



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



KETEN ELYAF TAKVİYESİ İLE
HİBRİTLEŞTİRMENİN CTP
KOMPOZİTLERİN DARBE DAYANIMINA
ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK
ARAŞTIRILMASI

Uğur KOZAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şubat-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Uğur KOZAN tarafından hazırlanan “Keten Elyaf Takviyesi ile Hibritleştirilen CTP Kompozitlerin Darbe Dayanımına Etkilerinin Deneysel Olarak Araştırılması” adlı tez çalışması 02/02/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Gürol ÖNAL

.....

Danışman

Prof. Dr. Behcet DAĞHAN

.....

Üye

Doç. Dr. Mürsel EKREM

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

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.

Uğur KOZAN

02.02.2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KETEN ELYAF TAKVİYESİ İLE HİBRİTLEŞTİRMENİN CTP KOMPOZİTLERİN DARBE DAYANIMINA ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Uğur KOZAN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Behcet DAĞHAN

2022, 96 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Behcet DAĞHAN
Doç. Dr. Gral NAL
Doç. Dr. Mürsel EKREM

Yapılan bu tez çalışmasında, E-cam elyaf takviyeli epoksi kompozit (CTPK) malzeme daha düşük maliyetli ve çevre dostu olabilmesi adına, keten elyaf ile hibritleştirilmiş ve düşük hızlı darbe testlerine tabi tutulmuştur. Bu kapsamda cam/keten elyaf takviyeli hibrit kompozitler (CKTPK) farklı yığılma sıraları ve farklı açılar ile dizilerek, vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen her bir numune 150X100 mm boyutlarında kesilmiş ve test cihazına dört tarafından ankastre olacak şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra numunelere düşey ağırlık düşürme darbe test cihazında 2 m/s ve 3 m/s hızlarında 5,6 kg vurucu kütlesi ile darbe uygulanmıştır. Yapılan testler sonucunda malzemelerin dinamik cevabı, oluşan hasar modları ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Cam Elyaf, Hasar Modları, Hibritleştirme, Kompozit

ABSTRACT

MS THESIS

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS ON IMPACT STRENGTH OF HYBRIDIZATION OF GFR POLYMER COMPOSITES WITH FLAX FIBER REINFORCEMENT

Uğur KOZAN

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

Advisor: Prof. Dr. Behcet DAĞHAN

2022, 96 Pages

**Jury
Prof. Dr. Behcet DAĞHAN
Doç. Dr. Güral ÖNAL
Doç. Dr. Mürsel EKREM**

In this thesis study, to be low cost and environment friend, E-glass fiber reinforced epoxy composite was hybridized with flax fibers and practiced to low velocity impact tests. Here, glass/flax reinforced hybrid composites were produced with different stacking sequences and different angles by using vacuum infusion method. Each specimen, having been produced, was cut out by dimensions of 150x100 mm and attached to tester as fixed from four sides. Then impact was applied with 5,6 kg mass of impactor and velocities of 2 m/s and 3 m/s. After tests was conducted, dynamic response, damage modes, and mechanical properties of the materials were investigated.

Keywords: Composite, Damage Modes, Glass Fiber, Hybridization

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması sürecinde her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Behcet DAĞHAN' a teşekkürlerimi sunuyorum.

Kompozit numunelerin üretimi aşamasında laboratuvar ve malzemelerini kullanmama müsaade eden Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesinin akademik personellerinden Sayın Prof. Dr. Erol KILIÇKAP ve Dr. Öğr. Üyesi Gurbet ORÇEN hocalarıma, üretim aşamasında bana en büyük desteği sağlayan yüksek lisans öğrencisi, arkadaşım Umut KAYA' ya, düşük hızlı darbe testleri aşamasında yardımlarını esirgemeyen Konya Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde görev yapan Arş. Gör. Taner COŞKUN' a teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca her zaman desteğini arkamda hissettiğim ve bu süreçte göstermiş olduğu sabırlı davranışlarından dolayı eşim Nilgün' e sonsuz teşekkür eder, canım oğlum Bulut Egenin gözlerinden öperim.

Uğur KOZAN
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİL DİZİNİ	vii
ÇİZELGE DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	13
3.1. Materyal	13
3.1.1. Kompozitler	13
3.1.1.1. Elyaf takviyeli kompozitler	16
3.1.1.2. Parçacık takviyeli kompozitler	18
3.1.1.3. Tabakalı kompozitler	18
3.1.1.4. Hibrit kompozitler	19
3.1.2. Takviye malzemeleri.....	21
3.1.1.5. Doğal elyaflar	22
3.1.1.6. Sentetik elyaflar	23
3.1.3. Matris malzemeleri	25
3.1.1.7. Polimerik matrisler	26
3.1.1.8. Metal matrisler.....	28
3.1.1.9. Seramik matrisler.....	28
3.2. Yöntem.....	29
3.2.1. Malzemenin üretilmesi	29
3.2.2. Düşük hızlı darbe test cihazı ve test setinin kurulması	33
3.2.3. Düşük hızlı darbe deneyi	37
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	39
4.1. Dinamik davranışlar	39
4.1.1. Kuvvetin zamana bağlı değişimi.....	40
4.1.2. Kuvvetin yer değiştirmeye bağlı değişimi	47
4.1.3. Birim kesit alanda yutulan ve iade edilen enerjinin konfigürasyon ve elyaf dizilimine göre değişimi	55
4.1.4. Test sonucu elde edilen tepe ve toplam değerler	58
4.2. Hasar davranışları.....	62
4.2.1. Hasar bölgelerinin taramalı elektron mikroskobu ile tespiti.....	64

4.2.2. Hasar bölgelerinin makro boyutta tespiti.....	68
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	75
5.1. Sonuçlar.....	75
5.2. Öneriler	77
KAYNAKLAR	78
EKLER	81
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.



SİMGELER VE KISALTMALAR

F	: Kuvvet
t	: Zaman
N	: Newton
V	: Hız
W	: İş
J	: Joule
Δd	: Yer değiştirme
s	: Saniye
kg	: Kilogram
gr	: Gram
m	: Metre
mm	: Milimetre
MPa	: Mega paskal
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
A	: $0^{\circ}/90^{\circ}$ konfigürasyonuna sahip numune
B	: $-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}$ konfigürasyonuna sahip numune
2	: 2 m/s darbe hızına tabi tutulmuş numune
3	: 3 m/s darbe hızına tabi tutulmuş numune
CTP	: Cam elyaf takviyeli polimer
CKTP	: Cam/Keten elyaf takviyeli polimer

ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 1.1 Uçak radomuna kuş çarpma olayı	1
Şekil 3.1 Elyaf ve matrisin kompozit malzemeyi oluşturmaları (İzci, 2015).....	14
Şekil 3.2 Elyaf, reçine ve ikisinden oluşan kompozitin Gerilim-Şekil Değiştirme eğrisi	15
Şekil 3.3 Boeing 787 uçağında kullanılan malzemeler (Alemour ve ark., 2019).....	16
Şekil 3.4 Elyaf takviyeli kompozit çeşitleri. a) Tek yönlü, sürekli, elyaf takviyeli b) Tek yönlü, süreksiz, elyaf takviyeli c) 0°-90° dizilimli, sürekli, elyaf takviyeli d) Çok yönlü, sürekli, elyaf takviyeli e)Kırpılmış, süreksiz, rastgele dizilmiş (Carvalho ve ark., 2013)	17
Şekil 3.5 Karışık tabakalı hibrit kompozit dizilimi(Uzay ve ark., 2017).....	20
Şekil 3.6 Karışık lifli elyaf kumaş (Uzay ve ark., 2017)	20
Şekil 3.7 Elyaf çeşitleri ve edinim yolları (Sathishkumar ve ark., 2014)	21
Şekil 3.8 Kompozit numune üretiminde kullanılan a) Cam elyaf kumaş, b) Keten elyaf kumaş	29
Şekil 3.9 Vakum İnfüzyon Makinesi	30
Şekil 3.10 Vakum infüzyon yöntemi genel gösterimi	30
Şekil 3.11 a) Elyaf kumaşların kesimi, b) Tabakaların oluşturulması, c) Epoksi reçine hazırlanması,	31
Şekil 3.12 A ve B Konfigürasyonlarının elyaf dizilimleri.....	31
Şekil 3.13 Numune kodunun tanımı	32
Şekil 3.14 Ağırlık düşürme deneyi cihazı.....	34
Şekil 3.15 Pnömatik kontrol mekanizması	35
Şekil 3.16 Vurucu-Kuvvet sensörü bağlantısı	35
Şekil 3.17 Örnek sinyal görüntüsü.....	36
Şekil 3.18 Numunenin test cihazına bağlantısı	38
Şekil 4.1 Tabakaların deformasyonu (Güneş, 2013)	39
Şekil 4.2 A konfigürasyonunda 2 m/s darbe hızında CTP ve CKTP kompozitlerin karşılaştırmalı.....	41
Şekil 4.3 B konfigürasyonunda 2 m/s darbe hızında CTP ve CKTP kompozitlerin karşılaştırmalı.....	42
Şekil 4.4 A konfigürasyonunda 3 m/s darbe hızında CTP ve CKTP kompozitlerin karşılaştırmalı.....	43
Şekil 4.5 B konfigürasyonunda 3 m/s darbe hızında CTP ve CKTP kompozitlerin karşılaştırmalı.....	44
Şekil 4.6 A ve B konfigürasyonlarında CTP kompozitin 2 m/s darbe hızında Kuvvet-Zaman (F-t) grafiği	45
Şekil 4.7 A ve B konfigürasyonlarında CTP kompozitin 3 m/s darbe hızında Kuvvet-Zaman (F-t) grafiği	45
Şekil 4.8 A konfigürasyonlarında 5 farklı dizilimde üretilen kompozitlerin 2 m/s darbe hızında Kuvvet-Zaman (F-t) grafiği	46
Şekil 4.9 A konfigürasyonlarında 5 farklı dizilimde üretilen kompozitlerin 3 m/s darbe hızında Kuvvet-Zaman (F-t) grafiği	46
Şekil 4.10 B konfigürasyonlarında 5 farklı dizilimde üretilen kompozitlerin 2 m/s darbe hızında Kuvvet-Zaman (F-t) grafiği	47
Şekil 4.11 B konfigürasyonlarında 5 farklı dizilimde üretilen kompozitlerin 3 m/s darbe hızında Kuvvet-Zaman (F-t) grafiği	47

Şekil 4.12 Eğilme Rijitliğinin ve Yapılan İşin Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiğinde tanımı	48
Şekil 4.13 A konfigürasyonunda 2 m/s darbe hızında CTP ve CKTP kompozitlerin karşılaştırmalı.....	49
Şekil 4.14 B konfigürasyonunda 2 m/s darbe hızında CTP ve CKTP kompozitlerin karşılaştırmalı.....	50
Şekil 4.15 A konfigürasyonunda 3 m/s darbe hızında Kuvvet-Yer değiştirme (F-Δd) grafikleri.....	51
Şekil 4.16 B konfigürasyonunda 3 m/s darbe hızında Kuvvet-Yer değiştirme (F-Δd) grafikleri.....	51
Şekil 4.17 A ve B konfigürasyonlarında cam elyaf takviyeli polimer kompozitin 2 m/s darbe hızında Kuvvet-Yer Değiştirme (F-Δd) grafiği	52
Şekil 4.18 A ve B konfigürasyonlarında cam elyaf takviyeli polimer kompozitin 3 m/s darbe hızında Kuvvet-Yer Değiştirme (F-Δd) grafiği	53
Şekil 4.19 A konfigürasyonlarında ve 5 farklı dizilimde üretilen kompozitlerin 2 m/s darbe hızında.....	53
Şekil 4.20 A konfigürasyonlarında ve 5 farklı dizilimde üretilen kompozitlerin 3 m/s darbe hızında.....	54
Şekil 4.21 B konfigürasyonlarında ve 5 farklı dizilimde üretilen kompozitlerin 2 m/s darbe hızında.....	54
Şekil 4.22 B konfigürasyonlarında ve 5 farklı dizilimde üretilen kompozitlerin 3 m/s darbe hızında.....	55
Şekil 4.23 A konfigürasyonunda 2 m/s darbe hızı ile teste tabi tutulmuş numunelerin yutulan ve iade edilen enerji seviyeleri.....	56
Şekil 4.24 B konfigürasyonunda 2 m/s darbe hızı ile teste tabi tutulmuş numunelerin yutulan ve iade edilen enerji seviyeleri.....	56
Şekil 4.25 A konfigürasyonunda 3 m/s darbe hızı ile teste tabi tutulmuş numunelerin yutulan ve iade edilen enerji seviyeleri.....	57
Şekil 4.26 B konfigürasyonunda 3 m/s darbe hızı ile teste tabi tutulmuş numunelerin yutulan ve iade edilen enerji seviyeleri.....	58
Şekil 4.27 Tüm numunelerin maksimum temas kuvvetleri	60
Şekil 4.28 Tüm numunelerin maksimum yer değiştirmeleri	60
Şekil 4.29 Tüm numunelerin toplam temas süreleri	61
Şekil 4.30 Tüm numunelerin toplam impulsları	61
Şekil 4.31 Tüm numunelerin temas rijitlikleri.....	62
Şekil 4.32 Tüm numunelerin eğilme rijitlikleri	62
Şekil 4.33 Darbe sonucu kompozitlerde oluşabilen hasarlar (Kara, 2006)	63
Şekil 4.34 Hasar modları	64
Şekil 4.35 2A1 numunesinin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü	65
Şekil 4.36 3A numunesinin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü	65
Şekil 4.37 3A4 numunesinin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü	66
Şekil 4.38 3B3 numunesinin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü.....	67
Şekil 4.39 3B4 numunesinin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü.....	67
Şekil 4.40 Darbe öncesi ve sonrası numunelerin mikroskop altındaki yan görünüşleri a) 3B numunesi b) 3B2 numunesi.....	68
Şekil 4.41 3B2 numunesi arka yüzey mikroskop görüntüsü	69
Şekil 4.42 2 m/s hızında darbe uygulanmış numunelerin ön ve arka yüzeylerinde oluşan hasarlar	70
Şekil 4.43 3 m/s hızında darbe uygulanmış numunelerin ön ve arka yüzeylerinde oluşan hasarlar	71

Şekil 4.44 Hasar alanının solidworks programı ile hesaplanması	72
Şekil 4.45 Ön yüzeyde oluşan hasarların grafiksel gösterimi.....	73
Şekil 4.46 Arka yüzeyde oluşan hasarların grafiksel gösterimi.....	74



ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 3.1 E-cam ve bazı doğal elyafların mekanik özellikleri (Sparnins, 2009)	22
Çizelge 3.2 Bitkisel elyaf örnekleri	22
Çizelge 3.3 Cam elyaf çeşitlerinin % ağırlık olarak bileşenleri (şahin, 2015)	24
Çizelge 3.4 Karbon elyaflardan bazılarının mekanik özellikleri (Yalçın, 2012).....	25
Çizelge 3.5 Bazı kevlarların mekanik özellikleri (Yalçın, 2012)	25
Çizelge 3.6 Numunelerin dizilim ve konfigürasyonları.....	32
Çizelge 3.7 Numunelerin ağırlıkça Elyaf-Matris Oranları	33
Çizelge 4.1 2 m/s hızında darbeye uğramış numunelerin değerleri.....	59
Çizelge 4.2 3 m/s hızında darbeye uğramış numunelerin değerleri.....	59
Çizelge 4.3 Numunelerde oluşan hasarların alanları	73



1. GİRİŞ

Bilindiği üzere kompozit malzemeler hayatın her alanında sıklıkla kullanılmakta ve gün geçtikçe önemini artırmaktadır. Hava araçlarının da birçok parçası iyi mekanik özellik göstermeleri ve özellikle hafif olmalarından dolayı kompozit malzemelerden oluşmaktadır. Uçakların burun kısmında bulunan, içerisinde uçağın radarını barındıran ve Radom (Radar Dome) denilen kısım birçok uçakta cam elyaf takviyeli polimer kompozitten üretilmektedir.

Ülkemizde ve dünyada her gün birçok hava aracı olayı olmakta ve bu olaylar maalesef can kaybıyla ya da maddi zararlar sonuculanmaktadır. Radoma kuş çarpma olayı da en çok karşılaşılan hava olaylarından biridir. Özellikle uçakların inişlerinde ve kalkışlarında kuş çarpması olayları yaşanabilmekte ve radom kısmı zarar görebilmektedir. Bu çarpışma uçaktaki hasarın büyüklüğüne göre o uçağın uçuşunun iptaline veya aerodinamik yapısının bozulacağından belki de düşmesine neden olabilmektedir. Bir uçuşun iptal olması firmaya çok yüksek maliyetlere neden olabileceği gibi radomda oluşan hasar, o radomun tamamen değişmesini gerektirecek ve ekstra malzeme maliyetine yol açacaktır. Şekil 1.1’ de radoma kuş çarpma olaylarından bazıları görülmektedir.



Şekil 1.1 Uçak radomuna kuş çarpma olayı

Peki bu radomlar neden metal malzemelerden üretilmemektedir? Radomların metal malzemeden yapılmamasının nedeni içerisinde uçak radarını bulundurmaları ve metal malzemenin radar sinyallerini olumsuz etkilemesidir. Bu yüzden radara sahip olan uçaklarda radom, metal olmayan kompozit malzemeden yapılmaktadır.

Yapılan bu çalışmada kuş çarpması kazalarında oluşan zararın minimuma indirilebilmesi ve radom imalatındaki maliyeti düşürmek amaçlanmıştır. Bu kapsamda CTPK, doğal elyaflar arasında diğerlerine göre nispeten daha iyi mekanik özellik gösteren keten elyafla hibritleştirilerek darbe dayanım özellikleri araştırılmıştır. Araştırma hava aracı üreten firmaların üretim maliyetini ve kullanıcı firmaların zararlarını azaltmaya yöneliktir.

Doğal elyaflar sentetik elyaflara göre daha ucuz, daha hafif, doğada bolca bulunmakta ve çevreye zararsız oldukları için CTP kompozitle yapılan radom ile doğal elyafla hibritleştirilmesi, kompozitin sadece maliyetini düşürmekle kalmayacak onu daha çevre dostu yapacaktır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Günümüze kadar doğal ve sentetik elyafların hibritleştirilmesi, hibritleştirmenin malzemenin mekanik özelliklerine etkileri üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalardan bazıları şu şekildedir:

Ramnath ve ark. (2014) hindistan cevizi lifi/keten lifi takviyeli cam elyaf hibrit kompozitin mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Hindistan cevizi lifi/keten lifi takviyeli cam elyaf hibrit kompozit, hindistan cevizi lifi takviyeli cam elyaf hibrit kompozit ile karşılaştırılmıştır. Kompozitler, CTP kompozit tabakaların en alt ve en üstte koyularak, el yatırması yöntemi ile üretilmiştir. Yapılan çekme testi sonucu farklı lifleri içeren kompozit en yüksek 56,88 MPa çekme mukavemetine ulaşmış ve tek tip lif takviyeli kompozit en yüksek 46,5 MPa çekme mukavemetine ulaşmıştır. Tek tip lif takviyeli kompozitin yüzde uzaması daha fazla olmuştur. Eğilme testinde ise farklı lifleri içeren kompozitin eğilme rijitliği en yüksek 136,11 MPa, eğilme mukavemeti 134,05 MPa olup bu iki değer tek tip lif takviyeli kompozitten daha yüksektir. Tahmin edilenin aksine tek tip lif takviyeli kompozitin kayma mukavemeti 71,1 MPa olup farklı lifleri içeren kompozitten daha fazladır. Farklı tip lif kullanılan kompozitin eğilme rijitliği ve tabaka ayrılma mukavemeti daha yüksek olmuştur.

