerek katalize edilmiş reçine ile birlikte jel kaplanmış kalıp yüzeyine püskürtülür (Şekil 2.3b). Elle kalıplama yöntemine benzer uygulamaya sahip olmasıyla birlikte bu yöntemde rastgele yönlendirilmiş süresiz fiberlerden dolayı üretilen kompozit malzemenin mekanik özellikleri daha düşüktür.



Şekil 2.3. Elle tabakalama yöntemi (a); Sprey kalıplama yöntemi (b) (Chawla, 2012)

2.2.2. Vakum torbalama yöntemi

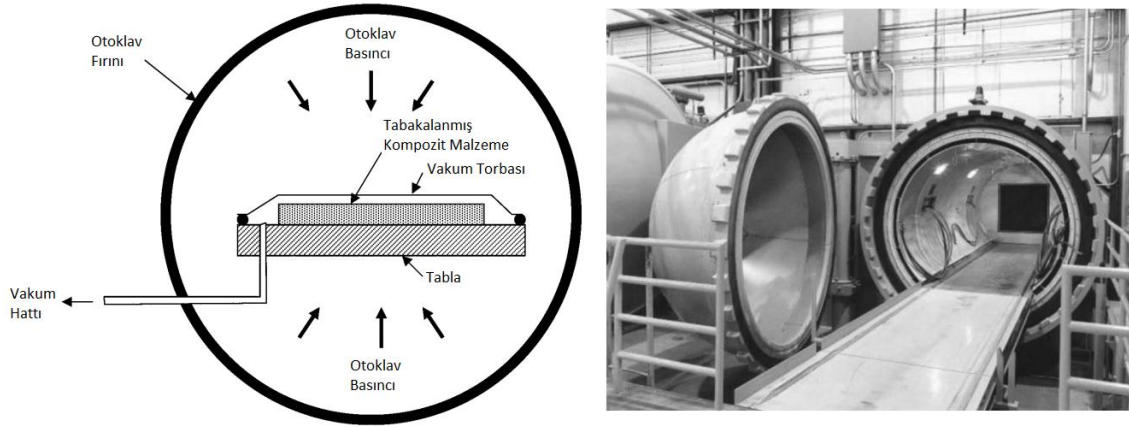
Vakum torbalama yöntemi elle tabakalama yönteminin devamı olarak düşünülebilir. Bu yöntemde tabakama işleminden sonra ek olarak vakum uygulanmasıyla tabakalar içinde hapsolan hava ve fazla reçine vakumla birlikte uzaklaştırılır (Şekil 2.4). Tabakalama işleminden sonra delikli kalıp ayırıcı film kompozit levhanın üzerine yerleştirilir. Delikli kalıp ayırıcı film üzerine fazla reçine çıkışı sağlayan reçine emici kumaş ve onun üzerine de içindeki fazla havanın çıkışını sağlayan havalandırma kumaşı yerleştirilir. En üste de vakum torbası geçirilerek etrafı sızdırmazlık bantlarıyla kapatılır. Vakum pompasıyla torba altında kalan sistem havası vakumlanır ve devamında kompozit levha kurlenir. Bu yöntemle elle tabakalama yöntemine göre daha mukavemetli ve daha yüksek fiber oranlı kompozit malzeme üretilir.



Şekil 2.4. Vakum torbalama yöntemi (Kar, 2016)

2.2.3. Otoklav yöntemi

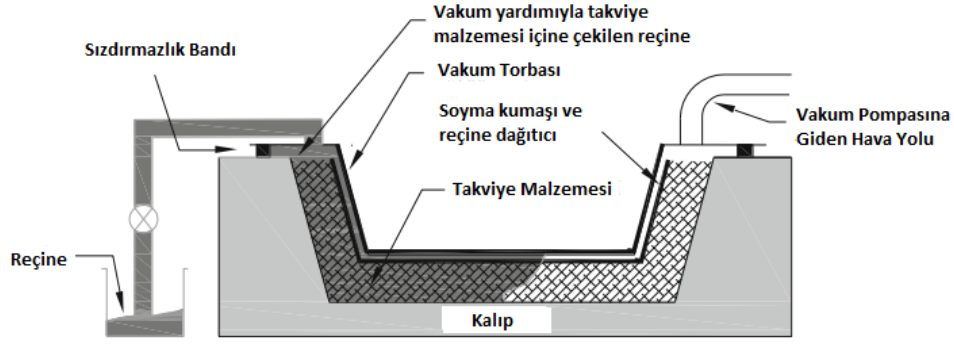
Otoklav yüksek basınç ve sıcaklığın aynı anda sağlandığı ve kontrol edilebildiği kapalı bir kaptır (Şekil 2.5). Havacılık sanayiinde kullanılan polimer matrisli kompozitlerin yüksek kalitede üretilirliği için kullanılır. Otoklav yöntemi vakum torbalama yöntemine benzer olarak hazırlanan vakum torbası otoklav içerisine yerleştirilir. Vakum torbasında oluşturulan vakuma ek olarak uygulanan otoklav basıncı ve ayarlanan sıcaklıkla malzeme içinde hapsolan hava atılır, fazla reçine emici kumaş içine akar ve devamında reçinenin kirlenmesi sağlanır.



Şekil 2.5. Otoklav sistemi (Campbell, 2010)

2.2.4. Vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) yöntemi

VARTM yönteminde kalıp ayırıcı film kaplı kalıp üzerine istenilen tabakalama sayısı ve sırasına sahip dokuma kumaşlar yerleştirilir. Kumaşlar üzerine kalıp ayırıcı film, soyma kumaşı, reçine dağıtıcı ve en sonunda vakum torbası yerleştirilir (Şekil 2.6). Sisteme reçine transferinin yapılacağı ve vakum edilen havanın çıkacağı spiral hortumlar yerleştirilir. Vakum torbası etrafına sızdırmazlık bantları yapıştırılır. Vakum pompası yardımıyla reçinenin vakum torbası altındaki istiflenmiş takviye malzemesi içerisinden akışı gerçekleşerek vakum hava yolu çıkışına ulaşır. Reçinenin dokuma kumaşlara tamamen emdirilmesi sağlanır ve malzeme istenilen ortam şartlarında kirlenir.



Şekil 2.6. Vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) yöntemi (Kar, 2016)

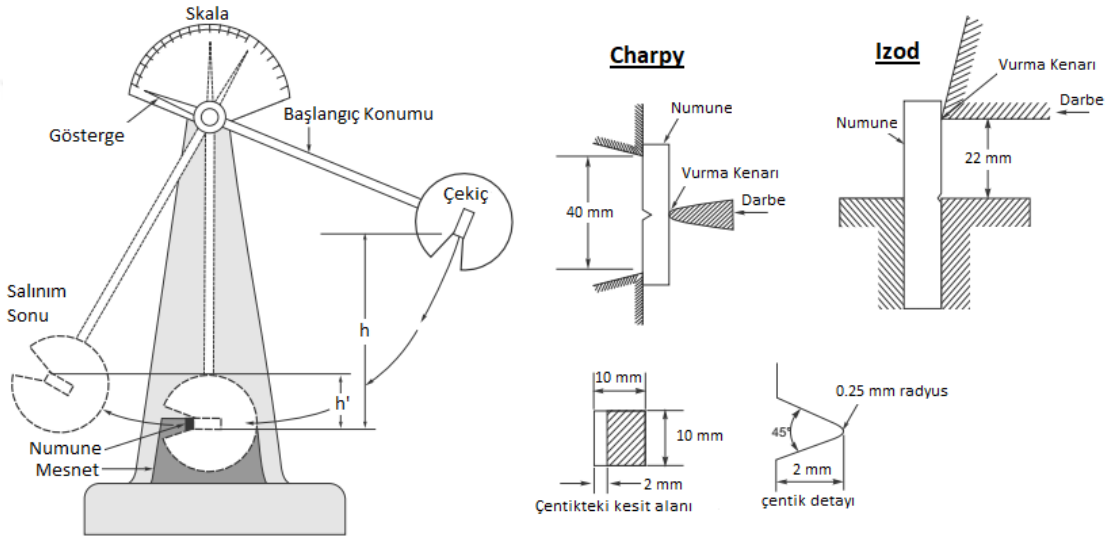
2.3. Polimer Matrisli Kompozitlerde Düşük Hızlı Darbe Test Metotları

Malzemelerin darbe cevabı dört farklı hız kategorisinde sınıflandırılır. Büyük kütleye sahip el aletinin düşüp çarpması sonucu 1 - 10 m/s arasındaki hızlarda meydana gelen düşük hızlı darbe, patlama ve kasırğa sonucu enkaz parçalarının 10 – 50 m/s hız aralığında etrafa savrulup çarpması sonucu oluşan orta hızlı darbe, tabanca ateşlemesi sonucu küçük kütleye sahip merminin 50 – 1000 m/s aralığında çarpmasıyla oluşan yüksek hızlı (balistik) darbe ve 2 – 5 km/s hız aralığında gerçekleşen hiper hızlı darbe olarak isimlendirilir (Abrate, 2011). Düşük hızlı darbe genellikle kompozit malzemelerin bakımı ve tamiri esnasında bir el aletinin düşüp çarpmasıyla oluşur. Malzemenin içerisinde meydana gelen ve gözle görülemeyen darbe hasarı sonucunda malzemenin mukavemeti ve kullanım ömrü düşmektedir. Bu yüzden malzeme üzerindeki darbe hasarının oluşumunun ve gelişiminin gözlemlenmesinde bazı test metodları geliştirilmiştir. Polimer matrisli kompozit malzemelerin darbe davranışlarını ve darbe direncini belirlemede Izod ve Charpy darbe testi, ankastre kiriş darbe testi ve ağırlık düşürme darbe testi olarak düşük hızlı darbe test metodları kullanılmaktadır.

2.3.1. Charpy ve Izod darbe testleri

Charpy ve Izod darbe testleri basit sarkaç salınım hareketi prensibiyle gerçekleştirilen testlerdir (Şekil 2.7). Her iki darbe testinde de sarkaç şeklindeki çekiç, düzeneğe yerleştirilen numuneye göre belli bir yükseklikten (h) bırakılarak çekiğin belli bir hızda numuneye çarpması sağlanır. Numuneye çarpan çekiç tarafından uygulanan darbe etkisiyle numunedeki çentik bölgesinde oluşan çok eksenli gerilmeler sonucunda numune kırılır. Çekiç salınım hareketini başlangıç konumundaki yükseklikten (h) daha

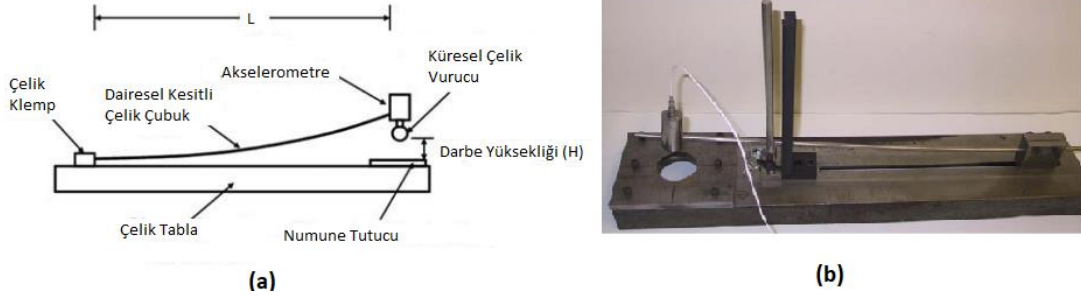
aşağı bir yüksekliğe (h') kadar sürdürür (Şekil 2.7). Çekicinin başlangıç konumundaki yükseklik ile salınımı tamamladığı andaki yükseklik arasındaki potansiyel enerji farkı numune tarafından absorbe edilen ve numunenin kırılması için gerekli olan darbe enerjisidir. Uygulama yöntemi genel olarak aynı olsa da bu iki test metodu arasında bazı farklılıklar vardır. Şekil 2.7’de Charpy test numunesinin yatay konumda mesnetlendiği ve çekicinin darbeyi çentik açılmamış yüzeyden uyguladığı, Izod test numunesinin ise düzeneğe dik konumda mesnetlendiği ve çekicinin darbeyi çentikli yüzeyin üst kısmından uyguladığı görülmektedir.



Şekil 2.7. Charpy ve Izod darbe deney düzeneği ve numunelerin yerleşim şekilleri (Rao ve ark., 2016)

2.3.2. Ankastre kiriş darbe testi

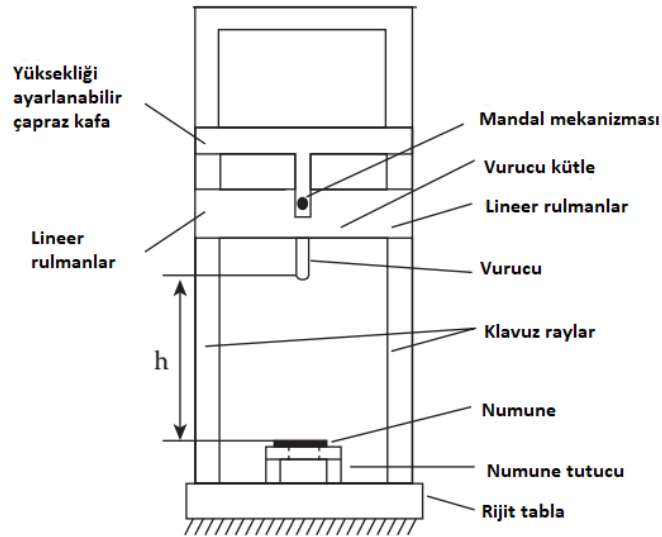
Ankastre kiriş darbe testi bir ucu ankastre olan dairesel kesitli çelik çubuğun diğer ucuna sabitlenmiş küresel çelik vurucunun istenilen darbe yüksekliğine kadar çıkarılıp bırakılması ve dairesel kesitli açıklıktan numuneye çarpması sonucu gerçekleşir. Vurucunun darbe anındaki kinetik enerjisi, vurucunun ilk andaki sahip olduğu darbe yüksekliğinden dolayı olan potansiyel enerjisi ile belirli bir esneklik katsayısına sahip olan çelik çubuğun şekil değiştirme enerjisi toplamıdır. Enerji eşitliklerinden vurucunun numuneye temas ettiği andaki ilk hızı hesaplanabilir.



Şekil 2.8. Ankastre kiriş darbe deney düzeneği şematik resmi ve fotoğrafı (Akangah ve ark., 2010)

2.3.3. Ağırlık düşürmeli darbe testi

Polimer matrisli kompozit malzemelerin ağırlık düşürmeli darbe testleri için Şekil 2.9’da görülen test cihazında çapraz kafaya mandal mekanizmasıyla bağlantılı bulunan vurucu kütle istenilen yüksekliğe (h) ayarlanarak vurucunun istenilen darbe enerjisiyle numuneye çarpması sağlanır. Aynı zamanda vurucunun numuneye çarptıktan sonra geri sıçraması ve ikinci bir çarpma yapma ihtimaline karşı pnömatrik geri sekmeyi önleyici pistonlarla bu durum engellenir. Vurucunun numuneye temas ettiği andan itibaren temas kuvvetleri vurucuya bağlantılı olan yük hücresiyle ölçülür ve veri toplama sisteminde temas kuvveti zaman geçmişiyle birlikte kaydedilir ve kuvvet-zaman grafiği oluşturulur.

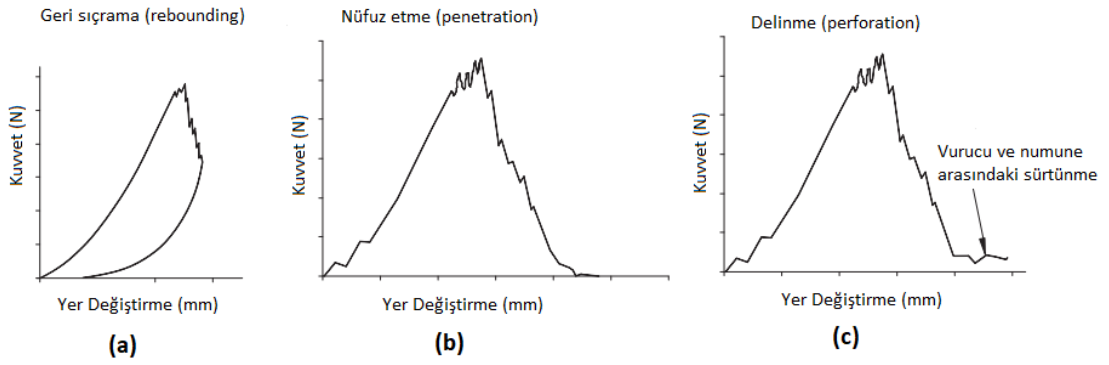


Şekil 2.9. Ağırlık düşürmeli darbe test cihazının şematik gösterimi (Carlsson ve ark., 2014)

Ağırlık düşürmeli darbe test cihazı Charpy ve Izod darbe test cihazlarıyla kıyaslandığında test edilen numunenin hasar davranışının tespit edilmesinde daha çok imkân sunmaktadır. Ağırlık düşürmeli darbe testi farklı geometriye sahip vurucu ve numunelerin darbe davranışının incelenmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca farklı enerji

seviyeleri, farklı vurucu kütleleri ve farklı vurucu hızlarının cihazda ayarlanabilmesi ağırlık düşürmeli darbe test cihazının diğer avantajlarındanır.

Düşük hızlı darbe testi sonrası çizilen kuvvet-yer değiştirme grafiklerinin görüntüsü, vurucunun çarpmasıyla kompozit malzemede oluşan darbe hasarı hakkında önemli bilgiler ifade etmektedir. Şekil 2.10'da gösterilen tipik kuvvet-yer değiştirme grafiklerine bakıldığında kuvvet değerlerinin yükselerek maksimuma ulaşması ve devamında vurucunun kısmen veya tamamen geri sıçramasıyla Şekil 2.10a'daki gibi yükün tekrar sıfırlanması neticesinde kapalı form grafik oluşur. Şekil 2.10b'de gösterildiği gibi test edilen kompozit numune bazı durumlarda vurucunun neredeyse tüm kinetik enerjisini yutar ve vurucu numuneye nüfuz eder. Şekil 2.10c'de vurucunun numuneye çarpmasıyla birlikte numunede delinme gerçekleştiği, vurucu ve numune arasındaki sürtünme etkileşimiyle temas kuvveti sıfırlanamadığı için açık form grafik oluşur(Atas ve Sevim, 2010; Hassan ve ark., 2014).

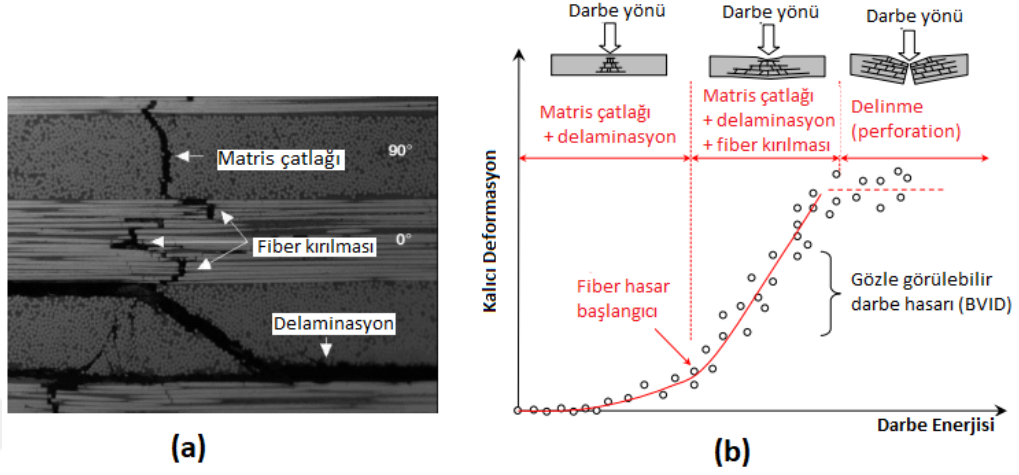


Şekil 2.10. Düşük hızlı darbe sonucunda oluşan tipik kuvvet-yer değiştirme grafikleri (Atas ve Sevim, 2010)

2.4. Düşük Hızlı Darbede Oluşan Hasar Modları

Tabakalı kompozitlerin darbe etkisine maruz kaldıklarında malzemede meydana gelen hasarlar dört ana kategoride isimlendirilir. Bu hasarlar matris çatlak hasarı, tabakalar arası meydana gelen delaminasyon, fiber kırılması ve penetrasyon olarak sıralanır. Darbe enerjisinin etki seviyesi arttıkça bu hasar modları malzemede sırasıyla meydana gelirler (Abrate, 2011; Silberschmidt, 2016). Şekil 2.11a'da tek yönlü fiber takviyeli kompozit levhada gözlemlenen üç hasar modunun görüntüleri yer almaktadır. Şekil 2.11b'de ise matris çatlağıyla başlayan hasarın artan darbe enerjisiyle birlikte kalıcı deformasyon derinliğine bağlı olarak diğer hasar modlarının eklenmesiyle devam ettiği, fiber kırılmalarının başladığı enerji seviyesinden itibaren meydana gelen hasarın darbe

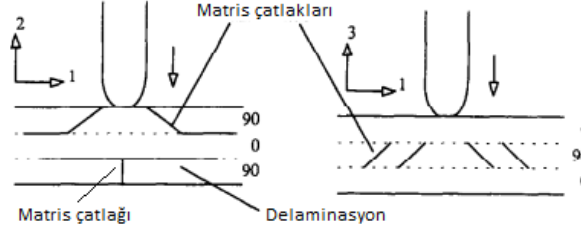
enerjisi artışıyla hızla arttığı ve gözle görülebilir hale geldiği, artan enerji seviyesiyle birlikte en sonunda da kompozitte penetrasyon oluşumu ve kısmi delinmenin gerçekleşmesinin evreleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.11. (a) Darbe sonrası fiber takviyeli kompozitte meydana gelen hasar modları görüntüsü (Olsson, 2012), (b) Artan enerji seviyesiyle birlikte kalıcı deformasyon derinliğine bağlı olarak hasar modları (Silberschmidt, 2016)

2.4.1. Matris çatlağı

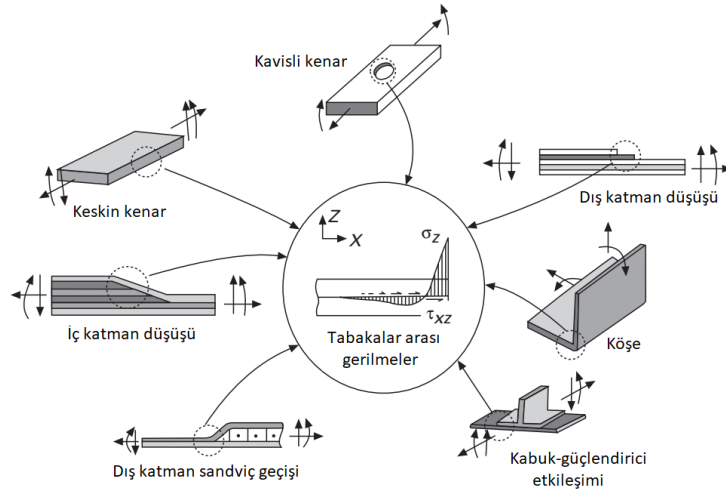
Düşük hızda darbe altında oluşan hasar modlarından ilki matris çatlağıdır. Çekme, basma ve kayma gerilmelerinden dolayı tek yönlü fiber takviyeli kompozitlerde çatlak ilerlemesi fiber doğrultusuna paralel olarak ilerler. Aynı zamanda matris fiber ayrılmasıyla matris hasarı gelişim gösterir. Vurucunun kompozit levhanın en üst tabakasına temas etmesiyle birlikte temas alanında oluşan yoğun temas kuvveti neticesinde 45^0 açıyla meydana gelen çok yüksek enine kayma gerilmeleri üst tabakalardaki matriste kayma çatlaklarına sebep olur. Kompozit levhanın en alt tabakasında ise eğilmeden kaynaklı çekme ve eğilme gerilmelerinin sebep olduğu eğilme çatlağı oluşur (Şekil 2.12). Uzun ve ince kompozit levhalarda darbe anında aşırı sehimden dolayı en alt tabakada eğilme çatlağı oluşurken, kısa ve kalın kompozit levhalar daha rijit davrandıklarından dolayı daha yüksek temas kuvvetinin sebep olduğu enine kayma çatlakları oluşur (Richardson ve Wisheart, 1996).



Şekil 2.12. [0/90/0] kompozit levhadaki darbe anında hasar başlangıcı (Richardson ve Wisheart, 1996)

2.4.2. Delaminasyon

Delaminasyon tabakalar arası bölgede meydana gelen en yaygın hasar modlarından biridir. Delaminasyon bir çatlak başlangıcıyla başlayıp çatlağın ilerleyerek bitişik iki kompozit tabakanın ayrılmasıdır. Delaminasyon, tabakalı kompozit malzemenin rijitliğinde ve kullanım ömründe önemli derecede düşüşe neden olur. Kompozit yapıdaki serbest kenar etkileri, yapısal süreksizlikler, üretim esnasındaki lokalize bozukluklardan dolayı tabakalar arası gerilmeler artarak delaminasyona sebep olur. Tabakalar arasında delaminasyon oluştuğunda Mod I, Mod II ve Mod III çatlaklarının hepsi meydana gelir (Sridharan, 2008). Şekil 2.13'te tabakalar arası gerilme artışına neden olan malzeme ve geometrik süreksizliklerde delaminasyon kaynakları gösterilmektedir.



Şekil 2.13. Malzeme ve geometrik süreksizliklerde delaminasyona sebep olan durumlar (Sridharan, 2008)

2.4.3. Fiber kırılması

Matris çatlağı ve delaminasyondan sonra oluşan fiber kırılması daha yüksek darbe enerji seviyelerinde gerçekleşir. Fiber kırılması kompozit levhanın üst tabakalarındaki

vurucunun temas alanı altında oluşan yüksek gerilmelerin ve vurucunun numuneye girinti oluşturmamasından dolayı kesme kuvvetlerinin etkisiyle ve en alt tabakada yüksek eğilme gerilmeleriyle meydana gelir(Richardson ve Wisheart, 1996).

2.4.4. Penetrasyon

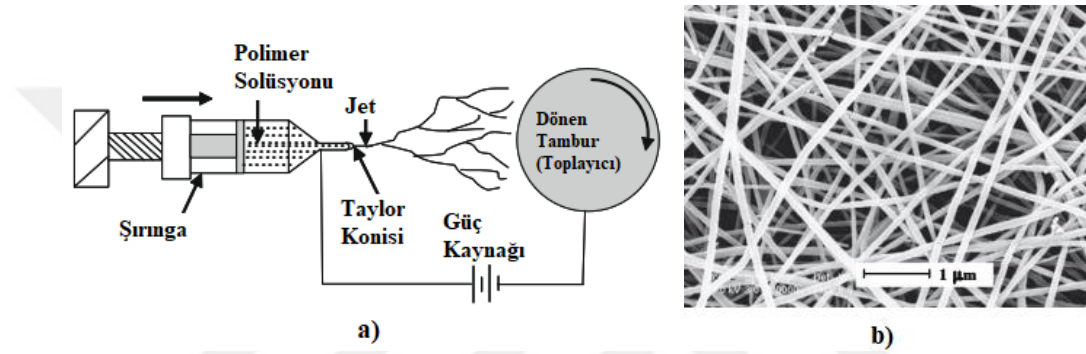
Penetrasyon, darbe anında fiber kırılmalarının belli bir kritik seviyeye ulaşması ve sonrasında vurucunun kompozit numuneye nüfuz etmesidir. Kompozit numunedeki kalınlık artışı vurucunun penetrasyon oluşturmaları için gerekli olan darbe enerjisini artırmaktadır. Aynı zamanda kompozit numuneyi oluşturan fiberlerin flaman sayısı, fiber yönelimi ve kumaşın dokuma tipi, matris malzemesi gibi faktörler penetrasyonu etkilemektedir (Abrate, 2011).

2.5. Elektroğirme Yöntemiyle Polimer Nanofiber Üretimi

Elektroğirme yöntemiyle polimer fiberlerin üretimi ilk olarak 1934 yılına dayanır. Formhals (1934) patentini aldığı ve geliştirmiş olduğu düzenekte elektriksel kuvvet alanından faydalanarak karşılıklı yerleştirilmiş iki zıt kutuplu elektrot arasında potansiyel fark oluşturarak iki elektrot arasından geçirilen polimer solüsyonundan filaman şeklinde polimerler elde etmeyi başarmıştır. Bu tarihten sonraki süreçlerde sürekli geliştirilen elektroğirme yönteminin uygulamalarına bakıldığında literatürde 50 çeşitten fazla polimerden elde edilebilen çapları 3 nm ile 1µm arasında değişen nanofiber üretimi gerçekleştirilmiştir. Polimer malzemenin bilinen formuna göre üretilen fiberlerin nanometre boyutlarında çapa sahip olmaları onlara geniş yüzey alanı-hacim oranı, yüzey işlevselliklerinde esneklik, rijitlik ve çekme mukavemeti gibi üstün mekanik özellikleri katmaktadır (Huang ve ark., 2003).

Polimer nanofiber üretiminde elektroğirme işlemi beş ana bileşenden oluşur. Bunlar yüksek voltaj sağlayan güç kaynağı (1-30 kV), solüsyonun tutulduğu hazne, polimer solüsyonunu hazneden sisteme sağlayan besleme sistemi (şırınga), şırınga ucuna yerleştirilen ve dağıtıcı ünite adı verilen iğne, jet oluşumundan sonra katılan fiberlerin üzerine biriktiği levha veya silindir şeklinde toplayıcıdan oluşmaktadır. Elektroğirme işlemi ergitilmiş veya solüsyon halindeki polimerin bulunduğu şırınga düzeneği ile toplayıcı olarak adlandırılan dönen tambur arasında oluşturulan potansiyel farkla başlar. İğne ucunda oluşan yüksek gerilim sayesinde solüsyon damlasının yüzeyi de elektrik

yüküyle yüklenir. Bu elektrik yükü iğne ucundaki damlanın koni şeklini almasını sağlar ve bu şekilde Taylor konisi adı verilir. Yüksek gerilim iğne ucunda kritik değere ulaştığı zaman, elektriksel itme kuvvetinin solüsyon damlasının yüzey gerilimini aşarak elektrik yüklü solüsyon Taylor konisi ucundan jet oluşumuyla püskürtülür. Jet oluşumuyla iğne ucundan ayrılan solüsyon kırbaç hareketi şeklini alarak uzar ve içindeki çözücünün buharlaşmasıyla katılaşıp nanofiber formunda toplayıcı üzerine biriktirilir (Akangah ve ark., 2010; Mohammadzadehmoghadam ve ark., 2015; Palazzetti ve Zucchelli, 2017). Şekil 2.14a’da elektroğirme işleminin şematik resmi, Şekil 2.14b’de ise elektroğirilmiş Naylon 6.6 nanofiberlerin SEM fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 2.14. Elektroğirme işleminin şematik gösterimi (a), elektroğirilmiş Naylon 6.6 nanofiberler (b)(Shivakumar ve ark., 2009)

2.6. Elektroğirme Yöntemine Etki Eden Faktörler

Elektroğirme yöntemiyle üretilen polimer nanofiberlerin yoğunlukları, çapları ve morfolojileri birçok farklı parametreye bağlıdır. Üretime etki eden bu parametreler polimer solüsyon parametreleri (moleküler ağırlık, viskozite, iletkenlik, yüzey gerilimi, çözücünün dielektrik etkisi), işlem parametreleri (besleme oranı, uygulanan voltaj, solüsyon sıcaklığı, kollektörün dönme hızı ve şekli, iğne ucu çapı ve iğne ucu ile kollektör arasındaki mesafe) ve ortam parametreleri (nem, sıcaklık, atmosfer ve basınç) olarak üç gruba ayrılır (Ramakrishna, 2005).

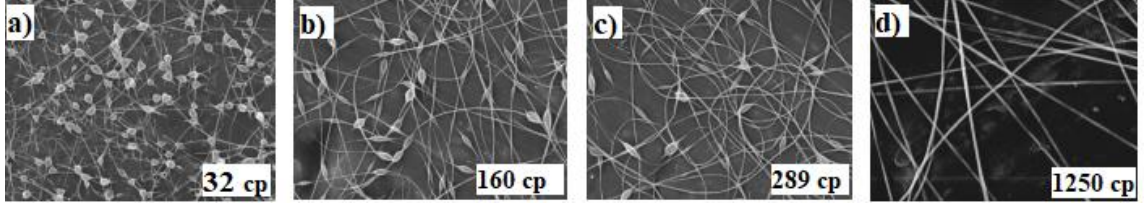
2.6.1. Polimer solüsyon parametreleri

2.6.1.1. Konsantrasyon ve viskozite

Elektroğirme işlemiyle nanofiber elde edilmesinde polimer solüsyonunun konsantrasyonu önemli rol oynamaktadır. Solüsyonun konsantrasyonunun değişimi, iğne

ucundan püskürtülen elektrik yüklü jetin esneme kararlılığını etkilemektedir. Eğer solüsyonun konsantrasyonu düşükse uygulanan elektrik alanı ve yüzey gerilimi jet kararlılığını bozarak, sarmal yapıdaki polimer zincirlerin kırılmasına ve kollektör üzerinde boncukların ve boncuklu nanofiberlerin birikmesine yol açar. Konsantrasyonun artırılması aynı zamanda solüsyonun viskozitesinin artırılması demektir. Bu yüzden polimer zincirleri arasındaki zincir sarmalı sayısı artarak yüzey gerilimine direnç gösterir ve daha büyük çapta, boncuksuz düzgün şekilli nanofiberler oluşur. (Zhang ve ark., 2005; Pillay ve ark., 2013; Ekrem ve ark., 2021).

Viskozite, moleküler ağırlık ve konsantrasyon birbiriyle bağlantılı terimlerdir. Elektroçğirme yönteminde çok düşük viskoziteli bir solüsyondan sürekli fiberler elde edilemezken, çok yüksek viskoziteli solüsyonun ise iğne ucundan jet püskürtülmesi çok zordur. Bu nedenle solüsyonun viskozitesinin uygun bir kıvamda olması gereklidir (Bhardwaj ve Kundu, 2010). Düşük viskozitede kollektörde biriken fiberlerde boncuk oluşumu gözlenir. Viskozitenin artırılmasıyla ters orantılı olarak yuvarlak şekilli boncuklar önce uzayan şekil alır ve uygun viskoziteye ulaşıldığında boncukların kaybolmasıyla kararlı çapa sahip sürekli fiberler elde edilir (Fong ve ark., 1999). Şekil 2.15.'de artan viskoziteyle birlikte boncuk oluşumunun nasıl kaybolduğu görülmektedir.

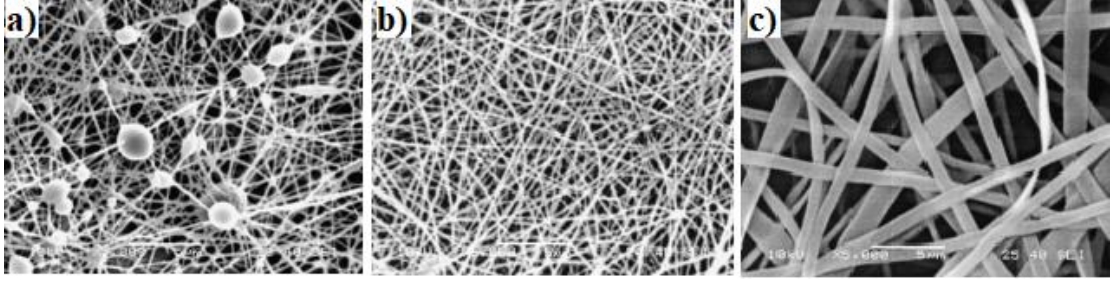


Şekil 2.15. Polietilen oksit (PEO) nanofiberlerin boncuklu yapısının viskoziteyle değişimi (Fong ve ark., 1999)

2.6.1.2. Moleküler ağırlık

Moleküler ağırlık nanofiberlerin morfolojisinin belirlenmesinde ve polimer solüsyonunun viskozitesini etkileyen bir diğer faktördür. Moleküler ağırlık, solüsyon içerisindeki polimer zincirlerinin sarmal sayısının bir göstergesidir. Yüksek moleküler ağırlıklı polimerden elde edilen bir solüsyonun viskozitesi aynı polimer malzemenin düşük moleküler ağırlıklı olanından daha yüksektir (Ramakrishna, 2005). Koski ve ark. (2004) elektroçğirme yöntemiyle farklı moleküler ağırlığa sahip ve 250 nm- 2 µm çaplar arasında değişen Polivinil Alkol (PVA) fiberler üretmişlerdir. Moleküler ağırlığın artırılmasıyla yapı içerisindeki boncuklu yapının kaybolup düzgün fiberler oluştuğunu

ve moleküler ağırlığın çok fazla artırılmasıyla mikro-şeritli fiberlerin oluştuğunu gözlemlemiştir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Polivinil Alkol (PVA) elektroğrılmış nanofiberlerin değişen moleküler ağırlıklardaki görüntüleri (a) 9000 – 10000 g/mol, (b) 13000 – 23000 g/mol, ve (c) 31000 – 50000 g/mol (Solüsyonun konsantrasyonu: %25)(Koski ve ark., 2004)

2.6.1.3. Yüzey gerilimi

Yüzey gerilimi solüsyonun içerisindeki solventin bir fonksiyonu olarak elektroğirme yönteminde önemli bir faktördür ve yüzey gerilimi düşürülerek boncuksuz nanofiberler elde edilebilir. Her solvent solüsyona farklı bir yüzey gerilimi kazandırır. Örneğin (Fong ve ark., 1999) etanol solventinin Polietilen oksit (PEO) solüsyonundaki konsantrasyon oranını arttırdıklarında yüzey geriliminin düştüğünü ifade etmişlerdir. Bununla birlikte solüsyon yüksek yüzey gerilimine sahipse, bu durum jetin kararsızlaşmasına neden olur ve boncuk oluşumunu destekler (Zuo ve ark., 2005; Bhardwaj ve Kundu, 2010).

2.6.1.4. Solüsyon iletkenliği

Solüsyonun iletkenliği Taylor konisinin şeklini etkilerken aynı zamanda istenilen nanofiber çapı elde etmede önemli rol oynar. Düşük iletkenliğe sahip bir solüsyonda iğne ucundaki damlacığın yüzeyinde Taylor konisini oluşturacak yük yoğunluğu elde edilememesi durumunda elektroğirme işlemi gerçekleşemez. Solüsyonun iletkenliğinin artırılmasıyla iğne ucundaki damlacığın yüzeyindeki yük yoğunluğu artarak Taylor konisini şekillendirir. Sentezlenen nanofiberlerin taşıdığı elektriksel yük üzerindeki oluşan çekme yükü artarak fiber çaplarının azalmasına neden olur (Sun ve ark., 2014). NaCl, KH_2PO_4 ve NaH_2PO_4 gibi iyonik tuzların polimer solüsyonlarına farklı oranlarda eklenmesi solüsyon iletkenliğini önemli oranda etkilemektedir (Zong ve ark., 2002). Zhang ve ark. (2005) yaptıkları çalışmada hazırladıkları Polivinil Alkol (PVA) solüsyonuna farklı oranlarda NaCl ekleyerek solüsyon iletkenliğine ve fiber morfolojisine

eklerini incelemişlerdir. Solüsyondaki %0.05- %0.2 aralığında NaCl miktarı artışıyla birlikte iletkenliğin 1.53 mS/cm'den 10.5 mS/cm'ye arttığını tespit etmişler aynı zamanda kollektörde biriken fiberlerin çaplarının 214 ± 19 nm'den 159 ± 21 nm'ye azaldığını gözlemlemişlerdir.

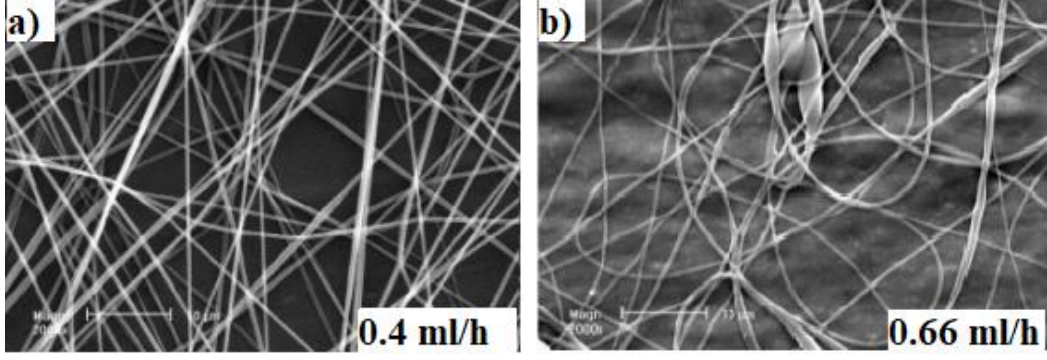
2.6.2. İşlem parametreleri

2.6.2.1. Uygulanan voltaj

Elektroeğirme işlemini başlatmak için gerekli eşik gerilimi solüsyonu hazırlanan her polimer için farklılık göstermektedir. Uygulanan yüksek gerilimle birlikte iğne ucundaki solüsyon damlacığı üzerinde yoğunlaşan elektrik yüklerinin etkisiyle elektrostatik kuvvetler solüsyonunun yüzey gerilimini aştığında Taylor konisi şeklini alarak jet oluşumuyla elektro eğirme işlemi başlar (Ramakrishna, 2005). Literatürde polimer solüsyonuna uygulanan voltajın elektroğirilmiş fiber çapları üzerine etkisini inceleyen çalışmalarda tartışmalı sonuçlarla karşılaşmıştır. Yapılan bazı çalışmalarda sisteme sağlanan gerilimin arttırılmasıyla birlikte iğne ucundan daha fazla polimer enjeksiyonun gerçekleştiği ve bu durumun daha büyük çapa sahip fiberlerin oluşumuna yol açtığı gözlemlenmiştir (Demir ve ark., 2002; Zhang ve ark., 2005). Bununla birlikte yapılan diğer çalışmalara bakıldığında uygulanan gerilimin arttırılmasıyla oluşan jet üzerindeki elektrostatik kuvvetlerin artması neticesinde fiber çaplarının daraldığı ifade edilmiştir (Megelski ve ark., 2002; Katti ve ark., 2004; Yuan ve ark., 2004).

2.6.2.2. Besleme hızı

Besleme hızı işlem parametrelerini etkileyen bir diğer önemli faktördür. Genellikle boncuksuz ve üniform yapılı nanofiberler elde etmek için elektroğirme işlemi düşük besleme hızlarında gerçekleştirilmelidir. Yüksek besleme hızları iğne ucundan ayrılan jetin kollektöre daha kısa sürede ulaşmasını sağladığından solventin buharlaşmasına imkân vermez. Bunun sonucunda kollektörde daha kalın çaplı ve boncuklu fiber morfolojisi gözlenir (Li ve Wang, 2013; Haider ve ark., 2015). Yuan ve ark. (2004) hazırladıkları %20 oranındaki PSF/DMAC solüsyonuyla besleme hızının fiber morfolojisine etkilerini incelemişlerdir. Şekil 2.17'te artan akış hızıyla fiber çaplarının arttığını ve boncuklu yapının oluştuğunu gözlemlemişlerdir.



Şekil 2.17. Besleme hızının elektroğrılmış PSF nanofiberlerin morfolojisine etkileri (Yuan ve ark., 2004)

2.6.2.3. Kollektör ve iğne arası mesafe

Kollektör ve iğne arası minimum mesafe aralığı iğne ucundan ayrılan jetin kollektöre ulaşmaya kadarki zamanda içerisinde bulunan solventin buharlaşabilmesine imkân tanımalıdır (Bhardwaj ve Kundu, 2010). Genel olarak iğne ucu ile kollektör arasındaki mesafe arttıkça kollektörde biriken fiberlerin ortalama çapında azalma meydana geldiği gözlenmiştir (Ayutsede ve ark., 2005; Matabola ve Moutloali, 2013). Matabola ve Moutloali (2013) yaptıkları çalışmada hazırladıkları %28’lik PVDF/DMAC solüsyonu için 12 kV’luk sabit gerilimde kollektör mesafesinin nanofiber morfolojisine etkisini incelemişlerdir. Kollektör mesafesinin 15 cm’den 16 cm’ye çıkarılmasıyla kollektörde biriken nanofiberlerin çaplarının 397 nm’den 314 nm’ye azaldığını ve daha üniform hale geldiklerini gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte bazı çalışmalarda ise iğne ucu ve kollektör arasındaki mesafe değişiminin kollektörde biriken nanofiberlerin morfolojisine önemli derecede etki etmediği gözlenmiştir (Megelski ve ark., 2002; Zhang ve ark., 2005).