Temel (2015) düşük hızlı darbe uygulanan farklı genişlikteki melez kompozit levhaların dinamik cevabı ve hasar davranışlarını incelemiştir. Melez kompozit malzeme olarak E-cam/epoksi ve karbon/epoksi kullanılmış ve kompozitler farklı sıralamalar ile farklı genişliklerde üretilmiştir. Düşük hızlı darbe deneyleri ağırlık düşürme test cihazında yapılmıştır. Deneyler 2 m/s, 2,5 m/s, 3 m/s darbe hızlarında, basit mesnet ve ankastre mesnet sınır şartlarında, 0°, 45G°, +45G°, 0G°, 90G°, 0G°, +45G°, 45G°, 0G°, 0G°, 45G°, +45G°, 0G°, 90G°, 0G°, +45G°, 45G°, 0C° ve 0G°, 45G°, +45G°, 0G°, 90G°, 0G°, +45G°, 45G°, 0C°, 0C°, 45G°, +45G°, 0G°, 90G°, 0G°, +45G°, -45G°, 0G° (C: Karbon, G: Cam) konfigürasyonlarında, 25mm, 30mm, 35mm numune genişliklerinde gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları; malzeme genişliğinin artması ile delaminasyon miktarının azaldığını ve dolayısıyla eğilme rijitliğinin arttığını, yutulan enerji miktarının azaldığını ve temas süresinin azaldığını göstermiştir. Kuvvet-Zaman eğrileri incelendiğinde ise kuvvet değerinin anlık düşmesinden ve birikimli enerji grafiklerindeki absorbe edilen enerjilerden genişlik arttıkça malzemedeki kalıcı hasarın azaldığı

görülmüştür. Karbon tabakaların dış kısımda olduğu numunelerde eğilme rijitliğinin ve maksimum temas kuvvetinin iç kısımlarda olanlara nazaran daha yüksek olduğu gözlenmiştir.

Lefeuvre ve ark. (2014) farklı iklimsel bölgelerdeki ve farklı sezonlarda toplanan ketenlerden elde edilen elyafların ve 4 farklı cam elyafın çekme testlerini karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Araştırma sonuçları farklı sezonlarda aynı bölgeden toplanan ketenin elyafında çok büyük bir farklılık olmadığını göstermiştir. Fakat kurak veya çok yağışlı fark etmeden yeşerme döneminde toplanan ketenin elyaflarının 4 yıl sonra daha iyi çekme özellikleri sergilediği görülmüştür. Bu elyafların cam elyafın yerini alabilecek çekme özelliği gösterdiği görülmüştür.

Ramesh ve Sudharsan (2018) 0° ve 90° konfigürasyonlu, CKT kompozitleri mekanik özellikleri bakımından incelemiştir. Yapılan testlerde 0° konfigürasyonlu kompozitin maksimum çekme dayanımı 82,71 Mpa, maksimum eğilme dayanımı 143,99 Mpa ve maksimum darbe dayanımı 4 kJ/m² görülmüştür. 90° konfigürasyonlu kompozitin ise maksimum çekme dayanımının 75,64 MPa, maksimum eğilme dayanımının 134,86 Mpa ve maksimum darbe dayanımının 3,99 kJ/m² olduğunu görmüşlerdir. Elyaf matris bağını ve yapısını incelemek için SEM görüntülerini incelemişler, mekanik özelliklerin tahmini için sonlu elemanlar analizini ANSYS 12.0 ile uygulamışlardır. Sonuçlar sonlu elemanlar yönteminin gerçek değerlere çok yakın olduğunu göstermiş ve bu hibrit kompozitlerin sentetik elyafli kompozitlere alternatif olarak kullanılabileceğini tavsiye etmişlerdir.

Liang ve ark. (2012) cam ve keten elyaf takviyeli kompozit numunelerin yorulma testlerini yapmışlardır. Çalışmadaki numuneleri 3 tabakalı ve $0^\circ/90^\circ$ ve $+45^\circ/-45^\circ$ konfigürasyonlarında hazırlamışlardır. Numuneleri aksel gerilme yorulma deneyine tabi tutmuşlar ve $0^\circ/90^\circ$ konfigürasyonlu keten elyaf takviyeli kompozitin CTP kompozite göre daha düşük yorulma dayanımına sahip olduğunu görmüşlerdir. Cam ve keten elyaf takviyeli numunelerin her ikisi için $+45^\circ/-45^\circ$ konfigürasyonundaki numunelerin yorulma dayanımının $0^\circ/90^\circ$ konfigürasyonuna göre daha iyi olduğunu görmüşlerdir.

Prabhakaran ve ark. (2014) keten elyaf takviyeli kompozitin ses ve titreşim sönümleme özelliklerini cam elyaf takviyeli kompozitle karşılaştırmalı olarak

incelemişlerdir. Yapılan ses sönümlleme testlerinde, keten elyaf takviyeli kompozitin ses sönümlleme katsayısının cam elyaf takviyeli kompozite göre 2000 Hz için 21,42%, 100 Hz için 25% daha fazla olduğunu görmüşlerdir. Yapılan titreşim testleri keten elyaf takviyeli kompozitin titreşim sönümllemesinin CTP kompozite göre 51,03% daha iyi olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda keten elyaf takviyeli kompozitin eğilme dayanımının ve eğilme modülünün cam elyaf takviyeli kompozite göre daha iyi olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar keten elyaf takviyeli kompozitin ses ve titreşim sönümlleme gerektiren uygulamalarda iyi bir alternatif olduğunu göstermiştir.

Yan ve Chouw (2015) keten elyaf takviyeli kompozitlerin su, deniz suyu ve alkalin solüsyonunda yaşlandırmanın etkilerini incelemişlerdir. El yatırması yöntemi ile ürettikleri kompozitleri 365 gün boyunca yaşlandırma solüsyonlarında bekletmişler ve sonrasında çekme ve 3 noktadan eğme testlerini yapmışlardır. Uzun yaşlandırma işlemi sonucu tüm numunelerin 8,5% - 9,4% oranında ağırlık kazandığını, buna karşın çekme ve eğilme dayanımlarında azalma olduğunu görmüşlerdir. Çekme dayanımı için 22,6%-31,1%, eğilme dayanımı için 9,3%-23,5% azalma olmuştur. Alkalin yaşlandırması en fazla azalmaya neden olmuş ve bunu deniz suyu takip etmiştir. SEM görüntülerinde her numune için elyaf matris bağının önemli ölçüde zayıfladığını görmüşler fakat bu zayıflamanın cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerde de görüldüğü tespit edilmiştir. Sonuç olarak keten elyafın sentetik elyafın kullanıldığı yerlerde kullanılabileceğini değerlendirmişlerdir.

Bensadoun ve ark. (2017) keten elyaf takviyeli kompozitin düşük hızlı darbe özelliklerini incelemişlerdir. Deneylerde kullanılmak üzere 8 farklı keten tipi, termoset plastik olarak epoksi, termoplastik olarak Maleik Anhidrit Polipropilen olmak üzere 2 farklı matris malzeme kullanmışlardır. Deneyler Fractovis CEAST 6789 ağırlık düşürmeli darbe test cihazı ile yapılmıştır. Deney sonuçları malzemenin sünekliğinin hasar toleransı, darbe dayanımı ve malzeme delinirken emilen enerji üzerindeki etkisinin çok fazla olduğunu göstermiştir. Emilen enerjinin termoplastik matris kullanılan kompozitlerde termoset matris kullanılanlara göre %50 daha fazla olduğunu, buna karşın termoset matrisli kompozitlerde eğilme özelliklerinin termoplastik matrisli kompozitlere göre daha iyi olduğunu gözlemişlerdir.

Wu ve ark. (2020) tabaka dizilim sıralamasının karbon elyaf takviyeli örgülü kompozit levhalarda düşük hızlı darbe dayanımına etkisini araştırmışlardır. Deneyler için

düzenli yapıda $\pm 45^\circ$ ve düzensiz yapıda $\pm 30^\circ/\pm 45^\circ/\pm 60^\circ$ dizilimlerde numuneler hazırlanmıştır. Düzensiz yapıdaki kompozit numune 30/45/60 ve 60/45/30 olacak şekilde iki taraflı deneye tabi tutulmuştur. Numuneler IS-30, IS-45 ve IS-60 olarak adlandırılmış ve sırası ile 30/45/60, 45, 60/45/30 dizilimlerini temsil etmektedir. Deneyler düşürülen ağırlık değiştirilerek 10,7J, 35,2J ve 60J darbe enerjilerinde yapılmıştır. Deney sonuçları IS-30 kompozitte mikro yığılmalardan kaynaklı tabaka ayrılmasının daha fazla olduğunu, IS-45 kompozitin darbe dayanımının IS-30 ve IS-60'a göre daha düşük olduğunu, IS-30 kompozitin IS-60 kompozite göre daha iyi darbe dayanımına ve daha düşük enerji emilimine sahip olduğunu göstermiştir.

Joshi ve ark. (2004) kenevir ve çin kamışından elde edilen doğal elyaf kompozitlerin CTP kompozitlere göre gerçekten doğa dostu olup olmadıklarını incelemişlerdir. Sonuç olarak 4 ana başlıkta doğal elyafların, cam elyaflara göre daha üstün olduğu değerlendirilmiştir. (1) cam elyaf üretiminde tamamıyla fosil yakıt kullanılmakta olduğu için doğal elyafların çevreye kötü etkisi azdır, (2) doğal elyaf takviyeli kompozitler eşit performans için daha fazla elyaf içeriğine sahiptir buda daha az kirlletici polimer bazlı matris anlamına gelir, (3) doğal elyaflar daha hafiftir bu da yakıt verimliliğini artırır, dolayısıyla çevre kirliliğini azaltır, (4) doğal elyafların kullanım ömrü dolduğunda yakılarak enerjiye dönüşür ve yakılmaları esnasında doğaya zarar vermeyen pozitif karbon yayılımı yaparlar. Bunların aksine doğal elyafların gübre olarak kullanımı yüksek nitrat ve fosfat salınımı yapacağından o bölgedeki sulak alanlarda azot ve fosfatın artmasına neden olabilmektedir. Eğer doğal elyaf takviyeli kompozitin ömrü, CTP kompozite göre çok düşükse doğal elyafların çevresel üstünlüğü ortadan kalkabilir.

Al-Hajaj ve ark. (2019) karbon/keten elyaf takviyeli hibrit polimer kompozitin darbe özelliklerini incelemişlerdir. A ve B tipinde iki farklı kompozit üretilmiş olup A tipi 0-90°Ka/0°Ke/0-90°Ka dizilimi B tipi 0-90°Ka/0-90°Ke/0-90°Ka diziliminde ve her iki tip için karbon tabakalar dış kısımlarda keten tabakalar iç kısımda olacak şekilde tabaka sayıları 2/12/2 olarak üretilmiştir. Testler sarkaçlı darbe deney cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları tip B kompozitin daha düşük enerji emdiğini, daha yüksek nüfuz etme enerjisine sahip olduğunu, daha düşük ısı artışına sahip olduğunu ve darbe dayanımının tip A'dan %33 daha iyi olduğunu göstermiştir. Her iki hibrit kompozitte keten elyaf takviyeli kompozite göre daha iyi darbe dayanımı göstermişleridir.

Barouni ve Dhakal (2019) keten/vinil ester tabakalı kompozit ve keten-cam/vinil ester tabakalı hibrit kompozitlerin ağırlık düşürmeli darbe test cihazı kullanarak düşük hızlı darbe hasar mekanizmalarını inlemişlerdir. Numuneler keten elyaf takviyeli vinil ester, cam elyaf takviyeli vinil ester ve cam/keten elyaf takviyeli vinil ester olarak 3 farklı tipte, bunlardan cam ve keten takviyeli kompozitler 6 katmanlı ve $\pm 45^\circ$ dizilim ile, cam/keten elyaf takviyeli hibrit kompozit 7 katmanlı C/K/C/K/C/K/C sıralaması ile hazırlanmıştır. Deneyler 25J ve 50J darbe enerjisi ile yapılmış olup deney sonuçları keten elyaf takviyeli kompozitin diğerlerine göre daha fazla enerji soğurabildiğini fakat daha fazla hasar genişlemesine sahip olduğunu göstermiştir. Cam/keten elyaf takviyeli hibrit kompozit cam elyaf takviyeli kompozit ile benzer özellikler göstermiş olup daha düşük yoğunluklu olması ve yenilenebilir olmasının tercih edilme sebebi olabileceği değerlendirilmiştir.

Güneş ve Şahin (2020) hibrit tabakalı kompozit plakaların düşük hızlı darbe deneyinde yüzey çatlağının etkisini araştırmışlardır. Hibrit kompozit numuneler orta 2 tabakası karbon diğer tabakalar cam elyaf olacak şekilde 18 tabakalı olarak hazırlanmıştır. Matris malzeme olarak Hexion-EPR840-EPH875 epoksi reçine kullanılmıştır. Numunelerde farklı çatlak derinlik-kalınlık oranı (a/t) ve farklı çatlak derinlik-genişlik (a/c) oranlarında çatlaklar oluşturulmuş ve deneyler 2 m/s, 2,5 m/s, 3 m/s darbe hızlarında ağırlık düşürmeli darbe test cihazında yapılmıştır. Deney sonuçları; artan yüzey çatlak derinliği ve genişliği ile kuvvet değerinin azaldığını, 2 m/s ve 2,5 m/s hızlar için yüzey çatlak genişliğinin artması ile etkileşim zamanının arttığını, 3 m/s hız için elyaf kırılmaları ve tabaka ayrılması gibi sebeplerden dolayı kuvvette ani düşüşün olduğunu, çatlak geometrisinin rijitliği önemli ölçüde etkilediğini, yüksek çatlak genişliği ile elastik deformasyonun daha fazla olduğunu fakat a/t'nin artması ile rijitliğin yüksek oranda düştüğünü, a/t'nin artması ile darbe dayanımının ve emilen enerjinin azaldığını göstermiştir. Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde basma yüküne bağlı olarak elyaf yığılmaları gözlenmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde ise yüzey çatlağının sonucu olarak tabaka ayrılmasının yaygın olduğu ve bu hasarın artan hız ile arttığı gözlemlenmiştir.

Sarasini ve ark. (2016) karbon/keten elyaf takviyeli hibrit kompozitin hasar toleranslarını düşük hızlı darbe testi ile incelemişlerdir. Referans olması için hibrit kompozite ek olarak karbon elyaf takviyeli kompozit ve keten elyaf takviyeli kompozit

numuneler de üretilmiştir. Numuneler keten elyaf kompozit 0/90° dizilimle 18 tabaka, karbon elyaf kompozit 0/90° dizilimle 14 tabaka, Ke/Ka/Ke hibrit kompoziti 0-90°Ke/0-90°Ka/0°Ke dizilimle 8 tabaka keten 10 tabaka karbon, Ka/Ke/Ka hibrit kompoziti 0-90°Ka/0-90°Ke/0°Ka dizilimle 10 tabaka keten 8 tabaka karbon olacak şekilde üretilmiştir. Deneyler ağırlık düşürmeli darbe test cihazı ile 5J-30J arası farklı darbe enerjileri ile yapılmıştır. Test sonuçları en iyi darbe dayanımına karbon elyaf takviyeli kompozitin, daha sonra Ka/Ke/Ka dizilimindeki hibrit kompozitin, daha sonra Ke/Ka/Ke dizilimindeki hibrit kompozitin en düşük darbe dayanımına ise keten elyaf takviyeli kompozitin sahip olduğunu göstermiştir. 30J yüksek enerji ile yapılan testte Ke/Ka/Ke hibritin Ka/Ke/Ka hibrit kompozitin darbe dayanımına çok yaklaştığı gözlenmiş bunun sebebinin ise keten elyafın enerji emme kabiliyetinden olduğu değerlendirilmiştir.

Zhang ve ark. (2013) tekyönlü keten/cam elyaf takviyeli hibrit kompozitlerin çekme ve ara yüzey özelliklerini incelemişlerdir. Kompozitler basınçla kalıplama yöntem ile üretilmiştir. Çekme özelliklerini araştırmak için 6 farklı numune hazırlanmış olup bunların biri cam elyaf takviyeli, biri keten elyaf takviyeli, diğer dördü ise farklı oranlarda cam/keten elyaf takviyeli hibrit kompozittir. Elyaf diziliminin çekme özelliğine etkisini araştırmak için 3 farklı kompozit (C: Cam, K: Keten) CKCKCKCKCKCKCKCK, CCKKCKKKKCKKCC ve CCCCKKKKKKKKCCCC şeklinde sıralanarak üretilmiştir. Yapılan çekme deneyleri sonucu artan cam elyaf miktarı ile hibrit kompozitin çekme mukavemetinin arttığı görülmüştür. Elyaf diziliminin çekme mukavemetine büyük etkisinin olduğu fakat elastisiteyi etkilemediği görülmüştür. Daha çok farklı elyaf dizilimi çekme dayanımını ve çekme kırılma dayanımını arttırmıştır.

Rajesh ve ark. (2018) keçi kılı takviyeli polyester kompozit ve keçi kılı/madar lifi polyester hibrit kompozitleri çekme özellikleri bakımından incelemişlerdir. Kompozit yapımında matris malzemesi olarak polietilen teraftarat, katalizör olarak metil etil ketone peroksit, hızlandırıcı olarak kobalt oktoat ve takviye malzeme olarak 5mm uzunluğunda kesilmiş keçi kılı ve madar lifi kullanılmıştır. Farklı elyaf yüzdeleri ile yapılan çekme deneylerinde keçi kılı takviyeli kompozitin en yüksek çekme dayanımı olan 24,7 MPa' a %7,5'lik oranda ulaştığı, hibrit kompozitin ise en yüksek çekme dayanımı olan 27 MPa' a %12,5'luk oranda ulaştığı görülmüştür. Her iki kompozitte elyaf oranlarının artması ile elastisite modülünün arttığı ve her ikisi için %15'lik elyaf oranında hibrit kompozitin, keçi kılı takviyeli kompozite göre elastisite modülünün %21,01 daha yüksek olduğu

gözlemlenmiştir. Yüzde uzamalar ise keçi kılı için %2,5'luk oranda, hibrit kompozit için %7,5'li oranda maksimum olmuştur.

Kashyap ve ark. (2020) doğal elyafların, kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisini araştırmak için hint keneviri ve hindistan cevizi lifi takviyeli kompozit malzeme üzerinde çalışmışlardır. Yapılan mekanik testler elyaf miktarının artması ile mekanik özelliklerin daha iyi olduğunu göstermiştir. Karşılaştırmalı analizler hint keneviri ve hindistan cevizi lifli hibrit kompozitin tek lifli kompozitlere göre daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Artan elyaf miktarının poisson oranı hariç elastik sabit değerleri iyileştirdiği görülmüştür. ANSYS ile yapılan sonlu elemanlar modellemesinde %15'lik elyaf miktarı için sonucun deneysel sonuçlarla ilişkili olduğu görülmüştür.

Kumar (2020) %5' den %25' e kadar farklı oranlarda hindistan cevizi lifi, sisal lifi ve sorgum lifi takviyeli polyester kompozitlerin çekme, eğilme, darbe ve sertlik bakımından mekanik özelliklerini incelemiştir. Kompozitlerin üretimi el yatırması yöntemi ile yapılmıştır. Yapılan çekme testi sonucunda %50 sisal, %25 sorgum, %25 hindistan cevizi lifi kullanılan kompozitin çekme mukavemeti 90.4 MPa olup, %90 sisal, %5 sorgum, %5 hindistan cevizi lifi kullanılan kompozite göre %25,54 daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Yapılan eğme testi sonucunda %50/%25/%25'lik kompozitin eğilme mukavemeti 40,3 MPa olup bu da %90/%5/%5'lik kompozite göre %34,9 daha iyi olduğu gözlenmiştir. Yapılan darbe testi sonucunda ise %50/%25/%25'lik kompozitin darbe mukavemeti 23,6 MPa olup bu da %90/%5/%5'lik kompozite göre %27,1 daha iyi olduğu gözlenmiştir.

Karthi ve ark. (2020) hindistan cevizi lifi, keten, rami bitkisi, güve otu, ananas yaprağı lifi ile sentetik elyaf takviyeli hibrit kompozitler üzerinde yapılmış olan bilimsel çalışmalardan derleme bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada doğal elyafların kimyasal işleme tutulmasını ve kullanım alanlarını incelemişlerdir. Doğal elyaf takviyeli kompozitlerin düşük yoğunluk, düşük maliyet ve çevre dostu olması yönüyle sentetik elyaflara göre üstün; fakat dayanım olarak daha düşük özellik gösterdiği değerlendirilmiştir. Doğal elyaflar için en uygun kimyasal işlemin alkali işlemi olduğu değerlendirilmiştir.

Awais ve ark. (2020) kendir, keten ve hintkeneviri liflerinin farklı dokuma yapıları ile eğilme, darbe mukavemeti ve basma sonucu tabakaların davranışlarını incelemişlerdir. Kendir lifinin matris malzeme ile karışık örme dokuması ile yapılan kompozitin eğilme deney sonucunda düz dokuma ve matrisle karışık düz dokuma ile yapılan kompozitlere göre sırasıyla %20 ve %29 daha iyi dayanım gösterdiği gözlenmiştir. Aynı etki keten ve hint keneviri içinde görülmüştür. Hasar direnci bakımından düz dokuma kompozitler her lif türü için diğer dokumalara göre daha iyi performans göstermiştir. Kullanılan lifler arasında eğilme, darbe mukavemeti ve basma sonucu tabakaların durumu incelendiğinde en iyi performansı keten lifi, daha sonra kendir lifi göstermiştir.

Metin (2008) Çalışmasında E-camı/epoksi tabakalı kompozitlerde düşük hızlı darbe hasarının burkulma özelliklerine etkisini incelemiştir. Deneyler ağırlık düşürmeli test cihazı ile 2 m/s, 2,5 m/s, 3 m/s, 3,5 m/s, 4 m/s, hızlarda ağırlık düşürmeli darbe test cihazı ile yapılmıştır. Yapılan test sonuçlarına göre darbe hızının artmasının meydana gelen hasarı arttırdığı, delinmenin 3 m/s' den yüksek hızlarda gerçekleştiği, delinme oluşan numunelerde delaminasyon alanının azaldığı, düşük hızlı darbe testine tabi tutulup delinen parçanın delinmeyen parçadan daha iyi mekanik özellikler sergileyebileceği ve hasarın öncelikle matris çatlaması ile başladığı daha sonra delaminasyon, elyaf kopması ve nüfuziyet ile ilerlediğini görmüştür.

Nagaraj ve ark. (2020) e-cam elyafı ve hintkeneviri lifi takviyeli hibrit polimer kompozitin çekme özelliklerini incelemiştir. Numuneler hintkeneviri lifi/e-cam elyaf/hintkeneviri lifi ve e-cam elyaf/hintkeneviri lifi/e-cam elyaf katman sıralaması ve el yatırması yöntemi ile üretilmiştir. Yapılan çekme testi sonucunda hintkeneviri lifi/e-cam elyaf/hintkeneviri lifi sıralamalı hibrit kompozitin çekme mukavemeti 13 MPa, e-cam elyaf/hintkeneviri lifi/e-cam elyaf sıralamalı hibrit kompozitin çekme mukavemeti ise 23,8 MPa olmuştur. Brinnel sertlik testinde ise hintkeneviri lifi/e-cam elyaf/hintkeneviri lifi sıralamalı hibrit kompozitin 91BHN ile daha üstün olduğu gözlemlenmiştir.

Gurusamy ve ark. (2015) sisal, hindistan cevizi ve şeker kamışı lifi takviyeli polimer kompozitlerin çekme, basma ve eğilme mukavemetlerini deneysel yöntemlerle araştırmışlardır. Kompozitler %50 doğal elyaf, %50 reçine kullanılarak el yatırması yöntemi ile hazırlanmıştır. Çekme ve basma testleri sonucu sisal lif takviyeli kompozitin diğer kompozitlere göre daha iyi çekme ve basma mukavemeti, eğilme test sonucu ise

şeker kamışı lifi takviyeli kompozitin diğerlerine göre daha iyi eğilme mukavemeti gösterdiği gözlemlenmiştir.

Pirmohammad ve ark. (2020) kenaf lifi ve keçi kılının asfalt karışımına eklenmesinin mod 1 ve mod 2 kırılma dayanımlarına etkilerini araştırmışlardır. Keçi kılı ve kenaf lifi farklı uzunluklarda ve farklı oranlarda asfalt karışımına eklenmiş ve testler yapılmıştır. Sonuçlar her iki lifin de asfaltın kırılma mukavemetini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Alınan en iyi sonuçlar kenaf lifi için 8 mm uzunluk, %0,3 karışım oranı ve keçi kılı için 4 mm uzunluk, %0,3 karışım oranında gerçekleşmiştir. Kenaf lifi mod 1 kırılma mukavemetinde, keçi kılı ise mod 2 kırılma mukavemetinde daha iyi performans göstermiştir.

Mahesh ve ark. (2020) hintkeneviri takviyeli epoksi kompozitlerde düşük hızlı darbenin tabaka kalınlığı ve vurucu uç şekline göre gösterdiği tepkiyi sonlu elemanlar metodu ile incelemişlerdir. Araştırma Abaqus/Cae yazılımı ile yapılmış olup analizi yapılan hintkeneviri takviyeli kompozit malzeme 6-10 mm kalınlıklarda, darbe deneyi 2-10 m/s darbe hızlarında yapılmıştır. Analiz sonuçları; tabaka kalınlığı ile enerji emiliminin arttığını ve darbe dayanımına çok önemli etkisinin olduğunu, vurucu ucun şeklinin enerji emilimini etkilediğini ve bunun vurucu ucun temas alanı ile doğrudan bağlantılı olduğunu, konik uçlu vurucunun daha iyi enerji emilimi gösterdiğini, dolayısıyla düşük temas alanının daha iyi enerji emilimi sağladığını, düz uçlu vurucunun daha fazla ve büyük hasar oluşturduğunu göstermiştir.

Gassan ve ark. (1999) alkali işleminden geçmiş keten elyaf takviyeli epoksi kompozitin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Keten elyaflar alkali işlemi öncesi üzerindeki vakstan arındırmak için metanol-benzen (1:1) karışımında 24 saat bekletilmiş daha sonra %29 NaOH çözeltisinde 20 °C’de 20 dakika bekletilmiştir. Alkali işlemi sonunda elyaflarda büzülme ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlenmiştir. Alkali işlemi görmüş keten elyaf takviyeli epoksi kompozite yapılan çekme ve sertlik test sonuçlarında artış gözlenmiştir. Darbe testlerinde ise alkali işlemi görmemiş elyafla yapılan kompozite göre 40-50% daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Karsli ve Aytac (2014) alkali işlemi görmüş kısa keten elyaf takviyeli poli laktik asit / polikarbonat kompozitlerin özelliklerini incelemişlerdir. Keten elyafları üzerindeki vakstan arındırmak için elyaflar 99% aseton çözeltisinde 60 °C’de 45 dakika bekletilmiş

ve saf su ile birkaç defa yıkanıp oda sıcaklığında kurutulmuştur. Kalan nemden arındırmak için vakum fırınında 80 °C’de 2 saat daha bekletilmiştir. Alkali işlemi için 2%, 5%, 10% NaOH çözeltisi ayrı ayrı kullanılmış, elyaflar çözeltide 20 dakika bekletilmiş ve saf su ile yıkandıktan sonra nötrleştirme için 2% asetik asit çözeltisinde bekletilmiştir. En son olarak tekrar saf suda yıkanan elyaflar vakum fırınında 80 °C’de 4 saat bekletilip kullanıma hazır hale getirilmiştir. Üretilen kompozit numunelere yapılan çekme testine göre çekme dayanımında en fazla artış 2% NaOH çözeltide, sem analizlerinde elyaf matris arası bağın en iyi durumu 2% NaOH çözeltide gözlenmiş olup termal özelliklerde pek fazla bir fark gözlenmemiştir.

Wang ve ark. (2020) keten elyaf takviyeli polimer ve CTP ile sarılmış betonun basma özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarını yüksek hızlı servo-hidrolik makinası kullanarak, sade beton, cam elyafa sarılmış beton ve keten elyafa sarılmış beton ile yapmışlardır. Deneyleri 0,1 m/s, 1 m/s, 2,5 m/s, 5 m/s ve 6,5 m/s darbe hızlarında yapmışlardır. Sonuç olarak CTP ile sarılmış betonun en büyük basma dayanımına, keten elyaf takviyeli polimer ile sarılmış betonun ise en büyük birim şekil değiştirmeye sahip olduğunu görmüşlerdir. Darbe hızının hasar ilerlemesinde düşük bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Genel olarak keten elyaf takviyeli polimer ile sarılı betonun CTP sarılı beton ile kıyaslanacak kadar iyi özelliklere sahip olduğu ve ekonomik faktörler de düşünüldüğünde keten elyaf takviyeli kompozitlerin daha fazla avantajının olduğunu değerlendirmişlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Kompozitler

Gereken amaç için tek başına uygun olmayan değişik özelliklerdeki iki veya daha fazla malzemeyi talep edilen özellikleri sağlayacak duruma getirmek için makro yapıda, fiziken belirli oranlarda ve şartlarda, bir araya getirerek üretilen malzemelere kompozit malzemeler denir (İzci, 2015).

İnsanoğlu ilk çağlardan beri dayanıksız malzemenin içerisine bitkisel ve hayvansal lifler ekleyerek bu dayanıksızlığın iyileşmesine çalışmıştır. Bunun en iyi ve bilindik örneği ise kerpiç evlerdir. Kerpiç üretiminde de, çamur içerisine koyulan saman, ot, sap gibi lifli yapılar, bu malzemenin hem üretim hem de kullanımındaki mukavemetini arttırmaktadır. M.Ö 1600 yıllarında Mısır'da ince cam liflerinin yapıldığı, XVIII. Hanedan döneminden kalan, farklı renklerde cam lifleriyle donatılmış amforaların varlığından anlaşılmaktadır. Ancak Moğollar M.S. 1200 yıllarında ipek, bambu lifleri, hayvan tendonu ve çam reçinesi kullanarak savaş okları yapmışlar ve bu oklar ile kompozit malzemenin günümüz kullanımına en yakın olanını üretmişlerdir (Association, 2016).

2. Dünya Savaşı esnasında hava ve deniz araçlarında ağırlığı azaltmak, dayanımı, sürdürülebilirliği ve deniz suyu, nem gibi ortam koşullarına karşı direnci artırmak için kompozit endüstrisinin temelleri atılmaya başlanmıştır. 1945'e kadar özellikle orduda olmak üzere 3 tonun üzerinde cam elyaf kullanılmış ve kısa süre sonra sivil endüstride tanınmaya başlamıştır (Association, 2016).

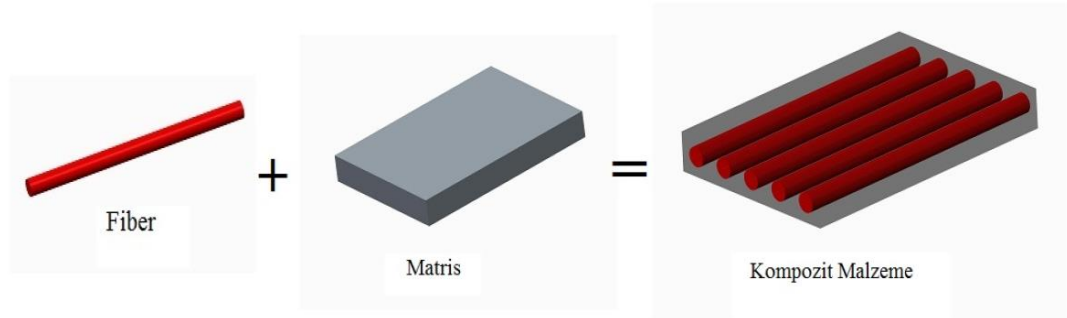
İlk karbon elyaflar 1961 yılında bulunmasına rağmen, ticari kullanım için karbon elyafların kompozitlerde kullanılması birkaç yıl almıştır. Karbon elyaf kullanımı birçok endüstrinin birçok alanında gelişmeye yardımcı olmuştur. 1966'da kimyager Stephanie Kwolek ileri kompozitlerde kullanmak için yeteri kadar güçlü olan kevlar'ı bulmuştur. Kevlar balistik ve delme direnci istenen yerlerde kullanılması ile bilinir (Association, 2016).

1970 sonları ile 1980 başlarında kompozitler Avrupa ve Asya'da ilk olarak inşaat sektöründe kullanılmaya başlanmış ve 1990'da kompozitler ilk defa İskoçya'da bir yaya üstgeçidinde kullanılmıştır (Association, 2016).

2000’li yılların başında karbon nanotüp keşfedilerek kompozit malzemelerde elyaf malzeme olarak kullanılmaya başlanmış ve ardından nanoteknoloji ticari alanda kendini göstermeye başlamıştır (Association, 2016).

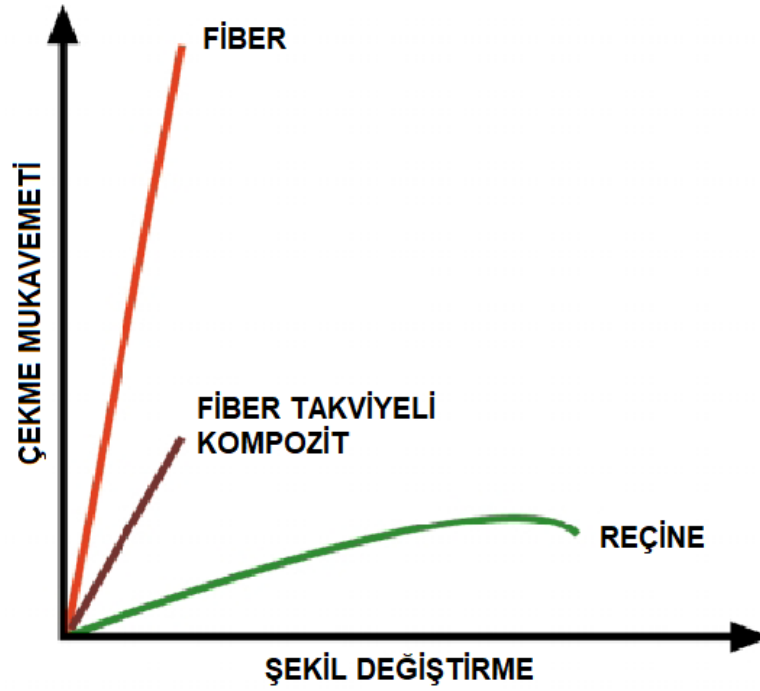
Birçok endüstri tasarımcısı ve mühendis bugünlerde kompozitleri çeşitli parçaların üretimine entegre etmek için çalışmaktadır. Kompozit sistemler dünya çapında binlerce uygulamada yapıyı güçlendirmek veya ses, ısı, nem gibi çevresel faktörlerden korumak için kullanılmaktadır.

Şekil 3.1’ de görüldüğü gibi, kompozitlerde temel yapı olarak bulunan bir elyaf ve bunun çevresinde hacim olarak fazla olan bir matris bulunur (Mazumdar, 2001). Bu malzemelerden elyaf, kompozitin mukavemeti ve yük taşımasını sağlamakta, matris ise plastik şekil değiştirmeye geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önlemekte ve kompozitin kırılmasını geciktirmektedir. Matris malzemesinin diğer bir amacı ise, elyafları bir arada tutmak ve yükün homojen bir şekilde dağılmasına yardımcı olmaktır. Bu şekilde elyaf malzemelerde kalıcı şekil değiştirme meydana geldiğinde meydana gelecek olan çatlak ilerlemesinin önüne geçilmiş olunmaktadır.



Şekil 3.1 Elyaf ve matrisin kompozit malzemeyi oluşturması (İzci, 2015)

Kompozit aslında bir tür karışımdır. Heterojendir, çözelti gibi değildir, bileşenler arasında atom alışverişi olmaz ve kimyasal olarak birbirlerinden etkilenmezler. Şekil 3.2’ de görüldüğü üzere elyaflar yüksek çekme dayanımına, düşük süneklığe sahipken matris malzeme olarak kullanılan reçinenin birim şekil değiştirmesi yüksek, çekme dayanımı düşüktür ve bu iki malzeme bir araya getirilerek oluşturulan elyaf takviyeli kompozit malzeme her iki özellikten de alarak optimum bir malzeme ortaya çıkarmaktadır.

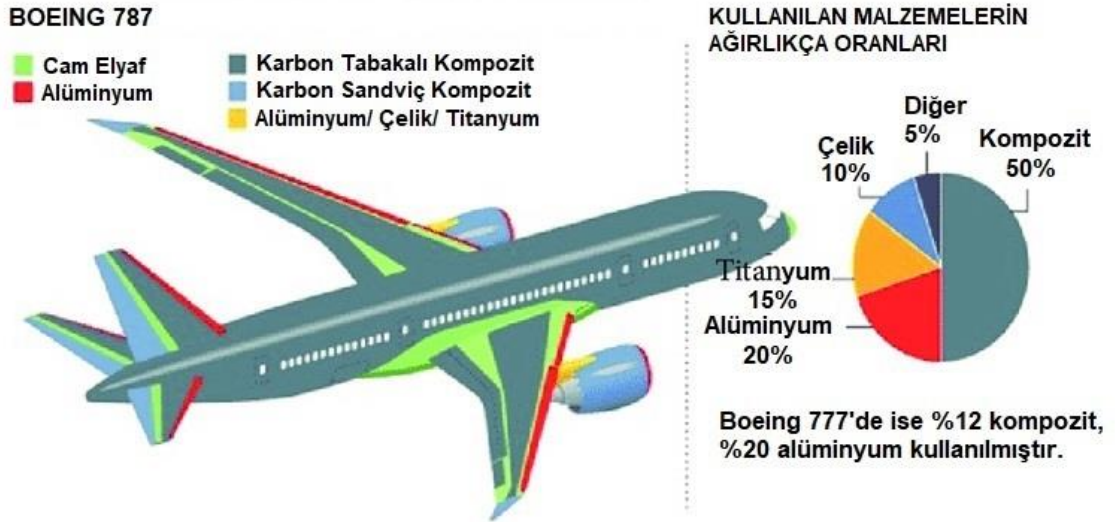


Şekil 3.2 Elyaf, reçine ve ikisinden oluşan kompozitin Gerilim-Şekil Değişirme eğrisi

Genel olarak kompozitler Elyaf-Reçine, Elyaf-Seramik, Metal-Beton, Metal-Reçine, Metal-Elastomer, Elyaf-Elastomer, Ahşap-Reçine gibi kombinasyonlarda üretilmekte olup üretimde kullanılan yöntemlerden bazıları ise el yatırması, iplik sarma, profil çekme (pultrüsyon), prepreg, püskürtme, reçine transfer, hazır kalıplama ve vakum infüzyon yöntemleridir.