2.6.3. Ortam parametreleri

Polimer solüsyon parametreleri ve işlem parametrelerinden sonra sıcaklık ve nem gibi ortam parametreleri de elektroğirme işleminde kollektörde biriken fiberlerin morfolojisini etkileyen diğer faktörlerdir. Ortamdaki bağıl nemin artmasıyla iğne ucundan çıkan solüsyon halindeki jetin katılaşmasının gecikmesinden dolayı daha fazla uzamasına sebep olarak daha küçük çapta nanofiberler oluşur (Sun ve ark., 2014). Tripatanasuwan ve ark. (2007) hazırladıkları %6’lık Polietilen Oksit (PEO) solüsyonuyla ortamdaki bağıl nem değişiminin fiber çaplarına ve morfolojisine etkilerini incelemişlerdir. Ortamdaki bağıl nem oranının %5.1’den %48.7’ye çıktığında kollektör üzerinde biriken

fiber çaplarının 253 nm'den 144 nm'ye dtn gözlemlemişlerdir. Ayrıca ortamdaki bağıl nem oranının %50'nin üzerine ıkarttıklarında daha ince ve boncuklu nanofiberlerin oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Elektroėėrilmif polimerik nanofiberlerin elde edilmesinde sıcaklık faktörü iki zıt etkiye sahiptir. Sıcaklığın arttırılmasıyla solüsyon içerisindeki solventin buharlaşma hızı artarken solüsyonun viskozitesi düşer. Sıcaklığın artmasıyla birlikte bu iki zıt mekanizmanın yani solüsyonun daha hızlı buharlaşması ve solüsyon viskozitesinin düşmesi kollektörde biriken nanofiberlerin ortalama çaplarının azalmasına yol açar (Mit-uppatham ve ark., 2004; Haider ve ark., 2015).

2.7. Nanopartikül Katkılarının Polimerik Nanofiberlerin Mekanik zelliklerine Etkileri

Elektroėėirme işleminden önce polimer solüsyonlarına nanopartiküllerin ağırlıkça belli oranlarda katılmalarıyla üretilen hibrit nanofiberlere çok iyi mekanik, optik, elektriksel ve katalitik özellikler kazandırılmaktadır(Son ve ark., 2006; Wang ve ark., 2012). Nanofiberlerin özellikle daha mukavemetli, daha rijit ve tokluk özellikleri kazanarak mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde tek cidarlı ve çok cidarlı karbon nanotüpler (SWCNT ve MWCNT) ile grafen, seramik ve metal oksit nanopartiküllerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.

Liu ve ark. (2009) poli laktik-ko-glikolik asit (PLGA) solüsyonuna ağırlıkça %1 MWCNT ekleyerek ürettikleri PLGA/MWCNT nanofiberlerin saf PLGA nanofiberlere kıyaslandığında nanofiberlerin çaplarında ve morfolojik özelliklerinde önemli bir değişiklik gzlemezlerken, nanofiber keçelerin çekme mukavemetinde ve elastisite modülünde sırasıyla %49 ve %88 artış elde etmişlerdir.

Eskizeybek ve ark. (2018) PAN nanofiberlere ağırlıkça %3 ve %5 oranında MWCNT katkısının nanofiberlerin çekme özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. %3 MWCNT katkılı PAN nanofiber keçelerde çekme mukavemeti ve elastisite modülünde sırasıyla %21 ve %70 ile en yüksek artış görülürken, %5 MWCNT katkılı PAN nanofiber keçelerde çekme mukavemeti ve elastisite modülündeki artış oranlarında %3 MWCNT katılı nanofiberlere kıyasla düşüş yaşanmıştır. Bu düşüşlerin PAN nanofiber içerisindeki MWCNT katkı oranının artışı topaklanmaya neden olduğunu ifade etmişlerdir.

Wang ve ark. (2013) GO katkılı PVA nanofiberlerde termal ve mekanik özelliklerdeki değişimleri incelemişlerdir. Ağırlıkça %0.02 ile %0.2 arasında değişen 6 farklı oranda GO nanolevha katılı PVA nanofiber solüsyonlarından GO/PVA kompozit

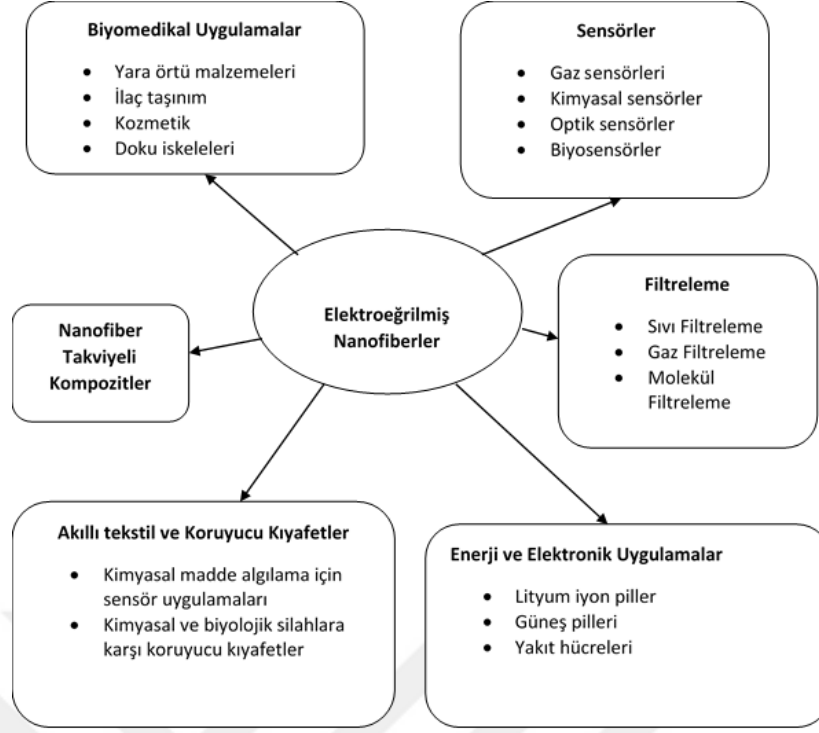
nanofiberler üreterek, GO'ların katkı oranlarına göre PVA nanofiberlerin mekanik özelliklerinde önemli iyileşmeler sağlamışlardır. %0.2 GO nanolevha katkılı PVA nanofiber keçelerin çekme mukavemetinde 42 kat artış elde ettiklerini belirtmişlerdir. TGA analizlerinde Saf PVA nanofiberlere göre %0.2 GO katkısının termal bozunma sıcaklığını 50°C düşürdüğünü gözlemlemişlerdir.

Satthiyaraju ve Ramesh (2019) %0.01, %0.05 ve %0.1 ZnO nanopartikül katkılı elektroeğrilmiş Poliviniliden Florid (PVDF) nanofiber keçelere nanopenetrasyon ve çekme testleri gerçekleştirerek ZnO nanopartiküllerin mekanik özelliklere etkilerini araştırmışlardır. Çekme testlerinde saf PVDF nanofiberlere kıyasla hibrit nanofiberlerde ZnO nanopartikül katkı oranı arttıkça çekme mukavemetinin de arttığını, en yüksek mukavemet artışının %60 ile %0.1 ZnO nanopartikül katkısıyla elde edildiğini, bununla birlikte nanopartikül katkısının artmasıyla kopma uzamasında düşüşlerin gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Nanopenetrasyon testlerinde ise en yüksek artışın %0.1 ZnO nanopartikül katkısıyla elastik modülünde %18 ve sertlikte %60 olduğunu bulmuşlardır.

Lamastra ve ark. (2008) PVA solüsyonuna ağırlıkça %2 ile %9 oranları arasında değişen oranlarda ayrı ayrı ZrO_2 ve Al_2O_3 seramik nanopartikülleri katarak elektroeğirme yöntemiyle PVA/ Al_2O_3 ve PVA/ ZrO_2 hibrit nanofiber keçeler üretmişlerdir. Saf PVA nanofiber keçelere kıyasla PVA/ Al_2O_3 ve PVA/ ZrO_2 hibrit nanofiber keçelerde çekme mukavemetinde sırasıyla 2.1 ve 3.88 kat artış gerçekleşirken, elastisite modülünde sırasıyla 2 ve 1.88 kat artış sağlanmıştır. Nanopartikül katkısıyla saf PVA nanofiberlere göre hibrit PVA nanofiberlerin kopma uzamasında düşüş gözlenmiştir.

2.8. Nanofiberlerin Uygulama Alanları

Elektroeğrilmiş fiberlerin nanometre boyutlarında çaplara sahip olmaları onlara yüzey işlevselliklerinde esneklik, geniş yüzey alanı-hacim oranı, rijitlik ve çekme mukavemeti gibi üstün mekanik özellikleri katmaktadır. Bu üstün özelliklerinden dolayı elektroeğrilmiş polimer nanofiberler son yıllarda devamlı genişleyen uygulama alanlarına sahip olmaktadır. Bu uygulama alanları genel olarak Şekil 2.18'te gösterilmektedir. Bu uygulamaların çoğu endüstriyel seviyeye ulaşmasa da araştırma ve geliştirme aşamasında çalışmaları devam etmektedir (Huang ve ark., 2003; Bhardwaj ve Kundu, 2010; Mohammadzadehmoghadam ve ark., 2015).

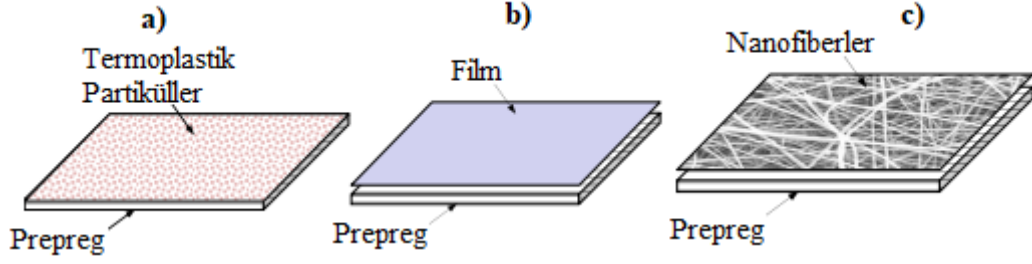


Şekil 2.18. Elektroğrılmış nanofiberlerin uygulama alanları

2.9. Tabakalı Kompozitlerde Ara Yüzey Toklaştırma Tekniği

Tabakalı kompozit malzemelerin fiziksel yapısından dolayı tabakalar arası bölge malzemenin dayanım açısından zayıf bölgeleridir. Darbe ve tekrarlı yüklere maruz kalan tabakalı kompozitlerde sıklıkla karşılaşılan hasar modlarından biri de delaminasyondur. Delaminasyon tabakalar arasında çatlak hasarının oluşumuyla tabakalar arası ayrılmadır. Tabakaların birbiri arasındaki anizotropik mekanik ve termal özelliklerinin uyumsuzluğundan dolayı malzemenin kenarlarında, bağlantı yerlerinde ve düzlem dışı yüklemeler altında tabakalar arası gerilmeler oluşur. Bu gerilmeler zayıf dayanıma ve kırılma tokluğuna sahip tabakalar arası bölgede delaminasyona sebep olur (Zucchelli ve ark., 2011; Palazzetti ve ark., 2013).

Delaminasyonu engellemek için kullanılan ara yüzey toklaştırma tekniği kompozit tabakalar arasına farklı bir termoplastik veya termoset malzemenin ince bir katman olarak üç farklı türde partikül, film veya nanofiberler şeklinde uygulanmasıdır (Shivakumar ve ark., 2013; Beylergil ve ark., 2017).



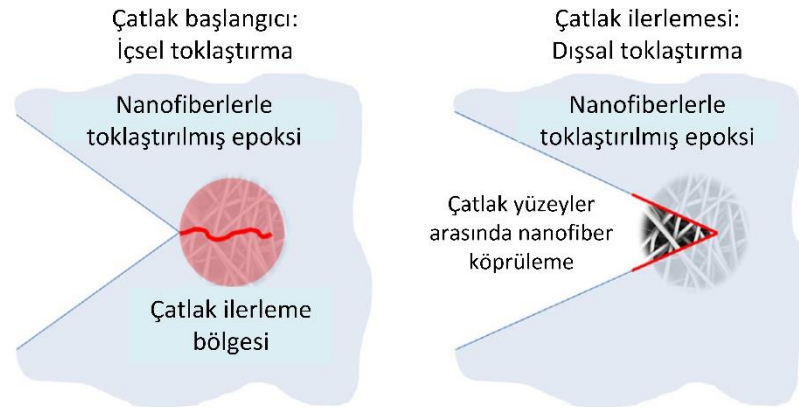
Şekil 2.19. Ara yüzey malzeme türleri: (a) Partikül ara yüzeyi, (b) Film ara yüzeyi, (c) Nanofiber ara yüzeyi (Shivakumar ve ark., 2013)

Termoplastik partikül ve film ara yüzey uygulamalarının delaminasyonun büyüme hızını azalttığı ve tabakalar arası tokluğu arttırdığı gözlenmesine rağmen ana kompozit levhanın kalınlığını yaklaşık %20 oranında arttırdığından dolayı düzlem içi rijitlik ve mukavemette %15-20 oranında düşüşe neden olduğu gözlenmiştir (Shivakumar ve ark., 2009). Bununla birlikte son yıllardaki yapılan çalışmalarda çok küçük çapa, gözenekli yapıya ve yüksek hacimsel gözenekliliğe sahip olan polimerik nanofiberler tabakalar arası bölgede fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde partikül ve film ara yüzey uygulamalarına göre daha kullanışlı ve etkili teknik olmuştur (Saghafi ve ark., 2013; Palazzetti ve Zucchelli, 2017). Li ve ark. (2008b) Polisülfon (PSF) solüsyonundan nanofiber keçe ve filmler üreterek karbon fiber/epoksi kompozit üzerindeki ara yüzey toklaştırma etkilerini incelemişlerdir. Aynı ayrı nanofiber keçe ve film formunda tabakalar arasına ağırlıkça %5 PSF uygulaması sonucunda film ara yüzey uygulaması referans numunelere göre kırılma tokluğunu %140 artırırken, nanofiber keçe uygulanan kompozit levhalarda %280 oranında arttığını tespit etmişlerdir. Bu çalışma tabakalar arası nanofiber uygulamasının film uygulamasına göre daha etkili bir ara yüzey toklaştırma yöntemi olduğunun bir örneğidir.

Ara yüzey toklaştırma yöntemlerinden olan polimerik nanofiberlerin tabakalar arasına uygulama çalışmaları ilk olarak Dzenis ve Reneker (2001)'in patent çalışmasına dayanır. Dzenis ve Reneker (2001) yaptıkları bu çalışmada tek yönlü grafit-elyaf epoksi prepreg tabakalar arasına 300-500 nm çapları arasında değişen elektroğrılmış Polibenzimidazol (PBI) nanofiberler uygulamışlardır. Referans ve nanofiber takviyeli numunelere Mode I ve Mode II kırılma tokluğu testleri uygulayarak nanofiberlerin tabakalar arası bölgede kırılma tokluğuna etkisini göstermişlerdir. Referans numunelere göre nanofiber takviyeli numunelerin Mode I kırılma tokluğunda %15 ve Mode II kırılma tokluğunda %130 artış gözlemlemişlerdir. Dzenis (2008) ayrıca kompozitlerin ara tabakalarında epoksi içerisinde birbirine dolaşık yapıda bulunan nanofiberlerin Velcro

bantların iç yüzeylerindeki halka ve kanca yapısı gibi kırılma direncini artırdığını, çatlak yolunu saptırma, çatlak köprüleme, nanofiber sıyrılması etkileriyle plastik deformasyonda önemli rol oynadıklarını ifade etmektedir.

Tabakalı kompozitlerde tabakalar arasında çatlak ilerlemesi ve delaminasyonu engellemeye yönelik mekanizmalardan birisi fiber köprülemedir (Nash ve ark., 2015). Şekil 2.20’de tabakalar arası bölgede nanofiberlerle modifiye edilmiş epoksida çatlak oluşumuna karşı nanofiber köprüleme ve toklaştırma mekanizmaları gösterilmektedir. Elektroçirime yöntemiyle üretilen termoplastik nanofiberler gevrek yapılı epoksi matrisçe zengin ara tabakalara yerleştirilerek epoksiye kıyasla daha sünek yapılı olmalarından dolayı tabakalar arası bölgeyi toklaştırır. Böylece tabakalar arası bölgede çatlak oluşumu için harcanması gerekli enerjinin ve dolayısıyla da tabakalar arası kırılma tokluğunun artmasını sağlarlar. Çatlak oluşumunu engellemeye yönelik bu mekanizmaya içsel toklaştırma adı verilir. Eğer çatlak oluşumu gerçekleşirse epoksi reçine içerisinde gömülü nanofiberler oluşan çatlağın arkasında çatlak yüzeyleri arasında köprüleme görevi görerek plastik deformasyonla uzayıp koparak çatlağın ilerlemesine engel olurlar ve dışsal toklaştırma görevi görürler. Yeni çatlak oluşumları gerçekleşmeye devam etmesi halinde oluşan çatlakların arkalarında yeni nanofiber köprüleme mekanizmaları oluşur. Nanofiber köprüleme bölgeleri oluşan yeni çatlaklarla daha da büyüyerek, çatlakların daha da ilerlemesi için gerekli enerji artışına paralel olarak kırılma tokluğunu da artırır (Daelemans ve ark., 2015; Saghafi ve ark., 2015c; Daelemans ve ark., 2020).



Şekil 2.20. Tabakalar arası bölgede nanofiberlerle modifiye edilmiş epoksida çatlak oluşumuna karşı içsel toklaştırma ve çatlak ilerlemesine karşı nanofiber köprülemeyle dışsal toklaştırma mekanizmaları (Daelemans ve ark., 2020)

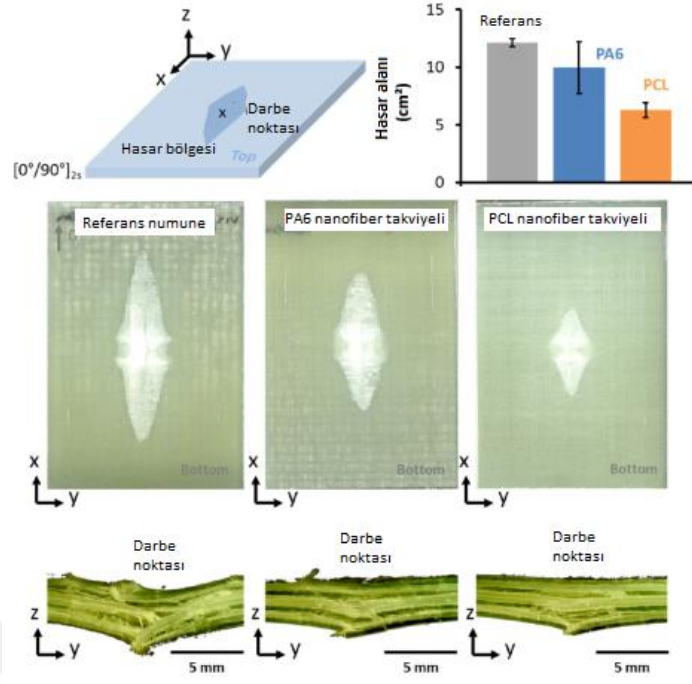
2.10. Nanofiber Takviyesinin Tabakalı Kompozitlerde Mekanik Özelliklere ve Darbe Davranışına Etkisi

Dzenis ve Reneker (2001)'in patent çalışmasından günümüze kadar yapılan birçok çalışmada araştırmacılar tabakalar arası bölgeye yerleştirdikleri elektroğrılmış polimerik nanofiberlerin tabakalı kompozitlerin delaminasyon direncini ve mekanik özelliklerini nasıl etkilediğini yaptıkları birçok mekanik testlerle (Mod I ve Mod II kırılma tokluğu, eğilme, çekme, yorulma, darbe vb.) ortaya koymuşlardır.

Saghafi ve ark. (2015c) %14 oranında Naylon 6.6'yı Formik asit/Kloroform (1:1) solüsyonunda çözerek elde ettikleri elektroğrılmış nanofiber keçeleri prepreg cam fiber/epoksi tabakalı kompozitin orta düzlemine yerleştirerek Mode I ve Mode II kırılma tokluğuna etkisini incelemişlerdir. Referans numunelere göre nanofiber takviyeli numunelerin Mod I ve Mod II kırılma enerjilerinin sırasıyla %62 ve %109 arttığını tespit etmişlerdir. Kırılma yüzeyine ait SEM fotoğraflarında epoksi matrise göre daha sünek yapıya sahip olan Naylon 6.6 nanofiberlerin köprü oluşturarak delaminasyonun başlamasını engellediği, bu durumun da çatlağın başlaması için daha fazla enerji gereksinimi oluşturduğu yorumunu yapmışlardır.

Phong ve ark. (2013) elektroğrılmış Nano-Polivinil Alkol(nPVA) nanofiberleri ağırlıkça %0.03, 0.05 ve 0.1 oranlarında epoksi reçine içerisine karıştırarak karbon fiber/epoksi tabakalı kompozit numuneler üretmişlerdir. Bu numuneler üzerinde çekme, Mod I kırılma tokluğu için DCB testi, çekme-çekme yükü altında yorulma testlerini gerçekleştirmişlerdir. Ağırlıkça %0.1 nPVA nanofiber içeren numunelerde referans numunelere göre Mod I çatlak başlangıcı ve çatlak yayılması kırılma tokluğu sırasıyla %65 ve %73 arttığını tespit etmişlerdir. Ağırlıkça %0.05 nPVA nanofiber içeren numunelerde çekme mukavemetinin sadece %5 kadar arttığını bununla birlikte tüm modifiye edilmiş numunelerde referans numunelere göre yorulma ömrünün 10-30 kat arasında uzadığını gözlemlemişlerdir.

Beylergil ve ark. (2017) %10 oranında PA 6.6'yı Formik asit/Kloroform (75:25) solüsyonunda çözerek nanofiberler elde etmişlerdir. Elektroğirme yöntemi PA 6.6 nanofiberlerin doğrudan karbon kumaş üzerine biriktirilmesiyle uygulanarak tabakalar arası kırılma tokluğunu artırmayı amaçlamışlardır. Vakum infüzyon tekniğiyle ürettikleri karbon fiber/epoksi referans ve nanofiber takviyeli kompozit numuneler üzerinde üç nokta eğme, çekme, basma, tabakalar arası kayma mukavemeti, Charpy darbe deneyi ve DCB (Çift ankastre kiriş) testlerini gerçekleştirerek PA 6.6 nanofiberlerin mekanik



Şekil 2.22. Referans, PA6 ve PCL nanofiber takviyeli numunelerde düşük hızlı darbe hasarı (Daelemans ve ark., 2016)

Ek olarak referans ve nanofiber takviyeli numuneler üzerinde gerçekleştirilen darbe testlerinde, 67 J enerji seviyesindeki düşük hızlı darbe sonucu numuneler üzerindeki hasarın nasıl değişiklik gösterdiği **Şekil 2.22**'te görülmektedir. Nanofiber takviyeli numuneler daha yüksek darbe direnci göstererek kompozit malzeme üzerinde meydana gelen hasarın azaldığı numune kesitlerinin gösterildiği resimlerde açıkça görülmektedir. Hem hasar alanı grafiğinde sayısal olarak hem de numunelerin alt yüzeylerinin fotoğraflarına bakıldığında PCL nanofiber takviyesinin darbe hasar alanını %50'ye kadar azalttığı gözlenmektedir. Kırılma mekanizması Mod I ve Mod II testlerindeki benzer olarak tabakalar arası bölgede nanofiber köprüleme bölgelerinin şekil değişimine uğramasıyla delaminasyon büyümesini engellediğini ve kırılma tokluğunu arttırdığını ifade etmişlerdir.

Bir sonraki çalışmalarında Daelemans ve ark. (2018) cam/epoksi kompozit levhalara PA6, PA6.9 ve PCL nanofiberlerin düşük hızlı darbe direncine etkilerini 14 J-79 J aralığında daha kapsamlı olarak incelemişlerdir. En iyi darbe direnci artışı darbe hasar alanını %60'a kadar azaltan PCL nanofiberlerle elde edilmiştir. Nanofiberlerin tabakalar arasında tokluk etkisi göstererek sağladıkları darbe direncinin özellikle 41 J'den daha yüksek enerjilerde önemli derecede arttığını belirtmişlerdir. Darbe testi sonrası hasarlı numunelere gerçekleştirdikleri basma testlerinde nanofiber takviyesinin basma mukavemetinde dikkate değer bir etkisinin olmadığı sonucuna varmışlardır.

Shivakumar ve ark. (2009) elektroēgrilmiş Nylon 6.6 nanofiber keēeleri AS4/3501-6 prepreg karbon fiber/epoksi kompozit tabakalarının arasına yerleştirerek ürettikleri kompozit numuneleri DMA (Dinamik Mekanik Analiz), düşük hızlı darbe ve Mod I kırılma tokluğu testlerine tabi tutmuşlardır. Tabakalar arasına Nylon 6.6 nanofiber takviyesinin kompozit levhanın kalınlığı ve ağırlığında %1'lik artış yapmasına rağmen, numunelerin düzlem içi mekanik özelliklerinde olumsuz bir etkisinin olmadığı elde ettikleri daha iyi sonuçlarla desteklenmiştir. Kompozit levhalardaki nanofiber takviyesinin sönümleme oranını %13 arttırdığı, darbe hasarını %16 azalttığını, Mod I kırılma tokluğu %150 ve kırılma direncini %33 arttırdığını tespit etmişlerdir.

Akangah ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada Nylon 6.6 nanofiberlerin AS4/3501-6 prepreg karbon fiber/epoksi kompozitlerde darbe direncine etkisini incelemişlerdir. Tabakalar arasına uygulanan nanofiberlerle modifiye edilen kompozit levhaların kalınlığında %2'lik bir artış gözlenmiştir. Referans numunelere göre nanofiber takviyeli numunelerde eşik darbe kuvvetinin %60 oranında arttığı ve darbe hasar alanının %50 oranında azaldığını ifade etmişlerdir.

Molnár ve ark. (2014) iğnesiz elektroēirme yöntemi olan polimer solüsyonu içerisine yarısına kadar batırılmış dönen bir tamburun dönme esnasında merkez kaç kuvveti etkisiyle tamburdan ayrılan solüsyonun ipliksi şeklinde uzaması neticesinde tek yönlü ve dokuma karbon kumaşlar üzerine biriktirilmesiyle %11'lik Poliakrilonitril (PAN)/DMF solüsyonundan nanofiberler üretmişlerdir. Yaptıkları tabakalar arası kayma mukavemeti (ILSS) testi, üç-nokta eğme, Charpy darbe ve ağırlık düşürme darbe testleriyle PAN nanofiberlerin tabakalar arası bölgede kompozit levhaların mekanik özelliklere etkilerini incelemişlerdir. Quasi-statik yüklemelerde tek eksenli karbon kumaşlı kompozit numunelerde nanofiber takviyesinin dokuma karbon kumaşlı numunelere göre daha etkili sonuçlar vermiştir. Nanofiber takviyesiyle tek eksenli ve dokuma kumaşlı numunelerde tabakalar arası kayma mukavemetinin sırasıyla %11 ve %7 arttığı, eğilme modülünün sırasıyla %54 ve %13 arttığı ifade edilmiştir. Bununla birlikte eğilme dayanımının tek eksenli karbon kumaşlı numunelerde %21 artarken, dokuma karbon kumaşlı numunelerde %12 düştüğü tespit edilmiştir. Charpy darbe testlerinde nanofiber takviyesiyle kırılma enerjilerinde önemli bir artış gözlenmiştir. Ağırlık düşürme darbe testlerinde dokuma kumaşlı numunelerde nanofiber takviyesiyle maksimum kuvvete kadar absorbe edilen enerjide %64'lük artış sağlanmıştır.

Saghafi ve ark. (2013) ağırlıkça %15 oranında PVDF'yi Dimetil sülfoksit/Aseton (30:70) solüsyonunda çözerek 39 µm ve 64 µm kalınlıklarında ürettikleri ince ve kalın

nanofiber keçeleri prepreg cam fiber/epoksi tabakalar arasına yerleştirmişler ve ince ve kalın kesitli iki farklı nanofiber takviyeli kompozit levhalar üretmişlerdir. 5 J enerji seviyelerinde yapılan ağırlık düşürme darbe testlerinde ince ve kalın nanofiber takviyesinin tabakalar arası bölgede kompozit levhanın darbe davranışını nasıl etkidiğini incelemişlerdir. Kuvvet-zaman grafiklerinde nanofiber takviyeli numunelerin darbe cevabının nanofiber takviyesiz numunelere göre neredeyse hiç farklılık göstermediğini tespit etmişlerdir. Bununla birlikte nanofiber takviyesinin nanofiber takviyesiz numunelere göre ince ve kalın nanofiber keçeli numunelerde darbe anında absorbe edilen enerjide sırasıyla %9.5 ve %13.4 oranında artış gözlenmiştir. Tüm bu sonuçlar dikkate alındığında cam/epoksi kompozitlerde PVDF nanofiber takviyesinin tabakalar arasını toklaştırma ve kompozit levhanın darbe hasar direncini artırmada iyi bir seçim olmadığı ortaya çıkmıştır.

Goodarz ve ark. (2019) üç farklı kalınlıkta (17.5 μm , 35 μm , ve 70 μm) ürettikleri PA6.6 nanofiber keçeleri aramid/epoksi kompozitlerde tabakalar arasına üç farklı konfigürasyonla (alt tabakalar, orta tabakalar ve iki taraflı) yerleştirerek nanofiber takviyeli kompozitlerin 16 J, 28 J ve 40 J darbe enerjilerindeki darbe davranışına etkilerini incelemişlerdir. Nanofiber takviyeli kompozitlerin darbe davranışında en iyi sonuçlar alt tabakalara yerleştirilen ve 35 μm kalınlığa sahip nanofiber keçelerle elde edilmiştir.

Palazzetti ve ark. (2013) elektroğrılmış Naylon 6.6 nanofiberlerin karbon fiber/epoksi kompozitlerde darbe davranışına etkisini incelemek için 3 J, 6 J ve 12 J seviyelerinde darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Nanofiberler en alt ve üst iki ara tabaka (Nano1) ile en alt üç ara tabakalara (Nano2) iki farklı konfigürasyonla yerleştirilmiştir. 3 J enerji seviyesinde nano-modifiyeli numunelerde maksimum kuvvet referans numuneye göre %8 düşük çıkmış ve test zamanı daha uzun sürmüştür. 6 J enerji seviyelerindeki darbe cevaplarında referans numuneye göre Nano1 ve Nano2 numuneleri sırasıyla %3.8 ve %14.3 daha az enerji absorbe etmişlerdir. 12 J enerji seviyelerinde ise referans numuneye göre Nano1 ve Nano2 numuneleri sırasıyla %7.5 ve %12.9 daha fazla enerji absorbe etmişlerdir. 12 J'lük yüksek enerji seviyesindeki darbe sonrası SEM görüntülerinden nanofiberlerin tamamen koptukları için darbe direncinde etkili olamadıklarını belirtmişlerdir.

Saf polimerik nanofiberlerle tabakalı kompozitlerin takviyelendirilmesiyle ilgili literatürde yukarıda bazıları özetlenen çalışmalardan çok sayıda yer alırken, nanopartikül katkılı hibrit nanofiberlerin tabakalı kompozitlerde daha fazla güçlendirme ve tokluk artışı elde etmek amacıyla kullanılmaları sınırlı sayıdaki çalışmalarda rastlanılmıştır. Bu

çalışmalar da özellikle MWCNT katkılı hibrit nanofiberlerin kompozitlerde güçlendirme etkisini incelemişlerdir.

Li ve ark. (2015) ağırlıkça %5-%20 arasında değişen oranlarda epoksi ile aşılantı karbon nanotüp (MWNTs-EP) katkılı hibrit PSF nanofiberleri her tabaka arasına yerleştirilerek karbon/epoksi kompozitlerde eğilme özellikleri, tabakalar arası kayma mukavemeti (ILSS) ve Mod II kırılma tokluğu üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Ağırlıkça %20 MWNTs-EP/PSF hibrit nanofiber takviyeli kompozitte eğilme mukavemeti ve modülünün saf PSF nanofiber takviyeli kompozite kıyasla sırasıyla %13.3 ve %22.8 ile en yüksek artış gözlemişlerdir. ILSS testlerinde referans kompozite kıyasla saf PSF nanofiber takviyeli kompozitte hafif düşüş yaşanırken, %20 MWNTs-EP/PSF hibrit nanofiber takviyeli kompozitte %11.9 ile en yüksek artış kaydedilmiştir. Mod II kırılma tokluğunda saf PSF nanofiber takviyeli kompozite kıyasla %48.4'lük en yüksek artış %10 MWNTs-EP/PSF hibrit nanofiber takviyeli kompozitte elde edilmiş, MWNTs-EP oranının %10'dan daha fazla artırılması Mod II kırılma tokluğu artışında düşüşe neden olmuştur.

Subagia ve ark. (2014) ağırlıkça %1, %3 ve %5 MWCNT içeren CNT/PU hibrit nanofiberleri bazalt fiberlerin sadece orta iki ara tabakalarına yerleştirilerek VARTM metoduyla CNT/PU takviyeli 12 tabakalı bazalt/epoksi kompozitler üretmişlerdir. Hibrit nanofiber takviyesinin bazalt/epoksi kompozitin çekme ve eğilme özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca %3 MWCNT içeren PU nanofiberlerin üretiminde yüzey aktif madde kullanarak MWCNT'in daha homojen dağılımı ve nanofiberlerin daha geniş yüzey alanına sahip olmaları hedeflenmiştir. Nanofiber takviyesiz referans kompozite kıyasla, PU nanofiber içerisindeki MWCNT oranının artmasıyla birlikte çekme ve eğilme özelliklerinin iyileştiği gözlenmiştir. Ek olarak, yüzey aktif maddeli %3 CNT/PU nanofiberli kompozitte referans kompozite kıyasla çekme mukavemeti, elastisite modülü ve eğilme mukavemetinde sırasıyla %13, %20 ve %17.3 ile en yüksek artışlar görülmüştür.

Song ve ark. (2020) elektroegrilmiş saf PA6.6 ve elektroegirme işlemi sonrası karboksil MWCNT dağıtılmış solüsyona daldırılarak üretilen CNT-COOH kaplanmış PA6.6 nanofiberler 16 tabakalı karbon kumaşların ortadaki tek ara yüzeyine yerleştirilerek vakum destekli el yatırma metoduyla saf PA6.6 ve CNT-COOH/PA6.6 nanofiber takviyeli karbon/epoksi kompozit levhalar üretmişlerdir. Nanofiber takviyesiz kontrol kompozite göre Mod I kırılma tokluğunda saf PA6.6 ve CNT-COOH/PA6.6 nanofiber takviyeli kompozitlerde sırasıyla %57 ve %122'lik artış gözlenirken, Mod II

kırılma tokluğunda ise sırasıyla %25 ve %81'lik artışlar kaydedilmiştir. Kırılma yüzeylerinin SEM görüntülerinden, Mod I kırılma tokluğu testlerinde tabakalar arası bölgede CNT-COOH kaplanmış PA6.6 nanofiberler saf PA6.6 nanofiberlere kıyasla daha iyi ara yüzey yapışması sergileyerek kırılma enerjisini artırırken, Mod II kırılma tokluğunda ise karbon nanotüplerin tabakalar arasında kayma çatlaklarının büyümesini engellemek için pimleme görevi görerek delaminasyon direncini ve kırılma tokluğunu arttırdıklarını belirtmişlerdir. Üç nokta eğme testlerinde de CNT-COOH/PA6.6 nanofiber takviyeli kompozit eğilme mukavemetinde %13 ile en yüksek artışı sağlamıştır.

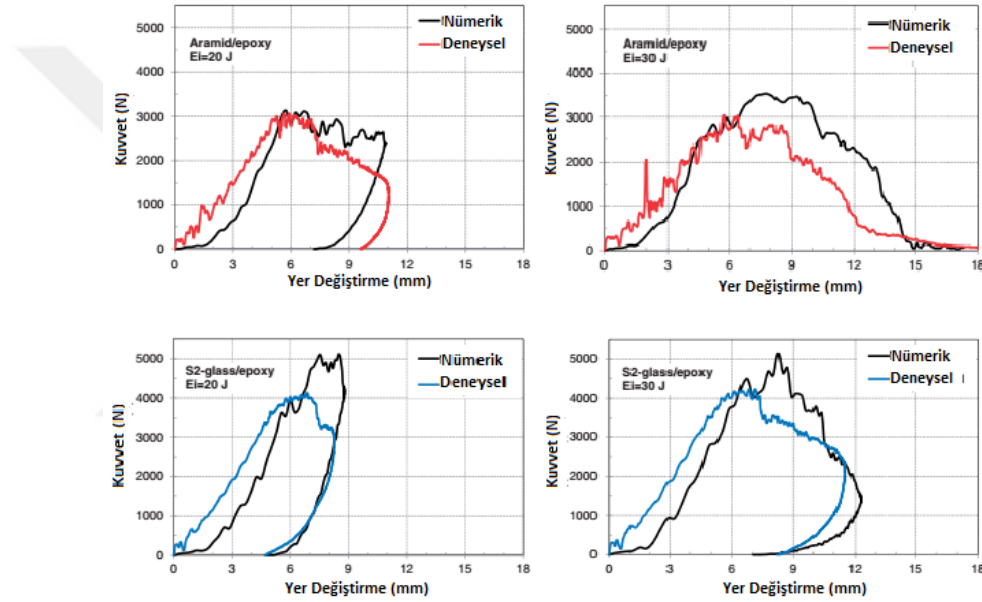
Cam/epoksi kompozitlerde tabakalar arasına saf PSF ve SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı hibrit PSF nanofiber takviyesinin mekanik özelliklere ve darbe davranışına etkilerini inceleyen herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu tez çalışmasında PSF nanofiberlere SiC nanopartikül katkısıyla cam/epoksi kompozitlerin darbe direnci artışı hedeflenirken, Fe₃O₄ nanopartikül katkısının PSF nanofiberlere ve cam/epoksi kompozitlere manyetik özellikler kazandırması amaçlanmıştır. Fakat bu çalışmada SiC-Fe₃O₄ nanopartiküllerin sadece mekanik özelliklere ve darbe davranışına etkileri incelenmiştir. Bu tez çalışması aynı anda iki farklı nanopartikül katkısı içeren polimerik nanofiberlerin polimer matrisli kompozitlerde tabakalar arasını güçlendirmeyi hedefleyen ilk çalışmalardan birine aday olmasıyla literatüre yeni katkılar sağlayacaktır.

2.11. Tabakalı Kompozitlerde Darbe Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi

Fiber takviyeli polimer kompozitlerin darbe davranışının modellenmesinde ve oluşan hasar modlarının tahmin edilmesinde literatürde ABAQUS/Explicit (Aymerich ve ark. (2009), Batra ve ark. (2012), Shi ve ark. (2012), Feng ve Aymerich (2014), Kurşun ve ark. (2015), Francesconi ve Aymerich (2017), Selver ve ark. (2020)) , LS-DYNA (Menna ve ark. (2011), Sevkati ve ark. (2009), Heimbs ve ark. (2009), Maio ve ark. (2013), Jung ve ark. (2017), Sevkati ve ark. (2013), Berk ve ark. (2016), Ahmad ve ark. (2018), Fragassa ve ark. (2019), Yalkın ve ark. (2020), Cherniaev ve ark. (2020)) , MSC. MARC (Hassan ve ark. (2014)), 3DIMPACT(Aslan ve ark. (2003), Karakuzu ve ark. (2010)) gibi ticari sonlu elemanlar yazılımları yaygın olarak kullanılmaktadır. Aşağıda bu çalışmalardan bazıları sunulmaktadır.

Berk ve ark. (2016) 2.40 mm kalınlığında S2-cam/epoksi ve 2.42 mm kalınlığında aramid/epoksi kompozit levhalar üzerinde 20 J ve 30 J seviyelerindeki düşük hızlı darbe

davranışını deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Nümerik simülasyonları LS-DYNA sonlu elemanlar programıyla gerçekleştirmişlerdir. Darbe davranışının modellenmesinde sekiz düğümlü katı eleman tipiyle oluşturulan vurucuya rijit malzeme modeli olan Mat 20 malzeme modelini, dört düğümlü kabuk eleman tipiyle oluşturulan kompozit tabakaları ise Tsai-Wu hasar kriterini kullanan MAT 55 numaralı malzeme modelini uygulamışlardır. Darbe testleri için 13 tabaka olarak üretilen kompozit levhaları 6 tabaka olarak modelleyerek hesaplama zamanından tasarruf sağlamışlardır. Tabakalar arası delaminasyon modellemesi için Contact_Automatic_One_Way_Surface_To_Surface_Tiebreak temas algoritması tanımlamışlardır.



Şekil 2.23. Aramid/epoksi (üstte) ve S2-cam/epoksi (altta) kompozit numunelerin 20 J ve 30 J seviyelerindeki Kuvvet- Yer değiştirme grafikleri (Berk ve ark., 2016)

Deneysel sonuçlarda 30 J seviyesindeki darbe enerjisinde aramid/epoksi numunelerde penetrasyon gerçekleşirken, S2 cam/epoksi numunelerde vurucunun geri sıçrama (rebounding) gerçekleştirdiği gözlenmiştir. Şekil 2.23’de kuvvet-yer değiştirme grafiklerinde gösterilen deneysel ve nümerik simülasyon sonuçları değerlendirildiğinde simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlarla genel olarak iyi bir eşleşme sağladığı görülmektedir.

Heimbs ve ark. (2009) karbon fiber/epoksi kompozitlerde basma ön yüklemesinin 40 J enerji seviyesinde düşük hızlı darbe davranışına etkisini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Darbe testi sonrasında ön yüklemeli numunelerin ön yüklemesiz numunelere göre daha fazla enerji absorbe ettiğini ve daha fazla şekil değişimine

uğradığını gözlemlemişlerdir. Nümerik simülasyonlar için LS-DYNA sonlu elemanlar programını kullanmışlardır. Kompozit tabakaların modellenmesinde dört düğümlü kabuk eleman tipi için Chang/Chang hasar kriterinin adapte edildiği MAT 54 malzeme modelini uygulamışlar ve tabakalar arası delaminasyon modellemesi için Contact_Automatic_One_Way_Surface_To_Surface_Tiebreak temas algoritması tanımlamışlardır. Modelleme parametrelerinden tabakalardaki kabuk eleman ölçüleri ve tabaka sayısının değişimiyle simülasyon sonuçlarının önemli oranda değiştiğini tespit etmişlerdir. Kuvvet-zaman ve enerji-zaman grafiklerinde simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla iyi bir korelasyon sağlamıştır.

Menna ve ark. (2011) ürettikleri prepreg dokuma kumaş cam fiber/epoksi kompozit levhaların düşük hızlı darbe davranışının LS-DYNA sonlu elemanlar programıyla nümerik simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Kompozit levhalar 0.96 mm kalınlığında 4 tabakalı ve 1.92 mm kalınlığında 8 tabakalı üretilmiştir. Her tabaka üç boyutlu sekiz düğümlü katı sonlu eleman tipi kullanılarak oluşturulmuş ve üç boyutlu gerilme temelli hasar kriterine dayalı malzemenin hasar ilerlemesini modelleyen MAT 59 katı malzeme modelini uygulanmıştır. Tabakalar arası delaminasyon modellemesi için Contact_Automatic_One_Way_Surface_To_Surface_Tiebreak temas algoritması tanımlamışlardır. 0.4 J – 20 J aralığındaki enerji seviyelerinde gerçekleştirilen darbe testlerinin kuvvet- yer değiştirme grafiklerinde nümerik simülasyon sonuçlarının yeterli doğruluk derecesinde deneysel sonuçları tahmin ettiği belirtmişlerdir.