Kompozit malzemelerin uzay teknolojisi, denizcilik, tıp, robot teknolojisi, kimya sanayi, elektrik-elektronik teknolojisi, müzik aletleri endüstrisi, inşaat ve yapı sektörü, otomotiv sektörü, savunma sanayi ve havacılık sektörü, gıda ve tarım sektörü, spor malzemeleri imalatı gibi birçok alanda kullanımları mevcuttur. Genelde elektriksel, termal, kütleli ve çevresel etkileri bakımından kullanılacakları yerlerde görev alırlar.

Şekil 3.3' de Boeing firmasının en son üretmiş olduğu 787 serisi uçağında kullanılan malzemeler görülmektedir. Burada %50 kullanım oranı ile ağırlıkça uçağın yarısını kompozit malzemeler oluşturmaktadır. Görüldüğü üzere uçağın ana gövdesi tamamen karbon tabakalı kompozitten oluşmuş ve bu da dünyada ilk defa bu uçak ile yapılmıştır.

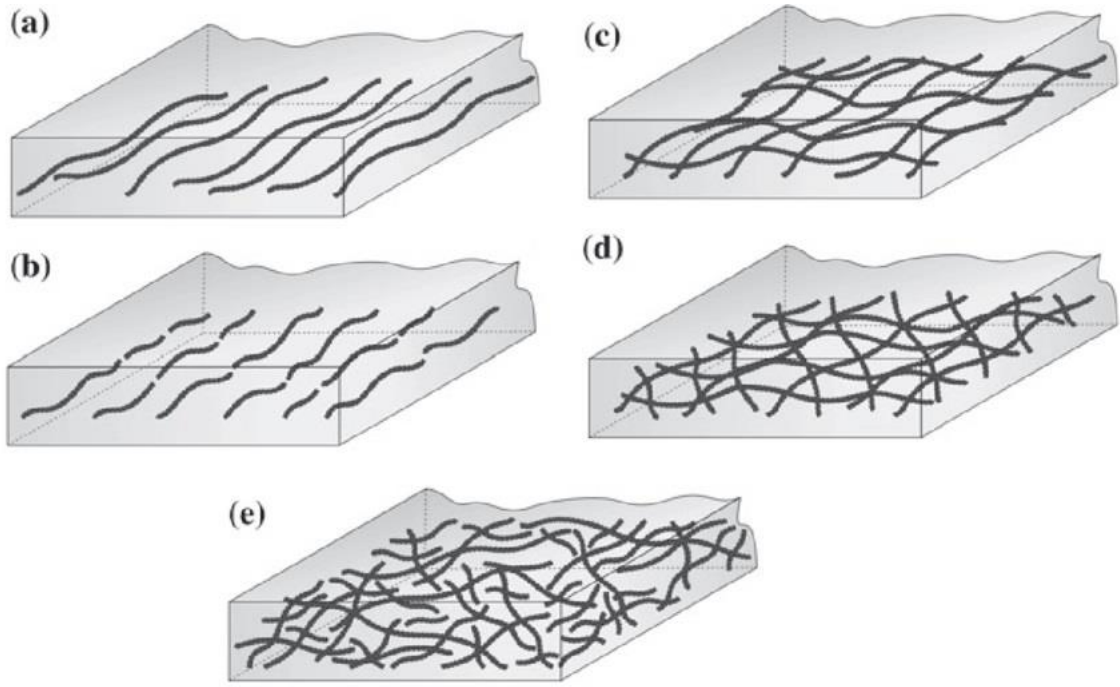


Şekil 3.3 Boeing 787 uçağında kullanılan malzemeler (Alemour ve ark., 2019)

Yüksek mukavemetli oluşları, kolay şekillendirilebilmeleri, iyi elektriksel özellikleri, korozyona ve kimyasal etkilere karşı yüksek mukavemet göstermeleri, ısıya ve ateşe karşı dayanıklı olmaları, titreşim ve ses sönümleyebilmeleri kompozit malzemelerin genel avantajları iken; üretim esnasında oluşabilen hava boşlukları, izotropik olmayışı ve talaşlı imalat zorluğu bazı dezavantajlarıdır.

3.1.1.1. Elyaf takviyeli kompozitler

Elyaf takviye elemanlarının önemli bir parçasını oluştururlar; çünkü gücü matrise kolaylıkla iletirler ve istenen özellikleri yerine getirebilmesi için gerekli şartları sağlarlar. Bir elyaf takviyeli kompozitin performansı, elyafın uzunluğuna, şekline, dizilimine ve elyaf ile matrisin mekanik özelliklerinin uyumuna bağlıdır. Bu kompozitler ince elyafların matris yapı içerisine tek yönlü sürekli, kırılmış, çapraz dizilmiş ve rastgele dizilmiş olarak koyulması ile oluşturulurlar. Şekil 3.4' de elyaf takviyeli kompozitlerin oluşturulma biçimleri görülmektedir.



Şekil 3.4 Elyaf takviyeli kompozit çeşitleri. a) Tek yönlü, sürekli, elyaf takviyeli b) Tek yönlü, süreksiz, elyaf takviyeli c) 0° - 90° dizilimli, sürekli, elyaf takviyeli d) Çok yönlü, sürekli, elyaf takviyeli e) Kırılmış, süreksiz, rastgele dizilmiş (Carvalho ve ark., 2013)

Elyafın matris içerisindeki yerleşim düzeni, kompozit malzemenin dayanımına etki eden önemli bir faktördür. Elyaf matris uyumu da kompozitin mukavemetinin bir göstergesidir ve mukavemet tek yönlü sürekli elyaflar için boylamasına yönde en yüksektir. Fakat en iyi performansı alabilmek için uygulanan yükün de bu yönde olması gerekir. Yükteki çok küçük bir açısal sapma kompozitin dayanımını çok yüksek oranda düşürebilir. İki boyutlu dizilmiş elyaf takviyeler ile her iki yönde de aynı dayanım meydana gelirken, matris içerisinde homojen yayılmış kısa elyaflar ile izotrop bir yapı meydana getirmek mümkündür (Öztürk, 2007).

Elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri, kompozit içerisindeki elyaf/matris oranlarını değiştirerek ve her fazın sahip olduğu özellikleri düzenleyerek ayarlanabilir. Elyafların yönlerine bağlı olarak özellikleri değişiklik gösteren kompozit malzemeler anizotropik malzemelerdir. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde yumuşak ve sünek matris içerisine sert, dayanıklı, elastikliği yüksek elyafların takviyesi ile çekme mukavemeti, yorulma mukavemeti gibi genel mekanik özellikler iyileştirilebilmektedir.

3.1.1.2. Parçacık takviyeli kompozitler

Genel olarak parçacık takviyeli kompozitlerin dayanımının, aynı malzemenin elyaf şeklinde olduğu elyaf takviyeli kompozitlerin dayanımına göre daha düşük olduğu söylenebilir. Parçacık takviyeli kompozitler iri parçacıklı ve saçınımlı dayanımı arttırılmış kompozitler olarak ikiye ayrılmaktadır. İri parçacıklı kompozitler adından da anlaşılacağı üzere matris içerisinde nano seviyede olmayan parçacıklardan oluşan kompozitlerdir. Metal, seramik ve polimer malzemeler ile kullanılır. Sermetler, seramik-metal kompozitlerine örnektir. En yaygın sermet ise sinterlenmiş karbürdür. Saçınımlı dayanımı artırılmış kompozit ise sert ve kararlı malzemelerin parçacıklarının metal veya metal alaşımları içerisine homojen olarak saçılması ile elde edilir.

Parçacık takviyeleri kompozit malzemenin dayanım ve tokluğunu iyileştirmesinin yanı sıra sertliğini arttırmak için kullanılır. Mekanik özelliklerinden dolayı aşınma direncinin yüksek olması istenen yerlerde kullanılır. Örneğin çimentonun sertliği içine koyulan kum veya çakıllar ile çok yüksek seviyelerde arttırılabilir. Parçacık takviyeler kompozitin mekanik özelliklerini ayarlama büyük avantaja sahiptirler, çünkü üretimi çok kolay ve ucuzdurlar.

Parçacıklar çok çeşitli geometrilerde olabilirler ama her düzlemde neredeyse aynı ölçüde olmaları gerekir. Etkili bir takviye olabilmeleri için küçük ve matris içerisinde eşit bir şekilde yayılmaları gerekir. Aslında parçacık ve matris hacim oranı malzemenin mekanik davranışını etkilemektedir ve parçacığın artırılması ile mekanik özellikler iyileştirilebilir (Callister Jr ve Rethwisch, 2020).

3.1.1.3. Tabakalı kompozitler

Tabakalı kompozit yüksek dayanım istenen yönlerde iki boyutlu levhaların ya da panellerin tabakalanması ile oluşturulur. Tabakalı kompozit malzemenin içerisinde en az iki farklı faz bulunmaktadır. Bu fazlardan biri kompozitin özelliklerini sağlayan sürekli faz, diğeri ise sürekli fazın oluşturduğu tabakaları birlikte tutan bağlayıcı fazdır. Tabakalanmış elyaf kompozitler, elyaf kompozit ve tabakalama yöntemlerinin her ikisini gerektiren kompozitlerin melez sınıfıdır (Demirci, 2015).

Tabakalı kompozit üretiminde önce katmanlar üst üste koyulur daha sonra birbirine yapıştırılır. Her katmanda malzemeye gelecek yükler göz önünde bulundurularak elyaf yönlerine dikkat edilir. Örneğin bir ahşap kontrplakta ağaç levhalar

ağacın damarları doğrultusunda doğru açıda dizilmiştir. Tabakalama plastik matris içine yerleştirilmiş pamuklu kumaş, kâğıt, örülmüş cam elyaf gibi malzemeler kullanılarak da yapılabilir. Bu yüzden tabakalı kompozitler iki boyutlu levha içerisinde birçok yönde oldukça yüksek dayanıma sahiptir (Callister Jr ve Rethwisch, 2020).

3.1.1.4. Hibrit kompozitler

İki veya daha fazla farklı takviye malzemesinin bir araya getirilmesi ile oluşturulan kompozitlere hibrit kompozit denilmektedir. Hibrit kompozitlerin temel amacı malzemenin mukavemet, tokluk ve süneklik gibi mekanik özelliklerini farklı bir takviye malzemesi kullanarak dengelemektir.

Mekanik davranış üzerinde hibrit etkisi diye tanımlanan sinerjik bir etki de görülmektedir. Hibrit etkisi için araştırmacılar tarafından 3 farklı hipotez ortaya konulmuştur. Bunlar artık gerilmeler, hasar ilerlemesindeki değişimler ve dinamik gerilme yığılmalarıdır. Pozitif veya negatif hibrit etkisi belirli mekanik özellik bakımından hibritin davranışından pozitif veya negatif değişim yapmasına göre isimlendirilir (Marom ve ark., 1978).

Hibrit kompoziti oluşturan bileşenlerin seçimi tasarlanan yapı veya malzemenin ihtiyaçları ve hibritleşmenin amacı ile belirlenir. Uyumlu elyaf tiplerini seçmek hibrit kompoziti tasarlarırken ve üretirken çok önemli bir yere sahiptir. Hibrit kompozitlerin başarısı elyaf/matris yapısının kimyasal mekanik ve fiziksel kararlılığı ile ifade edilir (Pothan ve ark., 2010).

Hibritleştirme sentetik elyafların daha iyi dayanım, sertlik, mukavemet ağırlık oranı ve diğer mekanik özellikler elde etmek için doğal, metalik veya başka sentetik elyaflar ile birleştirilmesi işlemidir (Prabhuram ve ark., 2010).

Hibrit kompozitler temelde 5 farklı yöntemle üretilmektedir. Bunlar karışık tabakalı, karışık lifli, tabaka ve lifler birlikte karışık, reçine hibrit ve süper hibrit kompozitlerdir.

Karışık tabakalı hibritler iki veya daha fazla katman haldeki homojen takviye malzemesinin üst üste yığılması ile oluşturulan hibrit kompozitlerdir (Pegoretti ve ark., 2004). Çekme ve eğilmeye karşı düşük mukavemet gösterebilirler bile karışık tabakalı hibritler çok iyi seviyede kırılma deformasyonu gösterirler. Bundan dolayı birçok araştırmacının da açıkladığı gibi pozitif hibrit etkisi karışık tabakalı hibritlerde karışık lifli hibrit kompozitlere göre daha fazladır (Rajpurohit ve ark., 2018). Karışık tabakalı yapıda bir hibrit kompozit dizilimi Şekil 3.5’ de görülmektedir.



Şekil 3.5 Karışık tabakalı hibrit kompozit dizilimi(Uzay ve ark., 2017)

Aynı katman içerisinde iki veya daha fazla elyaf tipinin birlikte örülmesi ile oluşturulan malzemeye karışık lifli hibrit malzeme denir. Karışık lifli yapıda bir hibrit kompozit dizilimi Şekil 3.6’ da görülmektedir.



Şekil 3.6 Karışık lifli elyaf kumaş (Uzay ve ark., 2017)

Adından da anlaşılacağı üzere tabaka ve liflerin karışık olduğu hibrit kompozit ise yukarıda bahsedilen kumaşların birlikte kullanılması ile oluşturulur.

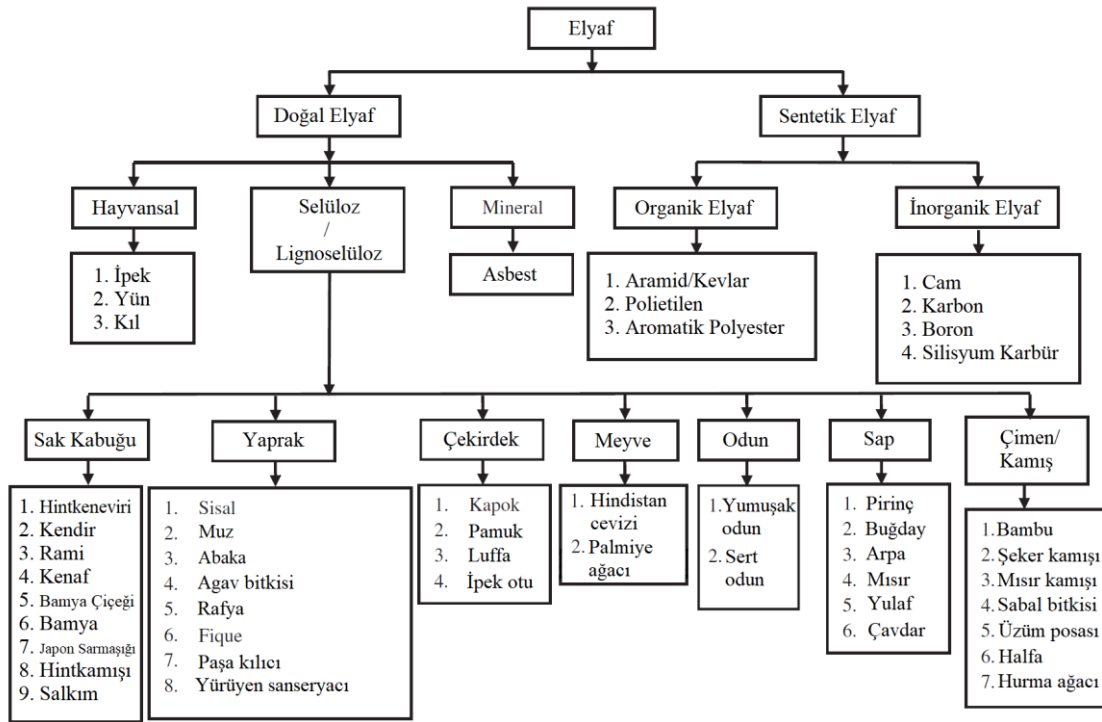
Farklı türde matris elemanının kullanılması ile oluşturulan hibrit kompozite reçine hibrit kompozit denir. Bu kompozitlere diş tedavisi, ortopedide kırık tedavisi gibi sağlık sektöründe karşılaşılmaktadır.

Süper hibrit kompozitler, tabakalar arasına belirli bir sırada metal levha veya metal kompozit plakaların yerleştirilmesi ile üretilir (Pegoretti ve ark., 2004). 1980’lerin başlarında aramid takviyeli alüminyum plakalar kullanılmaya başlanmış fakat aramidin

yüksek maliyetli olmasından dolayı sivil kullanımda bu uygulama pek yer bulamamıştır. Daha sonra maliyeti düşürmek amaçlı doğal malzemeler ile süper hibrit malzeme kullanımına yaygın bir şekilde devam edilmiştir.

3.1.2. Takviye malzemeleri

Elyaf takviye malzemeleri doğal elyaflar ve sentetik elyaflar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Doğal elyaflar doğada kendiliğinden bulunan elyaflar iken sentetik elyaflar kimyasal ve fiziki işlemler sonucu elde edilen elyaflardır. Şekil 3.7’ de elyaf çeşitleri ve edinim yolları görülmektedir.



Şekil 3.7 Elyaf çeşitleri ve edinim yolları (Sathishkumar ve ark., 2014)

Çizelge 3.1’de ise cam, keten, kenevir ve jüt elyafların bazı mekanik özellikleri verilmiştir. Buradan anlaşılacağı üzere keten elyaf doğal elyaflar arasında en iyi mekanik özellik gösteren elyaf durumundadır.

Çizelge 3.1 E-cam ve bazı doğal elyafların mekanik özellikleri (Sparnins, 2009)

Elyaf	Elastisite modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Yoğunluk (g/cm ³)	Özgül Çekme Katsayısı	Özgül Çekme Dayanımı
E-Cam	72	3530	2,54	28,2	1390
Keten	50-70	500-900	1,4-1,5	□41	□480
Kenevir	30-60	300-800	1,48	□30	□370
Jüt	20,55	200-500	1,3-1,5	□27	□250

3.1.1.5. Doğal elyaflar

Doğal elyaflar bitkisel, hayvansal ve mineral olarak 3'e ayrılmaktadır. Doğal elyaflar çevre dostu, düşük fiyatlı, düşük ağırlıklı ve evrende bol miktarda bulunmalarından dolayı tercih sebebi olmuşlardır (Yuhazri ve ark., 2016).

Bitkisel elyaflar kuru bazlı, hücre duvarları temel olarak selülozdan oluşmuş bitkilerden üretilir. Kimyasal bileşimi temel olarak elyafın kökenine bağlıdır ve aynı familyadan olsalar da farklı bitkilerde değişiklik gösterir. Kökenlerine göre bitkisel elyaflar; ıhlamur lifleri, yaprak lifleri, meyve lifleri, çekirdek lifleri, çim lifleri, kamış lifleri ve odun lifleri olarak sınıflandırılabilirler. Çizelge 3.2 bitkisel liflerin bazı özelliklerini göstermektedir. (Rodriguez-Castellanos ve Rodrigue, 2016). Ek-1' de ise bazı doğal elyafların mekanik özellikleri bulunmaktadır.

Çizelge 3.2 Bitkisel elyaf örnekleri

Elyaf Tipi	Karakteristik	Örnek
İhlamur	Yüksek selüloz içerir, esnektir	Keten, kenevir, kenaf
Çekirdek	Çekirdek etrafında oluşur	Pamuk, kapok ağacı
Meyve	Meyve kabuklarından elde edilir	Hindistan cevizi, palmye ağacı
Sap	Tahıl ürünlerinin sapından elde edilir	Buğday ve mısır sapı
Çim	Çimden elde edilir	Bambu, kargı, halfah otu
Yaprak	Yaprakların üst zarlarından elde edilir	Muz, ananas, agave
Odun	Çiçek veren ve kozalaklı ağaçlardan elde edilir	Akçağaç, çam

Keten elyaf kompozit üretiminde en sık kullanılan doğal elyaflardandır. Keten bitkisinin saplarından üretilir. Adı Arapçada kullanılan "kutan" kelimesinden gelmektedir, rutubetli ve serin iklimlerde yetişmektedir. Keten tohumu bitkisidir. Tohum için yetiştirildiğinde, 'bezir yağı' elde edilir. Lifleri kullanılacaksa, bitki körpeyken kesilir.