Sevkat ve ark. (2013) iki farklı tabakalandırma sırasıyla hibrit örgü S2 Cam-grafit/epoksi kompozit levhalar üretmişler ve dört farklı geometriye sahip vurucuların hibrit kompozitlerin darbe davranışına etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca LS-DYNA sonlu elemanlar paket programıyla nümerik simülasyonlarını gerçekleştirmişlerdir. GL/GR/GL tabakalandırma konfigürasyonunda alt ve üst kısma 9'ar tabaka cam kumaş (GL) ve orta kısımda 16 tabaka grafit kumaş (GR) olacak şekilde, GR/GL/GR konfigürasyonunda alt ve üst kısma 8'er tabaka grafit kumaş ve orta kısımda 16 tabaka cam kumaş olacak şekilde üretmişlerdir. Kompozit levhaların ve vurucunun sonlu elemanlarla modellenmesinde iki kumaş bir tabaka olacak şekilde kompozit tabakalar ve vurucu sekiz düğümlü katı eleman tipiyle oluşturulmuştur. Vurucu için MAT 20 rijit malzeme modeli ve kompozit tabakalar için ise Chang-Chang kompozit hasar modeli olarak isimlendirilen MAT 22 malzeme modeli kullanılmıştır. Tabakalar arası Contact_Automatic_Surface_To_Surface_Tiebreak temas modeli, vurucu ile kompozit arasında ise Eroding_Surface_To_Surface temas modeli tanımlanmıştır. Deneysel

sonuçlar GL/GR/GL konfigürasyonunun GR/GL/GR konfigürasyonuna göre daha fazla darbe direncine sahip olduğunu göstermiştir. Farklı geometrik şekillere sahip vurucular sayesinde vurucu ve kompozit arasındaki temas alanının kompozitin darbe cevabını etkilediğini, daha büyük yüzey alanına sahip vurucunun daha büyük başlangıç temas kuvveti ve maksimum kuvvet, hibrit tabaklar arasında daha büyük delaminasyon bölgeleri oluştuğunu ve daha kısa temas zaman aralığı sağladığını ifade etmişlerdir. Vurucunun numuneye çarpmasıyla birlikte dinamik kuvvet-zaman geçmişinin nümerik simülasyon ve deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında iyi bir eşleşme sağlandığı görülmüştür.

Maio ve ark. (2013) fiber takviyeli kompozitlerin düşük hızlı darbe sonrası oluşan tabakalar arası delaminasyonun şeklini ve oryantasyonunu LS-DYNA programıyla modellemeyi amaçlamışlardır. Kompozit tabakalara üç boyutlu malzeme modeli olan ve Sürekli ortam hasar mekaniğine (CDM) dayanan ilerlemeli hasar modeli olan MAT 162 numaralı malzeme modelini tanımlamışlardır. $[0_3/90_3/0_3/90_3/0_3]$ tabakalama dizilimine sahip kompozit levhada darbe testi sonrası tabakalar arası oluşan delaminasyonların yer fıstığına benzeyen deneysel ve simülasyon görüntüleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Nümerik simülasyon görüntülerinde MAT 162 malzeme modelinin delaminasyonun hem şekil hem de oryantasyonunu gerçeğe en yakın doğrulukta tahmin ettiği gözlenmiştir.

Chandekar ve ark. (2010) HVARTM metoduyla ürettikleri sepet örgü cam fiber/epoksi kompozitlerin 5.45 J ile 32.7 J arasında değişen altı farklı enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe davranışlarını incelemişler ve LS-DYNA ile kompozit levhaların darbe davranışlarını modelleyip deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Deneysel sonuçlarda artan darbe enerjisiyle birlikte maksimum yük taşıma kapasitelerinin arttığını tespit etmişlerdir. Darbe davranışının modellenmesinde kompozit levhaların üç boyutlu katı modelini oluşturup, iki farklı malzeme modeli elastik ortotropik malzeme modeli olan MAT 2 malzeme modelini ve Chang-Chang kompozit hasar modeli olarak isimlendirilen MAT 22 modelini kullanmışlardır. Darbe davranışında simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasında MAT 2 malzeme modelinin maksimum temas kuvvetini deneysel sonuçlardan uzaklaşarak daha yüksek tahminle elde ettiğini ve elastik davranışından dolayı darbeden sonra hiç enerji absorbe etmediğini, MAT 22 Malzeme modeli içinse deneysel sonuçlarla kıyaslandığında daha fazla enerji absorbe ettiğini ve maksimum temas kuvvetini deneysel sonuçlardan daha yüksek tahmin ettiğini kuvvet-zaman ve enerji-zaman grafiklerinden yorumlamışlardır. Bununla birlikte MAT 22 modelinin deneysel sonuçlarla daha iyi eşleştiğini gözlemlemişlerdir.

Fiber takviyeli epoksi kompozitlerde düşük hızlı darbe davranışının sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesinde yukarıda bahsedildiği gibi yapılan çalışmalara rastlanırken, nanofiber takviyeli kompozitlerin darbe davranışını modelleyen çok sınırlı sayıda çalışmaya rastlanılabilmektedir. Yademellat ve ark. (2018) cam fiber/epoksi kompozitlerde Nylon 6,6 nanofiber takviyesinin Mod I, Mod II kırılma tokluğuna ve 30 J enerji seviyesinde düşük hızlı darbe davranışına etkisini deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Nanofiber takviyeli numunelerde, referans numunelere göre Mode I ve Mode II kırılma tokluğunda sırasıyla %112 ve %25 artış tespit etmişlerdir. Düşük hızlı darbe testleri sonrası kompozit plakalarda delaminasyon sonucu oluşan hasar alanında referans numunelere göre nanofiber takviyeli numunelerde %34 azalma gözlemlemişlerdir. ABAQUS/Explicit sonlu elemanlar paket programıyla referans ve nanofiber takviyeli numunelerin darbe davranışını modellemişlerdir. Tabakalar arası nanofiberlerin modellenmesinde malzeme modeli olarak yapışkan bölge modeli (CZM) kullanılmıştır. Darbe sonrası numunelerde oluşan hasar alanının ölçülmesiyle deneysel sonuçlarla simülasyon sonuçları kıyaslandığında referans ve nanofiber takviyeli numunelerde fark sırasıyla %1 ve %6 çıkmıştır. Simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlara çok yakın elde edilmesi, darbe davranışının tahmin edilmesinde nümerik simülasyonların ne kadar etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir.

Saghafi ve ark. (2017) 12 tabakalı karbon/epoksi kompozitte Nylon 6.6 nanofiberlerin belirli ara tabakalara farklı istifleme konfigürasyonlarıyla yerleştirildiğinde 40.5 J enerji seviyesindeki düşük hızlı darbede tabakalar arası delaminasyona etkilerini sadece nümerik olarak incelemişlerdir. ABAQUS/Explicit sonlu elemanlar paket programı kullanarak tabakalar arasına yapışkan bölge modeli (CZM) tanımlamışlardır. CZM parametrelerini Mod I ve Mode II kırılma tokluğu testlerinin deneysel ve nümerik sonuçlarından belirledikten sonra darbe simülasyonları için kompozit modelleri oluşturmuşlardır. Kompozit modelin orta ara tabakası hariç olmak üzere bir modelde Nylon 6.6 nanofiber keçeler tüm ara tabakalara, diğer altı adet kompozit modelde ise 5 ara tabakaya yerleştirilecek şekilde orta tabakalar, üst tabakalar ve alt tabakalar olmak üzere kompozit modeller oluşturulmuştur. Nanofiber takviyesiz referans modelle kıyaslandığında tüm ara tabakalara Nylon 6.6 nanofiber keçeler yerleştirilen modelde delaminasyon alanı %60 azalarak en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Nanofiber keçelerin sadece 5 ara tabakaya yerleştirilerek %50 daha az nanofiber kullanımını amaçlayan konfigürasyonlarda ise en iyi sonuçlar orta bölgelerdeki ara

tabakalara yerleştirilen nanofiber keçelerle elde edilerek delaminasyon alanı %40 azalmıştır.

Bu çalışmada referans, saf PSF ve SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı hibrit nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerin 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyelerindeki düşük hızlı darbe davranışlarının kapsamlı olarak LS-DYNA sonlu elemanlar programıyla nümerik simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Nanofiber takviyeli kompozit levhaların farklı enerji seviyelerindeki darbe cevaplarının tahmin edilmesinde elde edilen sonlu elemanlar simülasyon sonuçları deneysel test sonuçlarıyla kuvvet-zaman, kuvvet-yer değiştirme ve enerji-zaman eğrileri üzerinde kıyaslanarak deneysel verilerle uyumluluklarıyla literatürdeki sınırlı sayıdaki çalışmalara katkı sağlayacaktır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Malzemeler

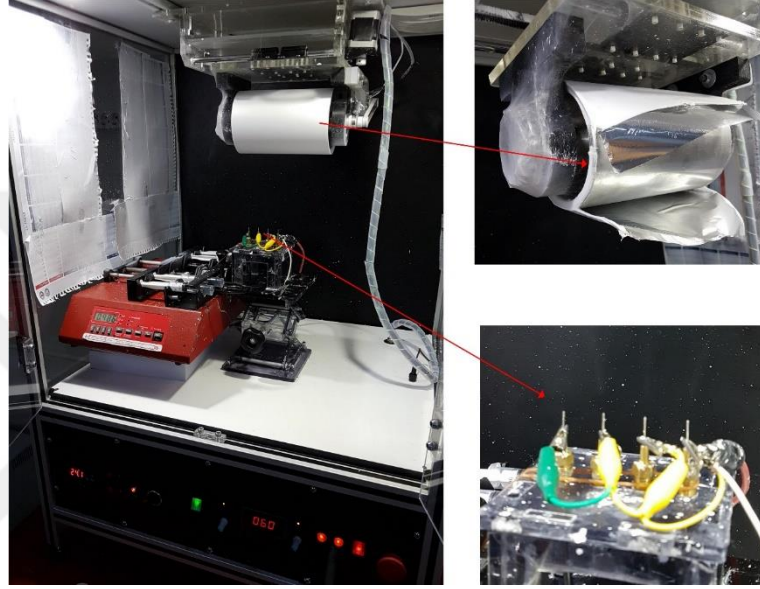
Granül formunda ve 35000 g/mol moleküler ağırlığa sahip Polisülfon (PSF) Sigma- Aldrich firmasından temin edilmiştir. Elektroegirme yöntemiyle PSF nanofiberlerin üretimi için hazırlanan solüsyonda PSF'nin çözücülerini olan Dimetilasetamid (DMAC) Merck firmasından ve Aseton (AC) ise Isolab firmasından temin edilmiştir. Katkılı PSF nanofiberlerin sentezinde ağırlıkça toplam %1 ve %2 oranlarında karışıma eklenen 50 – 70 nm boyutlarına sahip Silisyum Karbür (SiC) nanopartiküller ODTÜ Teknokent bünyesinde faaliyet gösteren Nanografi firmasından, Demir oksit (Fe_3O_4) nanopartiküller ise Selçuk Üniversitesi Fen Fakültesi Kimya Bölümü S.Ü. İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nden temin edilmiştir.

2/2 Twill örgü cam kumaşlar 390 g/m² birim alana düşen yoğunluğa sahip olup Hexcel firmasından temin edilmiştir. Laminasyon reçinesi olarak adlandırılan MGS-L160 epoksi reçine ve MGS- H160 sertleştirici Hexion firmasından temin edilmiştir. Vakum destekli el yatırma metoduyla ile kompozit levha üretimi için gerekli olan sarf malzemeler (Vakum torbası, sızdırmazlık bandı, infüzyon filesi, soyma kumaşı, vakum infüzyon ve spiral hortumları) Dost Kimya firmasından temin edilmiştir.

3.2. Elektroegirme Yöntemiyle Nanofiberlerin Üretimi

Polimerik nanofiber üretimi için elektroegirme sistemi birkaç ana parçadan oluşur. Bu parçalar yüksek voltaj sağlayan güç kaynağı, topraklanmış dönen bir toplayıcı tambur, dağıtıcı ünite (iğneler), solüsyon haznesi (şırıngalar) ve enjektör pompası olarak Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de gösterilmektedir. Elektroegirme yöntemiyle saf PSF, ağırlıkça %1 ve %2 SiC- Fe_3O_4 nanopartikül katkılı PSF nanofiber keçelerin üretimi için öncelikle polimer solüsyonları hazırlanır. Saf haldeki PSF solüsyonu için, ağırlıkça 9:1 oranındaki 57.6 g ağırlığında DMAC ve 6.4 g ağırlığında AC çözücülerini hazırlanan karışım içerisine granül haldeki 16 g ağırlığında ağırlıkça %20 PSF eklenerek elde edilmiştir. Solüsyon, manyetik karıştırıcıda 70 °C'de 5 saat boyunca karıştırılarak PSF'nin tam çözünmesi sağlanmıştır. Daha sonra solüsyon 10 ml'lik enjektörlere çekilerek elektroegirme cihazında enjektör pompasına yerleştirilmiştir (Şekil 3.2). Elektroegirme işlemi, pompadan sağlanan 1.5 ml/sa solüsyon akış hızında, güç kaynağından 26 kV

voltaj sağlanarak, iğne ile toplayıcı tambur arasındaki mesafe 13 cm olarak ayarlanıp gerçekleştirilmiştir. Üzerine alüminyum folyo sarılı yatay konumdaki 162 mm boyunda ve 100 mm çapındaki silindirik toplayıcı tamburun dönme hızı 600 dev/dk olarak ayarlanmıştır. Solüsyon 21 gauge numaralı ve 0.8 mm x 38 mm ebatlarında dört adet küt uçlu iğnelerden püskürtülmüştür. Şekil 3.1’de elektroegirme cihazında nanofiber üretimi ve sürekli akış neticesinde iğne ucundan ayrılan polimer solüsyonunun Taylor konisi oluşumları görülmektedir.

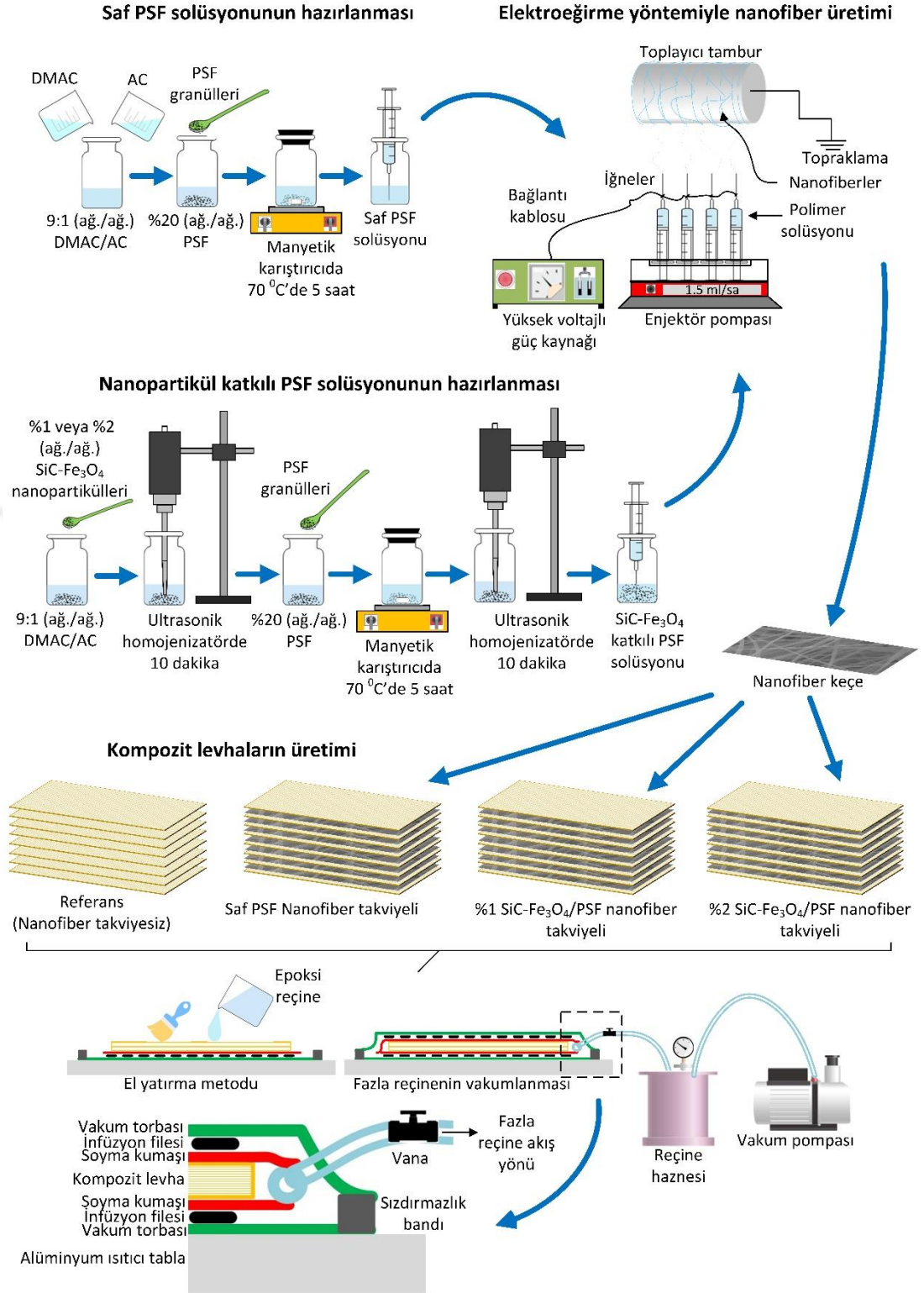


Şekil 3.1. Elektroegirme cihazında nanofiber üretimi

Nanopartikül katkılı PSF solüsyonlarını hazırlamak için, solüsyondaki ağırlıkça %20 PSF’nin ve ağırlıkça 9:1 oranındaki DMAC/AC çözücülerin oranı sabit tutulmuştur. PSF’nin ağırlıkça toplam %1 oranında SiC-Fe₃O₄ (%0.5 SiC- %0.5 Fe₃O₄) nanopartiküller ve PSF’nin ağırlıkça toplam %2 oranında SiC-Fe₃O₄ (%1 SiC- %1 Fe₃O₄) nanopartiküller, öncelikle DMAC/AC çözücülerini içerisine eklenerek her bir karışım 10 dk süresince ultrasonik homojenizatörde karıştırılmıştır. Sonrasında karışım içerisine ağırlıkça %20 PSF eklenip manyetik karıştırıcıya alınarak 70 °C’de 5 saat karıştırılmıştır. Devamında tekrar 10 dk ultrasonik homojenizatörde karıştırıldıktan sonra hazırlanan solüsyonlar elektroegirme işlemi için enjektörlere çekilmiştir (Şekil 3.2). Nanopartikül eklenmesiyle karışımın viskozitesinde kısmen artış gözlemlendiği için elektroegirme işleminde saf PSF nanofiber üretimindeki diğer işlem parametreleri sabit tutularak sadece uygulanan voltaj 32 kV’a yükseltilmiştir.

Her bir nanofiber keçe toplamda 2 ml’lik polimer solüsyonun toplayıcı tambur üzerine sarılı alüminyum folyo üzerine biriktirilmesiyle üretilmiştir (Şekil 3.1). Üretim sonrası ortalama 160 mm x 300 mm ölçülerine sahip nanofiber keçeler alüminyum folyodan ayrılarak yeterli kuruma sağlandıktan sonra hassas terazide tartılmıştır. Tartım işlemlerinden sonra her bir nanofiber keçenin ağırlığı toplam yüzey alanına bölünerek nanofiber keçelerin ortalama alansal yoğunluğu $10.5 \pm 1 \text{ g/m}^2$ olarak hesaplanmıştır.





Şekil 3.2. PSF solüsyonlarının hazırlanması, elektroeğirme yöntemiyle nanofiber üretimi ve vakum yardımıyla el yatırma metoduyla nanofiber takviyeli kompozit levha üretimine kadar gerçekleşen işlemlerin şematik gösterimleri

3.3. Referans ve Nanofiber Takviyeli Cam/Epoksi Kompozit Üretimi

Sekiz tabakalı referans (nanofiber takviyesiz) cam/epoksi, saf PSF, ağırlıkça %1 ve %2 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiber takviyeli dört farklı cam/epoksi kompozit levhaların vakum destekli el yatırma metoduyla üretimi Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Kompozit levhaların üretimi için öncelikle 0.3 mm nominal kalınlığa ve 390 g/m² alansal yoğunluğuna sahip 2/2 Twill örgü cam kumaşlar gerekli ölçülerde kesildi. Vakum naylonu, soyma kumaşı ve infüzyon fileler kompozit levhanın hem altına hem de üzerine yerleştirilecek şekilde ikişer adet ve cam elyaflardan daha büyük ebatlarda kesilerek hazırlandı. Üretici firmanın talimatları doğrultusunda ağırlıkça 4:1 oranında toplamda cam kumaş ağırlığının 1.5 katı kadar epoksi/sertleştirici karışımı hazırlandı. Karışım homojen bir şekilde karıştırıldı ve uygulama öncesi oluşan hava kabarcıklarının giderilmesi için 15 dk bekletildi. Kompozit levha üretimi için Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de gösterildiği gibi öncelikle alüminyum ısıtıcı tablanın üzerine sırasıyla vakum torbası, infüzyon filesi ve soyma kumaşı yerleştirildi. İlk olarak cam elyaf kumaşı yerleştirmeden önce soyma kumaşı yüzeyine epoksi reçine sürüldü. Devamında ilk cam elyaf kumaş tabakasının yerleştirilmesi sonrası kumaşın üst yüzeyine fırça yardımıyla epoksi reçine sürülerek cam kumaşın yüzeyinin tamamen epoksi reçine ile ıslatılması sağlandı. Şekil 3.3'de epoksi ile ıslatılmış cam kumaş yüzeyi üzerine soldan sağa doğru sırasıyla saf PSF, %1 ve %2 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiber keçeler yerleştirildi. Aynı şekilde fırça yardımıyla nanofiber keçelerin yüzeyleri epoksi reçine ile tamamen ıslatıldı. Nanofiber keçelerin üzerine ikinci cam kumaş tabakası yerleştirilerek ilk tabakadaki gibi aynı işlemler uygulandı. Her ara tabakaya nanofiber keçeler yerleştirilerek tüm tabakalara fırça yardımıyla el yatırma metoduyla reçine emdirilmesi gerçekleştirildi. Referans cam/epoksi kompozit levha üretimi için de yukarıdaki bahsedilen tüm işlemler her tabaka için gerçekleştirildi. Son olarak elyaf tabakaların üzerine soyma kumaşı, infüzyon filesi ve vakum torbasının diğer yarısı yerleştirildi. Vakum torbasının alt ve üst yüzeyleri arasına çift taraflı sızdırmazlık bandı yapıştırılarak tüm sistemin hava sızdırmazlığı sağlandı. Vakum torbası arasında kalan kompozit levha içerisindeki fazla reçine ve ortamda oluşan hava kabarcıkları vakum pompası vasıtasıyla 0.85 bar basınç altında 1.5 saat süresince vakumlanarak her bir kompozit levhanın üretimi tamamlandı.

Alüminyum ısıtıcı tablanın sıcaklık ve zaman kontrolü ayarlanarak 0.85 bar vakum atmosferi altında kompozit levhaların her biri 40 °C'de 6 saat ve 80 °C'de 8 saat

kürleme işlemine bırakıldı. Kürleme işlemi tamamlandıktan sonra soyma kumaşı, infüzyon filesi ve vakum naylonu kompozit levhaların yüzeylerinden soyularak çıkarıldı.



Şekil 3.3. Vakum destekli el yatırma metoduyla nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levha üretimi

3.4. Kompozit Levhalardan Test Numunelerinin Elde Edilmesi

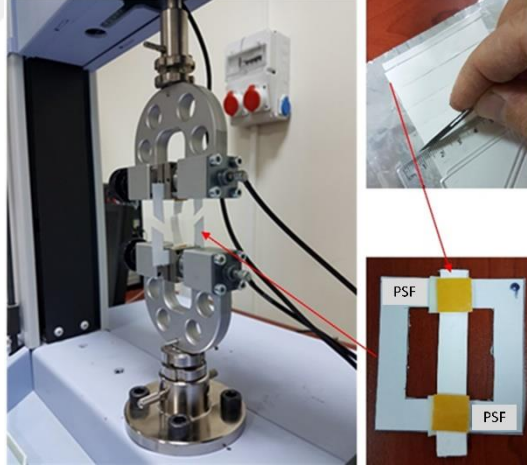
Üretilen referans, saf PSF, %1 SiC-Fe₃O₄/PSF ve %2 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozit levhaların nominal kalınlığı 2.5 ± 0.1 mm olarak ölçüldü. Ara tabakalara yerleştirilen nanofiber keçeler kompozit levhaların kalınlığında dikkate değer bir değişikliğe sebep olmamıştır. Kompozit levhaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve darbe davranışının incelenmesi için levhalar 300 mm/dk kesme hızında su jeti ile kesim yapılarak ilgili test standartlarına uygun ölçülerde test numuneleri elde edildi (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Saf cam/epoksi kompozit levha ve su jeti ile kesilmesi

3.5. Nanofiber Keçelerin Çekme Özelliklerinin Belirlenmesi

Saf PSF, ağırlıkça %1 ve %2 oranında SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı hibrit PSF nanofiber keçelerin çekme testleri Shimadzu AGS-X marka ve modele sahip 10 N- 10 kN kapasiteli masaüstü universal test cihazında gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5). Nanofiber keçelerin çekme yükü altındaki mukavemetleri oldukça küçük değerlere sahip olduğu için bu testlerde 10 N kapasiteli küçük yük hücresi kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Nanofiber keçelerden çekme numunelerinin hazırlanması ve çekme testi

Nanofiber keçelerin çekme testi koşulları, numune ebatları ve çekme testi hızı literatürdeki benzer çalışmalardan (Ayutsede ve ark., 2005; Vidotti ve ark., 2015; Lou ve ark., 2020) yararlanılarak belirlenmiştir. Nanofiber keçeler neşter kullanılarak 10 mm x 50 mm ebatlarında şeritler halinde kesilmiştir. Kesilen şeritler önceden kesilmiş kare kâğıt çerçeveler üzerine çift taraflı bant kullanılarak sabitlenmiştir (Şekil 3.5). Çekme çenelerine numuneleri bağlama esnasında nanofiber şeritlerin hasar görmesini

engellemek için kâğıt çerçeveler kullanılmıştır. Numuneler çekme çenelerine bağlandıktan sonra testi başlatmadan hemen önce kâğıt çerçeveler makasla kesilmiştir. Çift taraflı bantlar hem nanofiber keçelerin çeneler arasında zarar görmesini hem de çekme esnasında numunenin çekme çeneleri arasından kaymasını engellemiştir. Çekme testleri 12 mm/dk hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme testi sonunda çekme mukavemeti, σ_m ve elastisite modülü, E aşağıdaki eşitliklerden bulunur.

Çekme mukavemeti σ_m ,

$$\sigma_m = \frac{P_m}{A} \quad (3.1)$$

Eşitlikten bulunur. Burada P_m , maksimum kuvveti, A ise numunenin ilk kesit alanını ifade eder.

Elastisite modülü E, belirlenen elastik bölge aralığında iki farklı birim şekil değişimine karşılık gelen gerilmeler farkının, birim şekil değişimleri farkına bölünmesiyle bulunur.

$$E = \frac{\Delta\sigma_x}{\Delta\epsilon_x} \quad (3.2)$$

Eşitlikteki $\Delta\sigma_x$, iki farklı birim şekil değişimi değerine karşılık gelen gerilmeler farkı, $\Delta\epsilon_x$ birim şekil değiştirmeleri arasındaki farktır.

3.6. Kompozit Levhaların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerin Belirlenmesi

Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhaların çekme ve basma yükü altında mukavemetlerinin tespit edilmesi ve elastik sabitlerinin belirlenmesi için mekanik testler Shimadzu AGS-X marka ve modele sahip 100 kN kapasiteli universal test cihazında gerçekleştirilmiştir. Çekme yükü altında elastik sabitlerin belirlenmesinde aynı anda iki eksenli (uzama-daralma) ölçüm yapabilen ve numune üzerine yerleştirilebilen (clip-on) Epsilon 3560 ekstensometre kullanılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Universal çekme basma test cihazı ve clip-on ekstensometre

3.6.1. Çekme testi

Kompozit numuneler çekme özelliklerinin belirlenmesi için ASTM D3039-00 standardına göre 250 mm x 25 mm ölçülerinde kesilmiştir. Çekme testleri 2 mm/dk hızında gerçekleştirilmiştir. Çekme yönü ve numune boyu doğrultusu x-ekseni diğer ifadeyle alt indis 1 ve çekme yönüne dik veya enine doğrultusu y-ekseni diğer ifadeyle alt indis 2, çekme yönüne dik ve numune kalınlık doğrultusu z-ekseni ve alt indis 3 olarak ifade edilirse, numunelerin boyuna ve enine elastisite modülleri $E_1=E_2$, boyuna ve enine çekme mukavemetleri $X_T=Y_T$ eşit kabul edilmiştir. E_1 , X_T , Poisson oranları ν_{12} ve $\nu_{13}=\nu_{23}$ aşağıdaki eşitliklerden bulunur.

Çekme mukavemeti X_T ,

$$X_T = \frac{P_m}{A} \quad (3.3)$$

Eşitlikten bulunur. Burada P_m maksimum kuvveti, A ise numunenin ilk kesit alanını ifade eder.

ASTM D3039 standardına göre Elastisite modülü E_1 , elastik bölge aralığındaki (1000 $\mu\epsilon$ -3000 $\mu\epsilon$) iki farklı birim şekil değişimine karşılık gelen gerilmeler farkının, birim şekil değişimleri farkına bölünmesiyle bulunur.

$$E_1 = \frac{\Delta\sigma_x}{\Delta\epsilon_x} \quad (3.4)$$

Eşitlikteki $\Delta\sigma_x$, iki farklı birim şekil değişimi değerine karşılık gelen gerilmeler farkı, $\Delta\epsilon_x$ birim şekil değiştirmeleri arasındaki farktır.

Poisson oranları ν_{12} ve ν_{13} aşağıdaki eşitliklerden hesaplanır.

$$\nu_{12} = \frac{-\Delta\epsilon_y}{\Delta\epsilon_x} \quad (3.5)$$

$$\nu_{13} = \frac{-\Delta\epsilon_z}{\Delta\epsilon_x} \quad (3.6)$$

Çekme doğrultusunda elastik bölge aralığında enine birim şekil değişimleri farkının ($\Delta\epsilon_y$ veya $\Delta\epsilon_z$), çekme yönündeki birim şekil değiştirmeler farkına ($\Delta\epsilon_x$) oranının negatif işareti ile çarpımı Poisson oranını vermektedir.

3.6.2. Basma testi

Numunenin boyu ve eni doğrultusundaki basma mukavemetleri $X_C=Y_C$, ASTM D695-15 standardına göre tespit edilmiştir. Bu standarda göre numune ölçüleri 12.7 mm x 79.4 mm olacak şekilde kompozit levhalardan kesilmiştir. Test numuneleri Şekil 3.7’de gösterilen numune tutucuya yerleştirildikten sonra basma plakaları arasına gönye yardımıyla dik bir şekilde konumlandırılmıştır. Testler 1.3 mm/dk basma hızında ve numune tamamen hasar alıncaya kadar devam edilmiştir.

Basma mukavemeti X_C , aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$X_C = \frac{P_m}{A} \quad (3.7)$$

Burada P_m maksimum kuvveti, A ise numunenin ilk kesit alanını ifade eder.

3.6.3. Düzlem içi kayma mukavemeti ve kayma modülünün belirlenmesi

Kayma mukavemeti S_{12} ’nin belirlenmesi için ASTM D3518-01 standardına göre tabakalama $[\pm 45]_{2s}$ olacak şekilde yapılarak kompozit levha üretilip numuneler elde edildi. Numuneler ASTM D3039 standardındaki gibi 250 mm x 25 mm ölçülerinde kesildi. Çekme testleri 2 mm/dk ilerleme hızında gerçekleştirildi. Numunenin kopma anına kadar gerçekleştirilen test sonucunda cihazdan okunan maksimum kuvvetin numunenin ilk kesit alanına bölünmesiyle elde edilen gerilme değerinin yarısına bölümüyle düzlem içi kayma mukavemeti değeri elde edilmiştir.

$$S_{12} = \frac{P_m}{2A} \quad (3.8)$$

Kayma modülü G_{12} 'nin belirlenmesi için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$$G_{12} = \frac{\Delta\tau_{12}}{\Delta\gamma_{12}} \quad (3.9)$$

Eşitlikteki $\Delta\tau_{12}$, iki farklı kayma birim şekil değişimine karşılık gelen kayma gerilmelerinin farkını ifade ederken, $\Delta\gamma_{12}$ ise iki kayma birim şekil değişimi arasındaki farktır. $\gamma_{12} = \varepsilon_x - \varepsilon_y$ olarak ifade edilir. Burada ε_x boyuna birim şekil değişimi, ε_y enine birim şekil değişimini ifade eder ve $\varepsilon_y < 0$ 'dır.

Yukarıdaki kayma testiyle tespit edilemeyen kayma modülü G_{13} eşitlik 3.11'den hesaplanır. Ama öncelikle eşitlik 3.11'de kullanılmak üzere elastisite modülü E_3 , eşitlik 3.10 kullanılarak hesaplanır.

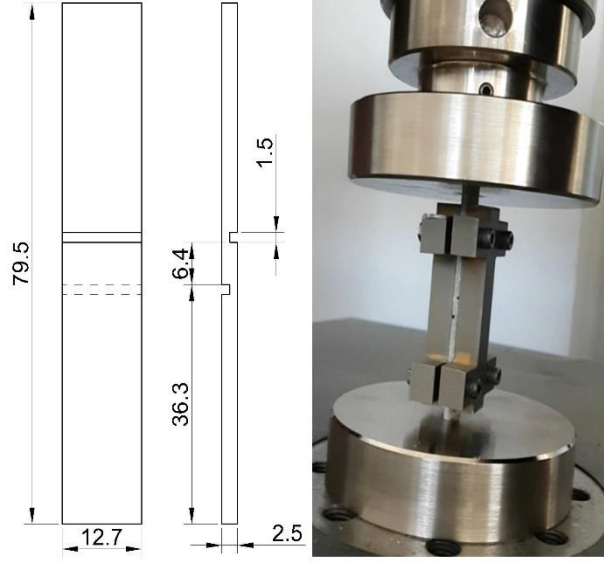
$$E_3 = \frac{E_{f,1}E_m}{E_mv_f + E_{f,1}(1 - v_f)} \quad (3.10)$$

$$G_{13} = G_{23} = \frac{E_3}{2(1 + \nu_{13})} \quad (3.11)$$

Bu eşitliklerde E_3 kalınlık doğrultusundaki elastisite modülü, $E_{f,1} = 72 \text{ GPa}$ enine doğrultudaki cam kumaş elastisite modülü ve $E_m = 3.2 \text{ GPa}$ epoksi elastisite modülüdür. ν_f , fiber hacim oranıdır.

3.6.4. Tabakalar arası kayma mukavemetinin belirlenmesi

ASTM D3846-02 standardına göre tabakalar arası kayma mukavemetinin belirlenmesinde numuneler 79.5 mm x 12.7 mm ölçülerinde kesildi. Ayrıca numunenin merkezinden eşit uzaklıkta birbirinden uzaklığı 6.4 mm olan, derinlikleri numune kalınlığının yarısı kadar, genişlikleri ise 1.05mm – 1.65 mm aralığında iki adet çentik kanalı açıldı (Şekil 3.7). Testler 1.3 mm/dk basma hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.7. ASTM D3846 standardına göre numune ölçüleri ve ASTM D695, ASTM D3846 standardına göre üretilmiş ve numune tutucuya yerleştirilmiş numuneye basma yükü uygulanması

Tabakalar arası kayma mukavemeti diğer adıyla kayma hasar gerilmesi SFLS, aşağıdaki eşitlikte ifade edildiği gibi çekme yükü altında maksimum kuvvetin çentik kanalları arasındaki alana bölünmesiyle hesaplanır.

$$SFLS = \frac{P_m}{wL} \quad (3.12)$$

Eşitlikteki P_m uygulanan maksimum kuvveti, w numunenin genişliğini, L iki çentik kanalı arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Von mises kriterine göre tabakalar arası normal hasar gerilmesi NFLS aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$NFLS = SFLS\sqrt{3} \quad (3.13)$$

3.6.5. Kompozit levhada cam fiber hacim oranı ve yoğunluğun belirlenmesi

ASTM D2584-02 standardına göre 25 mm x 25 mm ebatlarında kesilmiş numunelere $565 \pm 28^\circ\text{C}$ sıcaklıkta yakma işlemi gerçekleştirilmiştir. Hassas terazide yakma işlem öncesi ve yakma işlemi sonrası tartım yapılarak numunelerin ağırlık kayıpları hesaplanmıştır (Şekil 3.8). Yakma işlemi sonrası sadece cam fiberlerin kalması fiberlerin ağırlık oranının ve hacim oranının hesaplanmasına olanak sağlar.

Her bir kompozit levhanın fiber hacim oranı $(\vartheta_f)'$ nın belirlenmesi için aşağıdaki eşitlik kullanılır.

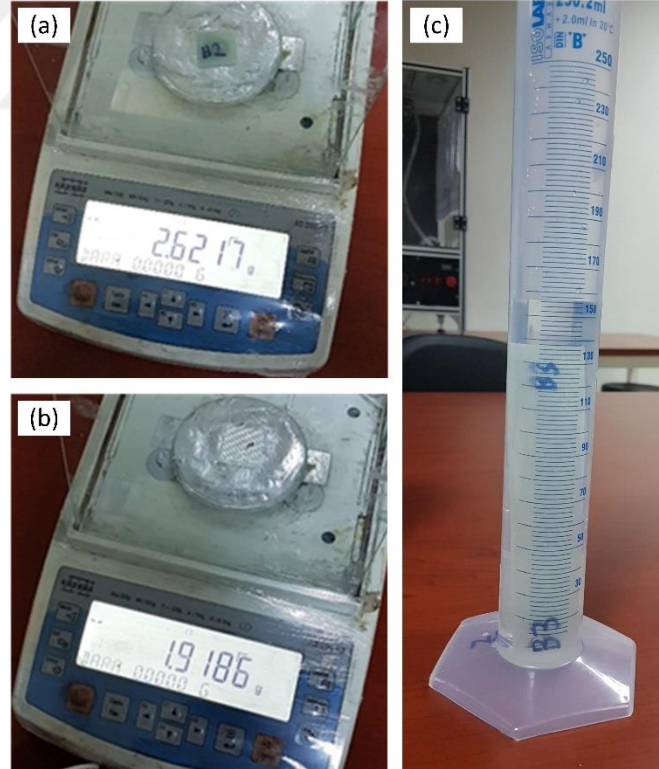
$$\vartheta_f = \frac{\frac{w_f}{\rho_f}}{\left(\frac{w_f}{\rho_f}\right) + \left(\frac{w_m}{\rho_m}\right)} \quad (3.14)$$

Eşitlikte w_f , fiber ağırlık oranını; ρ_f , fiber yoğunluğunu; w_m , matris ağırlık oranını; ρ_m , matris yoğunluğunu ifade etmektedir.

Fiber hacim oranı ϑ_f , belirlendikten sonra kompozit levhanın yoğunluğu ρ_c , aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir.

$$\rho_c = \rho_f w_f + \rho_m w_m \quad (3.15)$$

Ayrıca yoğunluğu hesaplamak için kompozit numunelerin her biri hassas terazide tartıldıktan sonra 2 ml hassasiyetli mezür içerisinde hacmi önceden bilinen suyun içerisine bırakılarak hacimleri ölçülmüştür (Şekil 3.8c). Her bir kompozit için ölçümler üçer defa tekrar edilerek hassas terazide ölçülen kütlelerinin, mezür ile ölçülen hacimlerine oranlarından gerçek yoğunlukları hesaplanarak ortalamaları alınmıştır. Kompozitlerin eşitlik 3.15'ten hesaplanan yoğunluklarıyla ve gerçek yoğunlukları arasında ciddi bir fark gözlenmemiştir.



Şekil 3.8. (a) Yakma testi öncesi ve (b) yakma testi sonrası numunelerin hassas terazide ağırlık ölçümleri, (c) 2 ml hassasiyetli mezür kullanarak kompozit numunelerin hacimlerinin ölçülmesi

3.7. Ağırlık Düşürmeli Darbe Testi

Kompozit levhaların ağırlık düşürmeli darbe testlerini gerçekleştirirken ASTM D7136 standardının diğer test şartları aynı kalmak koşuluyla sadece numune ebatları ile numune tutucu kalıp ve şekli farklı olarak üretilmiştir. 72 mm x 72 mm ebatlarına sahip kompozit numuneler, 50 mm dairesel açıklığa sahip iki rijit çelik plakadan oluşan kalıp arasına ankastre sabitlenmiştir. Şekil 3.9’da gösterilen ağırlık düşürmeli test cihazında 5.6 kg ağırlığa sahip vurucu kütle üzerinde montajlı bulunan 12 mm yarıçaplı yarı küresel uçlu çelik vurucu ile kompozit numune üzerine düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiştir. 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyelerinde uygulanan düşük hızlı darbe testleri en az üçer defa tekrarlanarak sonuçların birbiri ile uyumluluğu teyit edilmiştir. Her bir enerji seviyesi için vurucu kütle, potansiyel enerji eşitliğinden yararlanılarak 10 J için 0.182 m, 20 J için 0.364 m ve 30 J için 0.546 m yüksekliğe ayarlanmıştır. Vurucu ucun numuneye temas ettiği andan itibaren vurucuya bağlı bulunan kuvvet sensörü tarafından temas kuvveti verileri 25 kHz veri hızında analog sinyaller olarak algılanır. Temas kuvveti verileri önce şartlandırıcıya oradan veri toplayıcıda dijital hale çevrilerek anında bilgisayara gönderilir. Bilgisayarda kurulu bulunan LabVIEW yazılımı aracılığıyla bu sinyaller kuvvet-zaman grafiği olarak görsel hale getirilir ve her bir test için veriler kayıt altına alınır.



Şekil 3.9. Ağırlık düşürmeli darbe test cihazı

Her bir zaman adımındaki toplam anlık temas kuvvet değerleri kullanılarak Newton’un ikinci kanununa uygulandığında anlık ivme hesaplanır.

$$a(t) = F(t)/m \quad (3.16)$$

Eşitlikteki $a(t)$, t anındaki anlık ivmeyi; $F(t)$, t anındaki toplam temas kuvvetini; m vurucunun kütlesini ifade etmektedir.

Vurucu kütlenin belli bir yükseklikten dolayı sahip olduğu potansiyel enerji, vurucunun düşme esnasında numuneye ilk temas ettiği andaki hızdan kaynaklı kinetik enerjiye eşittir.

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.17)$$

Eşitlikteki m , vurucunun kütlesini; g , yer çekimi ivmesini; h , yüksekliği; v , vurucunun numuneye temas ettiği andaki hızını ifade etmektedir. Eşitlik yeniden düzenlenirse,

$$v = \sqrt{2gh} \quad (3.18)$$

Bu eşitlikten vurucunun numuneye temas ettiği andaki ilk hız bilindiği için aşağıdaki hareket denkleminde her bir zaman adımındaki vurucunun anlık hızı bulunur.

$$v(t) = v_i + \int_0^t a(t)dt \quad (3.19)$$

Eşitlikteki $v(t)$, t anındaki vurucunun anlık hızı; v_i , t_i anındaki vurucun anlık hızını ifade etmektedir.

Vurucunun numuneye temas ettiği andan itibaren her bir zaman adımındaki yer değiştirme değeri aşağıdaki eşitlikten bulunabilir. $\delta(t)$, t anındaki yer değiştirmedir.

$$\delta(t) = \int_0^t v(t)dt \quad (3.20)$$

Kuvvet – yer değiştirme grafiklerinde eğer grafik kapalı formda ise grafiğin kapalı alanı absorbe edilen enerjiyi (E_a) verir. E_a , absorbe edilen enerji aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir.

$$E_a = \int_0^{\delta_t} F(\delta)d\delta \quad (3.21)$$

Farklı enerji seviyelerinde gerçekleştirilen testlerde sadece cihazdan elde edilen kuvvet-zaman verileri kullanılarak yukarıdaki eşitliklerden hesaplanan anlık hız değerleriyle hız-zaman eğrileri, yer değiştirme değerleriyle kuvvet-yer değiştirme eğrileri, absorbe edilen enerji değerleriyle enerji-zaman eğrileri çizilmiştir.

3.8. Elektroeğrilmiş Nanofiberlerin ve Düşük Hızlı Darbe Sonrası Kompozit Levhaların Hasarlı Yüzeylerinin Görüntü Analizleri

Üretilen saf PSF nanofiberlerin ve SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiberlerin yüzey morfolojisi, şekil yapısı, çaplarının ölçümü ile SiC-Fe₃O₄ nanopartiküllerin nanofiber yapıları içerisindeki dağılımını incelemek için SEM ve TEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Nanofiberler 10 mm x 10 mm ebatlarında kesildikten sonra yüzeyleri altınla kaplanmış ve yüksek vakum ortamında Zeiss Evo LS10 marka ve modele sahip SEM cihazında görüntüleri alınmıştır. TEM analizlerinde yüksek geçirgenlik elde etmek için nanopartikül katkılı elektroeğrilmiş nanofiberler 20 – 30 saniye gibi çok kısa süre zaman aralığında dönen toplayıcı tambur üzerindeki alüminyum folyo üzerine biriktirilen numunelerden TEM görüntüleri alınmıştır.

Düşük hızlı darbe sonrası kompozit levhaların hasarlı yüzeylerinin görüntü analizleri için hasarlı kompozit numuneler tam ortalarından dekupaj testere ile kesilerek ikiye ayrılmıştır. Ortadan ikiye ayrılan kompozit numunelerin darbe yüzeyine dik kesitleri önce optik mikroskopta daha sonra SEM’de incelenmiştir. Eşit iki parçaya ayrılan numunelerin bir tarafının hasarlı bölgesi 10 mm x 20 mm ebatlarında tekrar kesilerek SEM analizi için uygun ölçülere getirilmiştir. Kompozit numunelerin hasarlı kesit yüzeyleri alkolle temizlenip yüzeyler üzerine ince bir tabaka altın kaplaması yapıldıktan sonra yüksek vakum altında Hitachi – SU 1510 marka ve modele sahip SEM cihazında görüntüleri alınmıştır.

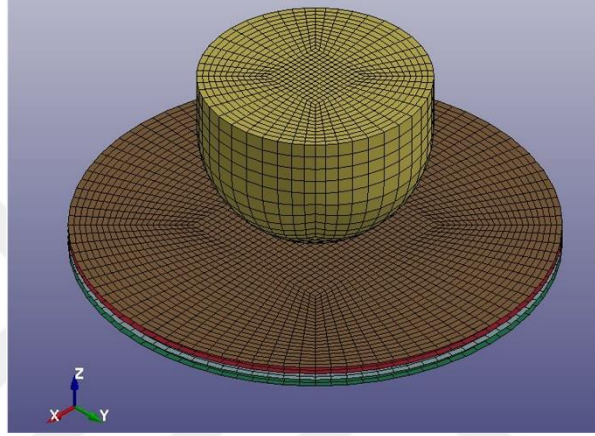
4. MODELLEME VE SİMÜLASYON

LS-DYNA düşük hızlı ve balistik darbe testleriyle yapıların dinamik cevabının analizi için kullanılan genel amaçlı sonlu elemanlar yazılımıdır. Açık zaman integrasyonu yöntemiyle dinamik problemin çözümüne ulaşılır. Uzaysal ayrıklaştırma için dört düğümlü tetrahedron (dört yüzlü) ve sekiz düğümlü katı eleman, üç ve dört düğümlü kabuk eleman, iki düğümlü kiriş eleman, sekiz düğümlü katı kabuk eleman, kafes eleman, membran eleman, ayrık eleman ve rijit kütleler kullanılır. LS-DYNA'da farklı malzemeler için iki yüz elliden fazla tanımlanmış malzeme modeli bulunmaktadır. Kompozit yapıların elastik ve elastik olmayan davranışlarının modellenmesinde ise 36 adet malzeme modeli yer almaktadır. LS-DYNA'da yer alan kompozit malzeme modellerinden literatürde en yaygın kullanılanlar MAT 22, MAT 54, MAT 55, MAT 58, MAT 59, MAT 161, MAT 162 olarak sıralanabilir.

4.1. Vurucu ve Kompozit Tabakaların Sonlu Elemanlar Modeli

Vurucu ve kompozit tabakaların sonlu elemanlar modelinin oluşturulması ve düşük hızlı darbe simülasyonlarının gerçekleştirilmesinde sonlu elemanlar analizi yazılım paketi LS-DYNA kullanılmıştır. Sekiz tabakalı olarak üretilmiş olan kompozit levhalar LS-DYNA'da her biri dört düğümlü kabuk elemanlardan oluşan ve tabakalama simetrisi dikkate alınarak dört ayrı tabaka ile modellenmiştir. Her kabuk tabakası içerisinde iki ayrı integrasyon noktası tanımlanmıştır. Böylelikle toplam tabaka sayısı gerçek kompozit levhadaki tabaka sayısına eşitlenmiştir. Her bir kabuk tabakanın kalınlığı 0.625 mm olarak oluşturularak dört ayrı kabuk tabakanın toplam kalınlığı gerçek kompozit levha kalınlığına eşit olacak şekilde 2.5 mm elde edilmiştir. Tabakalı kompozitlerde düşük hızlı darbenin modellenmesinde her bir tabaka ayrı olacak şekilde oluşturulup tabakalar arasına da delaminasyon için temas algoritması tanımlandığında kompozit levhanın simülasyon esnasında önemli derecede eğilme rijitliğini kaybetmesine ve gerçek sonuçlardan uzaklaşarak aşırı darbe hasarı almasına yol açabilmektedir. Heimbs ve ark. (2009) çalışmalarında tabakalı kompozitlerin düşük hızlı darbe testlerinin simülasyonunda birbirilerine delaminasyon modellemesi için temas algoritmasıyla bağlı ve kabuk elemanlardan oluşan ayrı tabakaların sayısı arttıkça absorbe edilen enerjiyi ve eğilme rijitliğini önemli ölçüde etkilediğini ifade etmişlerdir.

72mm x 72mm ebatlarındaki düşük hızlı darbe testi numuneleri test esnasında 50 mm dairesel açıklığa sahip iki çelik plaka arasına dört ayrı cıvata ile sıkıştırıldığı için kompozit levhaların sonlu elemanlar modeli 50 mm çapında silindir şekilli oluşturulmuştur. Bu yüzden kompozit levhanın her bir tabakası etrafındaki düğüm noktalarının tüm serbestlik dereceleri sınırlandırılmıştır. 24 mm çapa sahip yarı küresel uçlu vurucu kütle sadece z-ekseni üzerinde hareket eder ve dolayısıyla serbestlik derecesi tektir. X, y, ve z eksenleri etrafındaki dönmeleri ile x ve y eksenleri doğrultusundaki hareketleri sınırlandırılmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Vurucu ve kompozit tabakaların sonlu elemanlar modeli

Düşük hızlı darbe simülasyonlarının gerçek sonuçlarla uyumlu elde edilebilmesi için bir diğer parametre geometrik modelin yeterli sayıda elemana bölünerek ağ yapısının oluşturulmasıdır. Ağ yapısında bulunan her bir elemanın ebatları simülasyon sonuçlarını etkilemektedir. Darbe simülasyonlarında kompozit tabakalar tarafından absorbe edilen enerji, vurucunun oldukça lokalize darbe bölgesi nedeniyle tabakalardaki eleman boyutlarına göre değişir ve daha küçük eleman boyutları için simülasyon sonuçları gerçek değerlere yaklaşır. Doğru simülasyon sonuçları elde etmek için kompozit tabakaların yeterli büyüklükte elemanlardan oluşan ince bir ağ yapısı gerekir (Heimbs ve ark., 2009; Sy ve ark., 2019). Kaba ağ yapısından daha ince ağ yapısına doğru iyileştirmelerle bazı deneme yanılma simülasyonları yapıldıktan sonra, kabuk tabakaların en uygun eleman boyutları belirlenmiştir. Şekil 4.1’de gösterilen kompozit tabakalar, kare şekilli merkezde 0.75 mm kenar uzunluğuna sahip elemanlardan oluşurken darbe bölgesinden uzaklaştıkça kabuk tabakalarının çevresel kenarlarına doğru kademeli olarak 1.6 mm’ye kadar arttırılmıştır. Yarı küresel uçlu vurucu sekiz düğümden oluşan üç boyutlu katı elemanlarla modellenmiştir. Vurucunun başlangıç hızı için Initial_velocity_node başlangıç kartı

seçilmiş ve her enerji seviyesi için gerekli başlangıç hızı tanımlanmıştır. Vurucuyu oluşturan sonlu elemanlar üzerindeki her bir düğüm noktası tanımlanan hızda hareket etmektedir. Vurucu ile kompozit tabakalar arasında ceza temas (penalty contact) formasyonu ile Contact_Automatic_Surface_to_Surface temas algoritması (LS-DYNA, 2007) tanımlanmıştır.

4.2. Kompozit Malzemede Hasarın Modellenmesi

Kompozit malzemelerin hasar davranışlarının modellenmesinde hasar modları tabaka içi ve tabakalar arası olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Tabaka içi hasar modları fiber yönünde çekme ve basma hasarları ile matris yönünde çekme ve basma hasarlarıdır. Tabakalar arası hasarlar diğer ifadeyle delaminasyon bitişik tabakalar arasında oluşan hasar modudur.

4.2.1. Hasar başlangıcı

Sonlu elemanlar analizinde yükleme anında kompozit tabaka içerisinde her bir eleman için tanımlı hasar kriterleri şartları sağlandığında tabaka içi hasar başlangıcı meydana gelir. Hasar kriterleri, hasar başlangıcı anında gerilme ve şekil değiştirmenin durumunu temsil eden matematiksel eşitlerden oluşmaktadır. Hasar kriterleri hasar modlarından bağımsız ve hasar modlarına bağlı olarak iki ana gruba ayrılır. Maksimum gerilme ve gerinme, Tsai ve Wu (1971), Tsai-Hill (Tsai, 1965) ve Hoffman (1967) hasar modlarından bağımsız hasar kriterleri olarak örnek verilebilir. Bu hasar kriterlerinde hasar oluşumunun tahmin edilmesinde herhangi bir hasar modu tanımlanması yoktur. Hasar modlarına bağlı hasar tahmini elde edilen hasar kriterleri ise fiber yönünde çekme ve basma hasarı ile matris yönünde çekme ve basma hasarlarının ayrı ayrı tanımlandığı matematiksel eşitliklerle tanımlanır (Garnich ve Akula, 2009; Jiang ve ark., 2018). Kompozit malzemelerin darbe yükü altındaki dinamik cevaplarının sonlu elemanlar analizinde Chang ve Chang (1987), Hashin ve Rotem (1973), Hashin (1980), ve Puck (Puck ve Schürmann, 2002) literatürde yaygın olarak kullanılan hasar modlarına bağlı kompozit malzeme modelleridir.

Bu tez çalışmasında LS-DYNA’da kabuk eleman tipi için Chang ve Chang (1987) tarafından geliştirilen hasar kriterine dayalı MAT 54 lineer elastik kompozit malzeme modeli kullanılmıştır. Chang-Chang hasar kriterine göre aşağıdaki dört hasar koşulundan

herhangi bir tanesi sağlandığında kompozit malzemede hasar başlangıcı meydana gelmektedir (Hallquist, 2006).

Fiber yönündeki çekme hasarı (boyuna doğrultuda):

$$e_{f,t}^2 = \left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \beta \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{hasar} \\ < 0 & \text{elastik} \end{cases} \quad (4.1)$$

Hasar koşulu sağlandığında, $E_1 = E_2 = G_{12} = \nu_{12} = \nu_{21} = 0$ olur.

Fiber yönündeki basma hasarı:

$$e_{f,c}^2 = \left(\frac{\sigma_1}{X_C}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{hasar} \\ < 0 & \text{elastik} \end{cases} \quad (4.2)$$

Hasar koşulu sağlandığında, $E_1 = \nu_{12} = \nu_{21} = 0$ olur.

Matris yönündeki çekme hasarı (enine doğrultuda):

$$e_{m,t}^2 = \left(\frac{\sigma_2}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{hasar} \\ < 0 & \text{elastik} \end{cases} \quad (4.3)$$

Hasar koşulu sağlandığında, $E_2 = G_{12} = \nu_{21} = 0$ olur.

Matris yönündeki basma hasarı:

$$e_{m,c}^2 = \left(\frac{\sigma_2}{2S_{12}}\right)^2 + \frac{\sigma_2}{Y_C} \left(\frac{Y_C^2}{4S_{12}^2} - 1\right) + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 - 1 \begin{cases} \geq 0 & \text{hasar} \\ < 0 & \text{elastik} \end{cases} \quad (4.4)$$

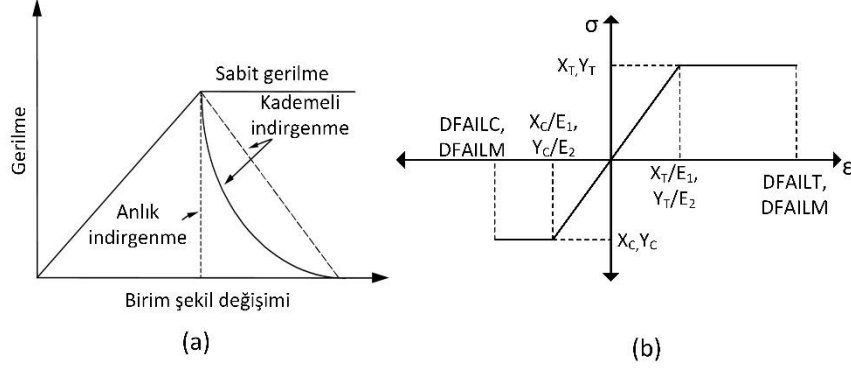
Hasar koşulu sağlandığında, $E_2 = G_{12} = \nu_{12} = \nu_{21} = 0$ olur.

Eşitliklerde yer alan σ_1 ve σ_2 sırasıyla fiber, matris yönlerinde etki eden gerilme bileşenleri, τ_{12} düzlem içi kayma gerilmesini, X_T ve X_C fiber yönündeki çekme ve basma mukavemetini, Y_T ve Y_C ise matris yönündeki çekme ve basma mukavemetini ifade etmektedir. S_{12} ise düzlem içi kayma mukavemetidir. β parametresi fiber yönündeki çekme hasarına kayma gerilmesi etkisinin orantısıdır. β parametresi 0 ile 1 arasında herhangi bir değer alınabilir. $\beta=1$ olduğunda fiber yönündeki çekme koşulunda (Hashin, 1980) hasar kriteri sağlanmış olur. $\beta=0$ olduğunda ise maksimum gerilme kriteri eşitliği edilir.

4.2.2. Hasar gelişimi

Hasar başlangıcının oluşumu için hasar kriterleri sağlandıktan sonra kompozit tabakaların daha fazla yüke maruz kalmasıyla birlikte malzeme özelliklerinin indirgenmesine neden olan hasar gelişimi gerçekleşir. Hasar gelişimi için indirgenme kurallarının hangisinin gerçekleşeceği tanımlanmalıdır. Bu indirgenme kuralları sabit gerilmeli hasar gelişimi, anlık indirgenmeli ve kademeli (doğrusal veya üstel)

indirgenmeli olarak üç ana kategoriye ayrılır (Sleight, 1999). Şekil 4.2a’da kompozit levhaların hasar başlangıcı sonrasında hasar gelişiminde tipik indirgenme davranışları gösterilmektedir.



Şekil 4.2. (a) Kompozit levhalarda hasar sonrası indirgenme davranışları (Sleight, 1999), (b) MAT 54 malzeme modelinin tipik birim şekil değişimine dayalı (anlık indirgenme) ve mukavemete dayalı (sabit gerilmeli) indirgenme davranışı

MAT 54 kompozit malzeme modeli kullanıcının seçimine göre hem birim şekil değişimine dayalı (anlık indirgenme) veya mukavemete dayalı (sabit gerilmeli) indirgenme davranışı sağlayabilmektedir (Şekil 4.2b). Tabaka içerisindeki bir elemenda eşitlik 4.1, eşitlik 4.2, eşitlik 4.3 veya eşitlik 4.4’teki hasar kriterlerinden herhangi bir tanesi sağlandığında, ilgili eşitliğin altında tanımlı elastik sabitler anında sıfıra düşürülür ve hasar tamamen gerçekleşmiş olur. Bu durumda birim şekil değişimine dayalı olan anlık indirgenme gerçekleşmiş olur. Şekil 4.2b’de kompozit tabakaların sonlu elemanlar modelinde boyuna ve enine doğrultulardaki çekme mukavemetleri (X_T ve Y_T) ile basma mukavemetleri (X_C ve Y_C) birbirilerine eşit kabul edildikleri için aynı gerilme – birim şekil değişimi grafiğinde sunulmuştur. Mukavemete dayalı (sabit gerilmeli) indirgenme davranışında ise kompozit tabaka içerisindeki herhangi bir elemanın üzerindeki gerilme değerleri çekme veya basma mukavemetlerinden herhangi bir tanesine ulaştıktan sonra daha fazla yüke maruz kalmasıyla birlikte sabit gerilme durumunda birim şekil değişimi artarak devam eder. Eğer birim şekil değişimi tanımlanan maksimum değeri aşarsa kompozit tabakada hasar gerçekleşmiş olur. Şekil 4.2b’de DFAILT ve DFAILC sırasıyla fiber yönünde tanımlanan maksimum çekme ve basma birim şekil değişimleridir. DFAILT pozitif değerde tanımlanırken, DFAILC negatif değerde tanımlanmalıdır. DFAILM matris yönünde tanımlanan maksimum çekme ve basma birim şekil değişimleridir. Eğer DFAILT, DFAILC, ve DFAILM için sıfırdan farklı olarak her biri için birim şekil değiştirme değerleri tanımlanırsa, Şekil 4.2b’de gösterildiği gibi kompozit

tabaka içerisindeki bir elemandaki birim şekil değişimi tanımlanan bu değerlerden herhangi birine ulaştığında mukavemete dayalı (sabit gerilmeli) indirgenme davranışıyla hasar gerçekleşir. Eğer DFAILT, DFAILC, ve DFAILM için herhangi bir birim şekil değişimi değeri tanımlanmazsa, Chang-Chang hasar kriterine göre ilk durumda bahsedilen birim şekil değişimine dayalı olan anlık indirgenme davranışıyla hasar gerçekleşir (Hallquist, 2006; Feraboli ve ark., 2011).

4.2.3. Delaminasyon

Düşük hızlı darbe sonrası tabakalar arası bölgede oluşan delaminasyon (tabaka ayrılması) hasarı ana problemlerden birisidir. Bu hasar mekanizması kompozit levhanın absorbe edeceği enerjiyi ve kompozit levhanın rijitliğini doğrudan etkilemektedir. Tabakalar arası hasarı modelleyebilmek için `contact_automatic_one_way_surface_to_surface_tiebreak` temas algoritması tanımlanmıştır. Aynı zamanda temas kartı içerisinde yer alan ceza temas (penalty contact) formülasyonu ile 8 numaralı hasar tercihi seçilmiştir (LS-DYNA, 2007). Delaminasyon başlangıcına karşılık gelen hasar kriteri sağlanıncaya kadar her iki tabaka arasında kalan ve başlangıçta temas halindeki düğümler (nodes) kayma hareketini engellemek için birbirine bağlanmıştır. Normal ve kayma bileşenlerine sahip düğümler arasındaki bağ kopması hasar kriteri:

$$\left(\frac{|\sigma_n|}{NFLS}\right)^2 + \left(\frac{|\sigma_s|}{SFLS}\right)^2 \geq 1 \quad (4.5)$$

Şeklinde tanımlanır. σ_n ve σ_s anlık normal ve kayma gerilmeleridir. NFLS ve SFLS tabakalar arası normal ve kayma hasar gerilmelerini ifade etmektedir. NFLS değeri Von mises kriterine göre $NFLS = SFLS\sqrt{3}$ olarak hesaplanmıştır (Cherniaev ve ark., 2020). Eşitlik 4.5'teki gerilme tabanlı hasar kriteri sağlandığında, tabakalar arasındaki temas gerilmesi başlangıçta birbiri ile temas halinde bulunan iki düğüm arasındaki mesafenin fonksiyonu olarak lineer olarak azalarak sıfıra düşer. İki düğüm arasındaki mesafe kritik açıklığa ulaştığında temas halindeki iki düğüm arasındaki temas bağı kopar ve kabuk elemanlı kompozit tabakalar arasındaki penetrasyonu engellemek için temas algoritması normal olarak `surface_to_surface_contact` temas algoritmasına dönüşür (Heimbs ve ark., 2009; Menna ve ark., 2011).

4.3. Malzeme modeli için gerekli malzeme özelliklerinin belirlenmesi

Serleştirilmiş çelikten yapılmış vurucunun kompozit tabakalara göre çok yüksek rijitliğe sahip olmasından dolayı şekil değiştirmedeği varsayımı yapılarak vurucu için MAT 20 rijit malzeme modeli kullanılmıştır. Bu malzeme için elastisite modülü (E) 200 GPa ve Poisson oranı (ν) 0.3 olarak alınmıştır. Vurucunun şeklinden hacmi bilindiği için yoğunluk değeri hesaplanarak MAT 20 malzeme kartına tanımlanmıştır ve vurucuya 5.6 kg'lık ağırlık kazandırılmıştır.

Kompozit tabakalar için bir önceki bölümde teorisine ayrıntılı yer verilen MAT 54 malzeme model kartında tanımlanması gerekli olan kompozit malzemelerin yoğunlukları, elastiklik modülleri, Poisson oranları, çekme ve basma mukavemetleri, düzlem içi kayma mukavemeti ve kayma modülü değerleri ile tabakalar arası tanımlanan temas algoritması kartında gerekli olan tabakalar arası normal ve kayma hasar gerilmeleri (NFLS, SFLS)'nin mekanik testleri ve nasıl elde edildikleri bölüm 3.6'da anlatılmıştır. Her bir kompozit levha için elde edilen malzeme özellikleri Çizelge 5.3'te verilmiştir.

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

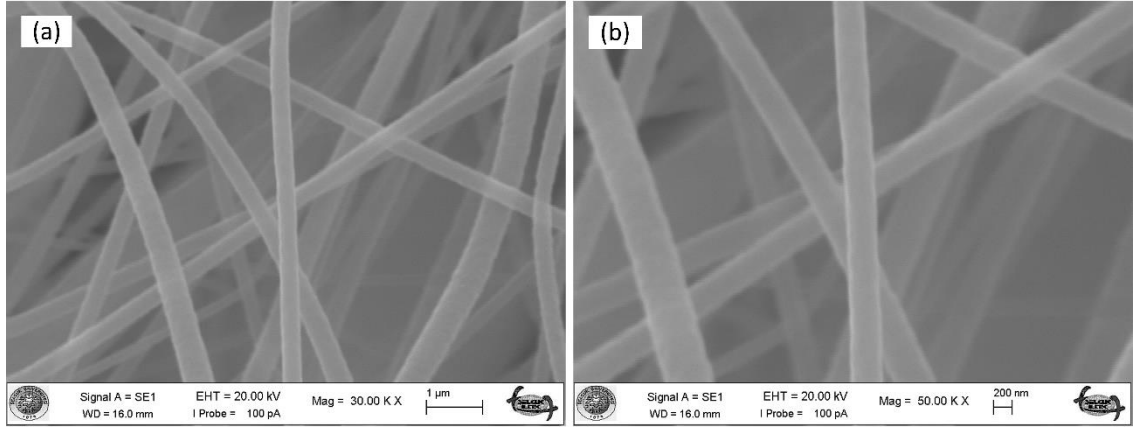
Bu bölümde öncelikle elektroğrılmış nanofiberlerin SEM ve TEM analiz sonuçlarına yer verilerek nanofiberlerin yüzey morfolojileri incelenmiştir. Nanofiber keçelerin çekme testi sonuçları ile nanopartikül katkısının etkisi gözlenmiştir. Şekil ve çizelgelerdeki kısaltmalarda Saf PSF, saf PSF nanofiberleri; %1 SiC-Fe₃O₄/PSF, ağırlıkça %1 oranında SiC-Fe₃O₄ (%0.5 SiC- %0.5 Fe₃O₄) nanopartikül katkısı içeren hibrit PSF nanofiberleri; %2 SiC-Fe₃O₄/PSF, ağırlıkça %2 oranında SiC-Fe₃O₄ (%1 SiC- %1 Fe₃O₄) nanopartikül katkısı içeren hibrit PSF nanofiberleri ifade etmektedir.

Daha sonra vakum destekli reçine transfer metoduyla üretilmiş nanofiber takviyesiz ve nanofiber takviyeli dört farklı cam/epoksi kompozit levhaların mekanik özellik testleri sonuçları ve düşük hızlı darbe testlerinin kuvvet – zaman, kuvvet – yer değiştirme ve enerji – zaman eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Düşük hızlı darbe testleri sonrası hasarlı numunelerin kırılma yüzeylerinden elde edilen optik mikroskop ve SEM görüntüleri ile kompozit levhaların hangi mekanizmalarla darbe direnci gösterdikleri karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır. Araştırma sonuçlarının son kısmında her bir kompozit levhanın farklı enerji seviyelerindeki düşük hızlı darbe cevaplarının LS-DYNA ile elde edilen sonlu elemanlar simülasyon sonuçları kuvvet – zaman, kuvvet – yer değiştirme ve enerji – zaman eğrilerinde deneysel verilerle karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Şekil ve çizelgelerde her bir kompozitin ismi kısaltmalarla belirtilmiştir. Şekil ve çizelgelerdeki Referans, nanofiber takviyesiz saf cam/epoksi kompoziti; Saf PSF, saf PSF nanofiber takviyeli cam/epoksi kompoziti; %1 SiC-Fe₃O₄/PSF, ağırlıkça %1 oranında SiC-Fe₃O₄ (%0.5 SiC- %0.5 Fe₃O₄) nanopartikül katkısı içeren hibrit PSF nanofiber takviyeli cam/epoksi kompoziti; %2 SiC-Fe₃O₄/PSF, ağırlıkça %2 oranında SiC-Fe₃O₄ (%1 SiC- %1 Fe₃O₄) nanopartikül katkısı içeren hibrit PSF nanofiber takviyeli cam/epoksi kompoziti ifade etmektedir.

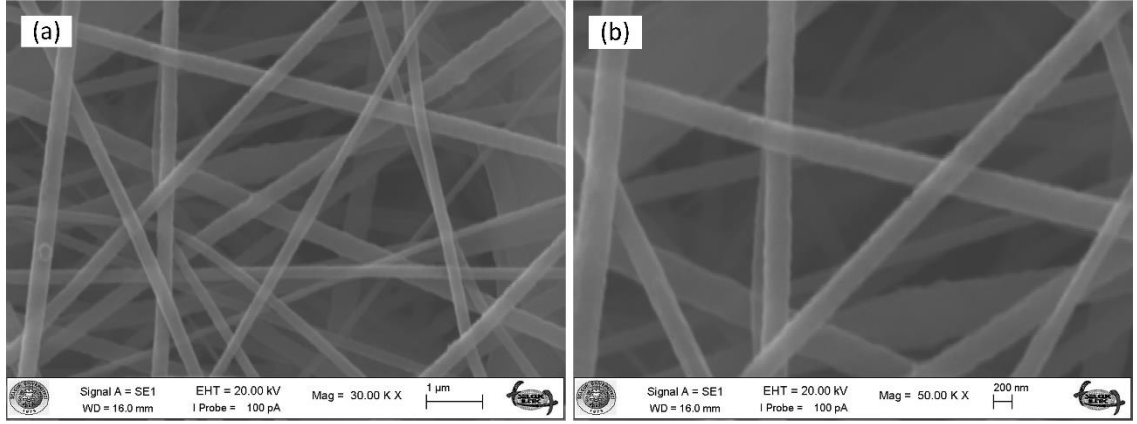
5.1. Elektroğrılmış Nanofiberlerin SEM ve TEM Analizleri

Şekil 5.1’de elektroğrılmış saf PSF nanofiberlerin, Şekil 5.2’de ise %2 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiberlerin SEM görüntüleri yer almaktadır. Sürekli ve homojen bir forma sahip nanofiber ağları elde edildiği görülmektedir. Nanofiberlerin çapları 250 – 300 nm arasında değişmektedir. Nanopartikül katkılı nanofiberlerin saf nanofiberlere göre daha pürüzlü yapıya sahip oldukları görülmektedir. Pürüzlü yapılarıyla

saf PSF nanofiberlere göre daha fazla yüzey alanına sahip olmaktadır. Nanopartikül katkısı nanofiberlerin çaplarında önemli bir değişikliğe neden olmamıştır.

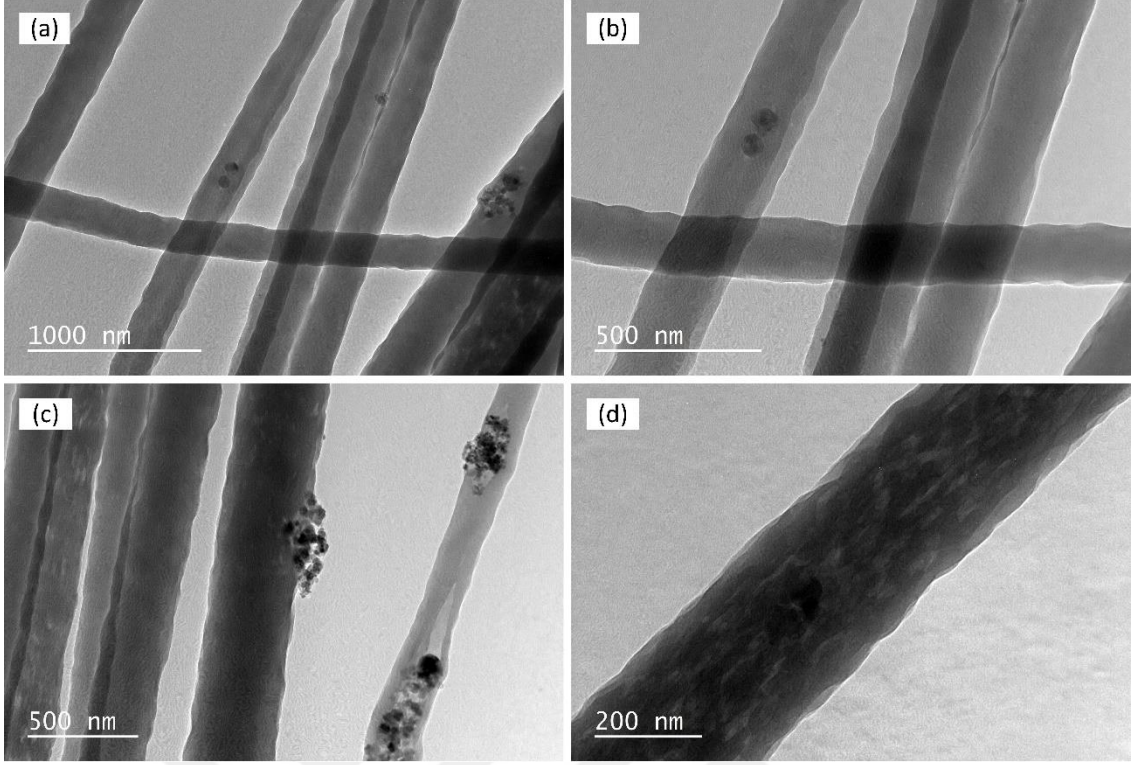


Şekil 5.1. Saf PSF nanofiberlerin SEM görüntüleri



Şekil 5.2. %2 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiberlerin SEM görüntüleri

Şekil 5.3'te ağırlıkça %2 SiC-Fe₃O₄ nanopartikülleri içeren hibrit PSF nanofiberlerin TEM görüntüleri yer almaktadır. Şekil 5.3a, b ve c'deki TEM görüntülerinde ilk göze çarpan durum Fe₃O₄ nanopartiküllerin yer yer topaklanmalar oluşturmaktadır. Açık gri renge sahip SiC nanopartiküller ise Şekil 5.3d'de tek bir nanofiber üzerinde incelendiğinde nanofiber içerisinde homojen bir şekilde dağılmıştır. Nanopartikül katkılı nanofiberlerin özellikle Fe₃O₄ nanopartiküllerin topaklanma etkisiyle daha pürüzlü bir yapıda oldukları anlaşılmaktadır. %2 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiberlerin Şekil 5.2'deki SEM fotoğraflarındaki çaplarıyla Şekil 5.3'teki TEM fotoğraflarındaki çaplarının birbirleriyle yakın büyüklüklerde olduğu görülmektedir.

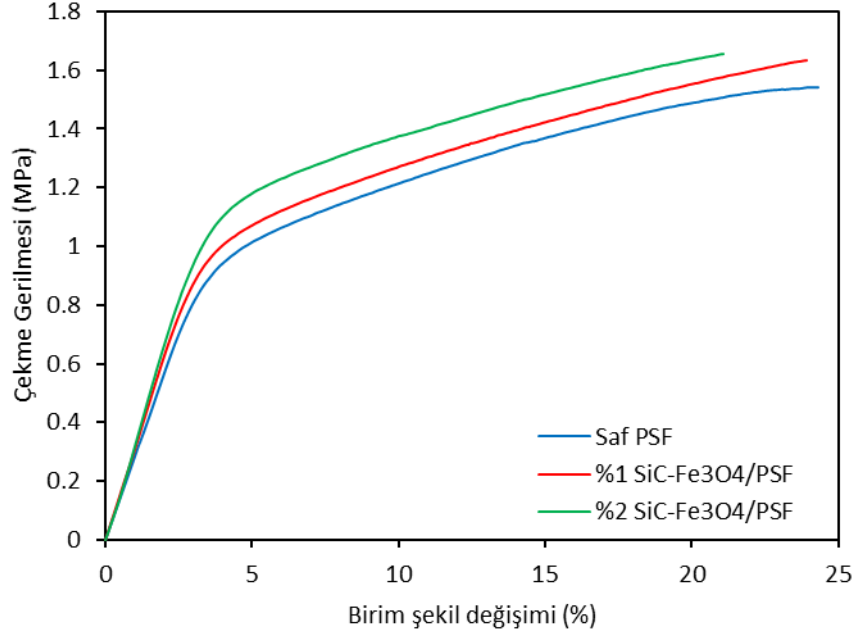


Şekil 5.3. %2 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiberlerin TEM görüntüleri

5.2. Nanofiber Keçelerin Çekme Testleri

Çekme testleri sonucunda saf PSF nanofiber ve nanopartikül katkılı hibrit nanofiber keçelerin Şekil 5.4’de gerilme – birim şekil değişimi eğrileri gösterilmektedir. Bu bölümde PSF nanofiberler içerisine belli oranda sert yapıdaki SiC ve Fe₃O₄ nanopartikülleri katılarak nanofiberlerin mukavemet ve rijitlik artışları amaçlanmıştır. Şekil 5.4’te gerilme-şekil değiştirme grafiğine bakıldığında nanopartikül katkılı hibrit nanofiberlerin kopma anına kadar saf PSF nanofiberlerden pozitif yönde ayrıştığı açıkça görülmektedir. Saf PSF nanofiber keçelere kıyasla, %1 SiC-Fe₃O₄/PSF hibrit nanofiber keçelerde süneklikte önemli bir düşüş gözlenmezken, %2 SiC-Fe₃O₄/PSF hibrit nanofiber keçelerde kopma uzaması %13 azalarak sünek deformasyon davranışında önemli bir kayıp meydana gelmiştir. Bu durum %2 SiC-Fe₃O₄/PSF hibrit nanofiberler için alınan TEM fotoğraflarında görülen Fe₃O₄ nanopartiküllerin topaklanma etkisinin nanofiberlerin çekme yükü altındaki şekil değiştirme davranışına yansıyan olumsuzlukları olarak açıklanabilir. Bununla birlikte, Çizelge 5.1’de sunulan çekme mukavemetleri ve elastisite modülü değerlerine bakıldığında, Saf PSF nanofiberlere ağırlıkça %1 ve %2 oranında SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkısıyla sırasıyla çekme

mukavemetlerinde %5 ve %7.8, elastisite modüllerinde sırasıyla %27 ve %28.7'lik bir artış meydana gelmiştir.



Şekil 5.4. Saf PSF, %1 ve %2 oranında SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkı PSF nanofiber keçelerin çekme testi gerilme – birim şekil değişimi eğrileri

Çekme yükü altında SiC-Fe₃O₄ nanopartiküllerin sünek yapıdaki PSF polimer zincirleriyle güçlü bir ara yüzey bağı kurarak nanofiberlerin şekil değiştirme direncini artırdığı, belli bir deformasyon sonrasında da nanofiber içerisindeki nanopartiküllerin ve özellikle de Fe₃O₄ nanopartiküllerin topaklanma oluşumlarının polimer zincirlerinin deformasyonuna engel teşkil eden kilitlenme mekanizmaları oluşturduğu düşünülmektedir. Bu deformasyon mekanizması da rijitlik ve mukavemet artışını beraberinde getirmiştir. Çekme testi sonuçları PSF nanofiberlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkısının önemli bir rol oynadığını göstermektedir.

Çizelge 5.1. Saf PSF, %1 ve %2 oranında SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkı hibrit PSF nanofiberlerin çekme testi sonuçları

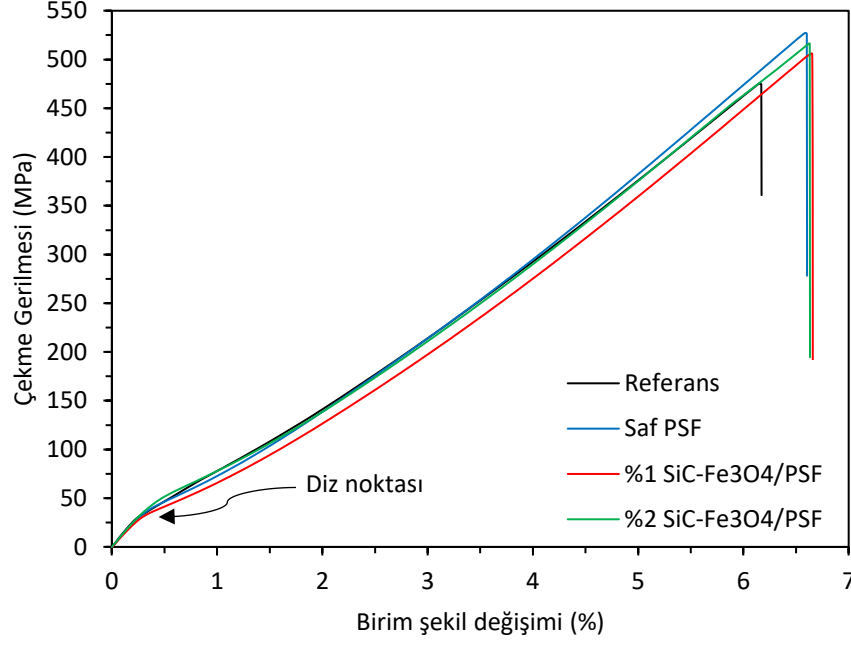
	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Elastisite Modülü (Mpa)
Saf PSF	1.54 ± 0.03	26.21 ± 0.26
%1 SiC-Fe ₃ O ₄ /PSF	1.62 ± 0.08	33.27 ± 1.89
%2 SiC-Fe ₃ O ₄ /PSF	1.66 ± 0.09	33.75 ± 2.32

5.3. Kompozit Levhaların Mekanik ve Fiziksel Özellik Testleri Sonuçları

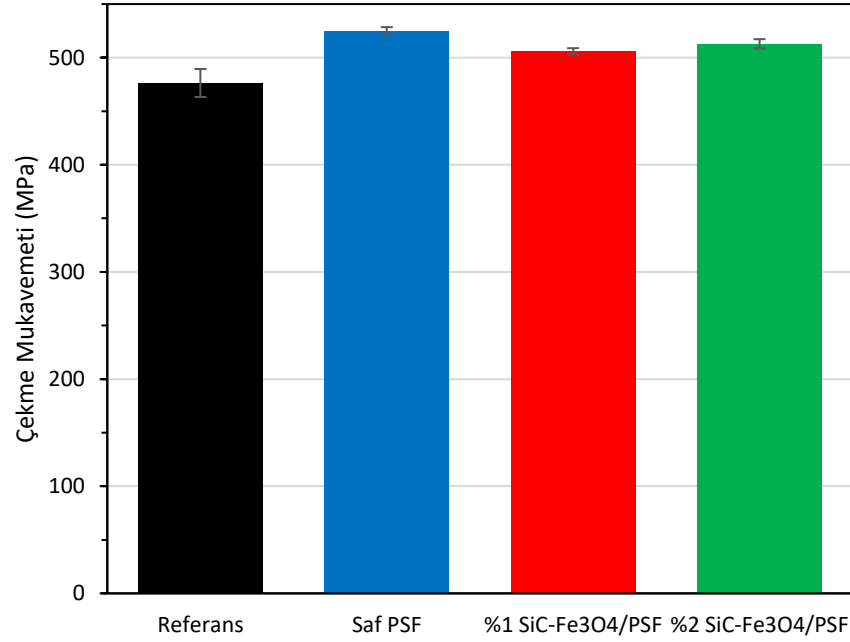
5.3.1. Çekme testi

Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlere ait çekme testi sonuçları Şekil 5.5'te gösterilmektedir. Gerilme-birim şekil değişimi eğrileri başlangıçta doğrusal- elastik bir eğime sahipken devamında diz noktası (knee point) adı verilen doğrusal olmayan bir geçiş bölgesi oluşturmuşlardır. Bu geçiş bölgesinin nedeni, çekme eğrilerinin başlangıçtaki doğrusal kısımdan sonra şekil değişiminin artmaya devam etmesiyle birlikte enine yönlenmiş cam fiberlerle epoksi matris arasındaki ara yüzey ayrılmalarının ve matris çatlaklarının oluşumu sonucu kompozit numunede ilk hasarların başlamasıdır. Bu deformasyon işleminin meydana gelmesi cam/epoksi kompozitlerin çekme gerilme-birim şekil değişimi eğrilerinde diz noktası adı verilen geçiş bölgesine sebep olmaktadır (Lisle ve ark., 2015; Zhu ve ark., 2016).

Şekil 5.5'te referans kompozitle kıyaslandığında, ara tabakalara hem saf PSF nanofiberin hem de nanopartikül katkılı hibrit PSF nanofiberlerin takviyelendirilmesiyle kompozitin çekme özelliklerini iyileştirdiği gerilme- birim şekil değiştirme eğrilerinden anlaşılmaktadır. Ara tabakalardaki saf ve hibrit nanofiber keçeler kompozit levhalara hem mukavemet atışı kazandırmış hem de tokluk kazandırarak daha fazla kopma uzaması elde edilmesini sağlamıştır. Şekil 5.6'da referans kompozitin çekme mukavemeti 475 MPa elde edilirken, referans kompozite kıyasla çekme mukavemeti saf PSF nanofiber takviyesiyle %10.5 artışla 525 MPa değerine ulaşarak en yüksek artış gözlenmiştir. %1 SiC-Fe₃O₄/PSF nanofiber takviyesiyle %6.5 artışla 506 MPa ve %2 SiC-Fe₃O₄/PSF nanofiber takviyesiyle de %8 artışla 513 MPa değerleri elde edilmiştir. Ayrıca nanofiber takviyeli kompozitler saf cam/epoksi kompozite göre daha tok davranış göstererek kopma anına kadar ortalama %7 oranında daha fazla birim şekil değiştirmişlerdir. Bununla birlikte saf PSF nanofiber takviyeli kompozitlerin çekme mukavemetine göre kıyaslandığında PSF nanofiberlere SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkısıyla %1 SiC-Fe₃O₄/PSF ve %2 SiC-Fe₃O₄/PSF nanofiber takviyeli kompozitlerin mukavemetleri sırasıyla %3.6 ve %2.3 oranında düşmüştür. Bu kısmi düşüşlerin gözlenmesi tabakalar arasında SiC-Fe₃O₄ nanopartiküllerin PSF nanofiberler ile epoksi matris arasındaki ara yüzey bağlarını kısmen zayıflatması ve bu durumunda Şekil 5.5'ten de görüleceği üzere malzemenin tokluğunda düşüşe neden olduğu ifade edilebilir.