Bitkinin her sapında ortalama 1000 adet sap lifi bulunur. Keten sapının %25'i elyaf olarak kullanılır. Keten bitkisinden elyaf elde edebilmek için öncelikle çürütülür, daha sonra dövülür ve son olarak eğrilir. İplik formuna geldikten sonra ise dokunur.

Keten elyaf tekstil sanayiinde de sıklıkla kullanılmaktadır. Yapısı gereği her mevsimde kullanılmaya müsaittir. Güneş ışınlarının insan derisine nüfuz etmesini önler ve yüksek emiciliği sayesinde kısa sürede nemi vücuttan atar. Sıcak yaz günlerinde serin ve ferah tutmayı başarır.

İpeğe benzeyen hafifliği ve güçlü dokusu ile keten, yüzyıllardır aranan bir elyaf türü olmuştur. Bugün de doğal oluşu ve muhteşem renkleri ile dekorasyonda en fazla kullanılan malzemelere öncülük etmektedir.

Keten lifleri dayanıklılık açısından diğer bitkisel lifler arasında ilk sırada yer almaktadır. Bu özelliğinden dolayı birçok kompozit ürünlerde kullanılmaktadır. Keten elyafın temel mekanik özelliklerinin iyi olmasının yanında ses ve titreşim sönümleme özellikleri de oldukça iyidir (Prabhakaran ve ark., 2014).

Bir diğer doğal elyaf edinim yöntemi ise hayvanlardan olmaktadır. Hayvansal liflerin yapı taşı proteindir. Hayvan kaynaklı üretilen liflerin yıllık üretimi, diğer tüm liflerin toplamının %10' undan azdır. Bu miktar dünyadaki lif üretiminin çok az bölümünü oluşturur (Doğan, 2015).

Hayvanlardan elde edilen liflerin başında yün gelir. Yün elyafı hayvansal liflerin kıl kökenliler grubuna girer. Yün lifleri koyunlardan bahar aylarında kırılarak elde edilir. Koyun cinsine bağlı olarak yün, kalite farklılıkları gösterir. Temizlenmemiş yün içerisinde, deri içindeki ter bezlerinden dolayı oluşan yağlar, vakslar ve ter tuzları vardır. Bunlara ek olarak hayvanın yaşadığı yerden gelen ot, toprak ve dışkı atıkları da bulunabilmektedir (Doğan, 2015).

Hayvansal liflerin bir diğeri ise ipektir. Doğal ipek, ipekböceğinden elde edilir ve böcek bu lifi kendi salgısı ile üretir.

3.1.1.6. Sentetik elyaflar

Kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak kullanılan sentetik elyaflar kullanım yeri ve fiyatlarına göre farklılık göstermektedirler. En çok tercih edilen sentetik elyaflar cam, karbon ve aramid elyaflardır. Son zamanlarda cam elyafa göre daha iyi mekanik özellikler gösteren bazalt elyafın takviye elemanı olarak kullanılması hızla artmaktadır.

Cam elyaflar az miktarda farklı oksitlerinde eklenmesiyle silikon oksitten yapılmaktadır. Yüksek mukavemet, iyi sıcaklık ve korozyon dayanımı ve düşük fiyatları ile ön plana çıkmaktadırlar.

E-Cam, C-Cam ve S-Cam olmak üzere 3 ana türde cam elyaf vardır. E-Cam en çok kullanılan olup adını iyi elektriksel özelliklerinden alır. C-cam, korozyon oluşumuna elverişli ortamlarda yapısal denge sağlayan kalsiyum borosilikat içeren cam elyaf tipidir. S-Cam ise çok dayanıklı, sert ve sıcaklık dayanımı yüksektir. Cam elyaflar otomotiv, denizcilik endüstrisi, spor ekipmanları gibi birçok sektörde takviye maddesi olarak kullanılmaktadır. Eritilmiş camın bir lüleden dışarı saçıldığı iplik çekme yöntemi ile üretilir. Camın akışkanlığı, sıcaklığı ve çekme hızının değiştirilmesi ile üretilen elyafın çapı değiştirilir. Piyasaya fitil, bükülmüş iplik, keçe ve dokuma şeklinde sunulur. Çizelge 3.3' de E-cam, C-cam ve S-cam elyafların % ağırlık olarak bileşenleri verilmiştir.

Çizelge 3.3 Cam elyaf çeşitlerinin % ağırlık olarak bileşenleri (şahin, 2015)

Bileşen	E-cam (%)	C-cam (%)	S-cam (%)
SiO ₂	52,4	64,4	64,4
Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	14,4	4,1	25,0
CaO	17,2	13,4	-
MgO	4,6	3,3	10,3
Na ₂ O.K ₂ O	0,8	9,6	0,3
Ba ₂ O ₃	10,6	4,7	-

Karbon elyaflar cam elyaflardan sonra en çok kullanılan ve polimer kompozitler için en sert ve en dayanıklı takviye malzemeleridir. Grafit formundaki saf karbondan yapılan elyaflar düşük yoğunluk ve negatif termal uzama katsayısına sahiptir. Karbon elyaflar çok pahalıdır ve metallerle temasında galvanik korozyon oluşturabilirler. Genellikle yarış arabaları, otomotiv ve uzay uygulamaları, spor ekipmanları gibi yüksek dayanım ve sertlik gerektiren yerlerde epoksi ile birlikte kullanılırlar. Karbon elyaflar PAN veya pitch metotları ile üretilirler. PAN metodu bir karbon atom zincirini ısıtarak ve oksitleştirerek poliakrilnitrilden ayırır. Pitch metodu ise sıcak sıvı bölgesinden bir lüle aracılığıyla grafit ipliklerini çekmeye dayanır. Çizelge 3.4' de bazı karbon elyafların mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.4 Karbon elyaflardan bazılarının mekanik özellikleri (Yalçın, 2012)

Ürün Kodu	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Elastiklik Modülü (GPa)	Yoğunluk (g/cm ³)
T300 3K	3650	231	1,76
T650/35 3K	4550	241	1,77
Thornel P25	1400	160	1,90
Thornel P75	390	320	1,70

Aramid elyaflar delinmeye karşı gösterdikleri direnç ve yüksek sertlik özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. Aramid elyaflar yüksek tokluk özelliği sebebiyle kurşun geçirmez yelekler, bisiklet lastikleri gibi yüksek delinmezlik gereken yerlerde ve uçak kanatları, spor ekipmanları gibi endüstrilerde de kullanılmaktadır.

Bu elyaflar fiyatları, kolay sıvı emmeleri ve üretim sonrası işleminin zor olması nedenlerinden dolayı cam ve karbon elyaflar kadar yaygın değildirler. Aramidler Kevlar ve nomex ticari adı ile de bilinirler. Çizelge 3.5’ de yaygın olarak kullanılan bazı kevlarların mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.5 Bazı kevlarların mekanik özellikleri (Yalçın, 2012)

Ürün Kodu	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Elastiklik Modülü (GPa)	Uzama (%)	Yoğunluk (g/cm ³)
Kevlar 29	2920	70	3,6	1,44
Kevlar 49	3000	112	2,4	1,44
Kevlar 149	3450	179	2	1,47

3.1.3. Matris malzemeleri

Elyafları birlikte tutarak yükü elyaflara dağıtan ve elyafı her türlü çevresel etkiden koruyan malzemeye “matris malzeme” denir. İdeal bir matris malzemesinin sürecin başlangıcında viskozitesi düşük olmalıdır. Proses tamamlandıktan sonra elyafları koruyabilecek katı bir formda olmalıdır (Bozkurt, 2011).

Matris malzemesi polimerik, metalik ve seramik olabilir. Son zamanlarda polimer matris malzemeler otomotiv parçaları, uçak parçaları, ev içi gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır (T P ve ark., 2014).

3.1.1.7. Polimerik matrisler

Kompozit dünyasında kullanılan matrislerin %90'a yakını polimerik matrisler oluşturmaktadır. Polimer matrisli kompozit malzemelerde matris malzemesi polimerlerdir. Kompozitlerde kullanılan plastik matrisler, termoset ve termoplastik olarak iki alt kategoriye ayrılmaktadır. Termoset esaslı malzemeler üretilirken malzeme bir defa ısıtılır ve şekil verilir, sonrasında malzeme tekrar ısıtılarak şekil elde edilemezler. Termoset matrisli malzemelerin molekülleri birbirlerine çapraz bağlı olduğu için bu malzemelerin geri dönüşümü yoktur ve tekrar kullanılamazlar (Yıldızhan, 2008). Termoplastikler ise rijit bir ağ yapısına sahip değildir, belirli bir sıcaklığın üzerine çıkıldığında yumuşarlar ve sıcaklık arttıkça viskoziteleri düşer. Bu malzemeler tekrar soğutulduğunda sertleşirler. Buharlaşarak bileşimleri değişmedikçe bu çevrim tekrarlanır. Termoplastik malzemelerin kullanıldıkları sıcaklıklar da termoset malzemelere göre daha düşüktür.

Polimerik matrisli kompozitlerin üretim masrafları azdır ve bu yüzden sıklıkla kullanılırlar. Bu malzemelerin başlıca avantajları düşük yoğunluk, elektrik ve ısı iletkenlikleri ile yüksek korozyon dayanımlarıdır (Yüce, 2007). Genellikle termoset malzemeler tercih edilir; fakat şekil verilebilme özelliklerinin çok iyi olmasından dolayı elyaf takviyeli termoplastik malzemelerin kullanımı da hızla artmaktadır. Kompozit üretiminde en çok kullanılan polimerik matris malzemeleri ise epoksi reçine, polyester reçine, vinil ester reçine, fenolik reçine ve silikon reçine matrislerdir.

Epoksi reçineler kompozit ürünlerde çok geniş bir kullanıma sahiptir. Epoksi güçlü ve çok dayanıklı bir termoset plastiktir. Reçinenin yapısı kompozitlerin performansına direkt etki eder. Epoksi reçinelerin polyester reçinelere göre en büyük üstünlüğü düşük çekilme oranıdır. Aynı zamanda epoksi reçineler farklı malzemeler ile veya diğer epoksi reçineler ile belirli performans özelliklerini iyileştirmek için karıştırılabilir. Epoksiler esas olarak üstün mekanik özellikleri olan, sıvı ve çevre faktörlerine dayanıklı, üstün elektrikli özellikleri olan, yüksek sıcaklıklara dayanabilen yüksek performanslı kompozitlerde kullanılmaktadır. Fakat epoksi reçinelerin UV dirençleri iyi değildir.

Epoksi neredeyse tüm asit ve çözücülere karşı dayanıklıdır, fakat baz ve klor içeren çözücülere karşı dayanıklı değildir. Sertleştirici madde ekleyerek kürleşme işlemi yapılır. Sertleştiricinin tipi epoksi uygulamada ve özelliklerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Polyester reçineler kompozit endüstrisinin başını çekmekte ve toplam reçine kullanımının yaklaşık %75' ini oluşturmaktadır. Hammadde imalat teknikleri çeşitliliği istenen özellikte ürün çıkarmak için elverişlidir. Polimer zincirleri oluştururken değişebilme yeteneğinden dolayı polyesterler çok yönlüdür. Kompozit endüstrisinin her alanında neredeyse limitsiz kullanıma sahip oldukları bilinir. Bu reçinelerin temel avantajları mekanik, kimyasal, elektriksel gibi özelliklerin çok dengeli olması, boyutsal durağanlık, fiyat ve işlenebilme kolaylıklarıdır. Polyester üreticileri belirli kullanıcı özelliklerine göre istenen özellikleri karşılayacak reçineyi sağlama kabiliyetine sahiptirler.

Vinil ester reçineler doymamış polyester reçinelerin hızlı sertleşmesi ve epoksi reçinelerin üstün mekanik özelliklerini bir araya getirmek için geliştirilmiştir. Bu reçineler akrilik veya metakrilik asitler ile epoksi reçineleri reaksiyona sokarak üretilmektedir. Bu da maleik anhidrit kullanılan polyester reçinelerdeki gibi bir doymamış alan sağlar. Oluşan malzeme polyester reçineye benzer bir sıvı üretmek için stiren içerisinde çözdürülür. Vinil ester reçineler aynı zamanda polyesterler ile kullanılan organik oksijenli su ile yıkanır.

Vinil esterler mekanik tokluk ve üstün korozyon direnci sunarlar. Bu gelişmiş özellikleri epoksi reçinelerdeki gibi karmaşık imalat yöntemi veya özel atölye üretimi olmadan elde edilebilir.

Fenolikler genelde fenole dayalı bir reçine sınıfıdır. Fenolikler yoğunlaşma reaksiyonu ile üretilen termoset reçinelerdir. Renkli uygulamaları kırmızı, kahverengi ve siyah ile kısıtlıdır. Fenolik kompozitler yüksek sıcaklık direnci, akma direnci, yüksek termal yalıtım ve ses yalıtım gibi birçok istenen performans özelliğine sahiptir. Fenolikler kontraplak, fren balatası, kavrama plakaları devre kartları ve bu gibi yerlerde yapıştırıcı olarak uygulanır.

Silikon reçineler, diğer reçinelerin aksine içerisinde inorganik yapıları silikon bulunduran reçinelerdir. Silikon esaslı reçineler mekanik ve elektriksel özelliklerini 250 C° ye kadar koruyabilmektedir. Mekanik mukavemetlerinin diğer reçineler ile karşılaştırıldığında nispeten daha düşük ve maliyetlerinin daha yüksek olmasından dolayı kullanım alanları kısıtlıdır (Topal, 2014).

3.1.1.8. Metal matrisler

Kompozit malzemelerde kullanılan metal matrisler, elyafla beraber kompozit malzemeyi bir bütün olarak tutarak malzemenin mekanik özelliklerini belirler. Yük taşıması bakımından polimerik matrislere göre yüksek mukavemet gösterirler. Üretim zorluğu ve maliyet yüksekliğine rağmen, metal matrisler kompozit malzemenin tokluğunu ciddi oranda yükseltir ve yüksek sıcaklık istenen yerlerde kullanılabilirler. Metaller matris olarak kullanılmaya, küçük metal liflerin üretilmesi ile başlamıştır. Bakır, alüminyum, titan, nikel, gümüş gibi malzemeler başlıca metal matris malzemeleridir. Metal matrisler erimiş durumda, molekül formda, levha ya da plaka halinde olabilirler. Metal matrisli kompozitler ise dökme, karıştırma, presleme, haddeleme gibi yöntemlerle üretilmektedir. Üretim aşamasında kullanılan liflerin zarar görmemesi sağlanmalıdır. Metal matris ile en basit kullanılan elyaflar bor ve borsic elyaflardır. Bunlarla üretilen kompozit 450-500 C° sıcaklıkta, sıcak presleme ile yapılır ve bu malzeme 300 C° çalışma sıcaklığına kadar özelliğini korumaktadır (Topal, 2014).

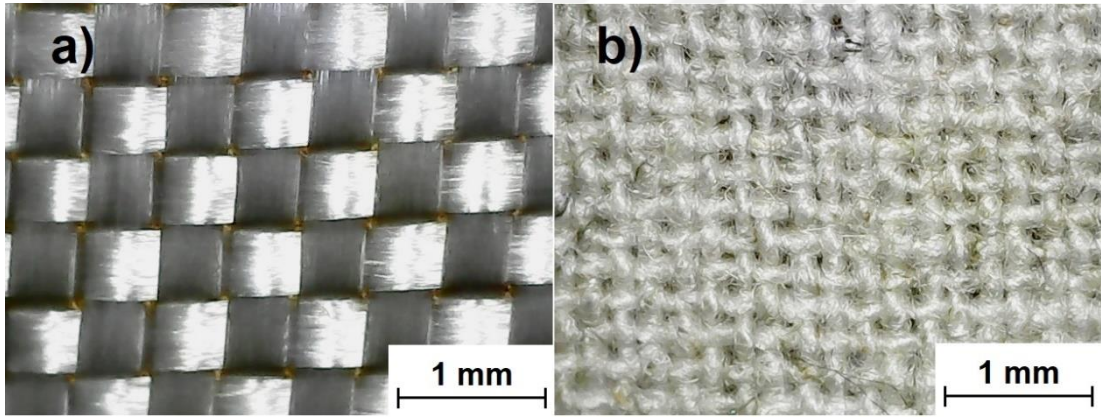
3.1.1.9. Seramik matrisler

Seramikler, plastik ve metallerin sahip oldukları yüksek dayanım özelliklerinin yanı sıra yüksek ısıl dayanıma sahiptirler. Takviye malzemesi olarak genelde Al_2O_3 ve SiC, lif şekline getirilerek kullanılırlar. Genellikle yüksek çalışma sıcaklığı istenen yerlerde kullanılırlar. Seramikler sert ve kırılgandırlar, kopma uzamaları ve toklukları çok düşüktür ve termal şoklar karşısında dayanımları düşüktür. Bundan dolayı lifler ile takviye edilirler. Buna karşın çok yüksek elastiklik modülü ve çalışma sıcaklıklarına sahiptirler (Tuncer, 2018). 3 tip seramik matrisli kompozit malzeme vardır. Sürekli elyaflı kompozitler, süreksiz elyaflı kompozitler ve partiküllü kompozitler. Türbin motor parçaları, sıcak gaz filtreleri, ısıl işlem fırınları, motor yalıtımı, fren diskleri, sıcak gaz filtreleri gibi yerlerde kullanılırlar.

3.2. Yöntem

3.2.1. Malzemenin üretilmesi

Kompozit numunelerin üretimi için takviye malzemesi olarak E-cam elyaf ve keten elyaf, matris malzemesi olarak epoksi reçine kullanılmıştır. Kullanılan cam elyaf kumaş Arcmarin firmasından temin edilmiş olup düz örgülü ve 300gr/m² ağırlığına sahiptir. Keten elyaf kumaş www.kumaszade.com online satış sitesinden temin edilmiş olup düz örgülü ve 225 gr/m² ağırlığa sahiptir. Kullanılan epoksi reçine ise ARC 152 seridir ve yine Arcmarin firmasından temin edilmiştir. Kullanılan cam elyaf ve keten elyafın yakın çekim görüntüleri Şekil 3.8’ de görülmektedir.