Şekil 5.5. Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerin çekme testi gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

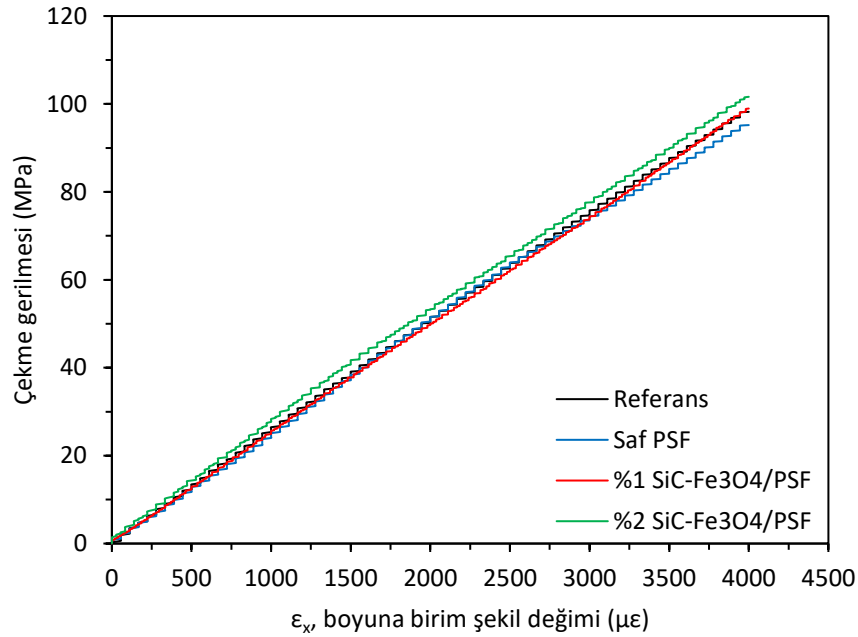


Şekil 5.6. Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerin çekme mukavemetlerinin sütun grafiklerle karşılaştırmalı gösterimi

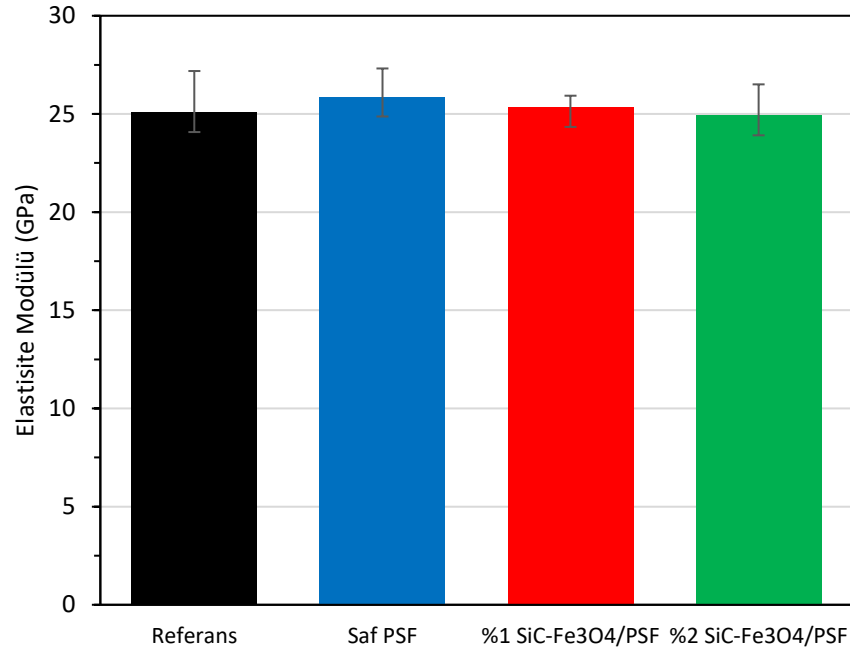
Çekme testleri esnasında kompozit numunelere bağlanan clip-on extensometre vasıtasıyla hassas ölçümlerle her bir kompozitin elastisite modülleri ve Poisson oranları belirlenmiştir. Şekil 5.7’de her bir kompozit için malzemenin orantı sınırının altındaki bölgede ekstensometreden okunan boyuna birim şekil değiştirmelere karşılık gelen

gerilme değerlerinin oluşturduğu eğrilerin $1000 \mu\epsilon - 3000 \mu\epsilon$ birim şekil değişim noktaları arasındaki eğimleri her bir kompozitin elastisite modüllerini vermektedir. Şekil 5.8’ de her bir kompozite ait elastisite modülleri sütun grafiklerle karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Nanofiber takviyesi referans kompozitin elastisite modülünde önemli bir değişikliğe neden olmamıştır. Referans kompozite göre elastisite modülünde, Saf PSF nanofiber takviyeli ve %1 SiC-Fe₃O₄/PSF nanofiber takviyeli kompozitlerde sırasıyla %3.2 ve %1 artış sağlanırken; %2 SiC/Fe₃O₄/PSF nanofiber takviyeli kompozitte %1’in de altında kısmi bir azalma meydana gelmiştir.

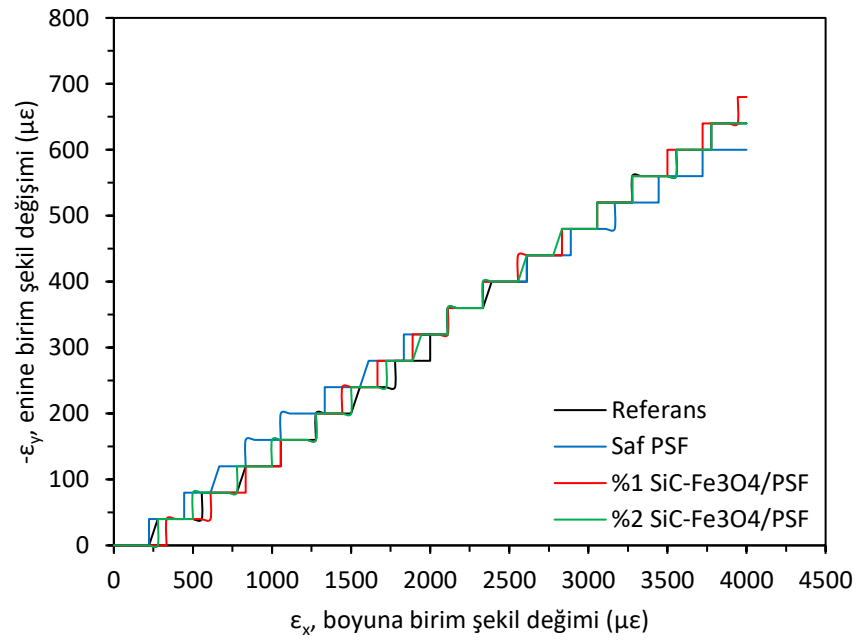
Şekil 5.9’da referans ve nanofiber takviyeli kompozitlerin Poisson oranları, ölçümleri gösterilmektedir. Şekil 5.10’da her bir kompozit için $1000 \mu\epsilon - 3000 \mu\epsilon$ boyuna birim şekil değişim noktaları arasında kalan eğrilerin eğiminden eksi yöndeki enine daralmanın boyuna uzamaya bölümüyle Poisson oranı, ν_{12} elde edilmiştir. Referans kompozit, %1 SiC-Fe₃O₄/PSF ve %2 SiC-Fe₃O₄/PSF hibrit nanofiber takviyeli kompozitlerde Poisson oranı 0.17, Saf PSF nanofiber takviyeli kompozit için Poisson oranı 0.16 hesaplanmıştır.



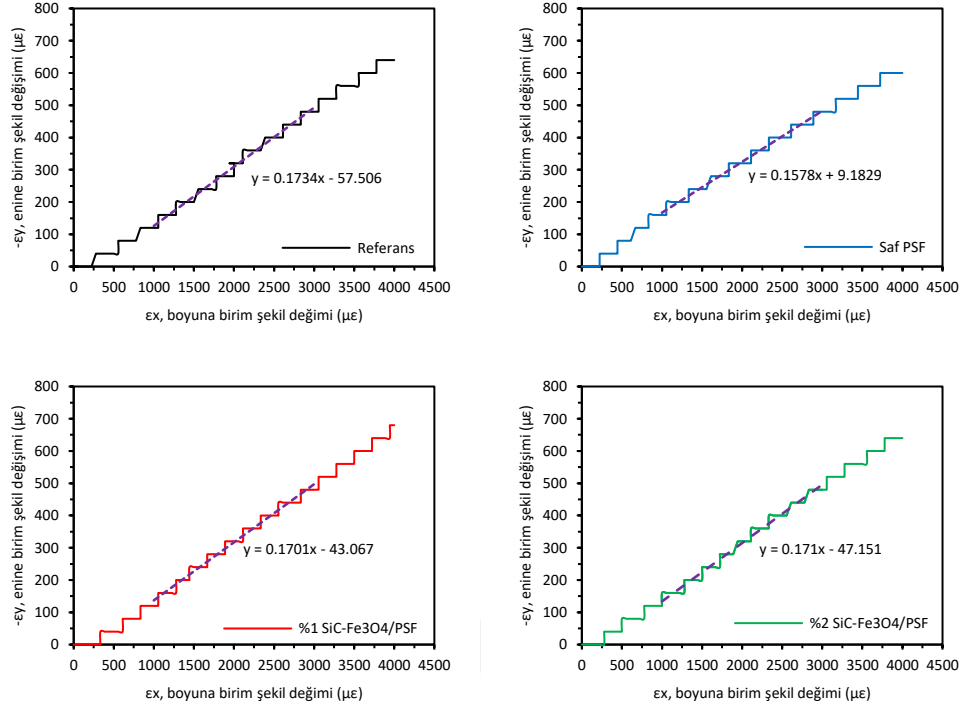
Şekil 5.7. Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerin elastisite modülü, E_1 ölçümleri



Şekil 5.8. Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerin elastisite modüllerinin sütun grafiklerle karşılaştırmalı gösterimi



Şekil 5.9. Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerin Poisson oranı, ν_{12} ölçümleri



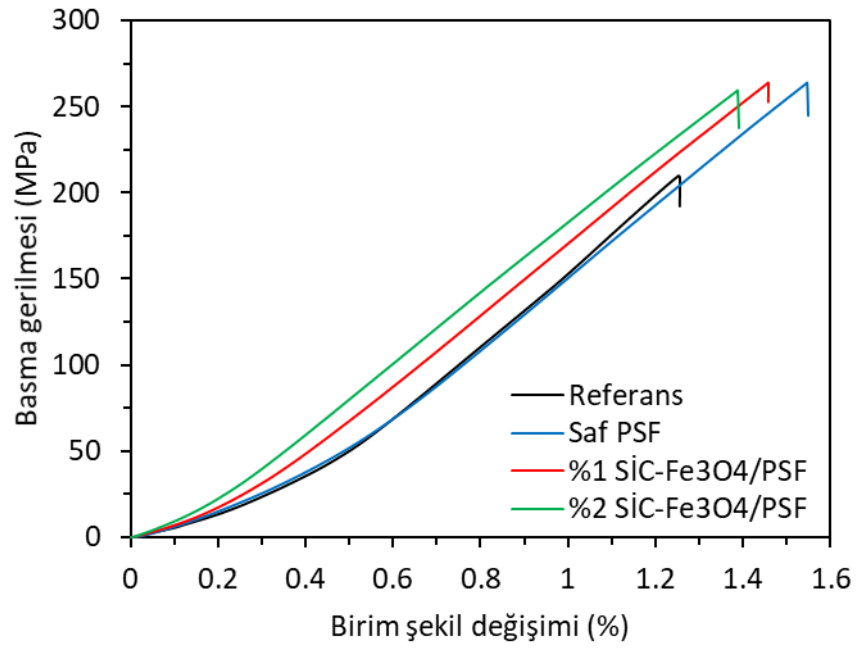
Şekil 5.10. Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerin Poisson oranı, ν_{12} ölçümlerinde 1000 $\mu\epsilon$ – 3000 $\mu\epsilon$ birim şekil değişim noktaları arasında eğimlerin belirlenmesi

5.3.2. Basma testi

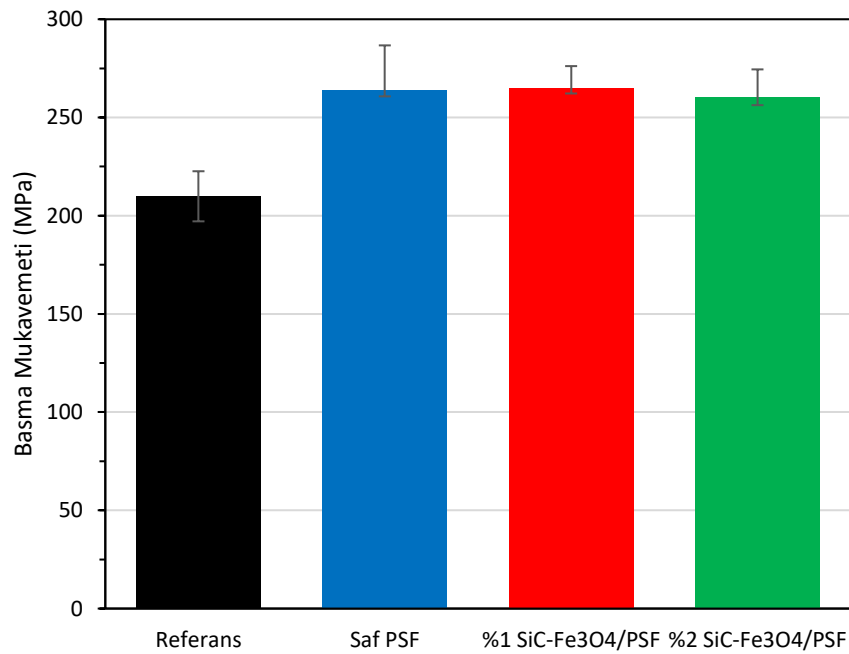
Şekil 5.11’de Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerin basma testi sonuçları gösterilmektedir. Kompozitlerin gerilme–birim şekil değiştirme eğrilerinde yükleme başlangıcında oluşan doğrusal olmayan bölgeler kompozit numunenin iki çelik plaka arasında sıkıştırılmaya başlamasıyla birlikte numunenin gevşemesi, hizalanması veya oturması gibi nedenlerle tam olarak konumlanana kadar oluşan bir bölgedir. Cam/epoksi kompozit levhaların tabakalar arasına nanofiber keçelerin yerleştirilmesinin basma mukavemetinde önemli artışlara neden olduğu görülmektedir.

Şekil 5.12’de kompozitlerin basma mukavemetleri sütun grafiklerle karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Referans kompozitin basma mukavemeti 210 MPa hesaplanmıştır. Saf PSF nanofiber ve %1 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiber takviyesiyle basma mukavemetleri sırasıyla 264 MPa ve 265 MPa değerlerine ulaşarak yaklaşık %26 oranında artış meydana gelmiştir. %2 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiber takviyesiyle de 260 MPa’lık basma mukavemetiyle %24 oranında artış gözlenmiştir. Nanofiberlere SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkısının saf PSF nanofiber

takviyeli kompozite göre basma mukavemetinde pozitif bir etkisi olmazken kompozitin tokluğunu azaltmıştır.



Şekil 5.11. Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerin basma testi gerilme-birim şekil değişimi eğrileri

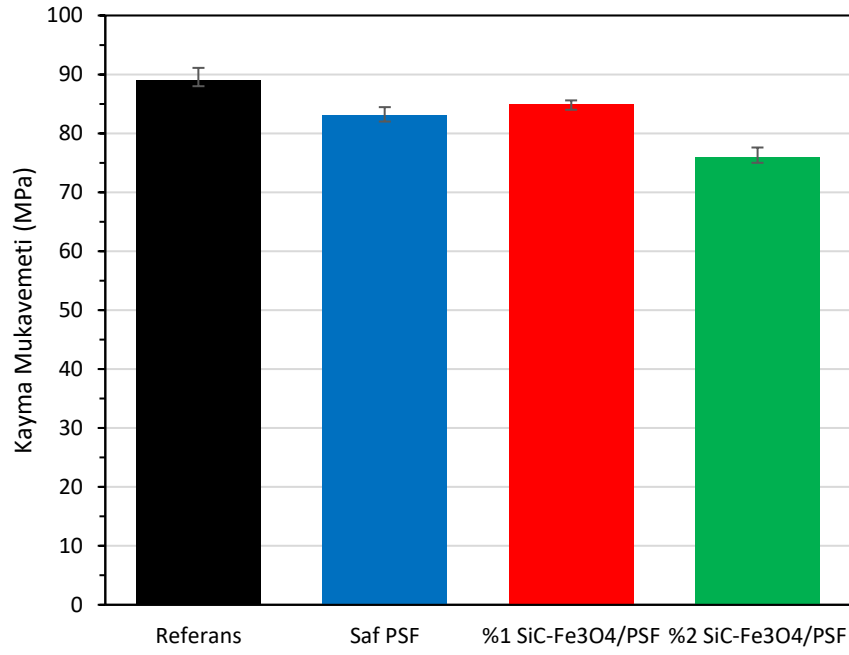


Şekil 5.12. Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerin basma mukavemetlerinin sütun grafiklerle karşılaştırmalı gösterimi

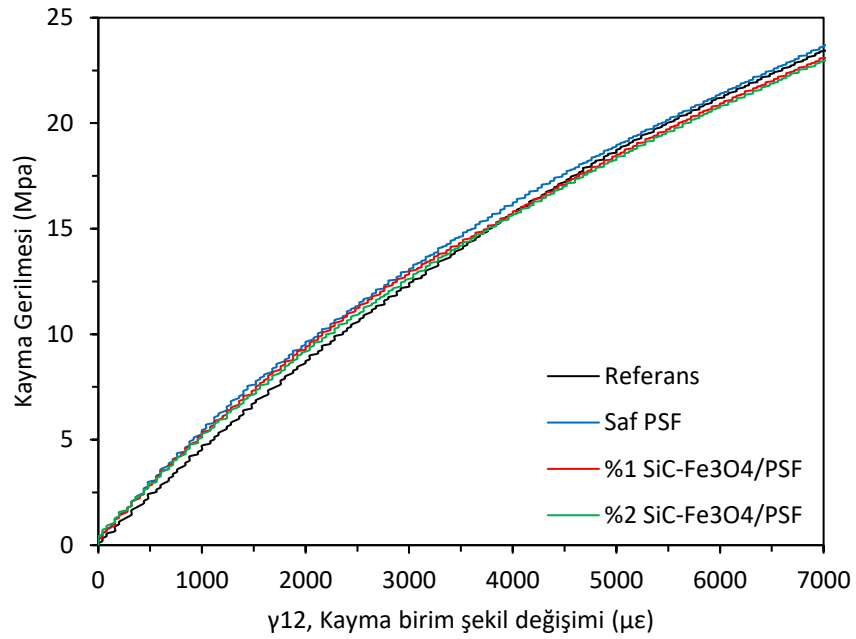
5.3.3. Düzlem içi kayma mukavemeti ve kayma modülü

Şekil 5.13’de referans ve nanofiber takviyeli kompozitlerin düzlem içi kayma mukavemet değerleri karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Referans kompozit için hesaplanan düzlem içi kayma mukavemet değeri 89 MPa’dır. Ara tabakalara PSF nanofiber keçelerin yerleştirilmesi olumsuz etkiyle referans kompozite göre kayma mukavemetinde düşüslere sebep olmuştur. Saf PSF ve %1 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozitin kayma mukavemeti değerleri sırasıyla 83 MPa ve 85 MPa’a düşerken, %2 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozitin kayma mukavemetinde ise %14.6 oranında en büyük düşüş gerçekleşerek 76 MPa olmuştur.

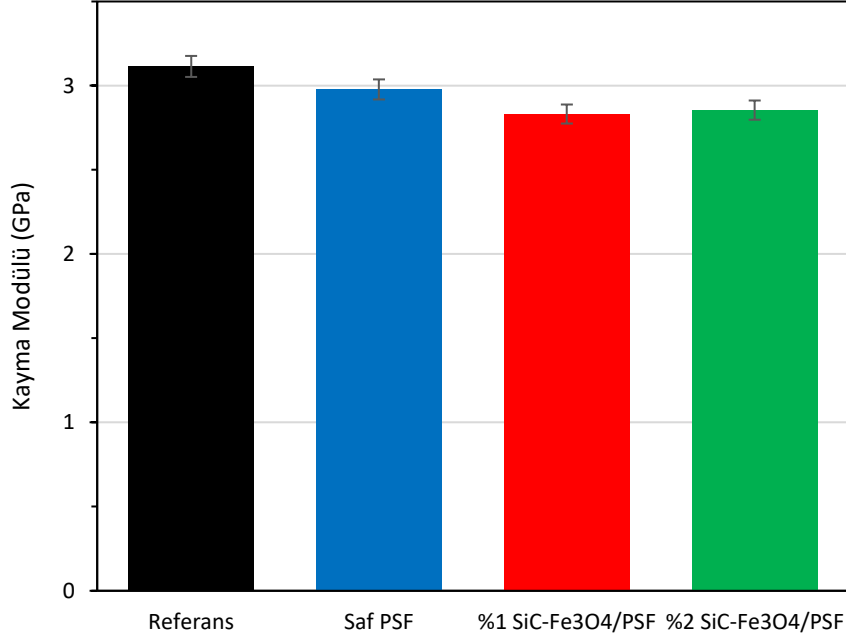
Şekil 5.14’te referans ve nanofiber takviyeli kompozitlerin düzlem içi kayma modülleri, G_{12} ’nin hesaplanması için ekstensometreden elde edilen kayma birim şekil değişimi ölçümlerine karşılık gerilme değerleri gösterilmektedir. 2000 $\mu\epsilon$ – 6000 $\mu\epsilon$ kayma birim şekil değişimi noktaları arasında kalan bölgede her bir kompozite ait gerilme – kayma birim şekil değişimi eğrisinin eğimi düzlem içi kayma modülünü vermektedir. Şekil 5.15’te referans ve nanofiber takviyeli kompozitlerin hesaplanan kayma modülü değerleri sunulmaktadır. Referans kompozit 3.11 GPa’lık kayma modülü değerine sahipken, referans kompozite kıyasla nanofiber takviyeli kompozitlerin kayma modüllerinde düşüşler meydana gelmiştir. Saf PSF, %1 SiC-Fe₃O₄/PSF ve %2 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozitlerin kayma modülleri sırasıyla 2.97 MPa, 2.83 MPa ve 2.85 MPa olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.13. Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerin düzlem içi kayma mukavemetlerinin sütun grafiklerle karşılaştırmalı gösterimi



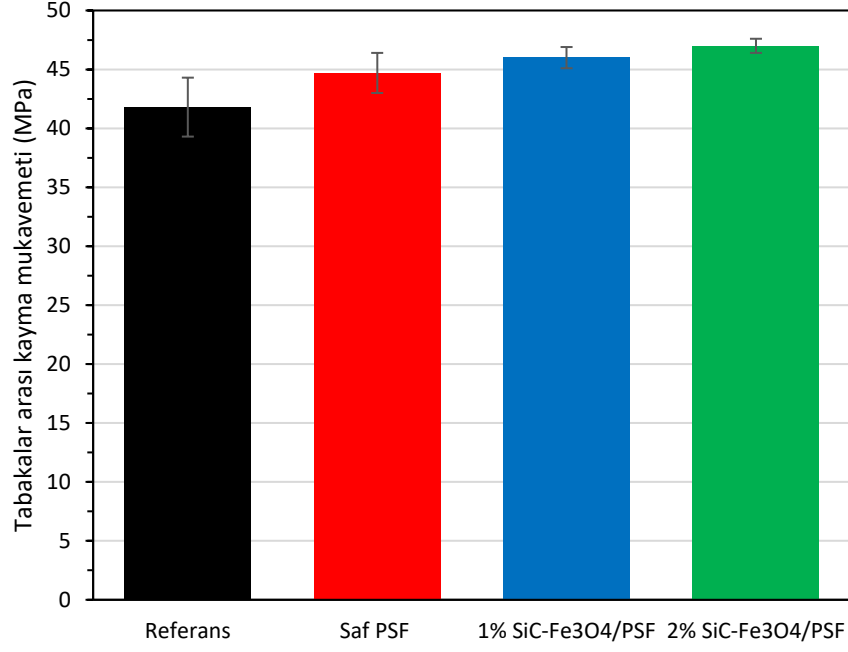
Şekil 5.14. Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerin düzlem içi kayma modülü, G_{12} ölçümleri



Şekil 5.15. Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerin düzlem içi kayma modüllerinin sütun grafiklerle karşılaştırmalı gösterimi

5.3.4. Tabakalar arası kayma mukavemeti

Saf PSF ve nanopartikül katkılı PSF nanofiber keçelerin cam/epoksi kompozitlerde tabakalar arası kayma mukavemetine etkisi Şekil 5.16'da gösterilmektedir. İki çelik plaka arasındaki numuneye uygulanan basma yükü sadece iki çentik kanalı arasında kalan tabakalar arası bölgedeki kayma alanı tarafından karşılandığından nanofiber keçelerin tabakalar arasında yük transferine doğrudan etkisi bu test sonucunda elde edilebilmektedir. Cam/epoksi kompozit levhalarda tabakalar arası kayma mukavemeti saf PSF nanofiber takviyesiyle 41.7 MPa'dan %6.9 artışla 44.7 MPa'a ulaşmıştır. Ağırlıkça %1 ve %2 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF hibrit nanofiber keçeler tabakalar arası kayma mukavemetinde referans kompozite göre saf PSF nanofiberlerden daha iyi iyileşme sağlayarak sırasıyla %10 artışla 46 MPa ve %12.4 artışla 47 MPa değerlerine ulaşmışlardır. Tabakalar arasındaki kayma gerilmelerinin yük transferinde epoksi içerisine gömülmüş saf PSF nanofiberlere göre nanofiber içerisine belli oranda SiC-Fe₃O₄ katkısının kayma direncini daha da artırarak mukavemet artışı sağladığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.16. Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerin tabakalar arası kayma mukavemetlerinin sütun grafiklerle karşılaştırmalı gösterimi

5.3.5. Kompozit levhalarda yoğunluk ve cam fiber hacim oranı

Cam/epoksi kompozitlerde tabakalar arasına saf ve nanopartikül katkılı PSF nanofiber takviyesinin yoğunluk ve cam fiber hacim oranına etkisi Çizelge 5.2’de gösterilmektedir. Saf ve hibrit PSF nanofiber takviyesiyle cam/epoksi kompozitin yoğunluğunda ortalama %1.5 artış gerçekleşmiştir. PSF nanofiberler aynı zamanda kompozitin cam fiber hacim oranını yaklaşık %3.5 arttırmıştır.

Çizelge 5.2. Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerin yoğunluk ve hacim oranları

Malzeme	Kompozit yoğunluk (kg/m ³)	Cam fiber hacim oranı (%)
Referans	1880	0.54
Saf PSF	1910	0.56
%1 SiC-Fe ₃ O ₄ /PSF	1906	0.555
%2 SiC-Fe ₃ O ₄ /PSF	1911	0.56

5.3.6. Sonlu elemanlar modeli için kompozit levhaların malzeme özellikleri

Her bir kompozit tabakaya tanımlanan MAT 54 malzeme modeli ve tabakalar arası temas algoritması için gerekli olan referans ve nanofiber takviyeli kompozit levhaların belirlenen malzeme özellikleri Çizelge 5.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 5.3. Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerin malzeme özellikleri

		Referans	Saf PSF	%1 SiC-Fe ₃ O ₄ /PSF	%2 SiC-Fe ₃ O ₄ /PSF
Yoğunluk (kg/m³)	ρ	1880	1910	1906	1911
Elastisite Modülü (GPa)	$E_1 = E_2$	25	25.9	25.3	24.9
	E_3	6.61	6.88	6.74	6.81
Poisson oranı	ν_{12}	0.17	0.16	0.17	0.17
	$\nu_{13}=\nu_{23}$	0.32	0.29	0.29	0.29
Kayma modülü (GPa)	G_{12}	3.11	2.97	2.83	2.85
	$G_{23}=G_{13}$	2.5	2.67	2.61	2.64
Çekme Mukavemeti (MPa)	$X_T=Y_T$	475	525	506	513
Basma Mukavemeti (MPa)	$X_C=Y_C$	210	264	265	260
Kayma Mukavemeti (MPa)	S_{12}	89	83	85	76
Tabakalar arası kayma hasar gerilmesi (MPa)	SFLS	41.8	44.7	46	47
Tabakalar arası normal hasar gerilmesi (MPa)	NFLS	72	77	80	81

5.4. Ağırlık Düşürmeli Darbe Testi

Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhaların 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyelerinde gerçekleştirilen düşük hızlı darbe testlerinde verdikleri darbe cevapları maksimum kuvvet, darbe hasarı eşik kuvveti, vurucu temas süresi, maksimum yer değiştirme, absorbe edilen enerji gibi darbe karakteristikleri cinsinden karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.4'te sunulmuştur. Ayrıca PSF nanofiber takviyesinin kompozit levhaların darbe cevabına etkisini her enerji seviyesinde daha ayrıntılı görebilmek için çizilen kuvvet-zaman, kuvvet-yer değiştirme ve enerji-zaman eğrileri alt başlıklarla sunulmuş ve Çizelge 5.4 ile birlikte yorumlanmıştır.

Çizelge 5.4. Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerin 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyelerindeki düşük hızlı darbe testi sonuçları

Darbe enerjisi	Malzeme	Maksimum kuvvet (N)	Darbe hasarı eşik kuvveti (N)	Temas süresi (ms)	Maksimum yer değiştirme (mm)	Absorbe edilen enerji (J)
10 J	Referans	4786	4482	7.04	4.3	4.64
	Saf PSF	4787	4697	7.16	4.46	4.65
	%1 SiC-Fe ₃ O ₄ /PSF	4883	-	7.36	4.57	4.04
	%2 SiC-Fe ₃ O ₄ /PSF	4780	4780	7.4	4.52	4.46
20 J	Referans	6615	5386	7.08	5.93	12.67
	Saf PSF	6895	6205	7.04	6.06	12.39
	%1 SiC-Fe ₃ O ₄ /PSF	6803	5514	7.16	6.22	12.15
	%2 SiC-Fe ₃ O ₄ /PSF	6737	5638	7.16	6.12	11.98
30 J	Referans	7320	5677	7.28	7.21	22.35
	Saf PSF	7691	6983	7.12	7.28	21.96
	%1 SiC-Fe ₃ O ₄ /PSF	8020	5997	7.24	7.58	21.02
	%2 SiC-Fe ₃ O ₄ /PSF	7926	5397	7.24	7.34	21.07

5.4.1. Kuvvet-zaman eğrileri

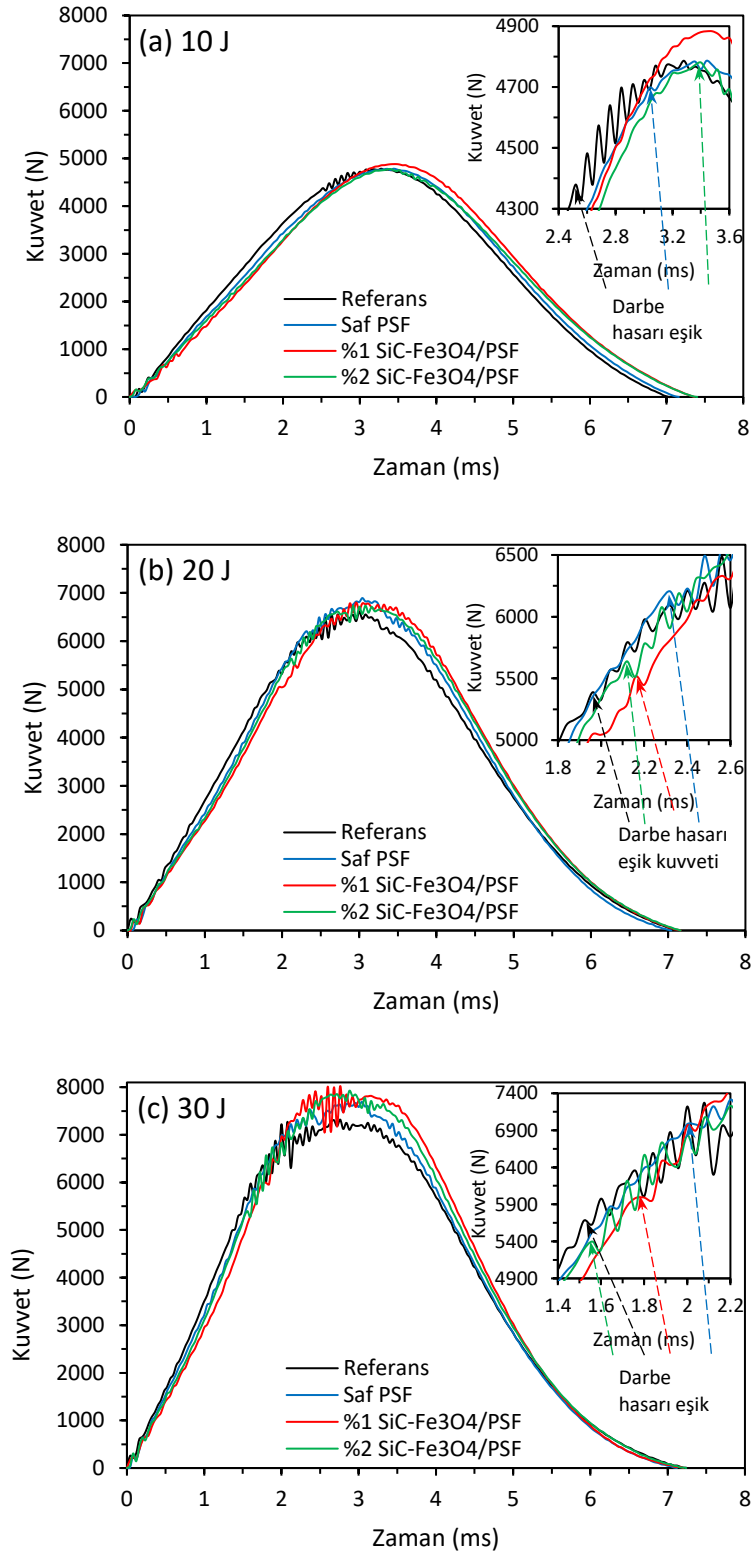
Şekil 5.17’de kompozit levhaların her bir enerji seviyesindeki düşük hızlı darbe sonrası elde edilen kuvvet-zaman eğrileri gösterilmektedir. Her bir kompozit için maksimum temas kuvveti ve temas rijitliğinin artan darbe enerjisiyle birlikte arttığı görülmektedir. Temas rijitliği vurucun kompozit numuneye temas ettiği andan itibaren yükleme fazındaki kuvvet-zaman grafiğinin başlangıç eğimi temas rijitliğini tanımlamaktadır. Referans cam/epoksi kompozitin nanofiber takviyeli kompozitlere göre tüm darbe enerji seviyelerinde kuvvet-zaman eğrilerinin yükleme fazında daha yüksek temas rijitliğine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum ara tabakalardaki sünek yapıli PSF nanofiber takviyeli kompozitlere göre referans kompozitte saf epoksi reçinenin doğasında olan gevrek yapısından kaynaklanmaktadır. Çizelge 5.4’te artan darbe

enerjisiyle birlikte vurucu temas süresinde ise referans kompozitte kısmi bir artış gözlenirken, PSF nanofiber takviyeli kompozitlerde en uzun temas süresi 10 J enerji seviyesinde ölçülmüştür. PSF nanofiberler kompozit levhaların ara tabakalarına sünek davranış kazandırdığı için darbe hasarının matris hasar boyutunu geçmediği 10 J'lük düşük enerji seviyelerinde maksimum yer değiştirmeyi artırarak daha uzun temas süresine sebep olmuştur. Saf PSF nanofiber takviyeli kompozitlere kıyasla tüm enerji seviyelerinde hibrit PSF nanofiber takviyeli kompozitlerin tüm enerji seviyelerinde daha uzun temas sürelerine sahip olduğu gözlenmiştir.

Şekil 5.17'deki kuvvet-zaman eğrilerinde salınımların olduğu bölgeler numunede hasarın meydana geldiği anlamını taşımaktadır. Küçük şiddetli salınımların matris kırılmalarını ifade ederken, artan darbe enerjisi salınımların şiddetini arttırmakla birlikte temas kuvvetindeki ani düşüşlerin olması fiber kırılmalarının da meydana geldiğini göstermektedir. Özellikle Şekil 5.17c'de 30 J enerji seviyesindeki kuvvet-zaman eğrilerine bakıldığında salınımların oldukça fazlaştığı ve şiddetlerinin arttığı açıkça görülmektedir. Şekil 5.17a, b ve c'de eğrilerdeki salınımların başladığı bölgeler grafiklerin sağ üst köşesinde büyütülerek verilmiştir. Büyütülmüş şekillerde her bir kompozite ait temas kuvvetinin belli bir kritik değere ulaştıktan sonra bir anda belli miktar düştüğü devamında da salınımların gerçekleştiği görülmektedir. Ani kuvvet düşüşünün gerçekleştiği noktalar yükleme fazının eğiminin değişmesine ve başlangıçtaki temas rijitliğinin kaybına yol açan darbe hasarının başlama durumudur. Kuvvet-zaman grafiklerinde ilk ani kuvvet düşüşünden hemen önce elde edilen maksimum kuvvet noktasına darbe hasarı eşik kuvveti adı verilmektedir (Schoeppner ve Abrate, 2000; Batra ve ark., 2012). 10 J enerji seviyesindeki darbe hasarında Şekil 5.17a ve Çizelge 5.4 birlikte incelendiğinde, referans kompozitin darbe hasarı eşik kuvveti 4482 N'dur. Nanofiber takviyesiyle saf PSF ve %2 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozitte darbe hasarı eşik kuvveti sırasıyla %4.8 ve %6.6 artış göstermiştir. %1 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozitte ise bu enerji seviyesinde darbe hasarı eşik kuvveti değerine ulaşamadığı için tespit edilememiştir. 20 J enerji seviyesindeki darbe hasarında Şekil 5.17b ve Çizelge 5.4'ten, Referans kompozit için hasar eşik kuvveti 5386 N iken, nanofiber takviyesiyle Saf PSF kompozitlerde %15 ile en yüksek artış gözlenmiş, %1 SiC-Fe₃O₄/PSF ve %2 SiC-Fe₃O₄/PSF hibrit nanofiberli kompozitlerde ise sırasıyla %2 ve %4.7'lik kısmi artışlar meydana gelmiştir. Şekil 5.17c ve Çizelge 5.4'ten 30 J enerji seviyesinde referans kompozit için hasar eşik kuvveti 5677 N tespit edilmiştir. Saf PSF ve %1 SiC-Fe₃O₄/PSF

kompozitlerde hasar eşik kuvvetinde sırasıyla %23 ve %5.6 artış meydana gelirken, %2 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozitte %5.2 düşüş gözlenmiştir.

Her bir kompozit numunenin darbe yükü taşıma kapasitesi elde edilen maksimum darbe kuvvetidir. Çizelge 5.4'te farklı enerji seviyelerine bakıldığında her bir kompozitin maksimum kuvveti artan darbe enerjisi ile birlikte artmaktadır. 10 J enerji seviyesinde referans kompozitin elde edilen maksimum kuvvetine kıyasla Saf PSF ve %2 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozitlerde önemli bir değişiklik gözlenmezken, %1 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozitte %2'lik kısmi bir artış gerçekleşmiştir. 20 J enerji seviyesinde en fazla maksimum kuvvet artışı %4.2 ile saf PSF kompozitte gerçekleşirken, %1 SiC-Fe₃O₄/PSF ve %2 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozitlerde sırasıyla %2.8 ve %2 olmuştur. 30 J enerji seviyesinde ise saf PSF, %1 SiC-Fe₃O₄/PSF ve %2 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozitlerde sırasıyla %5, %9.5 ve %8.2 oranlarında maksimum kuvvet artışı gerçekleşmiştir. Referans kompozite kıyasla nanofiber takviyeli kompozitlerin artan darbe enerjisiyle birlikte darbe yükü taşıma kapasitelerinin de oransal olarak artarak pozitif farkla ayrıştıkları görülmektedir.

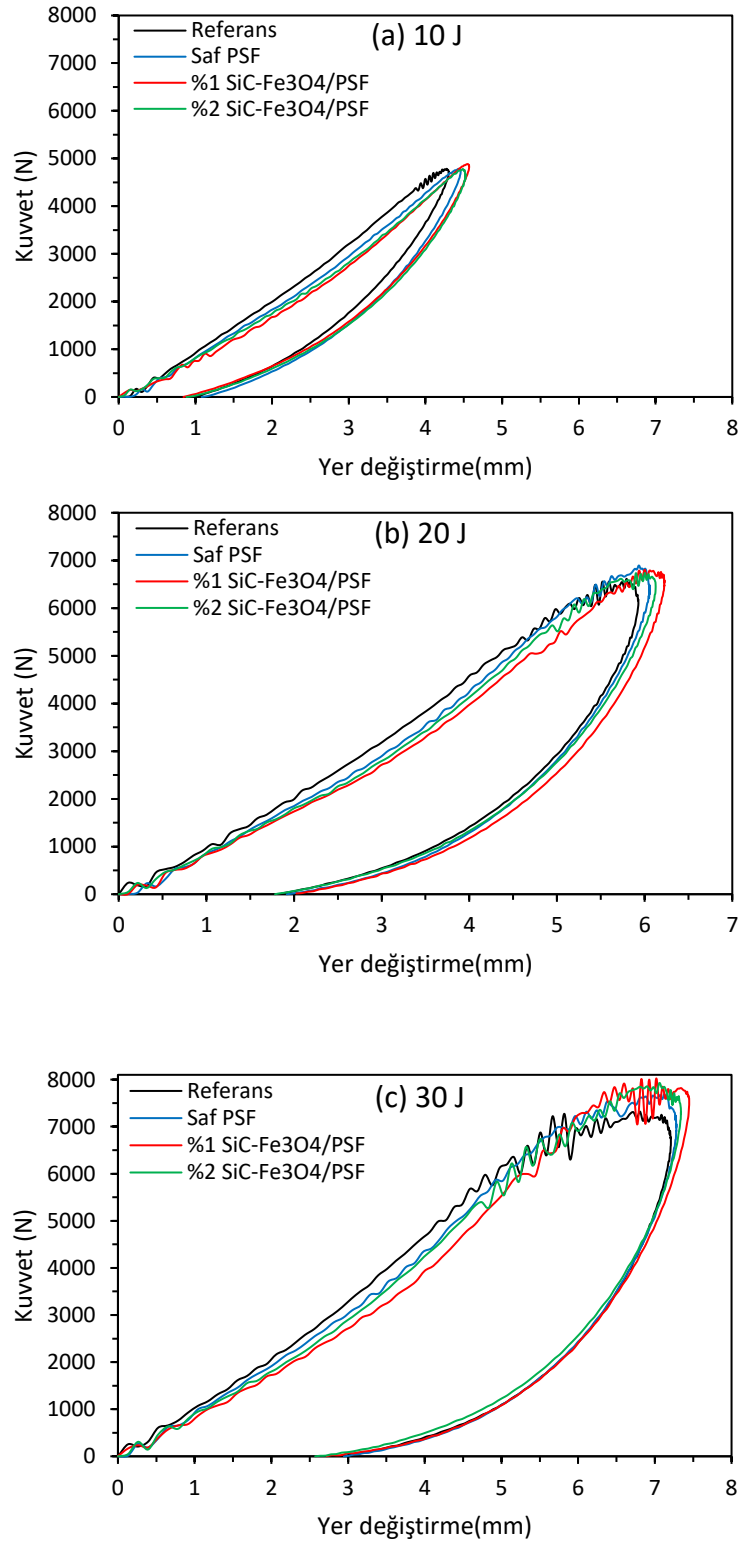


Şekil 5.17. Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerin 10 J, 20 J, 30 J enerji seviyelerindeki kuvvet – zaman eğrileri

5.4.2. Kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Kuvvet-yer değiştirme eğrileri vurucu tarafından numuneye aktarılan darbe enerjisinin ne kadarının numune tarafından absorbe edildiğini ifade eder. Diğer bir ifadeyle kapalı formdaki kuvvet-yer değiştirme eğrilerinin arasında kalan alan yapılan içi yani absorbe edilen enerjiyi verir. şekil 5.18’de artan darbe enerjisi ile birlikte hem maksimum kuvvette hem de numunenin şekil değişiminde önemli artışlar gerçekleşmiştir. Artan darbe enerjisiyle birlikte grafiğin arasında kalan alanın genişlemesiyle absorbe edilen enerjinin de arttığı açık bir şekilde görülmektedir. Numunenin ilk hasar alıncaya kadar temas kuvvetinin artışta olduğu bölgedeki eğrinin başlangıç eğimini ifade eden eğilme rijitliğinde, artan darbe enerjisiyle birlikte dikkate değer bir artış görülmemektedir.

şekil 5.18’de tüm enerji seviyelerinde nanofiber takviyeli kompozitler referans cam/epoksi kompozite göre daha düşük eğilme rijitliğine ve daha fazla maksimum yer değiştirme değerlerine sahiptir. En düşük eğilme rijitliği tüm enerji seviyelerinde %1 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozite ait olduğu görülmektedir. PSF’nin sünek yapısından dolayı nanofiberlerin tabakalar arası bölgelerdeki varlığıyla kompozitin darbe davranışına daha sünek ve esnek bir yapı kazandırılmıştır. Çizelge 5.4’ten maksimum yer değiştirmeler karşılaştırıldığında, referans kompozite kıyasla en fazla maksimum yer değiştirme tüm enerji seviyelerinde %1 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozitte meydana gelmiş, en yüksek fark ise %6.3 artışla 10 J enerji seviyesinde gerçekleşmiştir.