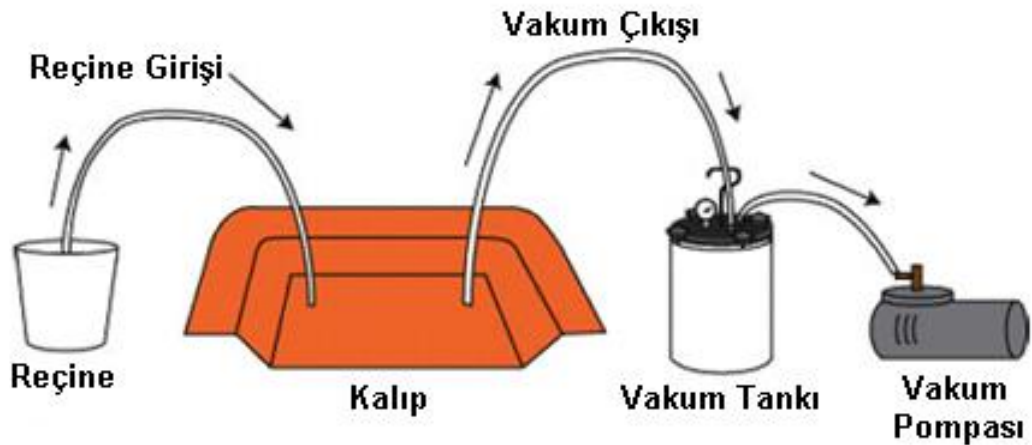
Şekil 3.8 Kompozit numune üretiminde kullanılan a) Cam elyaf kumaş, b) Keten elyaf kumaş

Kompozit üretimi Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunan Şekil 3.9’ da görülen Vakum İnfüzyon Makinesi kullanılarak yapılmıştır. Bu yöntemde kompozitin üretileceği tablanın üzerine öncelikle vakum naylonu koyulmuş onun üzerine soyma kumaşı serilmiştir, daha sonra soyma kumaşının üzerine cam ve keten elyaf kumaşlar $-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}$ ve $0^{\circ}/90^{\circ}$ açılı olarak, cam/keten hibrit kompozit C/K/C/K/C/C/K/C/K/C, C/C/K/K/C/C/K/K/C/C, C/C/K/K/K/K/K/K/C/C, C/K/K/C/C/C/K/K/C dizilimleri ile yatırılmıştır. Bu elyaf tabakaların üzerine tekrar bir kat soyma kumaşı onun üzerine infüzyon filesi ve son kat olarak vakum naylonu serilmiştir. En alt ve üstte bulunan vakum naylonu arasına birbirlerinin karşısına gelecek şekilde epoksinin homojen dağılımını sağlamak için infüzyon spiral hortum ortalarında T bağlantı borusu olacak şekilde koyulmuş ve vakum naylonları vakum sızdırmazlık bandı kullanılarak birbirine yapıştırılmıştır. Diğer taraftan epoksi reçine ve sertleştirici ağırlıkça 4:1 oranında ahşap karıştırıcı kullanılarak el ile

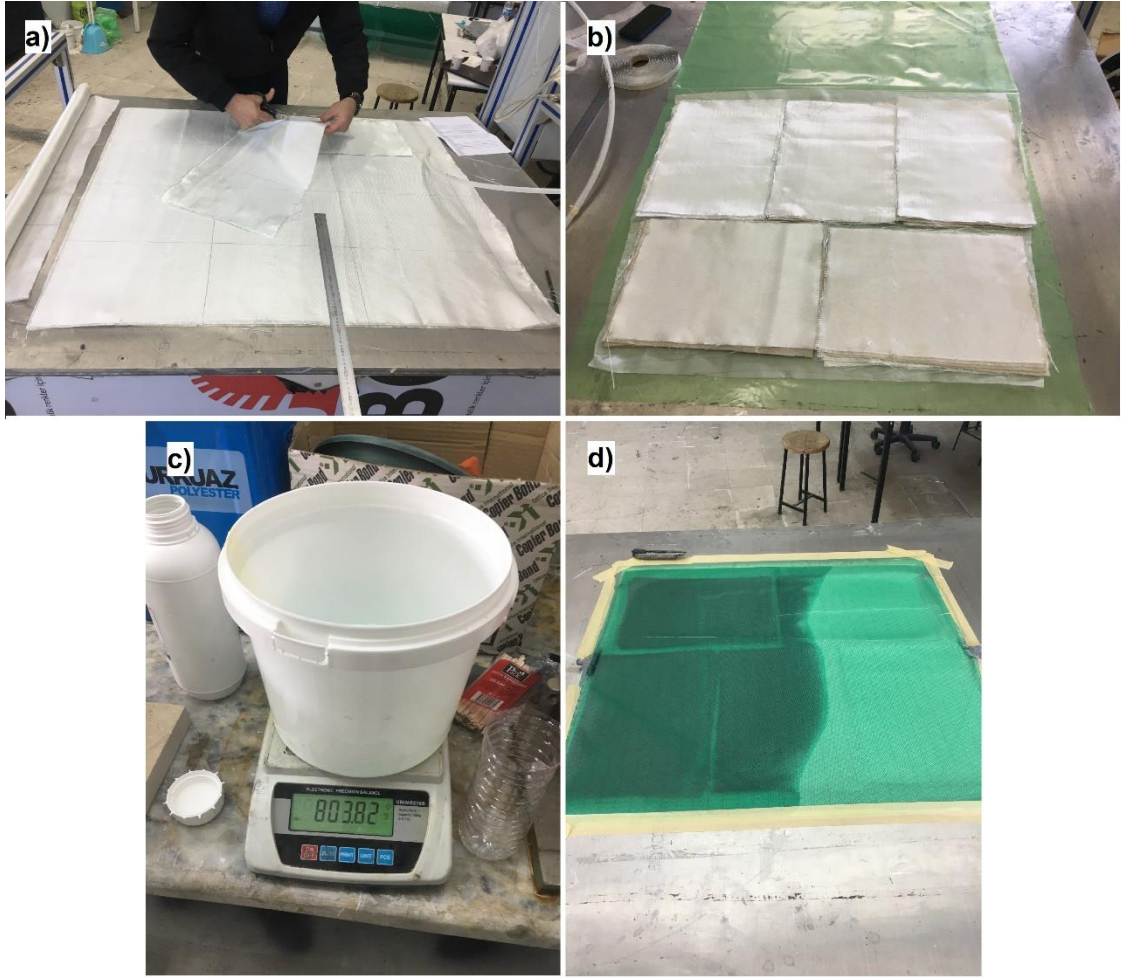
karıştırılmış ve besleme kabına koyulmuştur. Daha sonra vakum infüzyon cihazı çalıştırılarak -1 bar' da vakum işlemi yaptırılarak tüm reçinenin kompozit tabakalara emilimi beklenmiş ve tüm hava kabarcıklarının çıkması sağlanmıştır. Vakum torbasının içerisine hava girişinin önlenmesi için besleme ve vakum hortumları kelepçe ile sıkıştırılmıştır. Bu şekilde kompozit numuneler oda sıcaklığında epoksinin kürleşmesi için 48 saat bekletilmiş, post-cure işlemi yapılmamıştır. Şekil 3.10' da vakum infüzyon yönteminin genel bir gösterimi Şekil 3.11'de ise numunelerin üretim aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Vakum İnfüzyon Makinesi

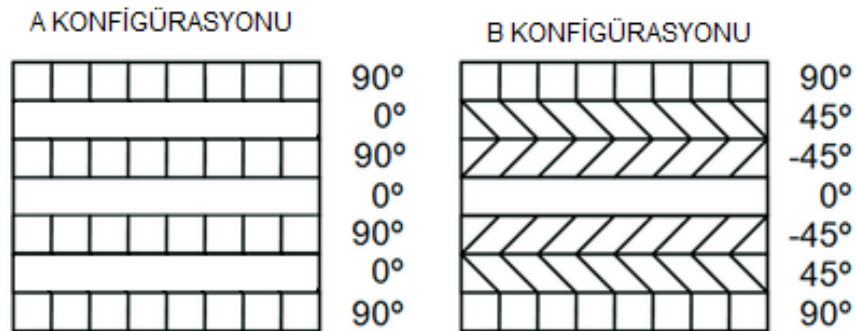


Şekil 3.10 Vakum infüzyon yöntemi genel gösterimi



Şekil 3.11 a) Elyaf kumaşların kesimi, b) Tabakaların oluşturulması, c) Epoksi reçine hazırlanması, d) Vakum infüzyon yöntemi ile epoksinin emdirilmesi

Kompozitler 10 tabakalı olacak şekilde üretilmiştir. Toplamda 2 adet cam elyaf takviyeli kompozit, 8 adet cam/keten elyaf takviyeli hibrit kompozit elde edilmiştir. Üretilen her kompozitten darbe testi için 4'er numune hazırlanmıştır. Numuneler 100x150 $\pm 0,25$ mm boyutlarında kesilmiştir. Çizelge 3.6' da hazırlanan numunelerin dizilim ve konfigürasyonları görülmektedir. Konfigürasyonların temsili gösterimi Şekil 3.12' de verilmiştir.

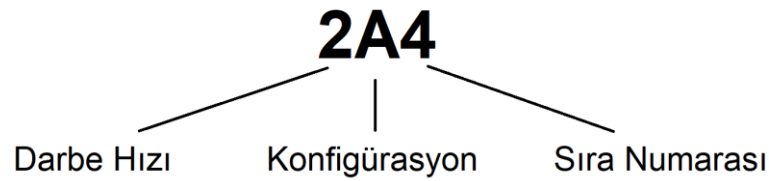


Şekil 3.12 A ve B Konfigürasyonlarının elyaf dizilimleri

Çizelge 3.6 Numunelerin dizilim ve konfigürasyonları

KONFIGÜRASYON	A 0°/90°/0°/90°/0°/90°/0°/90°/0°/90°		B -45°/0°/45°/90°/-45°/0°/45°/90°/-45°/0°	
DİZİLİM	-	C/C/C/C/C/C/C/C/C	-	C/C/C/C/C/C/C/C/C
	1	C/K/C/K/C/C/K/C/K/C	1	C/K/C/K/C/C/K/C/K/C
	2	C/C/K/K/C/C/K/K/C/C	2	C/C/K/K/C/C/K/K/C/C
	3	C/C/K/K/K/K/K/K/C/C	3	C/C/K/K/K/K/K/K/C/C
	4	C/K/K/C/C/C/C/K/K/C	4	C/K/K/C/C/C/C/K/K/C

Buradan itibaren numuneler Çizelge 3.6’ de görülen 1-4 arası sıra numaraları ve A-B konfigürasyonları ile ifade edilecektir. CTP kompozit numuneler için sıra numarası verilmemiş olup 2A, 3B şeklinde ifade edilecektir. Şekil 3.13’ de malzeme kodlarının açılımı gösterilmiştir. Burada 2A4 numunesi 0°/90° konfigürasyonlu C/K/K/C/C/C/C/K/K/C dizilimli ve 2 m/s darbe testine tabi tutulmuş numuneyi belirtmektedir.

**Şekil 3.13** Numune kodunun tanımı

Keten elyafın epoksi emiliminin cam elyafa oranla fazla olmasından dolayı numunelerin ağırlıkça elyaf matris oranları değişiklik göstermiştir. Numunelerin elyaf matris oranlarını tespit etmek için numuneler 100X150 mm kesildikten sonra hassas terazide tartılmış ve alınan değerden elyafların ağırlığı çıkartılarak matris ağırlığı bulunmuştur ve ağırlıkça orantı kurularak hesaplanmıştır. Örnek verecek olursak; 1 numaralı numunenin ağırlığı 64,3 gr gelmiş olup bu numunede 225 gr/m² ağırlığındaki keten elyafın 150 cm² kesildikten sonra 4 tabakası 13,5 gr, 300 gr/m² ağırlığındaki cam elyafın 150 cm² kesildikten sonra 6 tabakası 27 gr ağırlığında olmuştur. Toplam elyaf ağırlığı 40,5 gr gelmiş olup 64,3 gr numune için ağırlıkça %63 elyafa karşılık gelmektedir. Numunelerin elyaf matris oranları Çizelge 3.7’ de gösterilmiştir. Elyaf matris oranlarındaki bu farklılık üretilen numunelerin kalınlıklarının da farklı olmasına

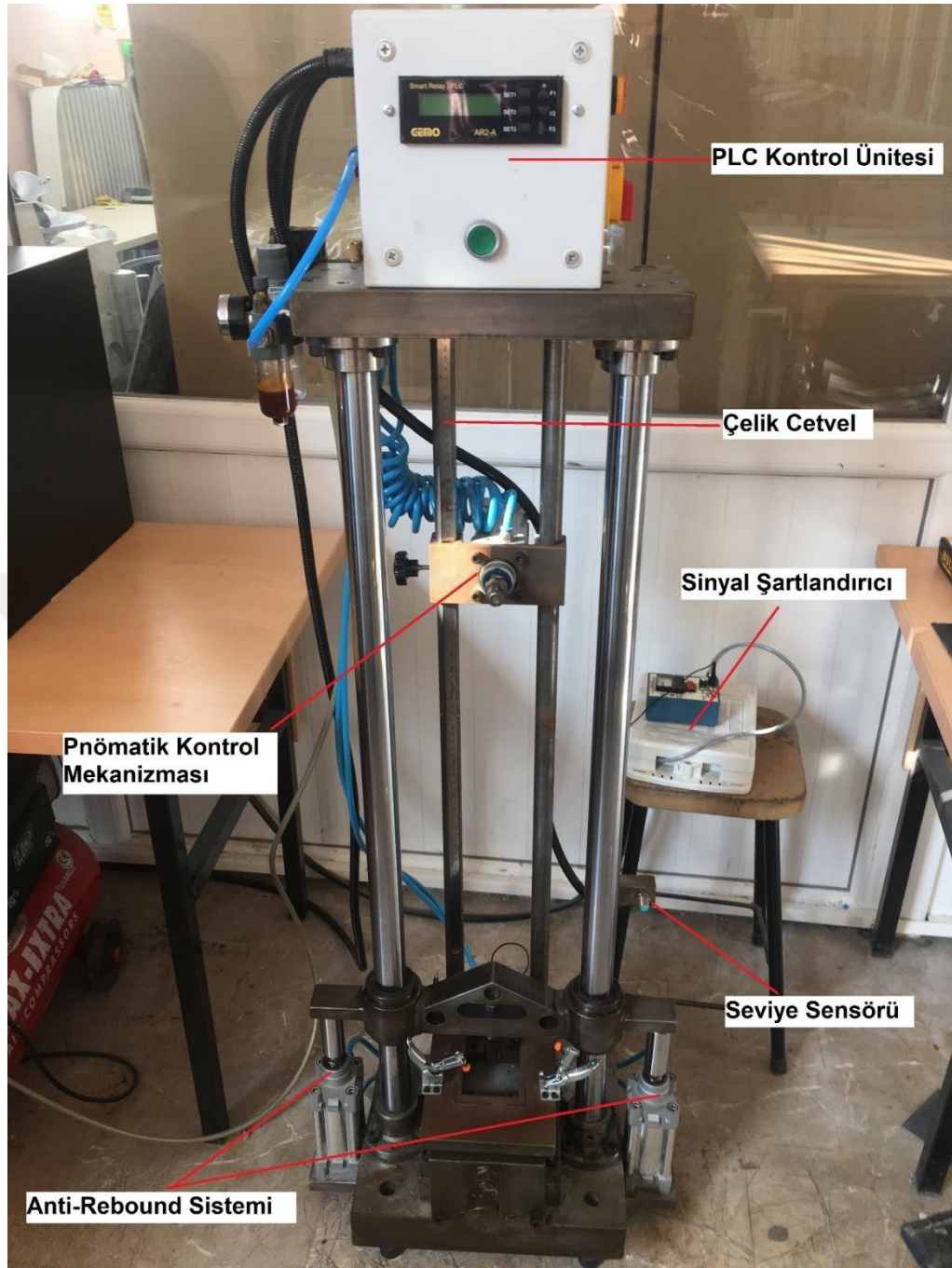
neden olmuştur. 1 numaralı cam elyaf takviyeli numuneler 2 mm kalınlığında iken 4 numaralı numune 3,1 mm ve 2, 3, 5 numaralı numuneler 3 mm kalınlığa sahip olmuştur.

Çizelge 3.7 Numunelerin ağırlıkça Elyaf-Matris Oranları

A, B	A1, B1	A2, B2	A3, B3	A4, B4
%23 Matris	%37 Matris	%41 Matris	%43 Matris	%40 Matris
%77 Elyaf	%63 Elyaf	%59 Elyaf	%57 Elyaf	%60 Elyaf

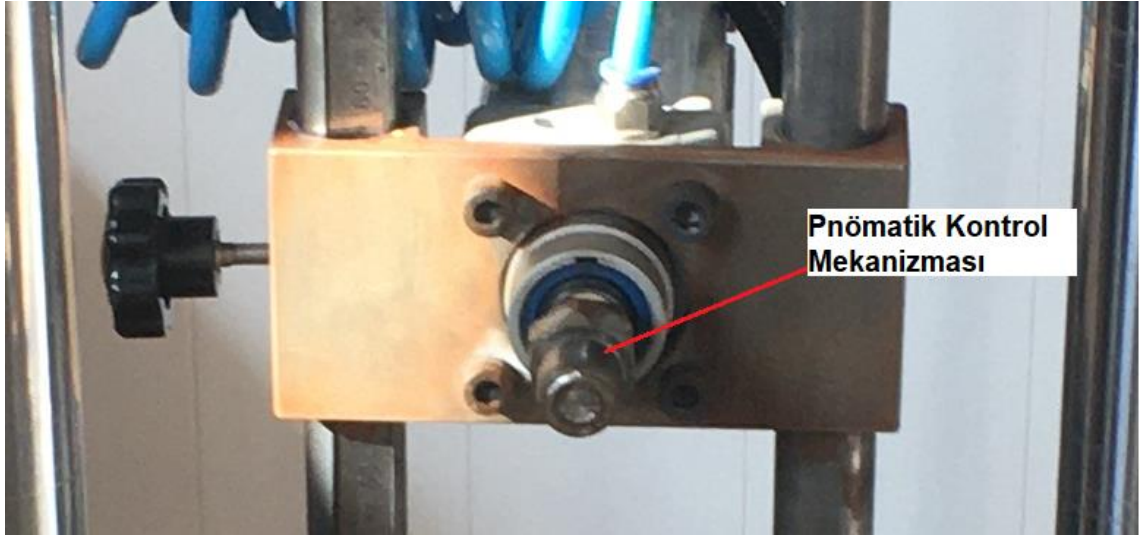
3.2.2. Düşük hızlı darbe test cihazı ve test setinin kurulması

Şekil 3.14’ de görülen ağırlık düşürme deneyi cihazı Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde bulunmaktadır. Cihazın vurucu ağırlığı 5,6 kg olup düşme yüksekliği 1 metreye kadar ayarlanabilmektedir. Değişik darbe hızlarının elde edilebilmesi için ağırlık farklı yüksekliklerden bırakılmakta ve vurucu bu yükseklikte pnömatik bir mekanizma sayesinde tutulmaktadır. Vurucu kütlenin yüksekliğini ayarlamak için gövdede çelik cetvel bulunmaktadır (Bozkurt, 2011).



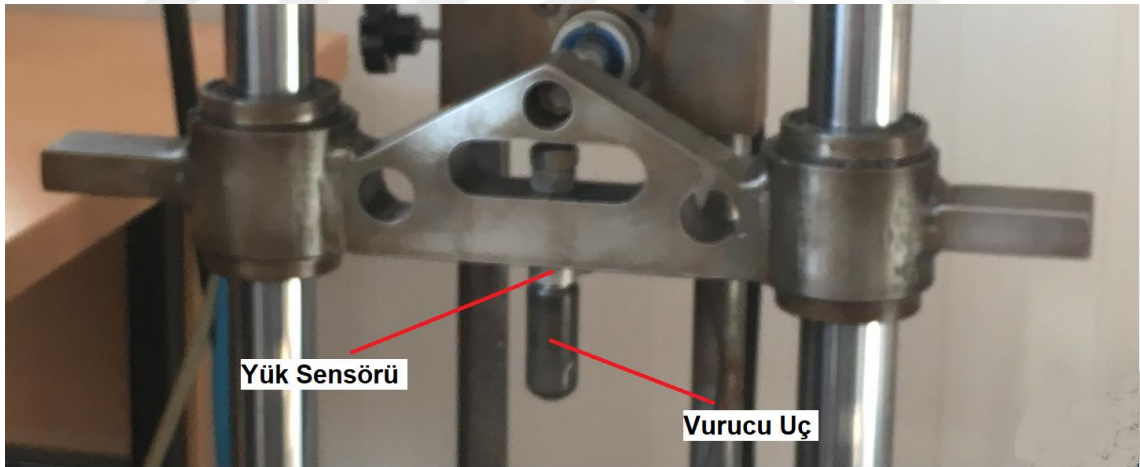
Şekil 3.14 Ağırlık düşürme deneyi cihazı

Şekil 3.15’ de hareket edebilen pnömatik kontrol mekanizması görülmektedir. Bu mekanizma sistem hava ile dolduktan sonra vurucu ağırlığı serbest bırakmaya yarar (Bozkurt, 2011).



Şekil 3.15 Pnömatik kontrol mekanizması

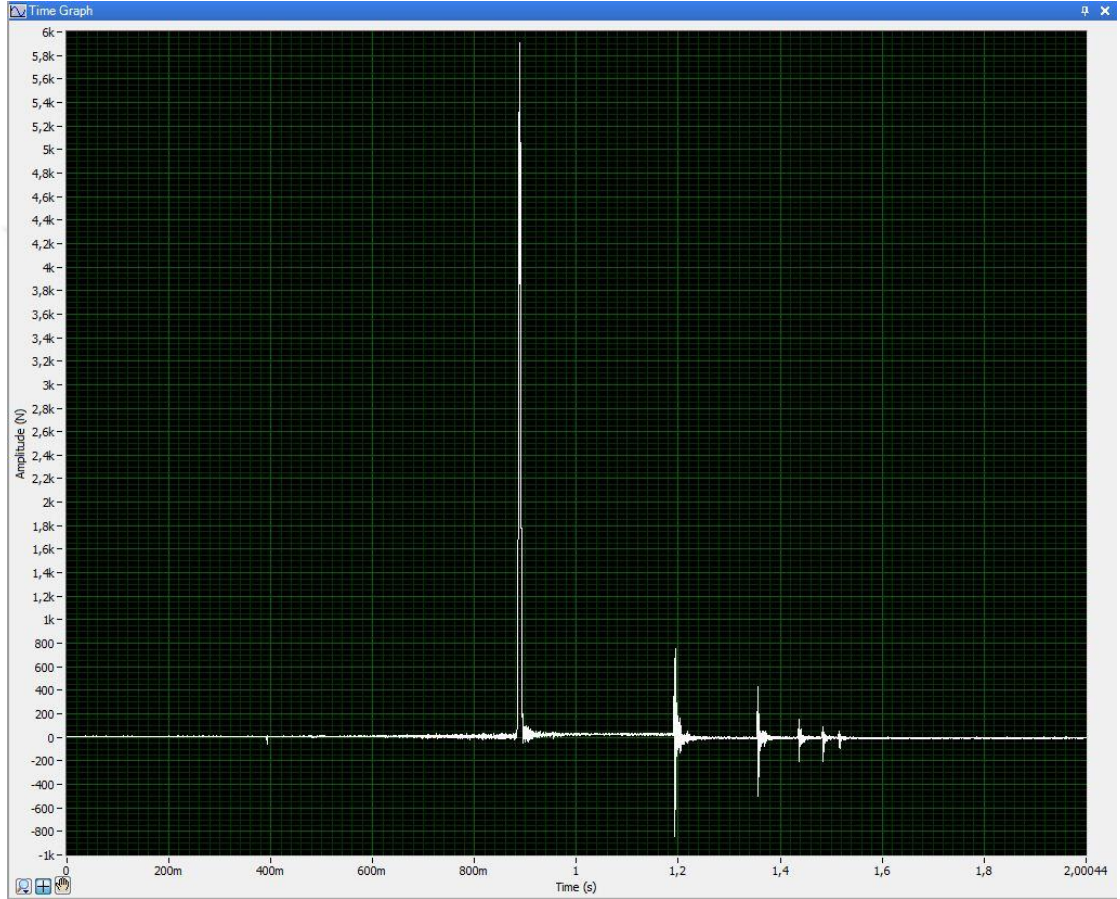
Şekil 3.16’ de ise vurucuyla kuvvet sensörü arasındaki bağlantı görülmektedir. Deneydeki vurucunun yarıçapı 12 mm, geometrisi yarı küresel şeklindedir. Kuvvet sensörü, vurucu ile vurucu kütlesi arasında bulunmaktadır. Kuvvet sensöründen alınan sinyal, bir kablo yardımıyla ve Labview Signal Express yazılımı kullanılarak elektronik kontrol ünitesine aktarılmaktadır (Bozkurt, 2011).



Şekil 3.16 Vurucu-Kuvvet sensörü bağlantısı

Elektronik kontrol ünitesi içerisinde, kuvvet sensörünün gönderdiği sinyali alıp yükselten sinyal şartlandırıcı vardır. Kuvvet algılayıcı ve sinyal şartlandırıcı arasında da teflon kablo kullanılmıştır. Teflon kablo kuvvet sensöründen gelen sinyalin dış etkenlerden etkilenip parazitlenmesini engellemek için kullanılmıştır. Şartlandırıcıda yükselen sinyallerin veri kartına aktarılabilmesi için bağlayıcı blok kullanılmıştır. Sinyalin doğrudan karta iletilmesi riskli kartın yanmasına veya kısmen bozulmasına

neden olabilir. Bundan dolayı yükseltile sinyalin aktarımı için bir bağlayıcı blok kullanılmaktadır. Bağlayıcı blok çeşitli verilerin aktarılmasında kullanılabilmektedir. Hız algılayıcıdan gelen bir bilgi kolaylıkla veri kartına aktarılabilmektedir. Ayrıca sistem içerisinde birlikte çalışacak cihazlar için veri kartının olduğu yerde oluşturulan gerilim bağlayıcı blok aracılığı ile elde edilebilmektedir. Şekil 3.17’ de örnek bir sinyal görülmektedir (Bozkurt, 2011).



Şekil 3.17 Örnek sinyal görüntüsü

Bunlara ek olarak istenen özelliklerde başka sinyaller üretilebilmektedir. Bu sinyaller, bağlayıcı blok vasıtasıyla alınarak başka uygulamalar yapılabilir. Labview signal Express yazılımı vasıtasıyla kuvvet-zaman grafiği alınabilmektedir. Bu yazılım sinyalin özelliklerini tanımlamada büyük kolaylık sağlamaktadır. Örneğin; ne kadar süreyle sinyal alınacağı, saniyede kaç veri alınacağı düzenlenebilmektedir. Dahası hesaplanan bir katsayı ile elde edilen veriler çarpılarak kuvvet değeri Newton şeklinde elde edilebilmektedir (Bozkurt, 2011).

3.2.3. Düşük hızlı darbe deneyi

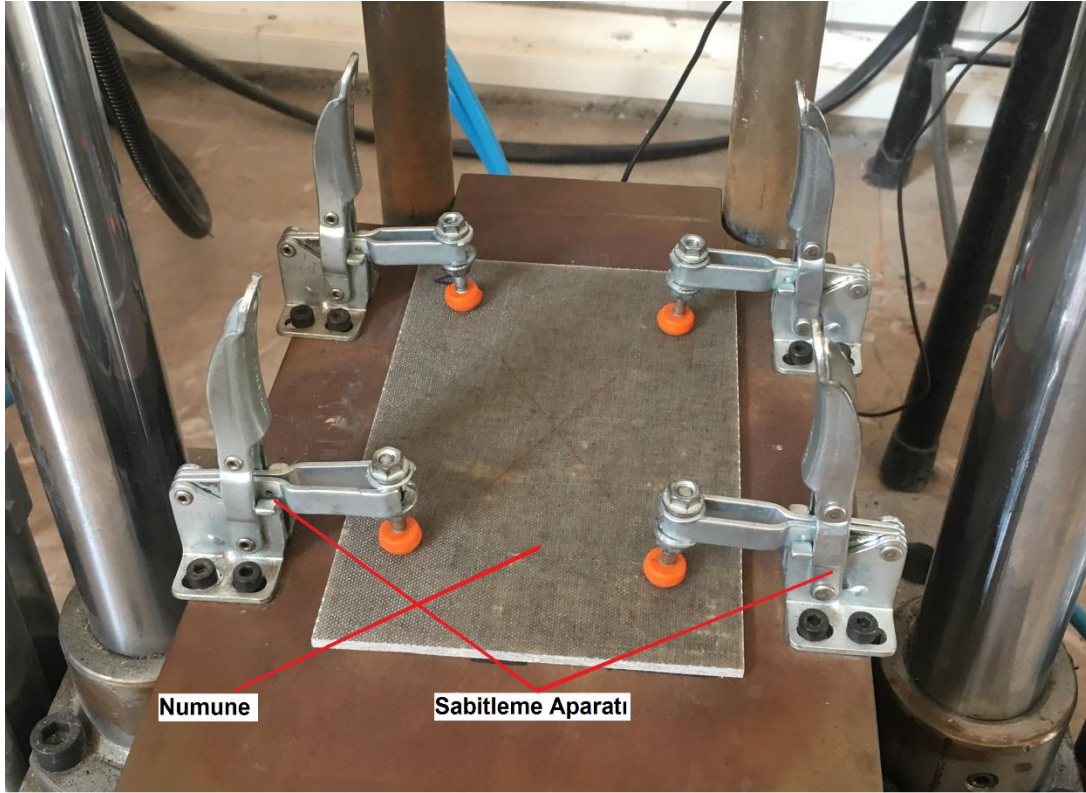
Darbeler genellikle düşük ve yüksek hızlı olarak ikiye ayrılırlar, fakat bunlar arasında belirli bir geçiş noktası bulunmamaktadır. Bu anlamda yapılan çalışmaların bazıları düşük hızlı darbeyi çarpışan cisimlerin rijitliği, malzeme özelliği ve çarpan cismin kütlesi ile bağlantılı olarak 1-10 m/s arasındaki hızlarda gerçekleşen darbe olarak değerlendirmektedir. Çalışma esnasında malzeme üzerine kaza ile düşen bir parça düşük hızlı darbeye verilebilecek en uygun örneklerden biridir. Düşük hızlı darbeler çarpışma esnasında malzemenin yapısında bozulmalar oluşturabilen darbelerdir. Düşük hızlı darbe, düşük enerjili darbe olarak da adlandırılabilir. Düşük hızlı darbede, darbenin uygulandığı malzemenin yapısal olarak dinamik cevabı çok önemlidir, çünkü malzemenin iç yapısında darbeye cevap vermek için istenen temas süresi malzemenin özelliklerini belirlemede yeterlidir (Ceyhun ve Turan, 2003).

Yapılan çalışmada, üretilen cam elyaf takviyeli kompozit ve cam/keten elyaf takviyeli hibrit kompozit numuneler düşük hızlı darbe testine tabi tutulmuştur. Testler ASTM 7136 "ağırlık düşürmeli çarpma deneyine tabi tutulan elyaf takviyeli bir polimer kompozitin hasar dayanımını ölçme" standardına göre yapılmış olup kompozitlerin darbe karşısındaki davranışları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Testler Şekil 3.14' de görülen ağırlık düşürmeli darbe test cihazı ile yapılmıştır. Deneye tabi tutulan numuneler dört noktadan ankastre bir şekilde Şekil 3.18' de görüldüğü gibi bağlantı aparatına sabitlenmiştir. Hazırlanan aynı tip numunelerden 2 tanesi 2 m/s, iki tanesi 3 m/s hızlarda darbe testine tabi tutulmuştur. Vurucu kütle 2 m/s hıza ulaşmak için 20,3 cm yükseklikten, 3 m/s hıza ulaşmak için 45,8 cm yükseklikten pnömatik sistem yardımıyla bırakılmıştır. Darbe hızı yükseklikleri denklem 3.1.'deki serbest düşme denklemine göre hesaplanmış olup rulmanlardaki sürtünmeler ihmal edilmiştir. Yarı küresel uçlu vurucu ile numunelerin merkezine darbe yaptırılmıştır. Darbenin en başından sonuna kadar tüm veriler kuvvet sensörü tarafından elektronik modüle aktarılmıştır. Darbe ucunun serbest düşmeye bırakıldığı yükseklikten deney numunesine temas edinceye kadar geçen sürede alınan sinyal değeri sıfır kabul edilmiştir. Darbe ucunun deney numunesine temas ettiği andan itibaren kuvvet değeri yükselmeye başlamıştır. Kuvvet değeri azami bir değere (peak value) ulaştıktan sonra tekrar düşmüş ve sıfır seviyesine gelmiştir. Kuvvet değeri sıfır olur olmaz darbe ucu geriye doğru sıçramış ve numune ile teması kesilmiştir. Bu sırada darbe ucu kütlesi cihazda bulunan anti rebound sistemi sayesinde tutularak tekrarlı

darbeler engellenmiştir. Darbe ucunun tutulmasıyla elde edilen sinyal Şekil 3.17’ de bulunan örnek sinyalde ilk darbeden sonraki salınımlar olarak görülmektedir.

$$h = V^2/2g \quad (3.1)$$

Yapılan testler sonucunda darbe dayanımı, temas kuvveti, darbe enerjisi, yer değiştirme, rijitlik, tabakalar arası ayrılma, elyaf kırılmaları gibi parametreler değerlendirilmiştir. Tüm testler oda sıcaklığında yapılmıştır.



Şekil 3.18 Numunenin test cihazına bağlantısı

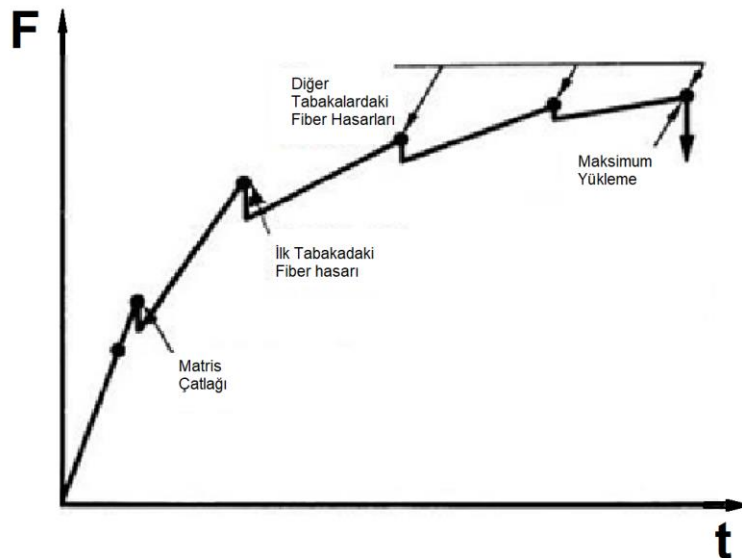
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Dinamik davranışlar

Bu bölümde 2 m/s ve 3 m/s hızlarında darbe uygulanan CTP ve CKTP kompozit numunelerin farklı konfigürasyon ve dizilimlerinin darbe davranışları grafikler halinde sunulmuş ve açıklanmıştır.

Darbe testleri ile numune üzerine uygulanan kuvvete bağlı olarak, kompozit malzemelerin darbe davranışlarını açıklayan birçok grafik ve sonuç edinilebilmektedir. Bu grafikler bize, malzemelerin darbe davranışına göre vurucu ucun yüzeyden sekmesi (rebounding), vurucunun malzemeye saplanması (penetration) ve vurucu ucun malzemeyi delmesi (perforation) gibi durumların anlaşılmasına yardımcı olmaktadır. Bu grafikler kuvvet-yer değiştirme ($F-\Delta d$), kuvvet-zaman ($F-t$), yer değiştirme-zaman ($\Delta d-t$), yutulan enerji-zaman ($Ea-t$) ve hız-zaman ($V-t$) gibi grafikler olup, malzemenin darbe davranışını belirlemek için kullanılmaktadır.

Genel anlamda kuvvet-yer değiştirme ve kuvvet-zaman grafikleri incelediğinde Şekil 4.1’ de görülen küçük salınımlar matris çatlaklarının oluşumu olarak tanımlanabilir. Kuvvette oluşan ani düşmeler ise çoğu zaman tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) ve/veya elyaf kopması gibi ağır hasar olarak değerlendirilir. Tabakalar arası ayrılma, tabakalı kompozitlerin eğilme rijitliğini önemli derecede düşürdüğü için kuvvet-yer değiştirme eğrisinde eğimin değişmesi olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4.1 Tabakaların deformasyonu (Güneş, 2013)

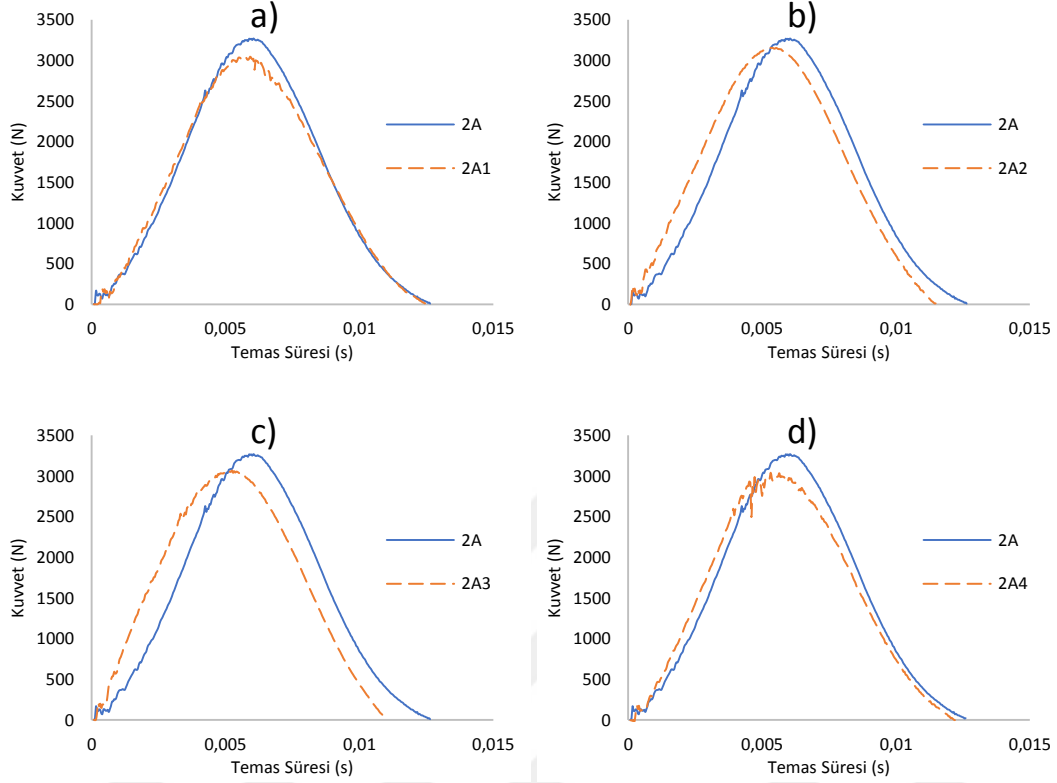
Grafikler incelendiğinde temasın başlaması ile malzemeye enerji aktarılmaya başlanmış, bunun sonucunda malzeme pozitif yönde deplasmana uğramıştır. Enerji aktarımı boyunca kuvvet ve deplasmanda artış yaşanmıştır. Kuvvet maksimum seviyeye ulaşınca vurucunun kinetik enerjisinin tamamı malzemeye aktarılmıştır ve burada vurucu kütlenin hızı sıfır olmuştur. Malzemeye aktarılan enerji, yutulan enerji ve iade edilen enerji olarak iki türlü değerlendirilebilir. Vurucu kütlenin hızı sıfıra düştüğünde malzemede depolanan enerjinin iadesi başlamış ve bunun sonucunda bir miktar negatif deplasman görülmüştür. Şekillerden de anlaşılabileceği üzere kuvvetin sıfıra ulaştığı bu noktada kalıcı şekil değiştirme oluşmuştur.