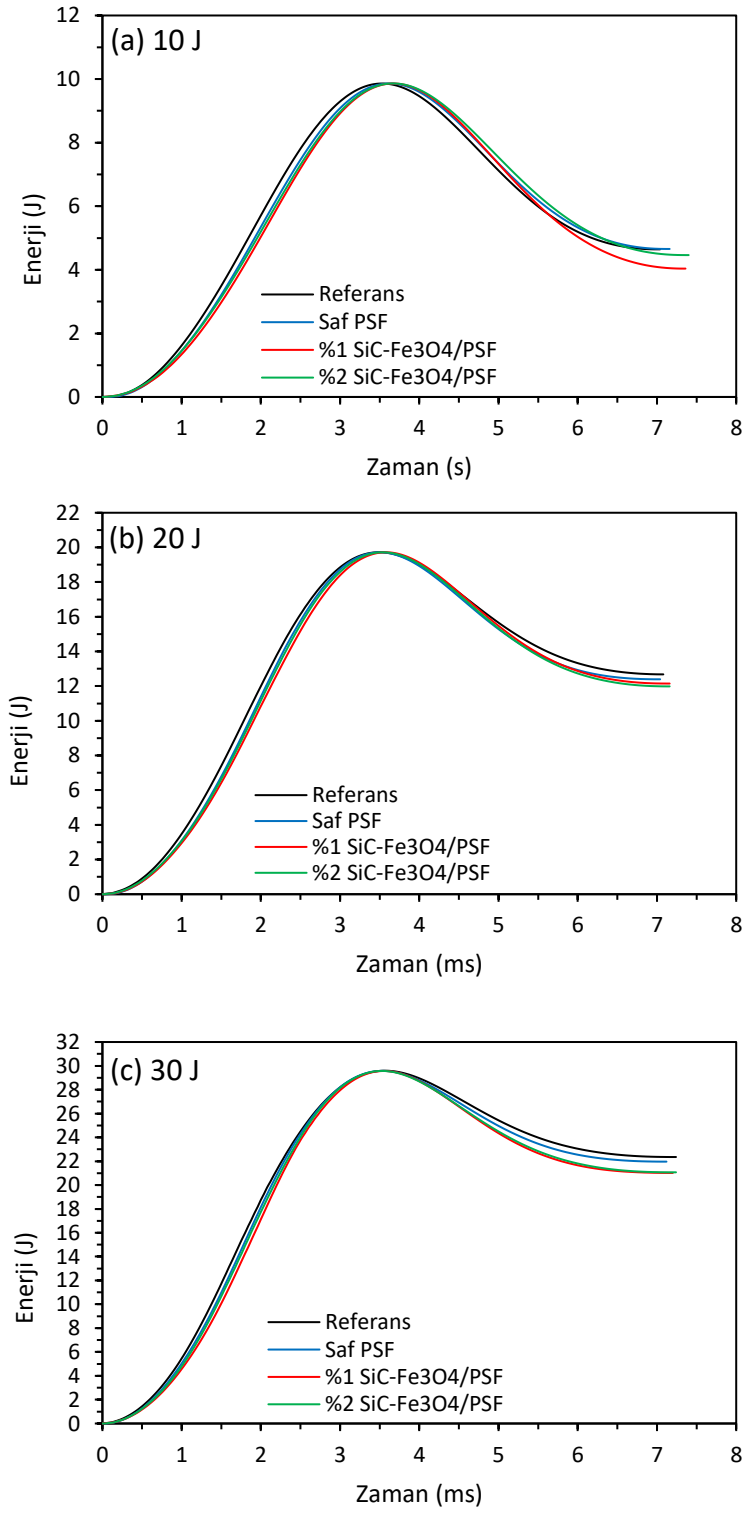


Şekil 5.18. Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerin 10 J, 20 J, 30 J enerji seviyelerindeki kuvvet-yer değiştirme eğrileri

5.4.3. Enerji-zaman eğrileri

Şekil 5.19’da referans ve nanofiber takviyeli kompozitlerin farklı enerji seviyelerindeki enerji-zaman eğrileri gösterilmektedir. Vurucunun numuneye temas ettiği andan itibaren vurucu tüm enerjisini numuneye transfer eder (maksimum enerji noktası). Vurucu tarafından uygulanan enerjinin bazen tamamı bazen de bir kısmı numunenin şekil değişimine harcanarak absorbe edilir. Eğer numune tarafından enerjinin bir kısmı absorbe edilirse, geri kalan enerji vurucunun geri sekmesine harcanmış olur. Enerji-zaman eğrilerinde görüldüğü üzere her bir enerji seviyesindeki eğrilerde enerjinin maksimum olduğu noktada vurucu enerjisini numuneye tamamen aktarmıştır. Aynı zamanda maksimum enerji noktası kuvvet-yer değiştirme eğrilerinde numune tarafından maksimum yer değiştirmenin olduğu noktaya karşılık gelir. O ana kadar numuneye aktarılan tüm enerjinin bir kısmı absorbe edilir. Enerji-zaman eğrisinin en son zaman adımına karşılık gelen enerji değeri numune tarafından absorbe edilen enerjiyi ifade etmektedir. Geri verilen yani vurucunun geri sekme enerjisi ise uygulanan enerjiden absorbe edilen enerjinin çıkarılmasıyla elde edilir. Darbe enerji seviyesi arttıkça numune tarafından absorbe edilen enerji de artmaktadır. Absorbe edilen enerji ne kadar yüksekse kompozit numunedeki darbe hasarı da artmaktadır.

Çizelge 5.4 ve Şekil 5.19’da farklı enerji seviyelerinde nanofiber takviyeli kompozitlerin referans kompozite göre absorbe ettikleri enerjiler karşılaştırıldığında, 10 J enerji seviyesinde absorbe edilen enerjide referans kompozite kıyasla saf PSF nanofiber takviyeli kompozitte bir farklılık gözlenmezken, %1 ve %2 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı hibrit nanofiber takviyeli kompozitler sırasıyla %13 ve %3.9 daha az enerji absorbe etmişlerdir. 20 J enerji seviyesine çıkıldığında saf PSF, %1 ve %2 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozitler absorbe edilen enerjide sırasıyla %2.2, %4.1 ve %5.4 düşüş gerçekleştirmişlerdir. 30 J enerji seviyesinde saf PSF kompozitte %1.7’lik kısmi düşüş görülürken, %1 ve %2 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı hibrit nanofiber takviyeli kompozitler yaklaşık %6 daha az enerji absorbe etmiştir. Artan darbe enerji seviyeleriyle birlikte saf ve nanopartikül katkılı PSF nanofiber takviyesinin cam/epoksi kompozitlerde daha az enerji absorbe ederek darbe hasar direncini arttırdığı Şekil 5.19’da açıkça görülmektedir. SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı hibrit PSF nanofiber takviyeli kompozitler saf PSF nanofiber takviyeli kompozite kıyasla daha yüksek darbe direnci artışı sağlamışlardır.



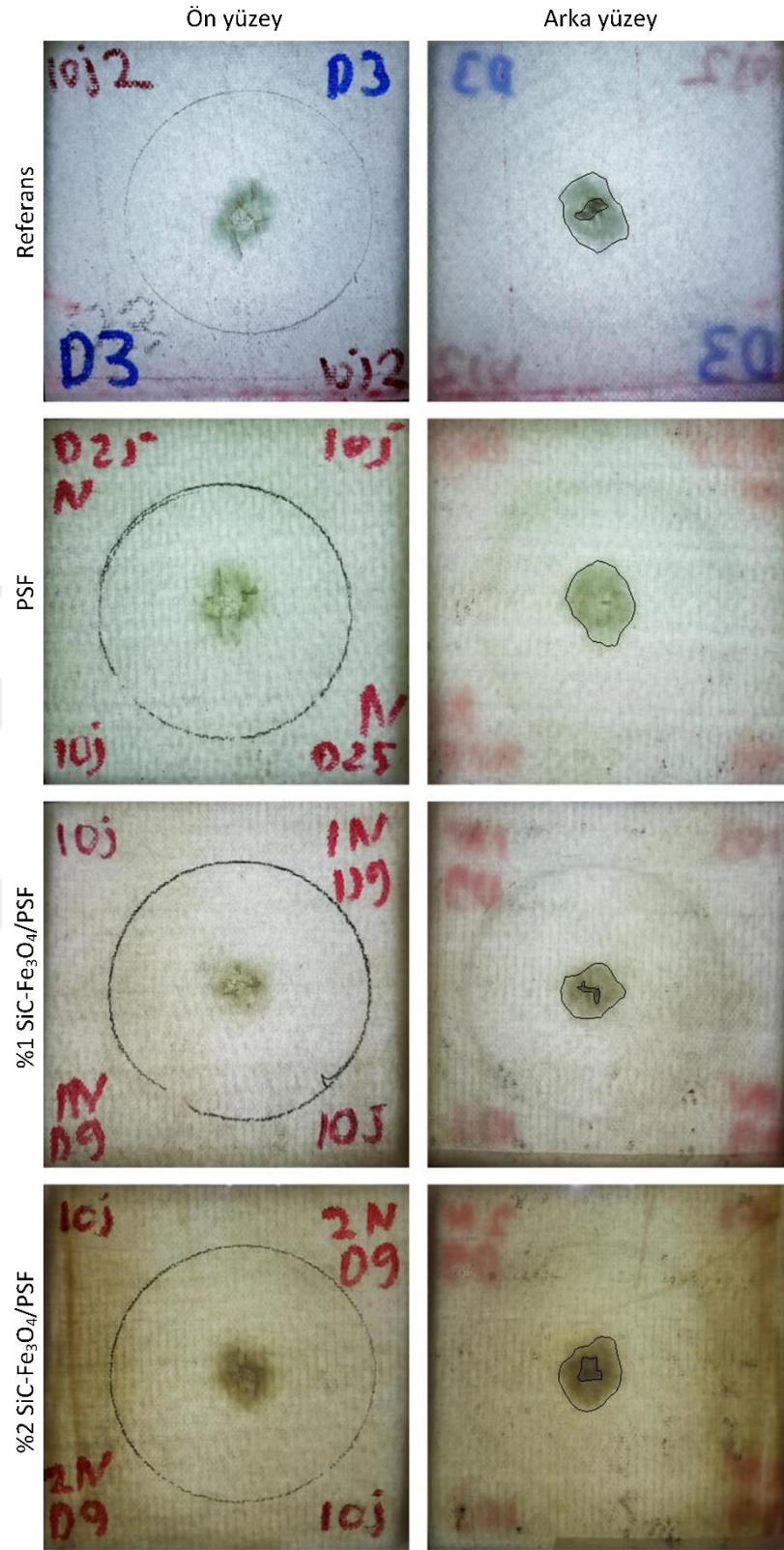
Şekil 5.19. Referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozitlerin 10 J, 20 J, 30 J enerji seviyelerindeki enerji – zaman eğrileri

5.5. Düşük Hızlı Darbe Testleri Sonrası Hasar Bölgelerinin İncelenmesi

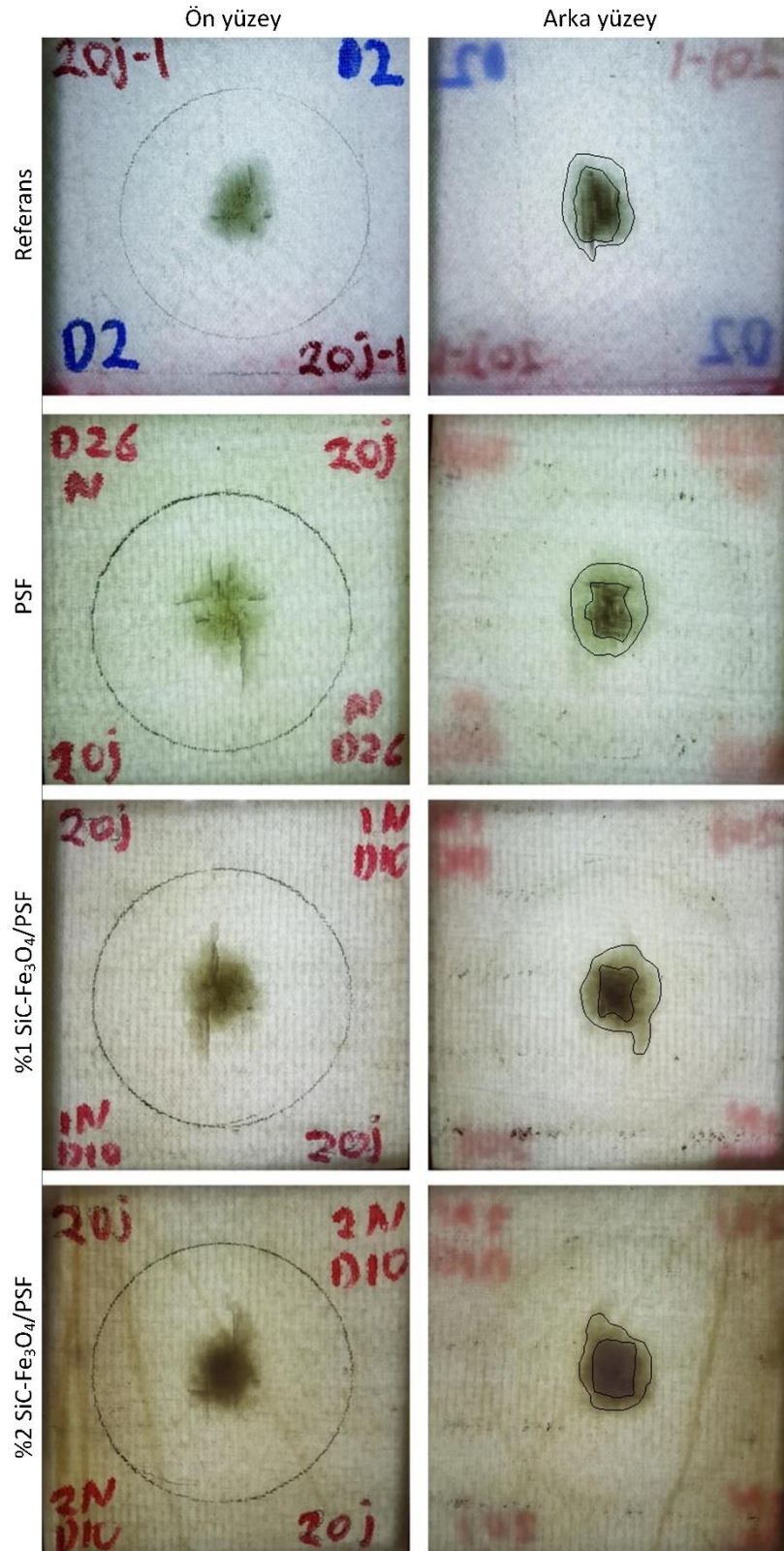
10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyelerinde darbe testi sonrasında referans ve nanofiber takviyeli kompozit numunelerin hasarlı ön ve arka yüzey fotoğrafları sırasıyla Şekil 5.20, Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’de gösterilmektedir. Hasarlı yüzeylerin fotoğrafları her bir numunenin alt tarafına bir ışık kaynağı yerleştirilerek alınmıştır. Cam fiberlerin ışık geçirgen yapısı darbe testi sonrası cam/epoksi kompozit levhada oluşan delaminasyon ve fiber kırılma alanlarının tespitini kolaylaştırmaktadır. Fotoğraflar 1:1 numune ölçülerinde AutoCAD programına aktarılarak hasar bölgelerin sınırları hassas bir şekilde çizilerek hasar alanları ölçülmüştür. Şekil 5.20, Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’de arka yüzey fotoğrafları incelendiğinde numunelerin orta kısımlarında siyah çizgilerle sınırlandırılmış koyu renkli küçük alanlarla, bu koyu renkli alanları daha geniş biçimde çevreleyen biraz daha açık ton rengine sahip alanlar açıkça görülmektedir. Darbe testi esnasında vurucunun numune yüzeyine temas ettiği andan itibaren vurucunun artan girintisiyle birlikte numunede meydana gelen hasarlar sırasıyla matris çatlaması, tabakalar arası meydana gelen delaminasyon ve en sonunda vurucunun girintisinin daha da artmasıyla fiber kırılmaları gerçekleşmektedir. Numunelerin merkezlerinde yoğunlaşmış bulunan koyu renkli alanlar vurucunun numuneye girintisiyle birlikte yüksek gerilmelere maruz kalmış fiber kırılma alanlarını ifade etmektedir. Fiber kırılma alanları numunenin alt tarafındaki ışık kaynağından sağlanan ışığı geçirmediği için fotoğraflarda koyu renkli görülmektedir. Koyu renkli merkezci alanları daha geniş biçimde çevreleyen biraz daha açık ton rengine sahip alanlar ise ışığı kısmen geçiren genişletilmiş delaminasyon alanlarıdır.

Her bir kompozit numunenin arka yüzey fotoğraflarına bakıldığında artan darbe enerjisiyle birlikte hem fiber kırılma alanları hem de delaminasyon alanları genişlemektedir. Bu durum artan enerji şiddetiyle numunelerdeki hasar oranının da arttığının bir göstergesidir. Şekil 5.23’de her enerji seviyesi için numunelerin arka yüzeyinde oluşan fiber kırılma ve delaminasyon alanlarının ölçülmüş değerleri sütun grafiklerle sunulmuştur. Şekil 5.20’de 10 J enerji seviyesindeki darbe hasarına maruz kalmış numuneler incelendiğinde referans cam/epoksi kompozit, %1 ve %2 oranında SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiber takviyeli kompozit numunelerde fiber kırılma alanları oluşurken, saf PSF nanofiber takviyeli kompozit numunede sadece delaminasyon hasarı alanı olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca, %1 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiber takviyeli numunede de fiber kırılma alanının referans numuneye göre oldukça küçük olduğu görülmektedir. Bununla birlikte referans

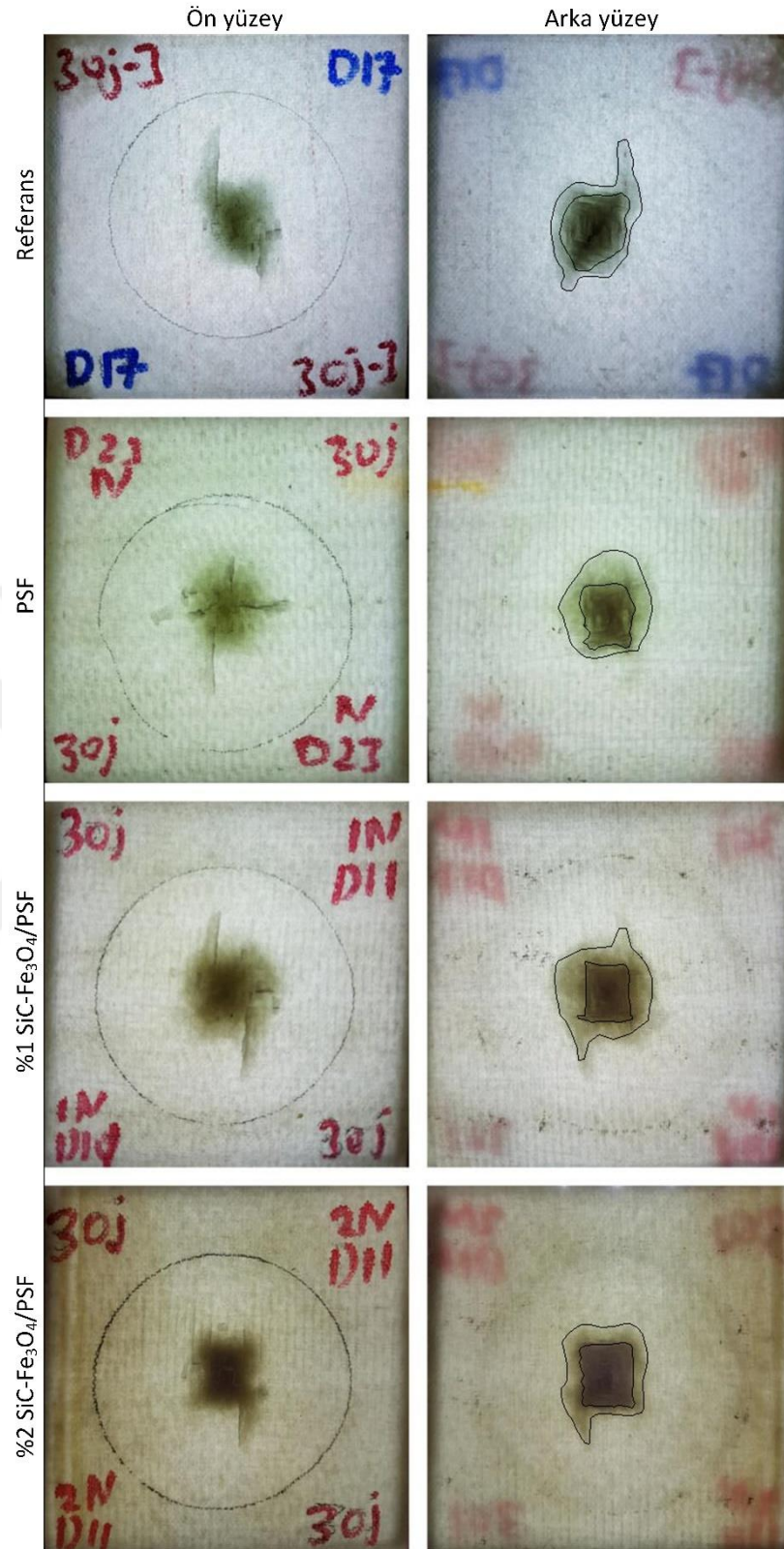
numuneye kıyasla saf PSF nanofiber takviyeli numunenin delaminasyon alanında artış görülürken, %1 ve %2 oranında SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiber takviyeli kompozit numunelerde delaminasyon alanı azalmıştır (Şekil 5.23). 20 J enerji seviyesi için Şekil 5.21’de darbe sonrası hasar fotoğraflarına ve Şekil 5.23’de ölçülmüş hasar alanlarına bakıldığında referans numuneye kıyasla saf PSF, %1 ve %2 oranında SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı hibrit PSF nanofiber takviyeli kompozit numunelerin fiber kırılma alanlarında sırasıyla %26, %38.5 ve %19 oranında azalma meydana gelirken, sadece %2 oranında SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiber takviyeli kompozit numunenin delaminasyon alanında kısmi azalma gözlenmiştir. Şekil 5.22 ve Şekil 5.23 birlikte incelendiğinde en yüksek enerji seviyesi 30 J’de özellikle fiber kırılma alanlarına bakıldığında nanofiberlerin cam/epoksi kompozit levhaların darbe direncine pozitif etkisinin daha da arttığı açıkça görülmektedir. Referans cam/epoksi kompozit numuneye kıyasla saf PSF, %1 ve %2 oranında SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiber takviyeli kompozit numuneler fiber kırılma alanlarında sırasıyla %28, %38 ve %22 oranlarında azalma sağlamışlardır. Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde tabakalar arasına nanofiber takviyesinin ve nanofiber içerisinde nanopartikül katkısının kompozit levhaların darbe direncine önemli derecede pozitif etkileri oldukları fiber kırılma alanlarındaki ciddi azalmalarla açıkça görülmektedir. Ara tabakalara yerleştirilen nanofiber keçelerin cam/epoksi kompozit levhalardaki en iyi darbe direnci etkisi 20 J ve 30 J enerji seviyelerinde %1 oranında SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiberlerle sağlanmıştır.



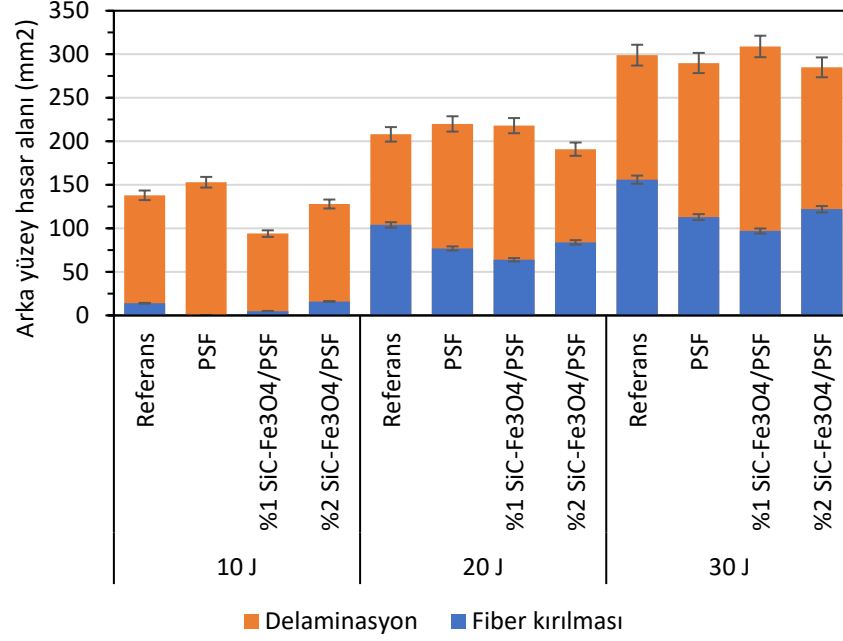
Şekil 5.20. 10 J enerji seviyesindeki düşük hızlı darbe testi sonrası referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhaların hasar yüzeyleri fotoğrafları



Şekil 5.21. 20 J enerji seviyesindeki düşük hızlı darbe testi sonrası referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhaların hasar yüzeyleri fotoğrafları



Şekil 5.22. 30 J enerji seviyesindeki düşük hızlı darbe testi sonrası referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhaların hasar yüzeyleri fotoğrafları



Şekil 5.23. 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyelerindeki düşük hızlı darbe testleri sonrası referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhaların ölçülmüş arka yüzey hasar alanları

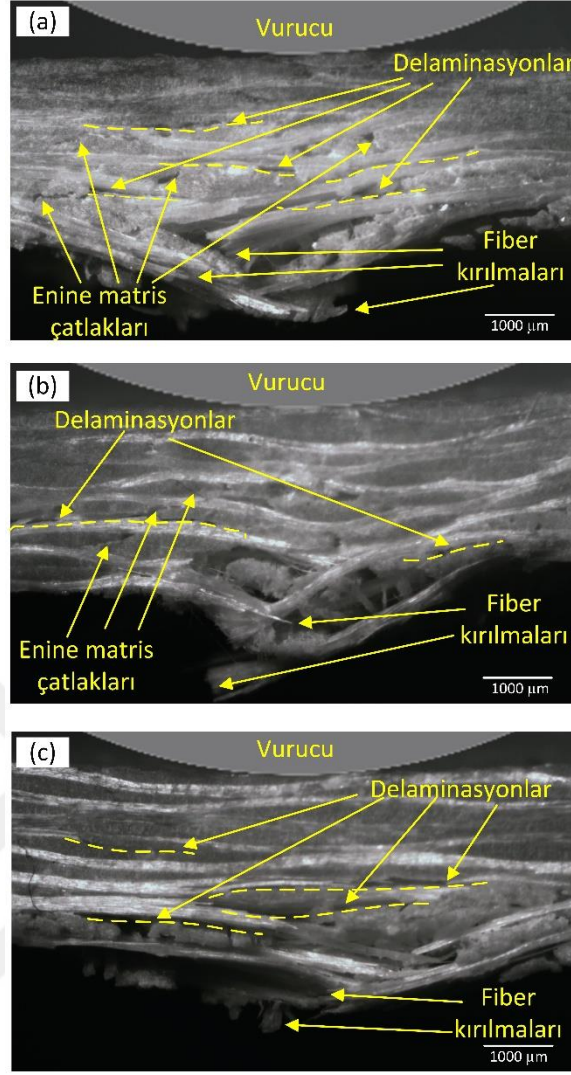
5.6. Düşük Hızlı Darbe Testleri Sonrası Kırılma Yüzeylerinin Optik Mikroskop ve SEM Görüntüleri

30 J enerji seviyesinde darbe testi sonrasında hasarlı kompozit numuneler tam ortalarından dekupaj testere ile kesilerek ikiye ayrılmıştır. Ortadan ikiye ayrılan kompozit numunelerin darbe yüzeyine dik kesitleri optik mikroskopta ve SEM’de incelenmiştir. Eşit iki parçaya ayrılan kare numunelerin bir tarafının hasarlı bölgesi 10 mm x 20 mm ebatlarında tekrar kesilerek SEM analizi için uygun ölçülere getirilmiştir. Kompozit levhaların kesitsel yüzeyleri alkolle temizlendikten sonra SEM görüntüleri alınmıştır.

Şekil 5.24’te 30 J’de darbe sonrasında referans ve nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhaların optik mikroskop altında kesitsel kırılma yüzeyleri gösterilmektedir. Şekillerde şematik çizimi verilen vurucunun 30 J şiddetinde yüksek enerji seviyesindeki darbe etkisi sonrasında vurucunun temas alanı altındaki üst yüzeylerdeki bölgelerde yoğunlaşmış yüksek temas gerilmelerinden dolayı matris çatlakları (Şekil 5.22’de üst yüzey fotoğrafları) oluşurken kompozit levhaların üst tabakalarından alt tabakalarına doğru ilerledikçe enine matris çatlakları, delaminasyonlar ve fiber kırılmalarının meydana geldiği görülmektedir. Vurucunun anlık olarak çarpması esnasında levhaların kesitinin ortasından geçen tarafsız eksenin üst kısmındaki tabakalar yüksek temas kuvvetlerine maruz kalırken, tarafsız eksenin alt kısmındaki tabakalar en alt tabakaya doğru artan

eğilme deformasyonundan dolayı çekme yükü altında eğilme gerilmelerine maruz kalmaktadır. Tabakaların birbirinden ayrılması anlamına gelen delaminasyon, kompozit levhanın vurucu tarafından eğilmeye maruz kalması esnasında tabakaların farklı fiber yönelimlerine sahip olmasından dolayı tabakalar arasındaki eğilme rijitliği uyumsuzluğunun sonucu olarak ortaya çıkar. Diğer taraftan enine kayma gerilmelerinin sebep olduğu enine matris çatlakları ilerleyerek tabakalar arası delaminasyonu başlatabilir. En alttaki tabakalarda eğilme gerilmelerinin en yüksek olmasıyla birlikte darbe hasarının boyutu daha da artarak fiber kırılmalarına sebep olur.

Şekil 5.24a'daki referans cam/epoksi kompozit levhanın almış olduğu darbe hasarının boyutuna bakıldığında en altta yoğun fiber kırılmalarının olduğu, kayma gerilmeleri sonucu oluşan enine matris çatlaklarının üst tabakalara doğru ilerleyerek tabakalar arası delaminasyonlara sebep olduğu ve oluşan diğer delaminasyonlar açıkça görülmektedir. Şekil 5.24b'de tabakalar arası bölgeye yerleştirilen saf PSF nanofiber takviyesinin kompozitin hasar davranışında iyileşme sağladığı öncelikle Şekil 5.23'de ölçülen delaminasyon ve fiber kırılma alanlarına bakılarak anlaşılabılır. İkinci olarak Şekil 5.24b'ye tekrar bakıldığında oluşan enine matris çatlakları tabakalar arası bölgede delaminasyonu kısmen başlatsa bile ilerletemediği, bu bölgede sünek yapıdaki PSF nanofiberlerin tabakalar arasında gevrek yapıdaki epoksi reçine içine gömüldüğünden dolayı enine çatlak ilerlemesinden kaynaklı delaminasyonları engellemektedir. Şekil 5.24c'de ise %1 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı hibrit nanofiber takviyesinin kompozit levhanın darbe direncine pozitif etkisini daha da artırdığı, alt tabaklardaki fiber kırılmalarının daha az yoğunlukta olduğundan anlaşılmaktadır. Şekil 5.23'te de kırılmış fiber alanındaki en fazla azalmanın yine %1 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı hibrit PSF nanofiber takviyeli kompozit levhada olduğu görülmektedir.



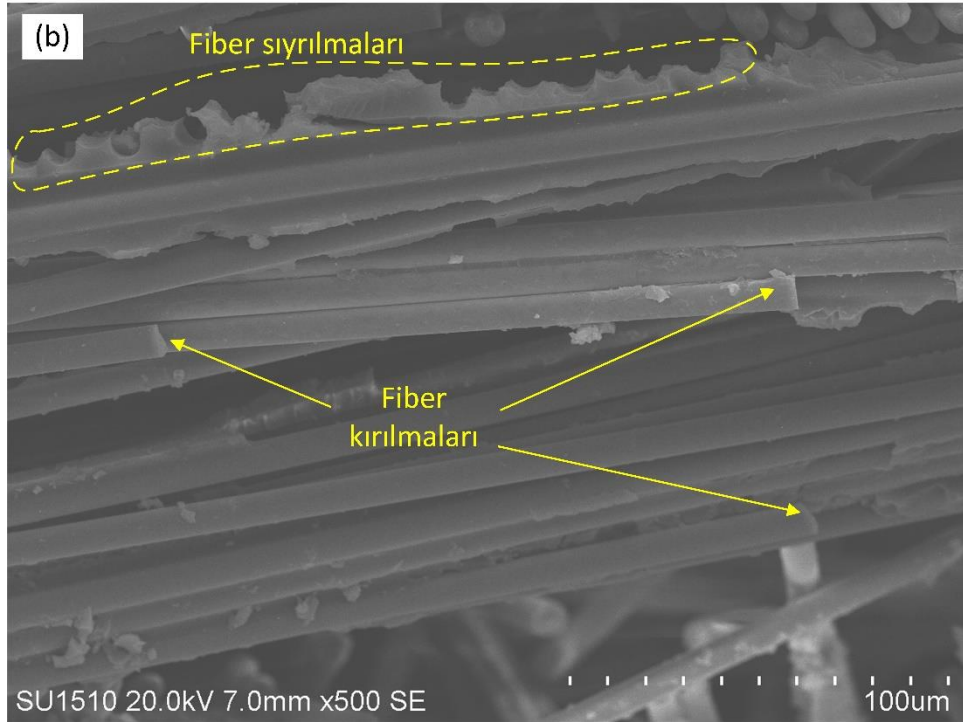
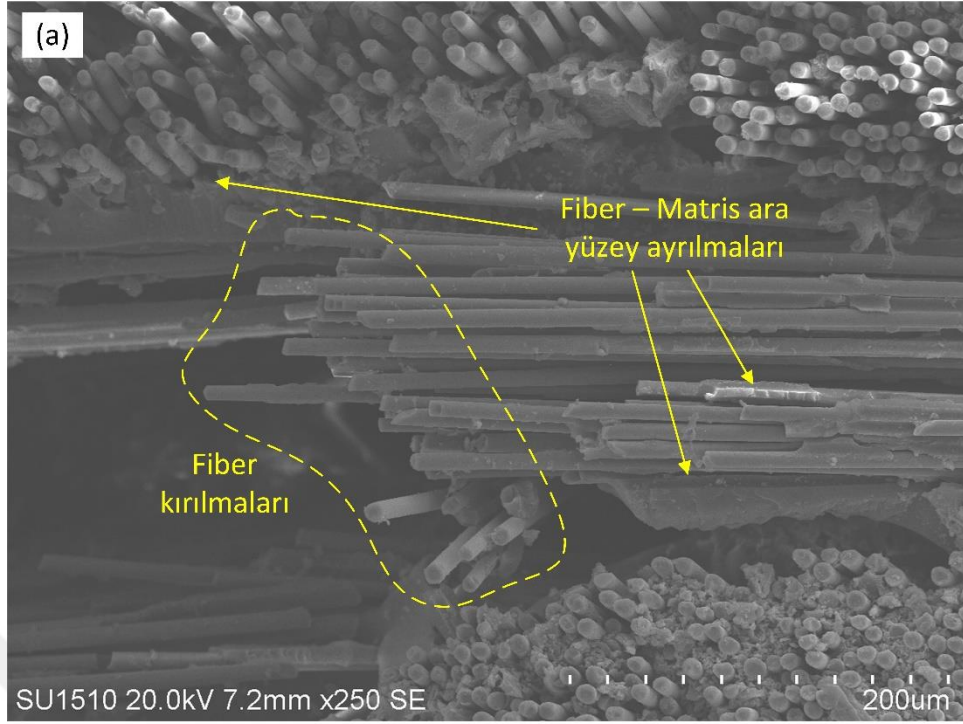
Şekil 5.24. 30 J darbe testi sonrası hasarlı cam/epoksi kompozit levhaların kesitsel optik mikroskop görüntüleri: Referans (a), saf PSF nanofiber takviyeli (b) ve %1 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiber takviyeli (c)

30 J enerji seviyesindeki darbe testi sonrası hasarlı referans cam/epoksi kompozit, saf PSF nanofiber takviyeli ve %2 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiber takviyeli kompozit levhaların kesitsel kırılma yüzeylerinin mikro boyutlardaki SEM fotoğrafları sırasıyla Şekil 5.25, Şekil 5.26 ve Şekil 5.27’de gösterilmektedir. Şekil 5.25a’ya bakıldığında fiber kırılmaları ve fiber-matris ara yüzey ayrılımları görülmektedir. Vurucunun darbe etkisiyle birlikte alt tabakalarda yüksek eğilme gerilmelerinden kaynaklı fiberlerin kırılmaları gerçekleşmiştir. Aynı zamanda fiber kırılmalarıyla birlikte fiberleri bir arada tutan bağlayıcı görevindeki epoksi matris ile cam fiberler arasındaki ara yüzey ayrılımları meydana gelmiştir. Cam fiberlerin keskin köşeli kırılma yüzeylerine sahip olması gevrek kırılmalarının olduğunu bir göstergesidir. Şekil 5.25b’de ise cam fiberlerin bağlayıcı epoksi matris içerisinden sıyrılarak kopmaların

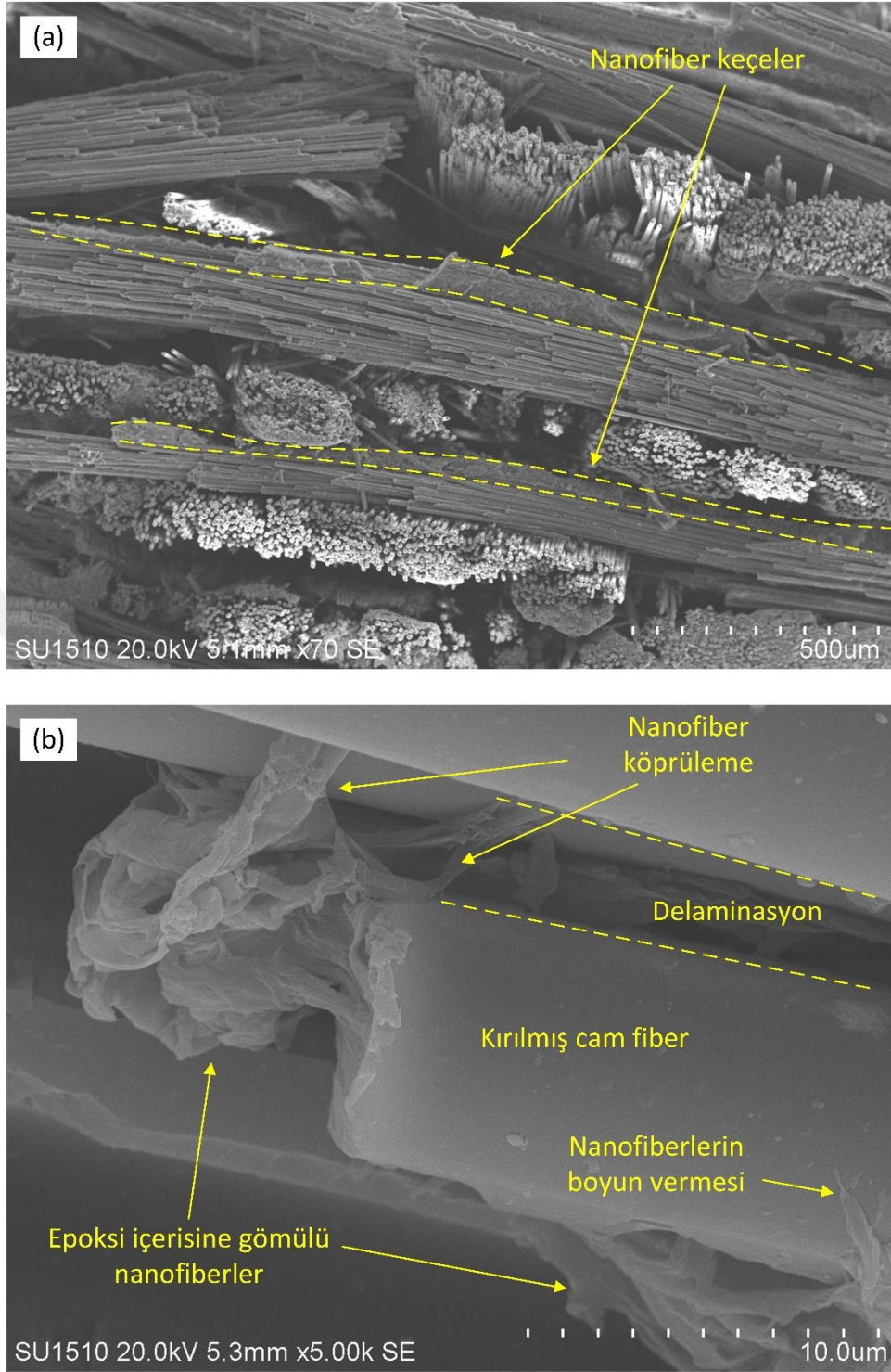
gerçekleştiği görülmektedir. Yerlerinden ayrılan fiberlerden kalan boşlukta matrisin cam fiberlerin dairesel kesit şeklini almış görüntüsü ve keskin köşeli kırılmış matris parçalarının fotoğrafta yer almasından dolayı epoksi matrisin de gevrek kırılma davranışı gösterdiği anlaşılmaktadır.

Şekil 5.26a'da hasarlı saf PSF nanofiber takviyeli kompozitin 70X büyütme kesitsel fotoğrafına bakıldığında saf PSF nanofiber keçelerin tabakalar arasındaki yerleşimleri rahatlıkla görülmektedir. Delaminasyonla birlikte cam fiber kırılmalarının da meydana geldiği nanofiber keçelerin alt ve üst bölgelerine bakıldığında anlaşılmaktadır. Epoksi reçine içerisine gömülmüş nanofiber keçelerin tabakalar arasındaki kalınlığı ortalama 70 – 80 μm arasında değişmektedir. Şekil 5.26b'de epoksi matris içerisine gömülü haldeki nanofiber demetlerinin darbe hasarı sonrasında cam fiberin kırılmış yüzeyine yapışmış görüntüsü, boyun vererek şekil değişimine uğrayıp kopmaları, delaminasyonu engellemek için ayrılan iki tabaka arasında köprüleme oluşturmaları açıkça görülmektedir.

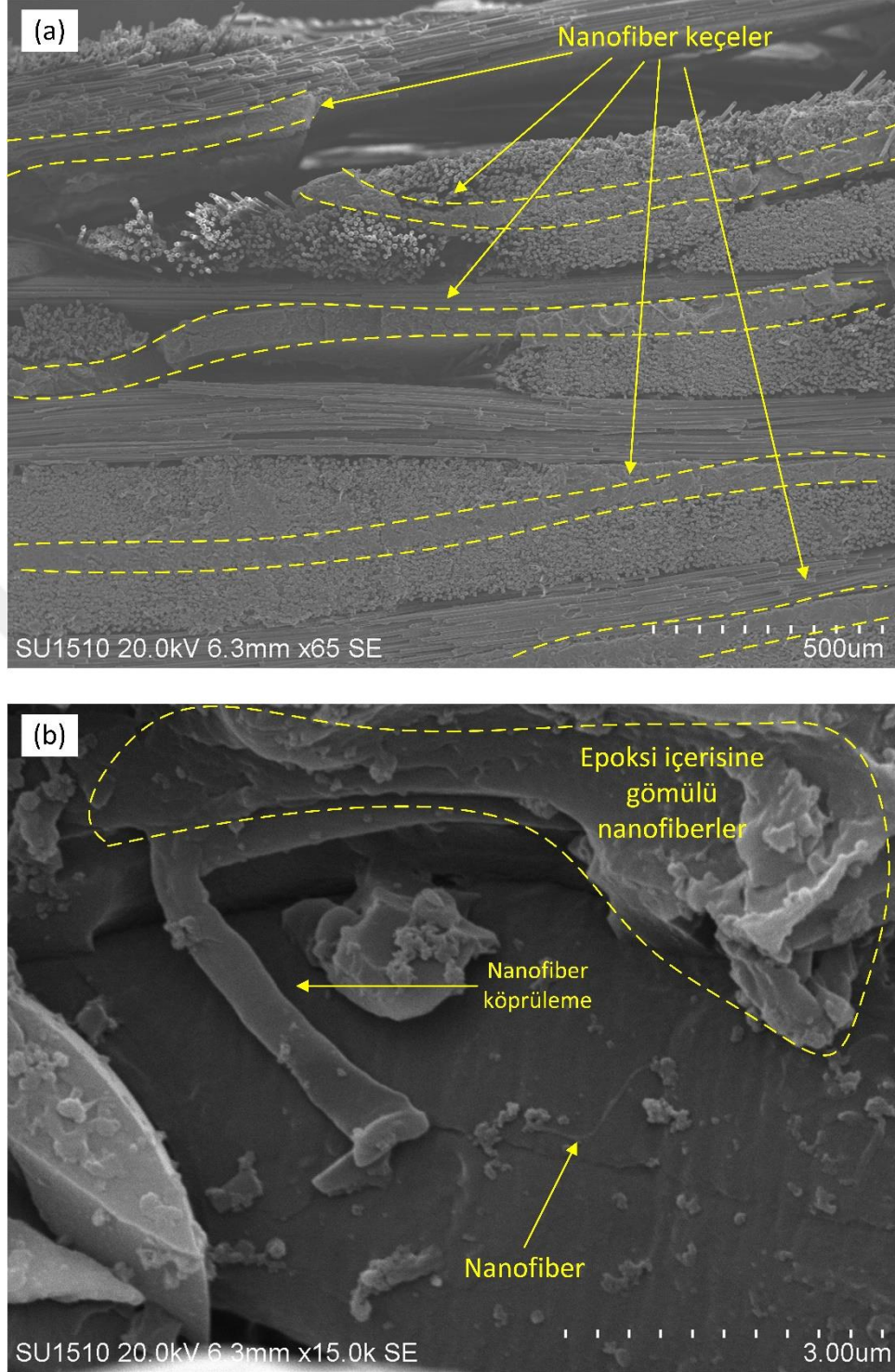
Şekil 5.27a'da %2 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı hibrit PSF nanofiber keçelerin cam/epoksi kompozitin tabakaları arasındaki yerleşimi açıkça görülmektedir. Fotoğrafın üst kısmındaki bölgeler numunenin darbe testi anındaki alt tabakalarını göstermektedir. Bu yüzden fotoğrafa göre üstteki tabakalarda delaminasyon oluşumu ve cam fiber kırılmaları gerçekleşmiştir. En üstteki iki tabaka arasında yüksek eğilmeden kaynaklı delaminasyon sonucu nanofiber keçede kopma meydana gelmiştir. Şekil 5.27b'de epoksi reçine içerisine gömülmüş nanofiberler ve darbe hasarı sonrası yüzeye tutunmuş tek PSF nanofiber parçası görülmektedir. Sünek yapıya sahip olan PSF nanofiberlerin tabakalar arasında epoksi matris içerisinde gömülmesi, gevrek yapıdaki matrisçe zengin tabakalar arası bölgeye tokluk kazandırmakla birlikte delaminasyonların gelişimini nanofiber köprüleme mekanizmasıyla engellemektedir.



Şekil 5.25. Referans cam/epoksi kompozit levhanın 30 J enerji seviyesindeki darbe testinden sonra kesitsel kırılma yüzeyi SEM görüntüleri



Şekil 5.26. Saf PSF nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhanın 30 J enerji seviyesindeki darbe testinden sonra kesitsel kırılma yüzeyi SEM görüntüleri



Şekil 5.27. %2 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhanın 30 J enerji seviyesindeki darbe testinden sonra kırılma yüzeyi SEM görüntüleri

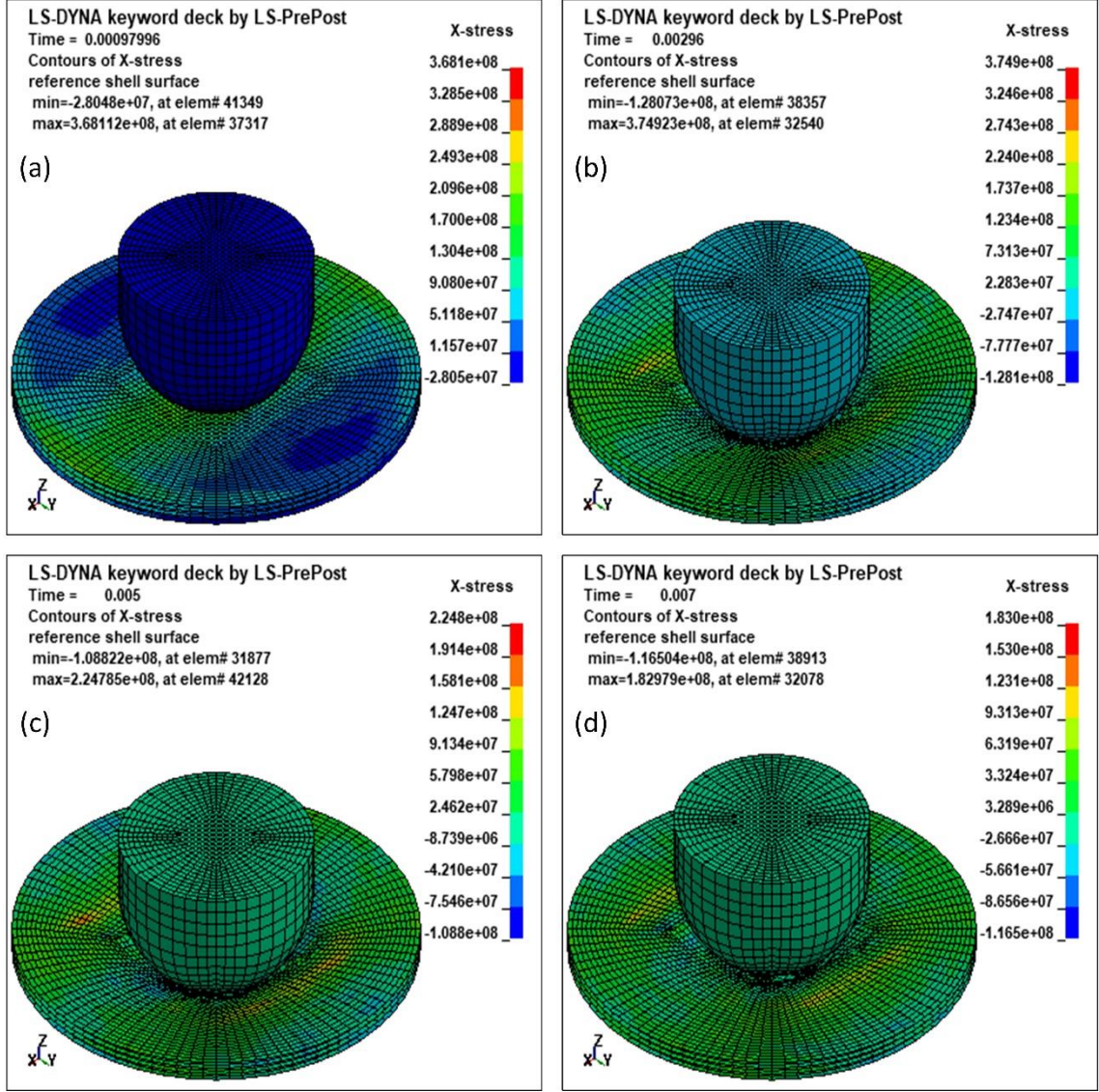
5.7. Düşük Hızlı Darbe Testlerinin Sonlu Elemanlar Simülasyon Sonuçları

Referans ve nanofiber takviyeli kompozitlerin cam/epoksi 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyelerindeki düşük hızlı darbe simülasyonlarının sonuçlarının kuvvet-zaman, kuvvet-

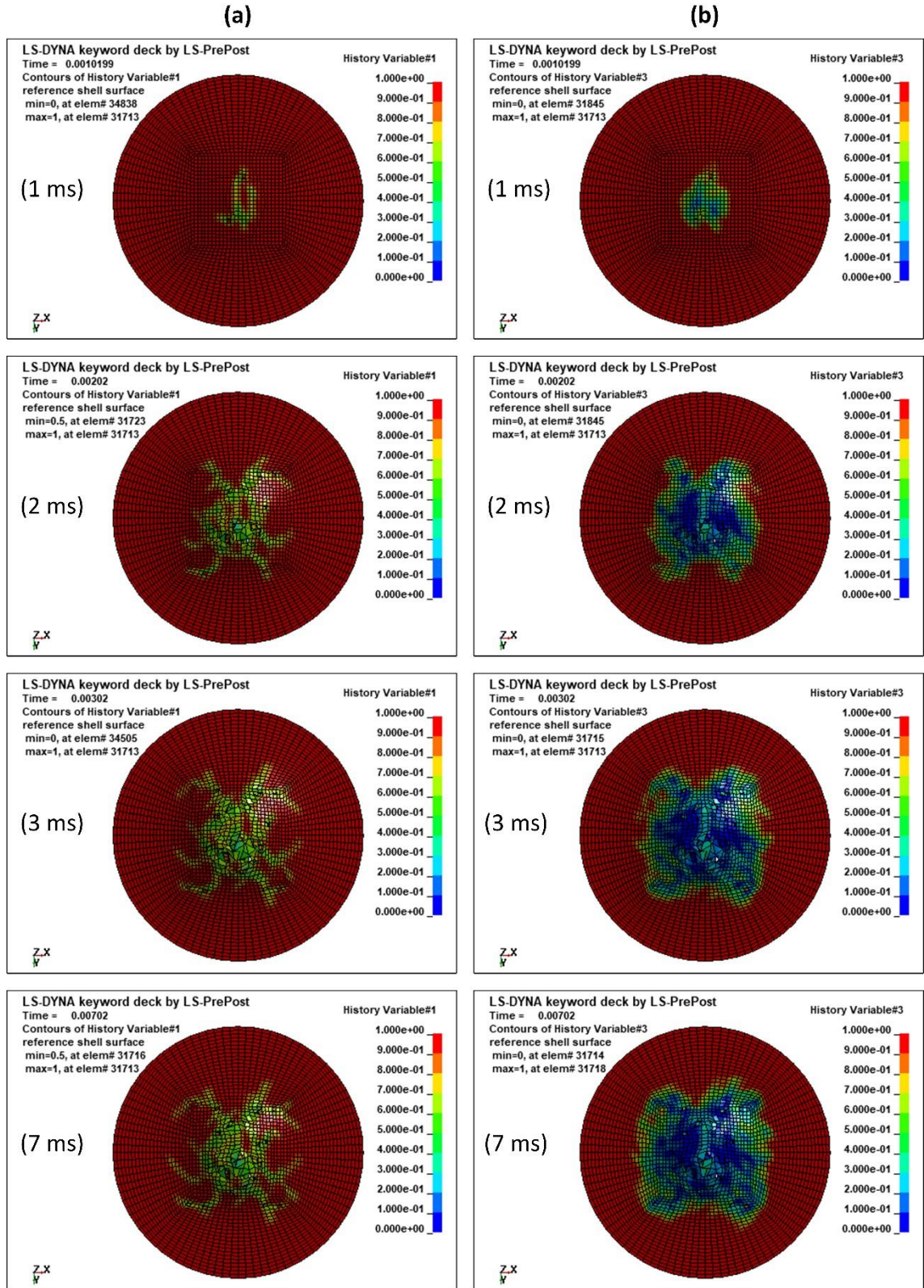
yer değiştirme ve enerji-zaman eğrileri her bir kompozitin deneysel sonuçlarıyla karşılaştırılmal olarak alt başlıklar halinde sunulmuştur. Simülasyon sonuçlarının genel eğilimleri hem yükleme hem de geri sıçrama fazlarında deneysel verilerle iyi bir uyum içinde olduğunu göstermiştir.

Darbe simülasyonlarında vurucunun zamana bağlı ilerlemesiyle kompozit tabakaların farklı zaman adımlarında gerilme dağılımlarını ve tahmin edilen darbe hasar ilerlemelerini tipik olarak göstermek için sadece saf PSF nanofiber takviyeli kompozitin 30 J enerji seviyesindeki simülasyon görsellerine yer verilmiştir. şekil 5.28'de saf PSF nanofiber takviyeli kompozitin 30 J enerjisi seviyesindeki düşük hızlı darbenin sonlu elemanlar simülasyonunda vurucunun numuneye temas ettiği andan itibaren farklı zaman adımlarında x-ekseni doğrultusundaki gerilme dağılımları gösterilmektedir. şekil 5.28a ve b'deki yükleme fazında vurucu temas eder etmez numune üzerindeki gerilmeler aniden artmaya başlamış ve 3 ms anında da vurucu tüm enerjisini numuneye aktarmıştır. şekil 5.28c ve d'de ise vurucu geri sıçrama fazındadır. Kompozit tabakalar tarafından enerjinin bir kısmı absorbe edildikten sonra, geri kalan enerji vurucuya geri aktarılarak vurucun geri sıçraması gerçekleşmiştir. Vurucunun geri sıçramasıyla kompozit tabakalar üzerindeki gerilmeler zamana bağlı olarak azalmıştır. 7 ms anında ise vurucu ile kompozit tabakalar arasında artık temas yoktur.

şekil 5.29'da saf PSF nanofiber takviyeli kompozit modelin 30 J enerji seviyesindeki düşük hızlı darbe simülasyonunda vurucunun kompozit tabakalara giritisiyle birlikte 1 ms, 2 ms, 3 ms ve 7 ms anlarında en alt tabakadaki tahmini hasarların ilerlemeleri gösterilmektedir. şekil 5.29a eşitlik 4.1'de ifade edilen fiber yönünde çekme hasarı modunda oluşan hasarların, şekil 5.29b ise eşitlik 4.3'te ifade edilen matris yönünde çekme hasarı modunda oluşan hasarların nasıl yayıldıklarını göstermektedir.



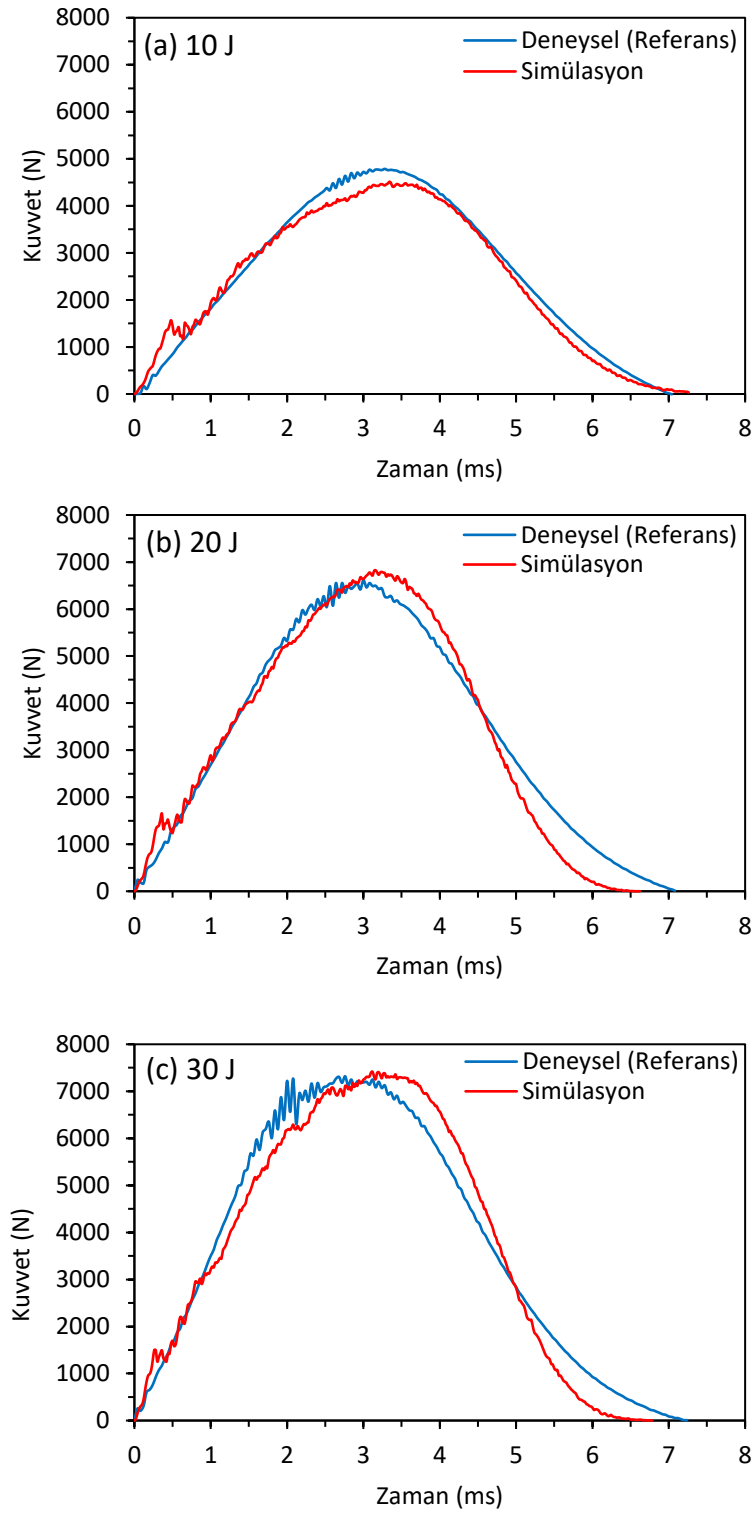
Şekil 5.28. PSF nanofiber takviyeli kompozitin 30 J enerji seviyesindeki sonlu elamanlar simülasyonunda darbe hasarı ilerlemesinin gerilme dağılımları: (a) 1 ms anında, (b) 3 ms anında, (c) 5 ms anında, (d) 7 ms anında



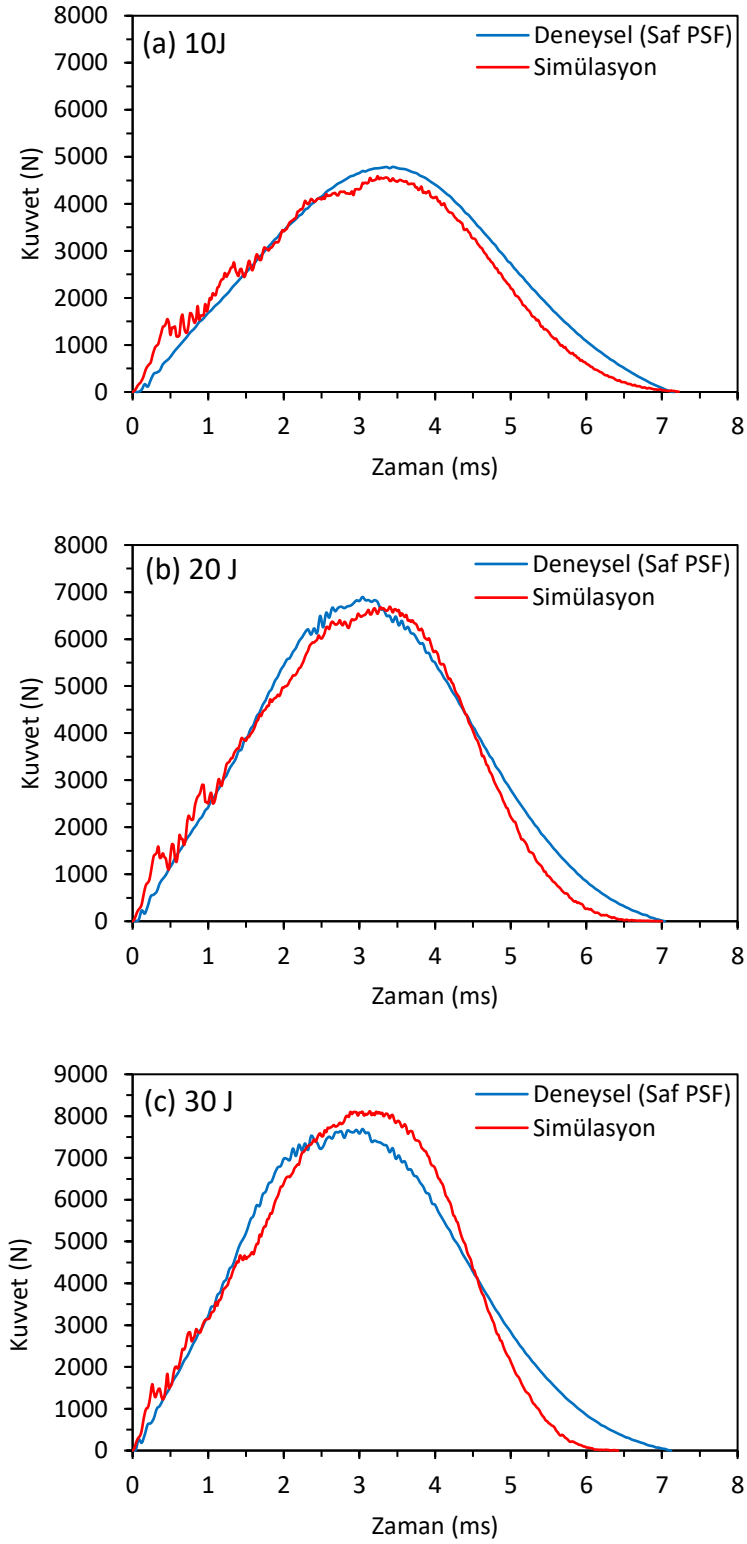
Şekil 5.29. PSF nanofiber takviyeli kompozitte 30 J enerji seviyesinde farklı zaman adımlarındaki tahmini hasar ilerlemesinin kompozit modelin alt görünüşten gösterimi: (a) Fiber yönündeki çekme hasarı, (b) matris yönündeki çekme hasarı

5.7.1. Kuvvet-zaman eğrileri

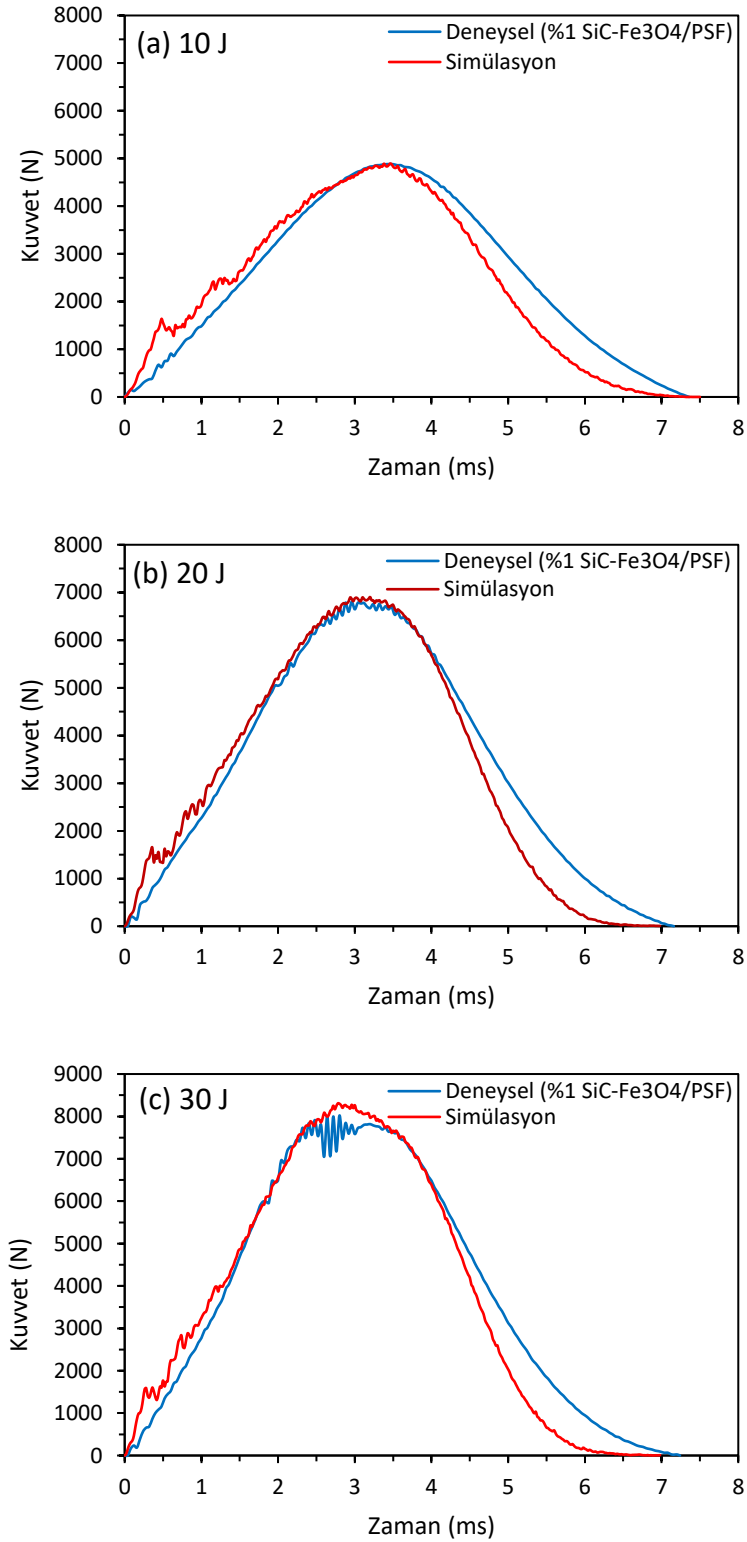
Tüm enerji seviyelerinde referans cam/epoksi, saf PSF, %1 ve %2 oranında SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhaların sırasıyla Şekil 5.30, Şekil 5.31, Şekil 5.32 ve Şekil 5.33'daki deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırmalı kuvvet-zaman eğrilerine bakıldığında sonlu elamanlar modeli genel olarak deneysel verileri çok yakın tahminlerle takip etmiştir. Her bir kompozitin modeli tüm enerji seviyelerinde deneysel sonuçlara göre darbe cevabında yükleme fazındaki ilk 0.5 ms anına kadar daha yüksek temas rijitliğine sahiptir. 0.5 ms'den sonra maksimum kuvvete kadar simülasyon sonuçları deneysel sonuçlarla uyumlu çıkmıştır. Artan enerji seviyesiyle birlikte simülasyon sonuçlarındaki temas süresi deneysel sonuçlardan daha kısa sürmüştür. 10 J enerji seviyesinde darbe cevabında deneysel verilere en uyumlu simülasyon kuvvet-zaman eğrisi Şekil 5.30a'da referans kompozitte sağlanırken, maksimum kuvvette en yakın tahmin Şekil 5.32a'da %1 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozit modeline aittir. Kuvvet-zaman eğrilerinde tüm enerji seviyelerindeki kompozitlerin darbe cevaplarının simülasyonları karşılaştırıldığında genel olarak deneysel sonuçları en yakın tahminlerle takip eden simülasyon sonuçları 20 J enerji seviyesinde Şekil 5.32b'de %1 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozitte ve Şekil 5.33b'de %2 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozitte elde edilmiştir. 30 J'lük en yüksek enerji seviyesinde modelin darbe cevabında Şekil 5.30c, Şekil 5.31c ve Şekil 5.33c'de yükleme fazında maksimum kuvvete doğru ve devamındaki geri sıçrama fazında deneysel sonuçlardan uzaklaşmalar görülse de Şekil 5.32c'deki %1 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozite ait modelin simülasyon sonuçları diğer kompozitlere göre daha uyumlu çıkmıştır.



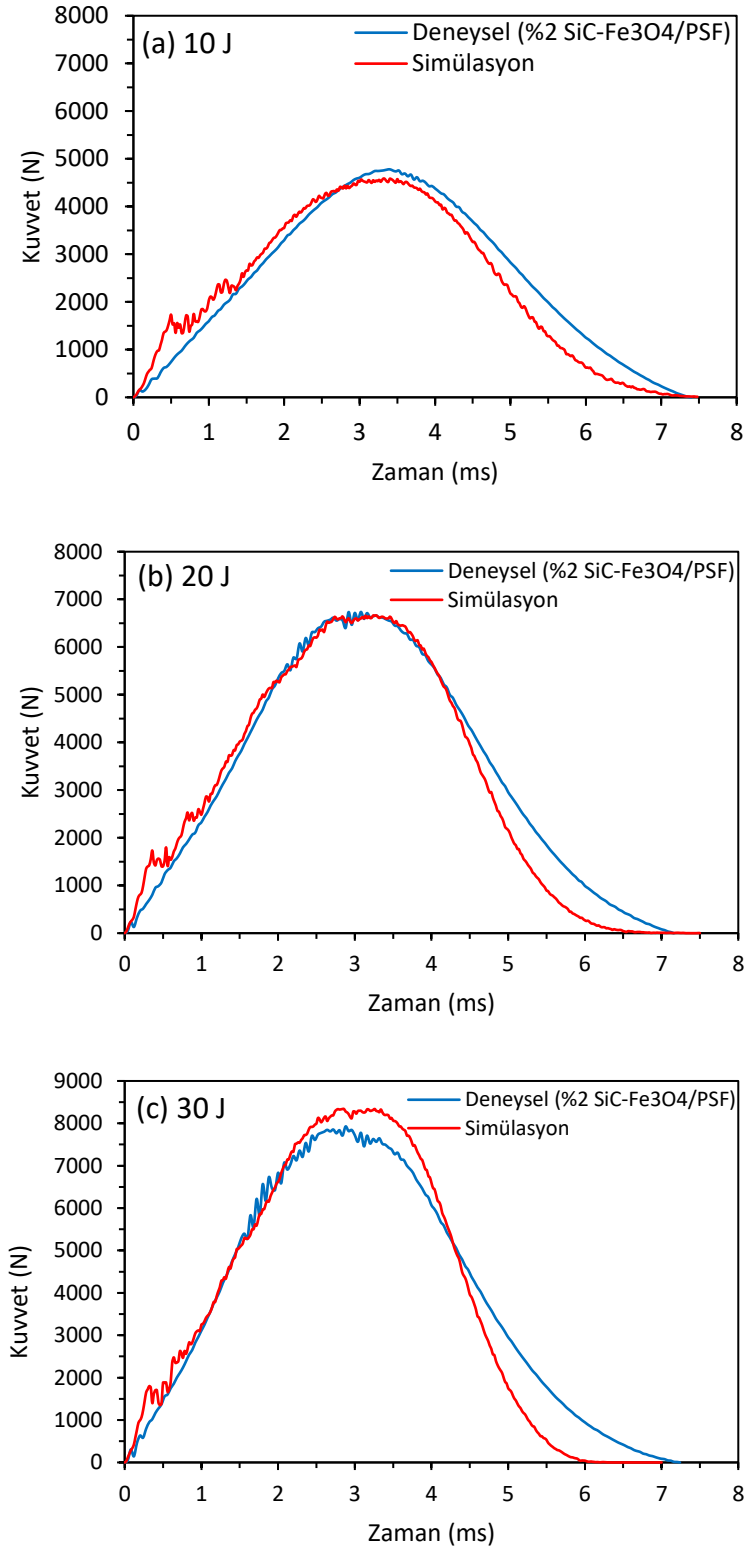
Şekil 5.30. Referans cam/epoksi kompozit levhaların 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyelerindeki düşük hızlı darbe deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırmalı kuvvet-zaman eğrileri



Şekil 5.31. Saf PSF nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhaların 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyelerindeki düşük hızlı darbe deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırmalı kuvvet-zaman eğrileri



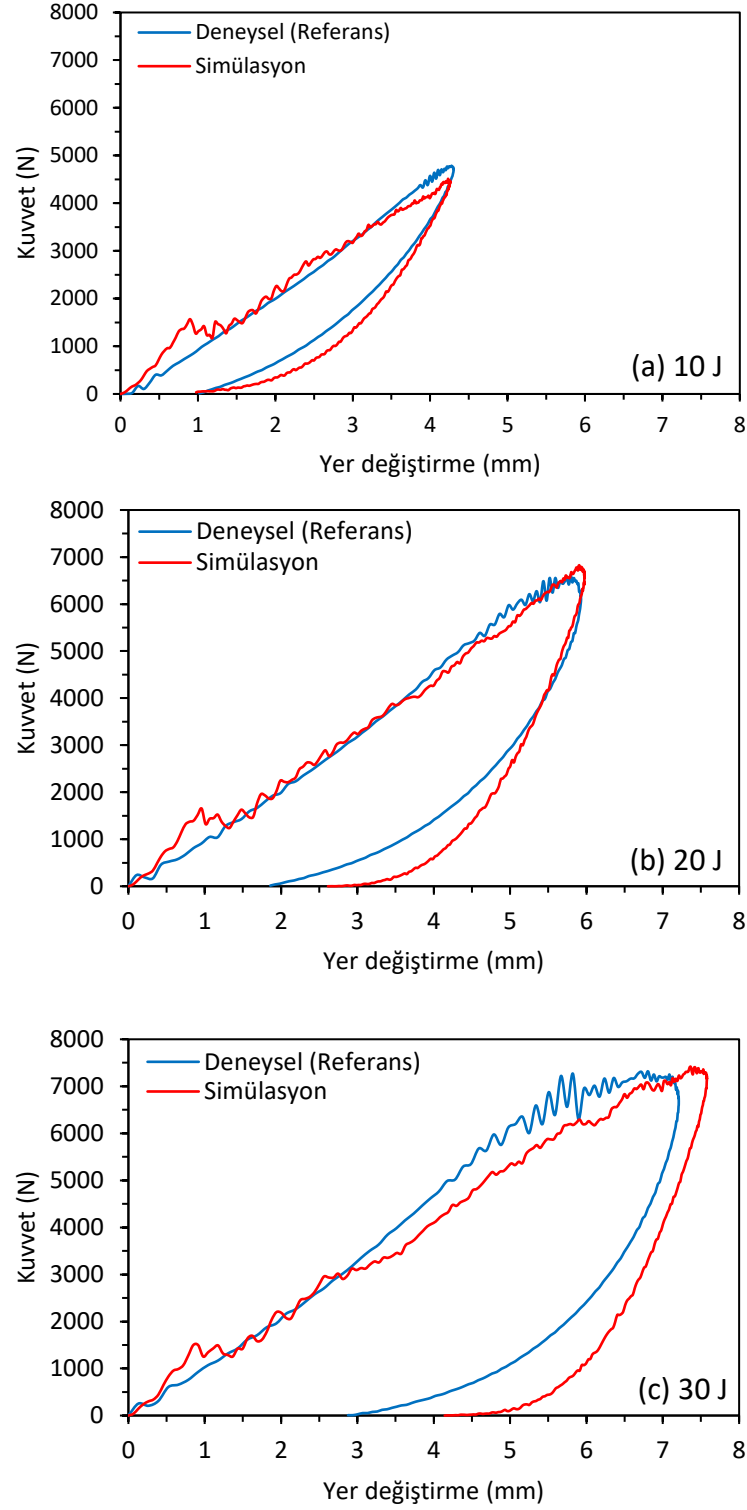
Şekil 5.32. %1 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhaların 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyelerindeki düşük hızlı darbe deneyel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırmalı kuvvet-zaman eğrileri



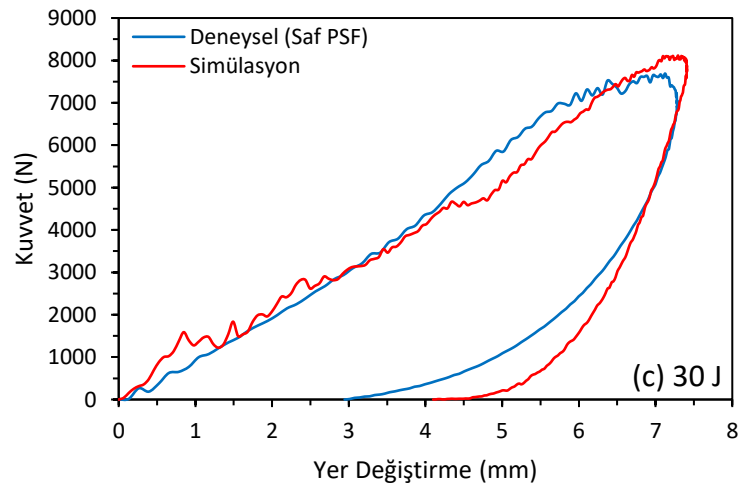
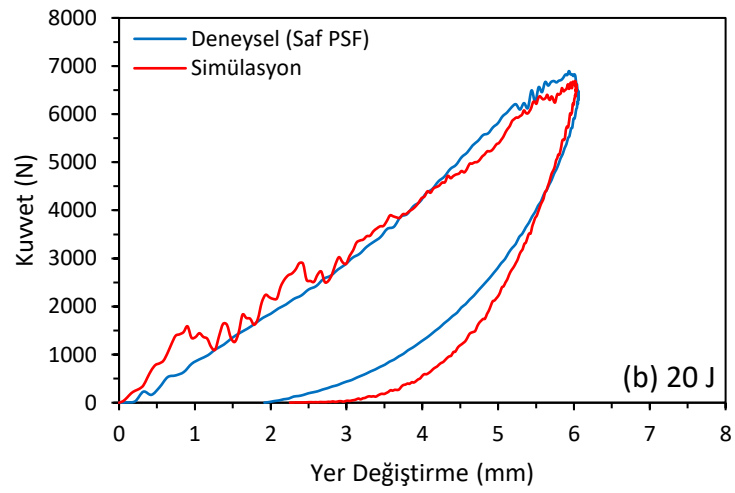
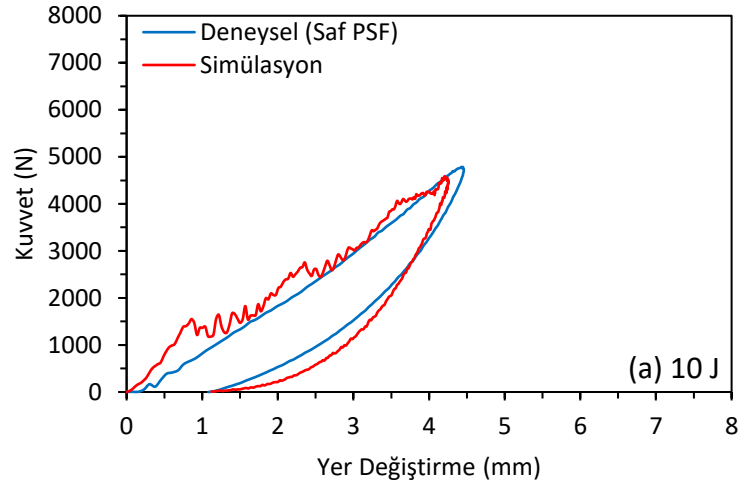
Şekil 5.33. %2 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhaların 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyelerindeki düşük hızlı darbe deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırmalı kuvvet-zaman eğrileri

5.7.2. Kuvvet-yer değiştirme eğrileri

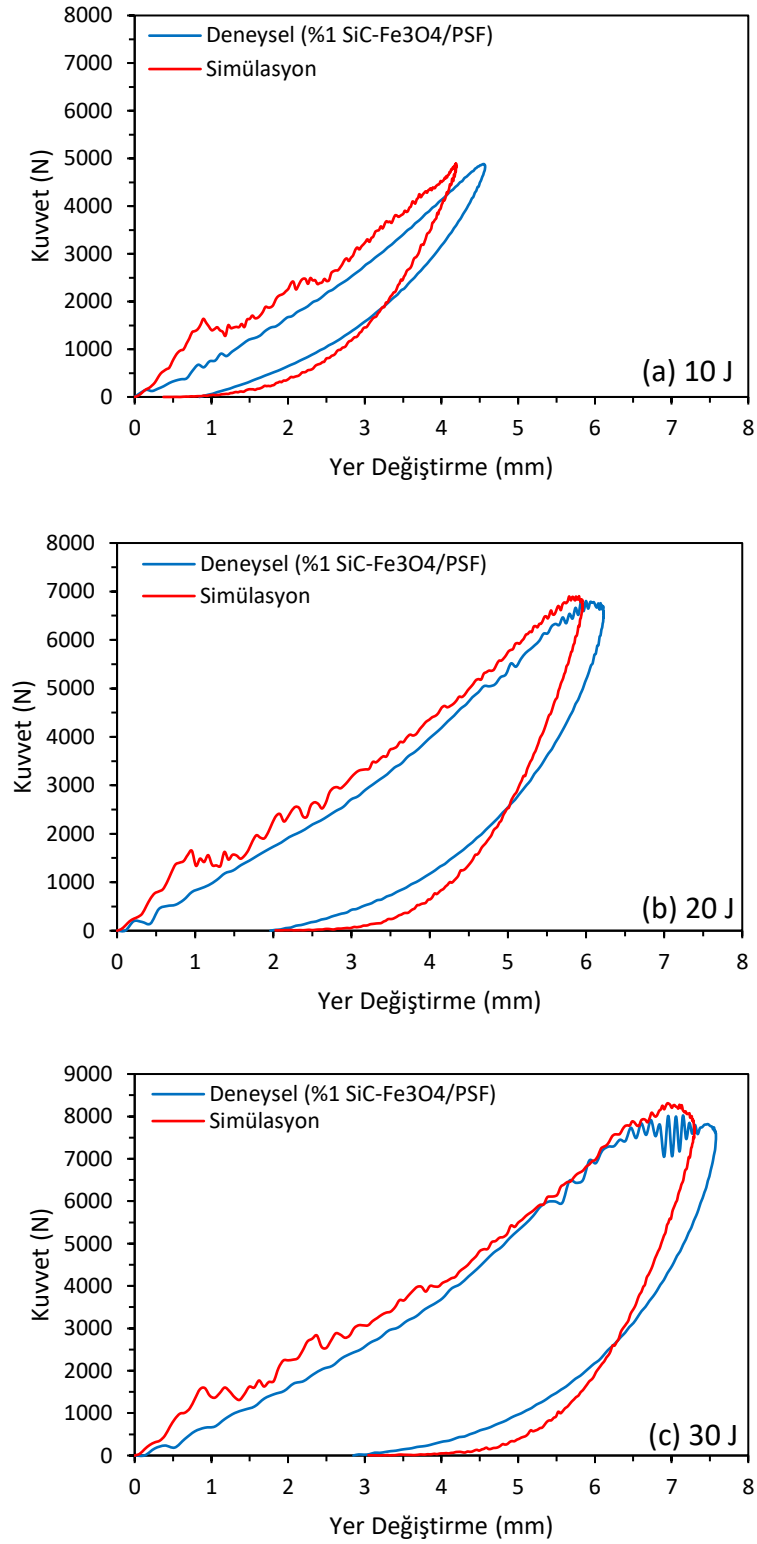
şekil 5.34, şekil 5.35, şekil 5.36 ve şekil 5.37’de sırasıyla referans cam/epoksi, saf, %1 ve %2 oranında SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhaların deneysel ve simülasyon kuvvet- yer değiştirme eğrileri gösterilmektedir. Her kompozitin sonlu elemanlar modeli tüm enerji seviyelerindeki darbe cevabında ilk başlarda deneysel verilere uyumsuz başlasa da maksimum kuvvete doğru deneysel verilere yaklaşarak yakın tahminlerle takip etmiştir. şekil 5.34a’daki referans kompozit levhanın 10 J enerji seviyesindeki ve şekil 5.35b’de saf PSF nanofiber takviyeli kompozit levhanın 20 J enerji seviyesindeki simülasyon sonuçları deneysel sonuçlara en yakın maksimum yer değiştirme tahminlerini elde etmişlerdir. Tüm enerji seviyelerinde vurucunun kompozit levhalara temas etmesinden maksimum kuvvete kadar olan yükleme fazı bölgelerindeki simülasyon sonuçları maksimum kuvvetten sıfır kuvvete kadar olan geri sıçrama fazı bölgelerindekinden deneysel verilerle daha uyumlu çıkmıştır.



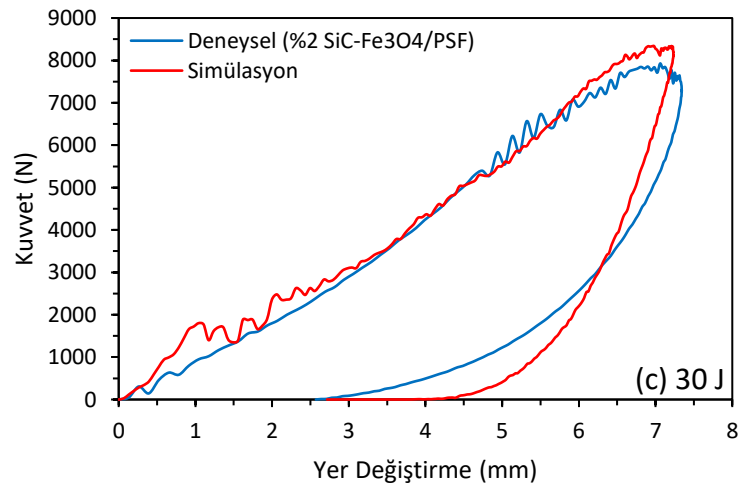
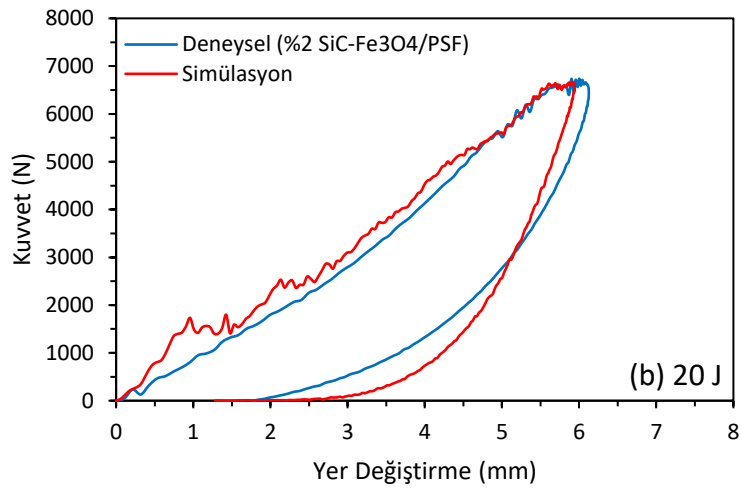
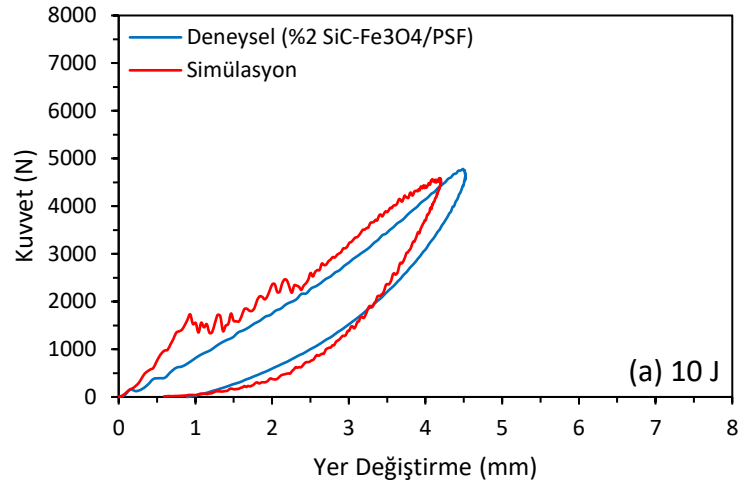
Şekil 5.34. Referans cam/epoksi kompozit levhaların 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyelerindeki düşük hızlı darbe deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırmalı kuvvet-yer değiştirme eğrileri



Şekil 5.35. Saf PSF nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhaların 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyelerindeki düşük hızlı darbe deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırmalı kuvvet-yer değiştirme eğrileri



Şekil 5.36. %1 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı hibrit PSF nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhaların 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyelerindeki düşük hızlı darbe deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırmalı kuvvet-yer değiştirme eğrileri

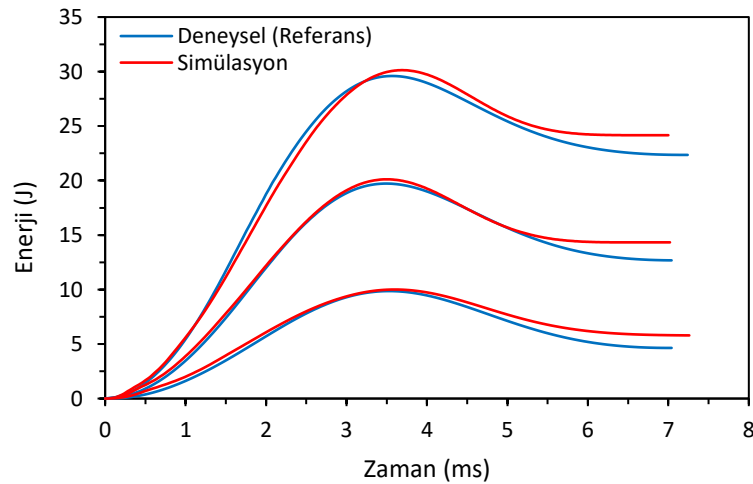


Şekil 5.37. %2 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı hibrit PSF nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhaların 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyelerindeki düşük hızlı darbe deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırmalı kuvvet-yer değiştirme eğrileri

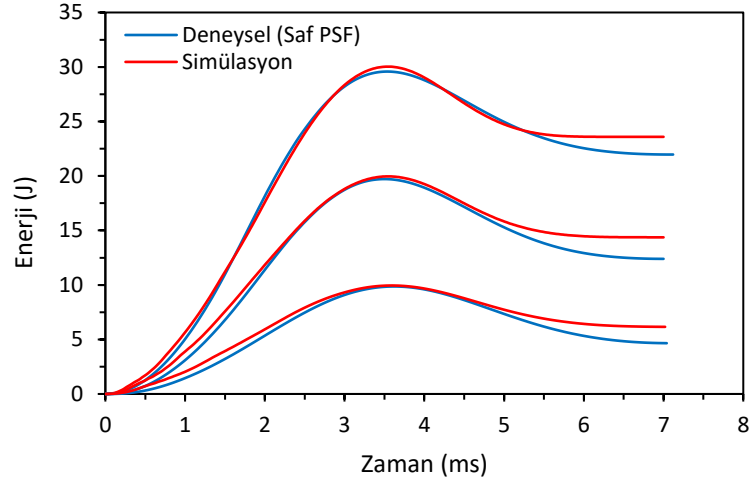
5.7.3. Enerji-zaman eğrileri

Şekil 5.38, Şekil 5.39, Şekil 5.40 ve Şekil 5.41’de sırasıyla referans cam/epoksi, saf PSF, %1 ve %2 oranında SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhalara ait enerji- zaman eğrilerinin deneysel ve simülasyon sonuçlarına bakıldığında maksimum enerjiye kadar iyi bir uyum içinde oldukları görülmektedir. Bununla birlikte, enerji zaman eğrilerinde en son zaman adımına karşılık gelen absorbe edilen enerjilere bakıldığında tüm enerji seviyelerinde her bir kompozitin sonlu elemanlar modeli deneysel sonuçlardan daha fazla enerji absorbe etmiştir. Bu durum kompozitlerin düşük hızlı darbe testlerinin simülasyonunda tabakaların birbirlerine temas algoritmasıyla bağlanması ve kabuk elemanlardan oluşan ayrı tabakaların sayısı ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Absorbe edilen enerjide deneysel sonuçlara en yakın simülasyon tahminlerine 10 J darbe enerjisinde %25.2 farkla Şekil 5.41’de gösterilen %2 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozit levhalarda, 20 J darbe enerjisinde %13.1 farkla Şekil 5.38’deki referans kompozitte ve 30 J darbe enerjisinde ise %7.4 farkla saf PSF kompozitte ulaşılmıştır. Her bir kompozit modeli için artan darbe enerjisiyle birlikte simülasyon sonuçlarındaki absorbe edilen enerji değerleri deneysel verilere yaklaşılarak gerçek test sonuçlarına en yakın orandaki sonuçlar 30 J darbe enerjisinde elde edilmiştir.

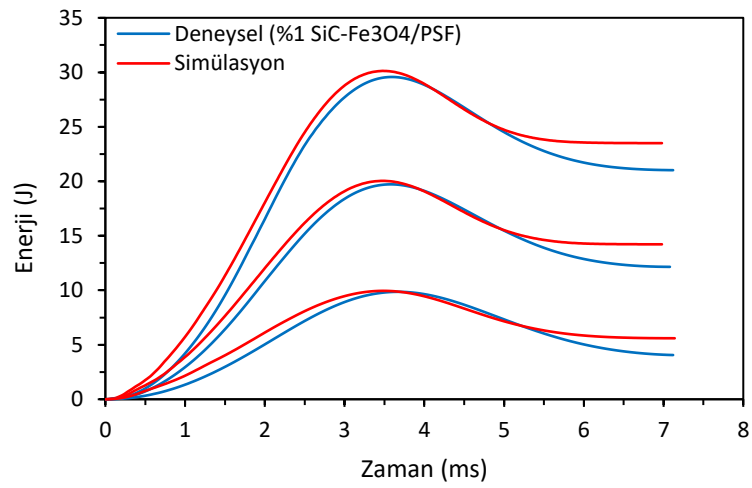
Sonuç olarak tüm enerji seviyelerindeki kuvvet-zaman, kuvvet-yer değiştirme ve enerji- zaman eğrilerinde simülasyon sonuçlarının genel eğiliminin deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğu gözlenmiştir.



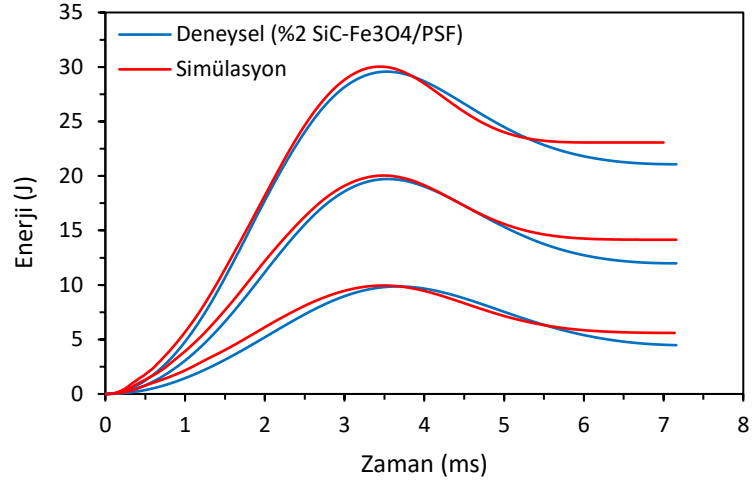
Şekil 5.38. Referans cam/epoksi kompozit levhaların 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyelerindeki düşük hızlı darbe deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırmalı enerji-zaman eğrileri



Şekil 5.39. Saf PSF nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhaların 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyelerindeki düşük hızlı darbe deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırmalı enerji-zaman eğrileri



Şekil 5.40. %1 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhaların 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyelerindeki düşük hızlı darbe deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırmalı enerji-zaman eğrileri



Şekil 5.41. %2 SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhaların 10 J, 20 J ve 30 J enerji seviyelerindeki düşük hızlı darbe deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırmalı enerji-zaman eğrileri

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmada elektroegirme yöntemiyle üretilen saf PSF ve SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı PSF nanofiber keçeler cam kumaş tabakalar arasına yerleştirilerek vakum yardımlı reçine transfer metoduyla nanofiber takviyeli cam/epoksi kompozit levhaların üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen referans (nanofiber takviyesiz) ve nanofiber takviyeli kompozit levhalar üzerinde quasi-statik mekanik testler ve düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilerek nanofiber takviyesinin ve nanofiberlere nanopartikül katkısının cam/epoksi kompozitlerde mekanik özelliklere ve darbe direncine etkileri incelenmiştir. LS-DYNA sonlu elemanlar yazılımında modellenen her bir kompozitin düşük hızlı darbe testlerinin simülasyonları gerçekleştirilerek simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumluluğu kuvvet-zaman, kuvvet-yer değiştirme ve enerji-zaman eğrilerinde kıyaslanmıştır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

- PSF nanofiberler içerisine katılan ağırlıkça %1 ve %2 oranındaki SiC-Fe₃O₄ nanopartikülleri nanofiber keçelerin çekme özelliklerini iyileştirmiştir. Saf PSF nanofiberlere ağırlıkça %1 ve %2 oranında SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkısıyla sırasıyla çekme mukavemetlerinde %5 ve %7.8, elastisite modüllerinde sırasıyla %27 ve %28.7'lik artışlar meydana gelmiştir.
- Cam/epoksi kompozitin mekanik özelliklerinde tabakalar arasına saf ve hibrit PSF nanofiber takviyeleriyle önemli değişiklikler elde edilmiştir. Referans kompozite göre nanofiber takviyeli kompozitlerde çekme, basma mukavemetleri ve tabakalar arası kayma mukavemetlerinde dikkate değer artışlar gözlenirken düzlem içi kayma mukavemetlerinde belli oranlarda düşüşler gerçekleşmiştir. Elastisite modülleri, Poisson oranları ve kayma modüllerinde ise dikkate değer değişiklikler gözlenmemiştir. Referans kompozitle kıyaslandığında, çekme mukavemetinde en yüksek artış %10.5 oranında saf PSF nanofiber takviyeli kompozitte, basma mukavemetinde en yüksek artışlar yaklaşık %26 oranında saf PSF ve %1 SiC-Fe₃O₄/PSF hibrit nanofiber takviyeli kompozitlerde gerçekleşmiştir. %2 SiC-Fe₃O₄/PSF hibrit nanofiber takviyeli kompozitte tabakalar arası kayma mukavemetinde %12.4 artışla en iyi iyileşme sağlanırken, düzlem içi kayma mukavemetinde ise %14.6 oranında en büyük düşüş gözlenmiştir. Çekme ve basma

testlerinde nanofiber takviyeli kompozitler kırılma anına kadar referans kompozite göre hem mukavemet artışı sağlamışlar hem de daha fazla kopma uzaması gerçekleştirerek cam/epoksi kompozite tokluk kazandırmışlardır.

- PSF nanofiberlerin cam/epoksi kompozitlerin yoğunluğu, cam fiber hacim oranı, levha kalınlığı gibi fiziksel özelliklerinde önemli bir değişikliğe sebep olduğu gözlenmemiştir.
- Üç farklı enerji seviyesinde gerçekleştirilen darbe testleri sonucu elde edilen kuvvet-zaman, kuvvet-yer değiştirme ve enerji-zaman eğrileri ayrı ayrı incelenerek referans kompozite göre nanofiber takviyeli kompozitlerin darbe davranışına etkileri kıyaslanmıştır. Kuvvet-zaman eğrilerindeki her bir kompozite ait yükleme fazında kritik bir değer olarak hasar başlangıcını ifade eden darbe hasar eşik kuvvetinde referans kompozite kıyasla nanofiber takviyeli kompozitlerde önemli değişiklikler gözlenmiştir. 10 J enerji seviyesinde saf PSF ve %2 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozitte kısmi artışlar gözlenirken, %1 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozitte ise bu enerji seviyesinde darbe hasarı eşik kuvveti değerine ulaşamadığı için tespit edilememiştir. Saf PSF nanofiberli kompozitlerde 20 J ve 30 J enerji seviyelerinde sırasıyla %15 ve %23 ile en yüksek darbe hasar eşik kuvveti artışı sağlanırken, 30 J enerji seviyesinde %2 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozitte %5.2 düşüş gözlenmiştir. Kompozit numunenin darbe yükü taşıma kapasitesi olarak ifade edilen maksimum kuvvet değerleri artan darbe enerjisiyle birlikte atmıştır. Referans kompozite kıyasla en dikkate değer artış 30 J enerji seviyesinde sağlanarak saf PSF, %1 SiC-Fe₃O₄/PSF ve %2 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozitlerde sırasıyla %5, %9.5 ve %8.2 oranlarında maksimum kuvvet artışı gözlenmiştir.
- Kuvvet-yer değiştirme eğrilerinde tüm enerji seviyelerinde nanofiber takviyeli kompozitlerin referans kompozite kıyasla daha düşük eğilme rijitliğine ve daha fazla maksimum yer değiştirme değerlerine sahip oldukları gözlenmiştir. En fazla maksimum yer değiştirme tüm enerji seviyelerinde %1 SiC-Fe₃O₄/PSF hibrit nanofiber takviyeli kompozitte meydana gelmiştir.
- Enerji-zaman eğrilerinde artan darbe enerji seviyeleriyle birlikte saf ve nanopartikül katkılı PSF nanofiber takviyesinin cam/epoksi kompozitlerde daha az enerji absorbe ederek darbe hasar direncini arttırdığı belirlenmiştir. 30 J enerji seviyelerinde saf PSF nanofiber takviyeli kompozitte absorbe edilen enerjide %1.7'lik kısmi düşüş gözlenirken, SiC-Fe₃O₄/PSF hibrit nanofiberli kompozitler yaklaşık %6 daha az enerji

absorbe etmişlerdir. SiC-Fe₃O₄ nanopartikül katkılı hibrit PSF nanofiber takviyeli kompozitlerde saf PSF nanofiber takviyeli kompozite kıyasla daha yüksek darbe direnci artışı sağlanmıştır.

- Düşük hızlı darbe testleri sonrası kompozit numunelerin arka yüzeylerindeki hasar alanları ölçülerek artan darbe enerjisiyle referans kompozite göre nanofiber takviyeli kompozitlerin ciddi oranda daha az hasar aldıkları tespit edilmiştir. Özellikle 20 J ve 30 J enerji seviyelerinde referans kompozite kıyasla %1 SiC-Fe₃O₄/PSF nanofiber takviyeli kompozit numunelerde fiber kırılma alanları yaklaşık olarak ortalama %38 oranında azalarak en iyi darbe direnci elde edilmiştir.
- Her bir kompozitin düşük hızlı darbe davranışının modellenmesinde kuvvet-zaman, kuvvet- yer değiştirme ve enerji-zaman eğrilerinin sonlu elemanlar simülasyon sonuçları, deneysel sonuçları genel olarak yakın tahminlerle takip ederek iyi bir uyum sağlamıştır. Kuvvet-zaman eğrilerinde tüm enerji seviyelerindeki kompozitlerin darbe cevaplarının simülasyonları birbirleriyle karşılaştırıldığında genel olarak deneysel sonuçları en yakın tahminlerle takip eden simülasyon sonuçları 20 J enerji seviyesinde %1 SiC/Fe₃O₄/PSF kompozitte ve %2 SiC-Fe₃O₄/PSF kompozitte elde edilmiştir. Kuvvet-yer değiştirme eğrileri karşılaştırıldığında referans kompozitin 10 J enerji seviyesindeki ve saf PSF nanofiber takviyeli kompozitin 20 J enerji seviyesindeki simülasyon sonuçlarında ise deneysel sonuçlara en yakın maksimum yer değiştirme tahminleri elde edilmiştir. Absorbe edilen enerjide deneysel sonuçlara en yakın simülasyon tahminlerine 10 J darbe enerjisinde %25.2 farkla %2 SiC/Fe₃O₄/PSF kompozitte, 20 J darbe enerjisinde %13.1 farkla referans kompozitte ve 30 J darbe enerjisinde ise %7.4 farkla saf PSF kompozitte ulaşılmıştır. Her bir kompozit modeli için artan darbe enerjisiyle birlikte simülasyon sonuçlarındaki absorbe edilen enerji değerleri deneysel verilere yaklaşarak gerçek test sonuçlarına en yakın orandaki sonuçlar 30 J darbe enerjisinde elde edilmiştir.

6.2. Öneriler

Sonraki çalışmalarda PSF nanofiberlere daha yüksek oranlarda ve farklı nanopartikül katkıları eklenerek PSF nanofiberlerin çaplarına ve morfolojilerine etkileri ile çekme özelliklerine etkileri daha detaylı olarak incelenebilir. Cam/epoksi kompozitlere ek olarak karbon/epoksi veya cam-karbon/epoksi hibrit kompozitler nanofiberlerle takviyelendirilerek nanofiberlerin daha yüksek enerji seviyelerinde ve

farklı ortam sıcaklıklardaki darbe direnci etkileri araştırılabilir. Ayrıca farklı şekil ve çaplara sahip vurucular kullanılmasıyla nanofiber takviyeli kompozitlerin aynı enerji seviyesindeki farklı vuruculara verdikleri düşük hızlı darbe tepkileri incelenebilir.



KAYNAKLAR

- ASTM D3518 / D3518M-94(2001). Standard test method for in-plane shear response of polymer matrix composite materials by tensile test of a $\pm 45^\circ$ laminate. West Conshohocken, PA, ASTM International.
- ASTM D2584-02. Standard test method for ignition loss of cured reinforced resins. West Conshohocken, PA, ASTM International.
- ASTM D3846-02. Standard test method for in-plane shear strength of reinforced plastics. West Conshohocken, PA, ASTM International.
- ASTM D695-15. Standard test method for compressive properties of rigid plastics. West Conshohocken, PA, ASTM International.
- ASTM D3039 / D3039M-00. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. West Conshohocken, PA, ASTM International.
- Abrate, S., 2011, Impact engineering of composite structures, Springer Science & Business Media, p.
- Ahmad, F., Abbassi, F., Park, M. K., Jung, J.-W. ve Hong, J.-W., 2018, Finite element analysis for the evaluation of the low-velocity impact response of a composite plate, *Advanced Composite Materials*, 28 (3), 271-285.
- Akangah, P., Lingaiah, S. ve Shivakumar, K., 2010, Effect of Nylon-66 nano-fiber interleaving on impact damage resistance of epoxy/carbon fiber composite laminates, *Composite Structures*, 92 (6), 1432-1439.
- Akangah, P. ve Shivakumar, K., 2012, Impact Damage Resistance and Tolerance of Polymer Nanofiber Interleaved Composite Laminates. 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA.
- Aslan, Z., Karakuzu, R. ve Okutan, B., 2003, The response of laminated composite plates under low-velocity impact loading, *Composite Structures*, 59 (1), 119-127.
- Atas, C. ve Sevim, C., 2010, On the impact response of sandwich composites with cores of balsa wood and PVC foam, *Composite Structures*, 93 (1), 40-48.
- Aymerich, F., Dore, F. ve Priolo, P., 2009, Simulation of multiple delaminations in impacted cross-ply laminates using a finite element model based on cohesive interface elements, *Composites Science and Technology*, 69 (11-12), 1699-1709.
- Ayutsede, J., Gandhi, M., Sukigara, S., Micklus, M., Chen, H.-E. ve Ko, F., 2005, Regeneration of Bombyx mori silk by electrospinning. Part 3: characterization of electrospun nonwoven mat, *Polymer*, 46 (5), 1625-1634.
- Balasubramanian, M., 2013, Composite materials and processing, CRC press, p.
- Batra, R. C., Gopinath, G. ve Zheng, J. Q., 2012, Damage and failure in low energy impact of fiber-reinforced polymeric composite laminates, *Composite Structures*, 94 (2), 540-547.
- Berk, B., Karakuzu, R., Murat Icten, B., Arikan, V., Arman, Y., Atas, C. ve Goren, A., 2016, An experimental and numerical investigation on low velocity impact behavior of composite plates, *Journal of Composite Materials*, 50 (25), 3551-3559.
- Beylergil, B., Tanoğlu, M. ve Aktaş, E., 2017, Enhancement of interlaminar fracture toughness of carbon fiber-epoxy composites using polyamide-6,6 electrospun nanofibers, *Journal of Applied Polymer Science*, 134 (35).
- Beylergil, B., Tanoğlu, M. ve Aktaş, E., 2016, Modification of Carbon Fibre/Epoxy Composites by Polyvinyl Alcohol (PVA) Based Electrospun Nanofibres, *Advanced Composites Letters*, 25 (3), 69-76.

- Bhardwaj, N. ve Kundu, S. C., 2010, Electrospinning: a fascinating fiber fabrication technique, *Biotechnol Adv*, 28 (3), 325-347.
- Campbell, F. C., 2010, Structural composite materials, ASM international, p.
- Carlsson, L. A., Adams, D. F. ve Pipes, R. B., 2014, Experimental Characterization of Advanced Composite Materials, CRC Press, p.
- Chandekar, G. S., Thatte, B. S. ve Kelkar, A. D., 2010, On the behavior of fiberglass epoxy composites under low velocity impact loading, *Advances in Mechanical Engineering*, 2, 621406.
- Chang, F.-K. ve Chang, K.-Y., 1987, A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations, *Journal of Composite Materials*, 21 (9), 834-855.
- Chawla, K. K., 2012, Composite materials: science and engineering, Springer Science & Business Media, p.
- Cherniaev, A., Pavlova, S., Pavlov, A. ve Komarov, V., 2020, Prediction of Load-Bearing Capacity of Composite Parts with Low-Velocity Impact Damage: Identification of Intra- and Inter-Ply Constitutive Models, *Applied Mechanics*, 1 (1), 59-78.
- Daelemans, L., van der Heijden, S., De Baere, I., Rahier, H., Van Paepegem, W. ve De Clerck, K., 2015, Nanofibre bridging as a toughening mechanism in carbon/epoxy composite laminates interleaved with electrospun polyamide nanofibrous veils, *Composites Science and Technology*, 117, 244-256.
- Daelemans, L., van der Heijden, S., De Baere, I., Rahier, H., Van Paepegem, W. ve De Clerck, K., 2016, Damage-Resistant Composites Using Electrospun Nanofibers: A Multiscale Analysis of the Toughening Mechanisms, *ACS Appl Mater Interfaces*, 8 (18), 11806-11818.
- Daelemans, L., Cohades, A., Meireman, T., Beckx, J., Spronk, S., Kersemans, M., De Baere, I., Rahier, H., Michaud, V., Van Paepegem, W. ve De Clerck, K., 2018, Electrospun nanofibrous interleaves for improved low velocity impact resistance of glass fibre reinforced composite laminates, *Materials & Design*, 141, 170-184.
- Daelemans, L., Van Paepegem, W. ve De Clerck, K., 2020, Chapter 11 - Effect of interleaved polymer nanofibers on the properties of glass and carbon fiber composites, In: *Fiber-Reinforced Nanocomposites: Fundamentals and Applications*, Eds: Han, B., Sharma, S., Nguyen, T. A., Longbiao, L. ve Bhat, K. S.: Elsevier, p. 235-260.
- De Schoenmaker, B., Van der Heijden, S., De Baere, I., Van Paepegem, W. ve De Clerck, K., 2013, Effect of electrospun polyamide 6 nanofibres on the mechanical properties of a glass fibre/epoxy composite, *Polymer Testing*, 32 (8), 1495-1501.
- Demir, M. M., Yilgor, I., Yilgor, E. ve Erman, B., 2002, Electrospinning of polyurethane fibers, *Polymer*, 43 (11), 3303-3309.
- Dzenis, Y. ve Reneker, D., 2001, Delamination resistant composites prepared by small fibre reinforcement at ply interfaces, *Patent US6265333 B*, 1.
- Dzenis, Y., 2008, Structural Nanocomposites, *Science*, 319 (5862), 419-420.
- Ekrem, M., Özten, Ü. ve Şahin, Ö. S., 2021, Production and Thermal Characterization of MWCNT Reinforced Polimethyl Methacrylate (PMMA) Nanofibers by Electrospinning, *Journal of New Technology and Materials (JNTM)*, 11, 33-38.
- Eskizeybek, V., Yar, A. ve Avcı, A., 2018, CNT-PAN hybrid nanofibrous mat interleaved carbon/epoxy laminates with improved Mode I interlaminar fracture toughness, *Composites Science and Technology*, 157, 30-39.
- Feng, D. ve Aymerich, F., 2014, Finite element modelling of damage induced by low-velocity impact on composite laminates, *Composite Structures*, 108, 161-171.

- Feraboli, P., Wade, B., Deleo, F., Rassaian, M., Higgins, M. ve Byar, A., 2011, LS-DYNA MAT54 modeling of the axial crushing of a composite tape sinusoidal specimen, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (11), 1809-1825.
- Fong, H., Chun, I. ve Reneker, D. H., 1999, Beaded nanofibers formed during electrospinning, *Polymer*, 40 (16), 4585-4592.
- Formhals, A., 1934, Process and Apparatus for Preparing Artificial Threads. Patent, U. S. 1975504.
- Fragassa, C., Vannucchi de Camargo, F., Pavlovic, A. ve Minak, G., 2019, Explicit numerical modeling assessment of basalt reinforced composites for low-velocity impact, *Composites Part B: Engineering*, 163, 522-535.
- Francesconi, L. ve Aymerich, F., 2017, Numerical simulation of the effect of stitching on the delamination resistance of laminated composites subjected to low-velocity impact, *Composite Structures*, 159, 110-120.
- Garnich, M. R. ve Akula, V. M., 2009, Review of degradation models for progressive failure analysis of fiber reinforced polymer composites, *Applied Mechanics Reviews*, 62 (1).
- Goodarz, M., Bahrami, S. H., Sadighi, M. ve Saber-Samandari, S., 2019, Low-velocity impact performance of nanofiber-interlayered aramid/epoxy nanocomposites, *Composites Part B: Engineering*, 173, 106975.
- Haider, A., Haider, S. ve Kang, I.-K., 2015, A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology, *Arabian Journal of Chemistry*.
- Hallquist, J. O., 2006, LS-DYNA theory manual, *Livermore software Technology corporation*.
- Hashin, Z. ve Rotem, A., 1973, A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials, *Journal of Composite Materials*, 7 (4), 448-464.
- Hashin, Z., 1980, Failure criteria for unidirectional fiber composites, *Journal of applied mechanics*, 47 (2), 329-334.
- Hassan, M., Naderi, S. ve Bushroa, A., 2014, Low-velocity impact damage of woven fabric composites: Finite element simulation and experimental verification, *Materials & Design*, 53, 706-718.
- Heimbs, S., Heller, S., Middendorf, P., Hähnel, F. ve Weiße, J., 2009, Low velocity impact on CFRP plates with compressive preload: test and modelling, *International Journal of Impact Engineering*, 36 (10-11), 1182-1193.
- Hoffman, O., 1967, The Brittle Strength of Orthotropic Materials, *Journal of Composite Materials*, 1 (2), 200-206.
- Hojo, M., Matsuda, S., Tanaka, M., Ochiai, S. ve Murakami, A., 2006, Mode I delamination fatigue properties of interlayer-toughened CF/epoxy laminates, *Composites Science and Technology*, 66 (5), 665-675.
- Huang, Z.-M., Zhang, Y. Z., Kotaki, M. ve Ramakrishna, S., 2003, A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites, *Composites Science and Technology*, 63 (15), 2223-2253.
- Jiang, H., Ren, Y., Liu, Z., Zhang, S. ve Wang, X., 2018, Evaluations of failure initiation criteria for predicting damages of composite structures under crushing loading, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 37 (21), 1279-1303.
- Jung, K.-H., Kim, D.-H., Kim, H.-J., Park, S.-H., Jhang, K.-Y. ve Kim, H.-S., 2017, Finite element analysis of a low-velocity impact test for glass fiber-reinforced polypropylene composites considering mixed-mode interlaminar fracture toughness, *Composite Structures*, 160, 446-456.

- Kar, K. K., 2016, Composite materials: processing, applications, characterizations, Springer, p.
- Karakuzu, R., Erbil, E. ve Aktas, M., 2010, Impact characterization of glass/epoxy composite plates: An experimental and numerical study, *Composites Part B: Engineering*, 41 (5), 388-395.
- Katti, D. S., Robinson, K. W., Ko, F. K. ve Laurencin, C. T., 2004, Bioresorbable nanofiber-based systems for wound healing and drug delivery: optimization of fabrication parameters, *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 70 (2), 286-296.
- Koski, A., Yim, K. ve Shivkumar, S., 2004, Effect of molecular weight on fibrous PVA produced by electrospinning, *Materials Letters*, 58 (3), 493-497.
- Kurşun, A., Şenel, M. ve Enginsoy, H. M., 2015, Experimental and numerical analysis of low velocity impact on a preloaded composite plate, *Advances in Engineering Software*, 90, 41-52.
- Lamastra, F., Bianco, A., Meriggi, A., Montesperelli, G., Nanni, F. ve Gusmano, G., 2008, Nanohybrid PVA/ZrO₂ and PVA/Al₂O₃ electrospun mats, *Chemical Engineering Journal*, 145 (1), 169-175.
- Li, G., Li, P., Yu, Y., Jia, X., Zhang, S., Yang, X. ve Ryu, S., 2008a, Novel carbon fiber/epoxy composite toughened by electrospun polysulfone nanofibers, *Materials Letters*, 62 (3), 511-514.
- Li, G., Li, P., Zhang, C., Yu, Y., Liu, H., Zhang, S., Jia, X., Yang, X., Xue, Z. ve Ryu, S., 2008b, Inhomogeneous toughening of carbon fiber/epoxy composite using electrospun polysulfone nanofibrous membranes by in situ phase separation, *Composites Science and Technology*, 68 (3-4), 987-994.
- Li, P., Liu, D., Zhu, B., Li, B., Jia, X., Wang, L., Li, G. ve Yang, X., 2015, Synchronous effects of multiscale reinforced and toughened CFRP composites by MWNTs-EP/PSF hybrid nanofibers with preferred orientation, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 68, 72-80.
- Li, Z. ve Wang, C., 2013, One-Dimensional nanostructures: Electrospinning Technique and Unique Nanofibers, Springer Berlin Heidelberg, p.
- Lisle, T., Bouvet, C., Pastor, M. L., Rouault, T. ve Marguerès, P., 2015, Damage of woven composite under tensile and shear stress using infrared thermography and micrographic cuts, *Journal of Materials Science*, 50 (18), 6154-6170.
- Liu, F., Guo, R., Shen, M., Wang, S. ve Shi, X., 2009, Effect of Processing Variables on the Morphology of Electrospun Poly[(lactic acid)-co-(glycolic acid)] Nanofibers, *Macromolecular Materials and Engineering*, 294 (10), 666-672.
- Lou, L., Yu, W., Kendall, R. J., Smith, E. ve Ramkumar, S. S., 2020, Tensile testing and fracture mechanism analysis of polyvinyl alcohol nanofibrous webs, *Journal of Applied Polymer Science*, 137 (30).
- LS-DYNA, L., 2007, Keyword user's manual, *Livermore software Technology corporation*, 971.
- Maio, L., Monaco, E., Ricci, F. ve Lecce, L., 2013, Simulation of low velocity impact on composite laminates with progressive failure analysis, *Composite Structures*, 103, 75-85.
- Mallick, P. K., 2007, Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design, CRC press, p.
- Matabola, K. ve Moutloali, R., 2013, The influence of electrospinning parameters on the morphology and diameter of poly (vinylidene fluoride) nanofibers-effect of sodium chloride, *Journal of Materials Science*, 48 (16), 5475-5482.

- Matthews, F. L. ve Rawlings, R. D., 1999, Composite materials: engineering and science, Elsevier, p.
- Megelski, S., Stephens, J. S., Chase, D. B. ve Rabolt, J. F., 2002, Micro- and Nanostructured Surface Morphology on Electrospun Polymer Fibers, *Macromolecules*, 35 (22), 8456-8466.
- Menna, C., Asprone, D., Caprino, G., Lopresto, V. ve Prota, A., 2011, Numerical simulation of impact tests on GFRP composite laminates, *International Journal of Impact Engineering*, 38 (8-9), 677-685.
- Metin, F. ve Avcı, A., 2021, In-plane quasi-static and out-of-plane dynamic behavior of nanofiber interleaved glass/epoxy composites and finite element simulation, *Composite Structures*, 270, 114085.
- Mit-uppatham, C., Nithitanakul, M. ve Supaphol, P., 2004, Ultrafine Electrospun Polyamide-6 Fibers: Effect of Solution Conditions on Morphology and Average Fiber Diameter, *Macromolecular Chemistry and Physics*, 205 (17), 2327-2338.
- Mohammadzadehmoghadam, S., Dong, Y. ve Jeffery Davies, I., 2015, Recent progress in electrospun nanofibers: Reinforcement effect and mechanical performance, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 53 (17), 1171-1212.
- Molnár, K., Mészáros, L. ve Košťáková, E., 2014, The effect of needleless electrospun nanofibrous interleaves on mechanical properties of carbon fabrics/epoxy laminates, *Express Polymer Letters*, 8 (1), 62-72.
- Mouritz, A. P., 2012, Introduction to Aerospace Materials, Elsevier Science, p.
- Nash, N., McGrail, T., Young, T. ve Stanley, W., 2015, Inclusion of a Thermoplastic Phase to Improve Impact and Post-Impact Performance of Carbon Fibre Reinforced Thermosetting Composites - A Review, *Materials and Design*, 85, 582-597.
- Olsson, R., 2012, Modelling of impact damage zones in composite laminates for strength after impact, *The Aeronautical Journal*, 116 (1186), 1349-1365.
- Palazzetti, R., Zucchelli, A. ve Trendafilova, I., 2013, The self-reinforcing effect of Nylon 6,6 nano-fibres on CFRP laminates subjected to low velocity impact, *Composite Structures*, 106, 661-671.
- Palazzetti, R. ve Zucchelli, A., 2017, Electrospun nanofibers as reinforcement for composite laminates materials – A review, *Composite Structures*, 182, 711-727.
- Phong, N. T., Gabr, M. H., Okubo, K., Chuong, B. ve Fujii, T., 2013, Improvement in the mechanical performances of carbon fiber/epoxy composite with addition of nano-(Polyvinyl alcohol) fibers, *Composite Structures*, 99, 380-387.
- Pillay, V., Dott, C., Choonara, Y. E., Tyagi, C., Tomar, L., Kumar, P., du Toit, L. C. ve Ndesendo, V. M. K., 2013, A Review of the Effect of Processing Variables on the Fabrication of Electrospun Nanofibers for Drug Delivery Applications, *Journal of Nanomaterials*, 2013, 22.
- Puck, A. ve Schürmann, H., 2002, Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models, *Composites Science and Technology*, 62 (12), 1633-1662.
- Ramakrishna, S., 2005, An Introduction to Electrospinning and Nanofibers, World Scientific, p.
- Rao, C. L., Narayanamurthy, V. ve Simha, K., 2016, Applied impact mechanics, John Wiley & Sons, p.
- Richardson, M. ve Wisheart, M., 1996, Review of low-velocity impact properties of composite materials, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 27 (12), 1123-1131.

- Saghafi, H., Palazzetti, R., Zucchelli, Z. ve Minak, G., 2013, Impact response of glass/epoxy laminate interleaved with nanofibrous mats, *Engineering Solid Mechanics*, 85-90.
- Saghafi, H., Brugo, T., Minak, G. ve Zucchelli, A., 2015a, Improvement the impact damage resistance of composite materials by interleaving Polycaprolactone nanofibers, *Engineering Solid Mechanics*, 3 (1), 21-26.
- Saghafi, H., Brugo, T., Minak, G. ve Zucchelli, A., 2015b, The effect of PVDF nanofibers on mode-I fracture toughness of composite materials, *Composites Part B: Engineering*, 72, 213-216.
- Saghafi, H., Palazzetti, R., Zucchelli, A. ve Minak, G., 2015c, Influence of electrospun nanofibers on the interlaminar properties of unidirectional epoxy resin/glass fiber composite laminates, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34 (11), 907-914.
- Saghafi, H., Ghaffarian, S. R., Salimi-Majd, D. ve Saghafi, H. A., 2017, Investigation of interleaf sequence effects on impact delamination of nano-modified woven composite laminates using cohesive zone model, *Composite Structures*, 166, 49-56.
- Saghafi, H., Minak, G., Zucchelli, A., Brugo, T. M. ve Heidary, H., 2019, Comparing various toughening mechanisms occurred in nanomodified laminates under impact loading, *Composites Part B: Engineering*, 174, 106964.
- Satthiyaraju, M. ve Ramesh, T., 2019, Nanomechanical, Mechanical Responses and Characterization of Piezoelectric Nanoparticle-Modified Electrospun PVDF Nanofibrous Films, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44 (6), 5697-5709.
- Schoeppner, G. A. ve Abrate, S., 2000, Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31 (9), 903-915.
- Selver, E., Dalfi, H. ve Yousaf, Z., 2020, Investigation of the impact and post-impact behaviour of glass and glass/natural fibre hybrid composites made with various stacking sequences: Experimental and theoretical analysis, *Journal of Industrial Textiles*.
- Sevkat, E., Liaw, B., Delale, F. ve Raju, B. B., 2009, Drop-weight impact of plain-woven hybrid glass-graphite/toughened epoxy composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40 (8), 1090-1110.
- Sevkat, E., Liaw, B. ve Delale, F., 2013, Drop-weight impact response of hybrid composites impacted by impactor of various geometries, *Materials & Design (1980-2015)*, 52, 67-77.
- Shi, Y., Swait, T. ve Soutis, C., 2012, Modelling damage evolution in composite laminates subjected to low velocity impact, *Composite Structures*, 94 (9), 2902-2913.
- Shivakumar, K., Lingaiah, S., Chen, H., Akangah, P., Swaminathan, G. ve Russell, L., 2009, Polymer nanofabric interleaved composite laminates, *AIAA journal*, 47 (7), 1723-1729.
- Shivakumar, K. N., Panduranga, R. ve Sharpe, M., 2013, Interleaved Polymer Matrix Composites - A Review. 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference.
- Silberschmidt, V. V., 2016, Dynamic deformation, damage and fracture in composite materials and structures, Woodhead Publishing, p.
- Sleight, D. W., 1999, Progressive Failure Analysis Methodology for Laminated Composite Structures, *NASA Langley Technical Report Server*.

- Sohn, M. S., Hu, X. Z., Kim, J. K. ve Walker, L., 2000, Impact damage characterisation of carbon fibre/epoxy composites with multi-layer reinforcement, *Composites Part B: Engineering*, 31 (8), 681-691.
- Son, W. K., Youk, J. H. ve Park, W. H., 2006, Antimicrobial cellulose acetate nanofibers containing silver nanoparticles, *Carbohydrate polymers*, 65 (4), 430-434.
- Song, Y., Zheng, N., Dong, X. ve Gao, J., 2020, Flexible Carboxylated CNT/PA66 Nanofibrous Mat Interleaved Carbon Fiber/Epoxy Laminates with Improved Interlaminar Fracture Toughness and Flexural Properties, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 59 (3), 1151-1158.
- Sridharan, S., 2008, Delamination behaviour of composites, Elsevier, p. 11.
- Subagia, I. D. G. A., Jiang, Z., Tijing, L. D., Kim, Y., Kim, C. S., Lim, J. K. ve Shon, H. K., 2014, Hybrid multi-scale basalt fiber-epoxy composite laminate reinforced with Electrospun polyurethane nanofibers containing carbon nanotubes, *Fibers and Polymers*, 15 (6), 1295-1302.
- Sun, B., Long, Y. Z., Zhang, H. D., Li, M. M., Duvail, J. L., Jiang, X. Y. ve Yin, H. L., 2014, Advances in three-dimensional nanofibrous macrostructures via electrospinning, *Progress in Polymer Science*, 39 (5), 862-890.
- Sy, B. L., Fawaz, Z. ve Bougherara, H., 2019, Numerical simulation correlating the low velocity impact behaviour of flax/epoxy laminates, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 126.
- Tripatanasuwan, S., Zhong, Z. ve Reneker, D. H., 2007, Effect of evaporation and solidification of the charged jet in electrospinning of poly(ethylene oxide) aqueous solution, *Polymer*, 48 (19), 5742-5746.
- Tsai, S. W., 1965, Strength Characteristics of Composite Materials, *Philco Corp Newport Beach CA*.
- Tsai, S. W. ve Wu, E. M., 1971, A general theory of strength for anisotropic materials, *Journal of Composite Materials*, 5 (1), 58-80.
- Vidotti, H. A., Manso, A. P., Leung, V., do Valle, A. L., Ko, F. ve Carvalho, R. M., 2015, Flexural properties of experimental nanofiber reinforced composite are affected by resin composition and nanofiber/resin ratio, *Dent Mater*, 31 (9), 1132-1141.
- Wang, C., Li, Y., Ding, G., Xie, X. ve Jiang, M., 2013, Preparation and characterization of graphene oxide/poly(vinyl alcohol) composite nanofibers via electrospinning, *Journal of Applied Polymer Science*, 127 (4), 3026-3032.
- Wang, S., Zhao, Y., Shen, M. ve Shi, X., 2012, Electrospun hybrid nanofibers doped with nanoparticles or nanotubes for biomedical applications, *Therapeutic delivery*, 3 (10), 1155-1169.
- Yademellat, H., Nikbakht, A., Saghafi, H. ve Sadighi, M., 2018, Experimental and numerical investigation of low velocity impact on electrospun nanofiber modified composite laminates, *Composite Structures*, 200, 507-514.
- Yalkın, H. E., Karakuzu, R. ve Alpyıldız, T., 2020, Experimental and numerical behaviors of GFRP laminates under low velocity impact, *Journal of Composite Materials*, 54 (21), 2999-3007.
- Yuan, X., Zhang, Y., Dong, C. ve Sheng, J., 2004, Morphology of ultrafine polysulfone fibers prepared by electrospinning, *Polymer International*, 53 (11), 1704-1710.
- Zhang, C., Yuan, X., Wu, L., Han, Y. ve Sheng, J., 2005, Study on morphology of electrospun poly(vinyl alcohol) mats, *European Polymer Journal*, 41 (3), 423-432.
- Zhu, P., Lu, J., Ji, Q. ve Cheng, Z., 2016, Experimental study of in-plane mechanical performance of carbon/glass hybrid woven composite at different strain rates, *International Journal of Crashworthiness*, 21 (6), 542-554.

- Zong, X., Kim, K., Fang, D., Ran, S., Hsiao, B. S. ve Chu, B., 2002, Structure and process relationship of electrospun bioabsorbable nanofiber membranes, *Polymer*, 43 (16), 4403-4412.
- Zucchelli, A., Focarete, M. L., Gualandi, C. ve Ramakrishna, S., 2011, Electrospun nanofibers for enhancing structural performance of composite materials, *Polymers for Advanced Technologies*, 22 (3), 339-349.
- Zuo, W., Zhu, M., Yang, W., Yu, H., Chen, Y. ve Zhang, Y., 2005, Experimental study on relationship between jet instability and formation of beaded fibers during electrospinning, *Polymer Engineering & Science*, 45 (5), 704-709.