4.1.1. Kuvvetin zamana bağlı değişimi

Bu bölümde darbe testine tabi tutulan CTP ve CKTP kompozit numunelerin Kuvvet-Zaman grafikleri gösterilmiş ve açıklanmıştır. Gösterilen değerler aynı numunenin tabi tutulduğu 2 test sonucundan daha yüksek temas kuvvetine sahip olan numune alınarak oluşturulmuştur. Şekil 4.2- Şekil 4.11 arasında 2 farklı konfigürasyon, 5 farklı tabaka dizilimi ve 2 farklı test hızındaki numuneler için temas kuvvetinin zamana bağlı değişimi karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere 2 m/s hız ile yapılan darbe testlerinin grafikleri, malzemede büyük hasar denilebilecek delaminasyon ve elyaf kırılmalarının gerçekleşmemesinden ötürü düz bir çan eğrisi şeklindedir. Darbe hızının artması ile kuvvet eğrisindeki çarpılmalar da dikkat çekmektedir. Bu çarpılmalar matris çatlakları, delaminasyon ve elyaf kırılmaları gibi hasarları ifade etmektedir.

Şekil 4.2' de A konfigürasyonunda 2m/s darbe hızında Kuvvet-Zaman grafikleri görülmektedir. 2A numunesi CTP kompozit numune olup diğer CKTP kompozit numuneler ile karşılaştırması yapılmıştır. Burada 2A numunesi için 2650 N mertebelerinde kuvvet eğrisinde küçük salınımlar görülmüş ve matris çatlaklarının olduğu değerlendirilmiştir ve bu numunenin maksimum temas kuvveti 3270,2 N olmuştur. CKTP kompozit, CTP kompozit ile maksimum temas kuvveti bakımından değerlendirildiğinde bütün CKTP kompozitlerin daha düşük değerler gösterdiği fakat 2A2 numunesinin 3154 N ile en yakın değeri gösterdiği görülmüştür. Bu da 2A2 numunesindeki maksimum temas kuvvetinin 2A numunesinin %96,4' üne karşılık gelmektedir. Aynı zamanda 2A2 numunesinde matris çatlaklarının diğer numunelere göre

en düşük seviyelerde olduğu görülmüştür. Maksimum temas kuvvetleri 2A1, 2A3 ve 2A4 numuneleri için sırası ile 3046N, 3068 N ve 3040 N olmuştur.

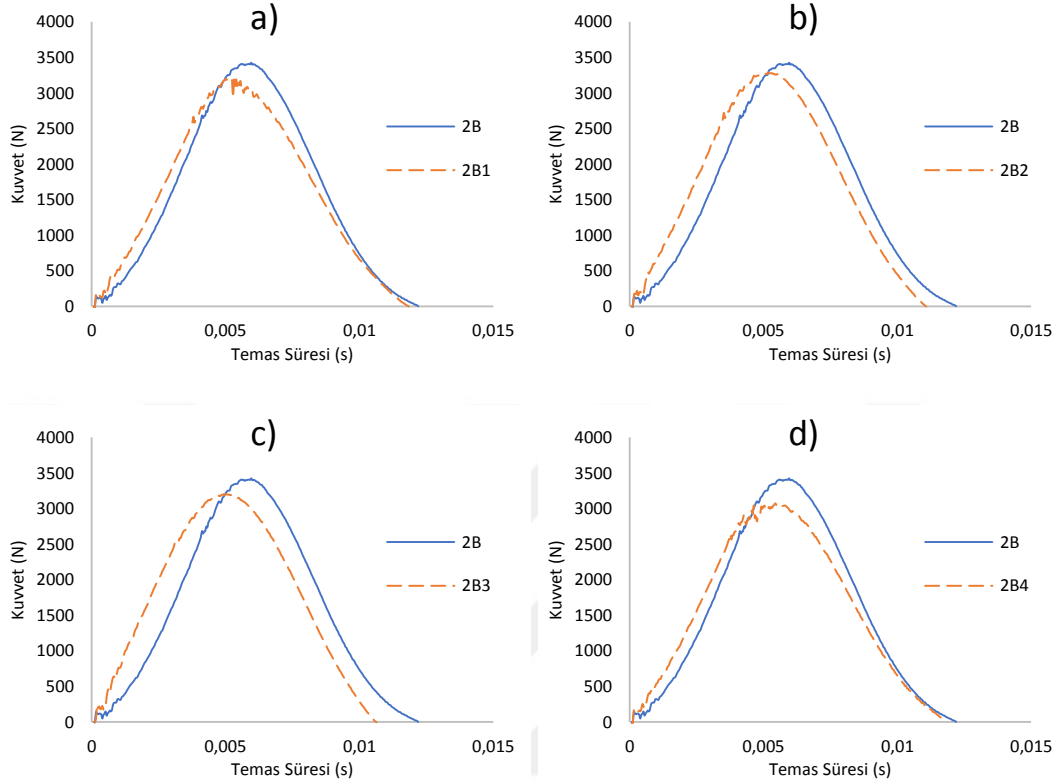


Şekil 4.2 A konfigürasyonunda 2 m/s darbe hızında CTP ve CKTP kompozitlerin karşılaştırmalı Kuvvet-Zaman (F-t) grafikleri

Şekil 4.3' de B konfigürasyonunda 2 m/s darbe hızında Kuvvet-Zaman grafikleri görülmektedir. Burada da 2B numunesinde 2A de olduğu gibi 2700 N civarlarında matris çatlaklarının olduğu görülmüştür ve bu numunenin maksimum temas kuvveti 3425 N olmuştur. Maksimum temas kuvveti bakımından diğer bütün CKTP kompozitler daha düşük değerler göstermiştir. 2B2 numunesi 3286 N ile en yakın tepe kuvvet değerini göstermiş olup bu da 2B2 numunesindeki maksimum temas kuvvetinin 2B numunesinin %95,9 olmaktadır. Maksimum temas kuvvetleri 2B1, 2B3 ve 2B4 numuneleri için sırası ile 3223N, 3201 N ve 3073,8 N olmuştur.

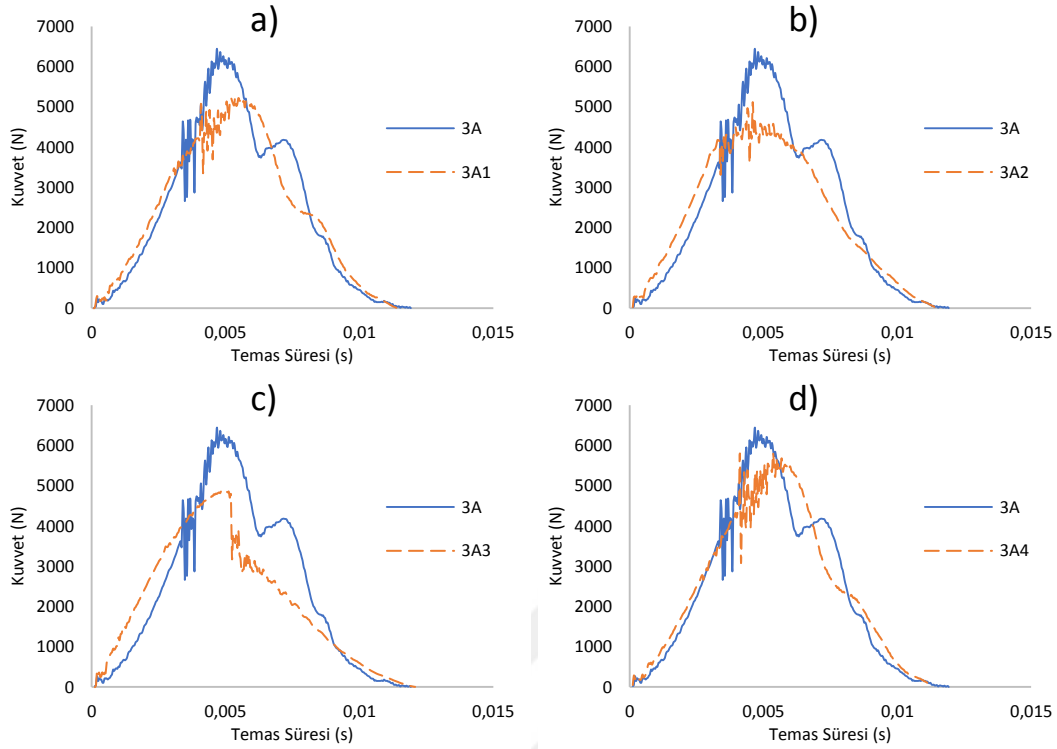
Şekil 4.2 ve Şekil 4.3' deki grafikleri incelediğimizde darbe deneylerinin yapıldığı hibrid tabakalı kompozit malzemelerden 2A2, 2A3, 2B2 ve 2B3 numunelerinin uygulanan kuvvete karşı cevabının daha kısa olduğu temas sürelerinin daha az olmasından anlaşılmaktadır. Cam elyafın 2 tabaka halinde dışarda olması malzemenin eğilme rijitliğini arttırmış, dolayısı ile temas süresinde azalma olmuştur. CTP kompozit

numunede ise tamamen cam kullanılmasına karşın malzemenin ince cidarlı olması eğilme rijitiğini düşürmüş ve temas süresini artırmıştır.



Şekil 4.3 B konfigürasyonunda 2 m/s darbe hızında CTP ve CKTP kompozitlerin karşılaştırmalı Kuvvet-Zaman (F-t) grafikleri

Şekil 4.4' de A konfigürasyonunda 3 m/s darbe hızında Kuvvet-Zaman grafikleri görülmektedir. Burada da 3A numunesinin temas kuvvetinin 4620 N olduğu yerde kuvvet eğrisinde büyük salınımlar başlamış ve bu esnada elyaf kırılmalarının olduğu değerlendirilmiştir. 3A numunesi için maksimum temas kuvveti 6443,7 N olmuştur. Maksimum temas kuvveti bakımından diğer bütün CKTP kompozitler daha düşük değerler göstermiştir. 3A4 numunesi 5815 N ile en yakın tepe kuvvet değerini göstermiş olup bu değer 3A numunesinin %90,2 sine karşılık gelmektedir. Maksimum temas kuvvetleri 3A1, 3A2 ve 3A3 numuneleri için sırası ile 5276 N, 5118,4 N ve 4869 N olmuştur. A konfigürasyonunda 3 m/s darbe hızında yapılan testlerde tüm numunelerde belirli noktalarda delaminasyonlar görülmüştür. 3A3 numunesinde belirli noktaya kadar hasar minimum seviyede kalmış fakat maksimum temas kuvvetine ulaşıldığında sadece dış tabaklarda olan cam elyaf daha fazla dayanamayıp kırılmış, ardından geri sekme enerjisi kaynaklı ufak çaplı hasarlar devam etmiştir.

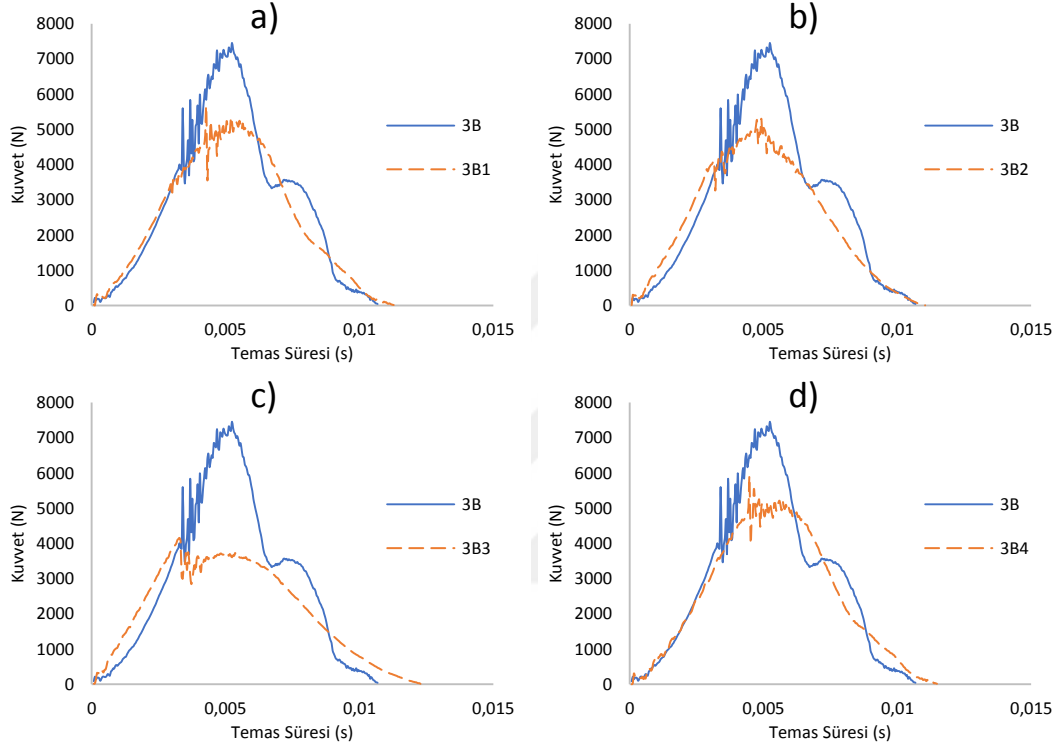


Şekil 4.4 A konfigürasyonunda 3 m/s darbe hızında CTP ve CKTP kompozitlerin karşılaştırmalı Kuvvet-Zaman (F-t) grafikleri

Şekil 4.5’ de B konfigürasyonunda 3 m/s darbe hızında Kuvvet-Zaman grafikleri görülmektedir. Burada da 3B numunesinin temas kuvvetinin 5600 N ulaştığı yerde kuvvet eğrisinde büyük salınımlar başlamış ve bu esnada elyaf kırılmalarının olduğu değerlendirilmiştir. 3B numunesi için maksimum temas kuvveti 7453,5 N olmuştur. Maksimum temas kuvveti bakımından diğer bütün CKTP kompozitler daha düşük değerler göstermiştir. 3B4 numunesi 5893 N ile en yakın maksimum temas kuvveti değerini göstermiş olup bu değer 3B numunesinin %79 una karşılık gelmektedir. 3B3 numunesine bakacak olursak numune eğilme rijitliğinin çok yüksek olması ve keten elyaf oranının cama göre düşük olmasından (%40-%60), dolayısı ile matris oranının diğer numunelere göre fazla olmasından kaynaklı daha düşük bir yükleme kuvvetinde hasarlanmaya başlamıştır. Bu yüzden darbe enerjinin çoğunu malzeme üzerinde harcamış ve temas süresi artmıştır. Maksimum temas kuvvetleri 3B1, 3B2 ve 3B3 numuneleri için sırası ile 5633 N, 5301 N ve 4152,3 N olmuştur. B konfigürasyonunda 3 m/s darbe hızında yapılan testlerde tüm numunelerde belirli noktalarda elyaf kırıkları görülmüştür.

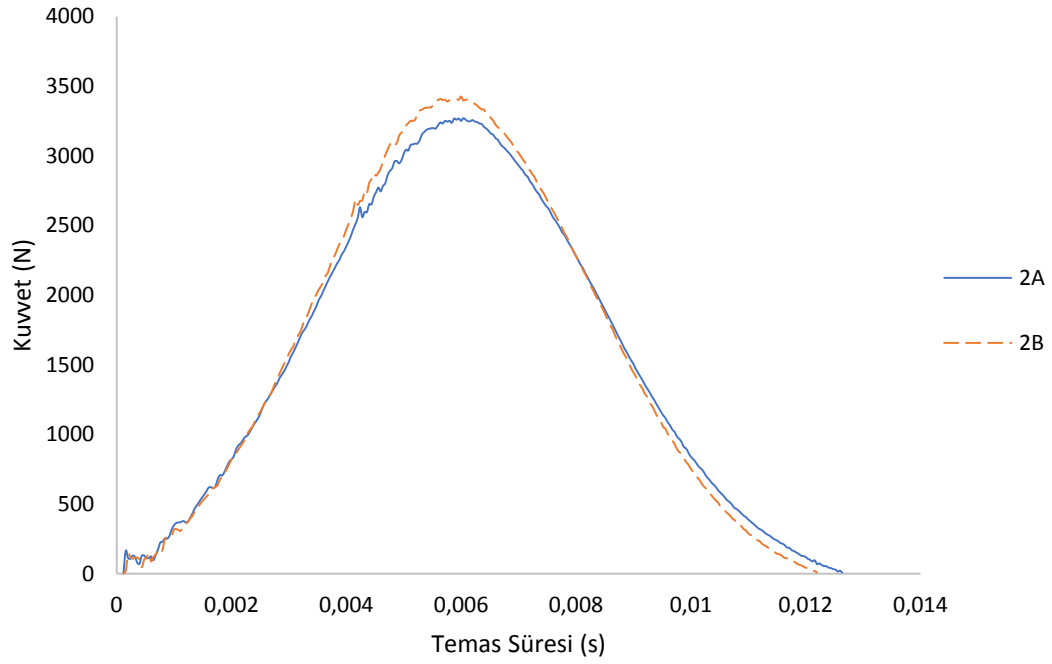
Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 incelendiğinde temas sürelerinin 3B3 numunesi hariç tüm numunelerde 3 m/s için birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. Darbe hızının

artması ile numunelerde oluşan hasarlar artmış ve oluşan hasarlar neticesinde malzeme üzerinde yapılan iş de artmıştır. Bu sebepten 2 m/s darbe hızında gerçekleşen testlerde daha düşük temas süresine sahip olan 3 ve 4 numaralı numuneler 3 m/s darbe hızındaki testlerde diğer numunelere yakın değerler göstermiştir. 3B3 numunesi ise diğer numunelere göre daha düşük kuvvette hasarlanmaya başlamış ve bu da temas süresinin artmasına neden olmuştur.



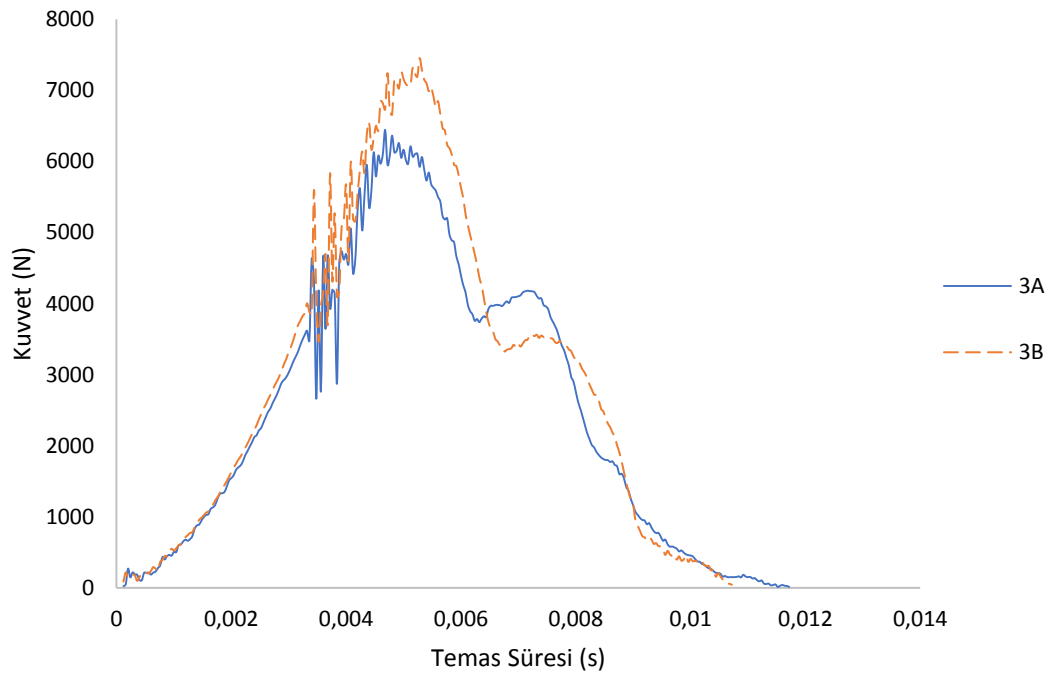
Şekil 4.5 B konfigürasyonunda 3 m/s darbe hızında CTP ve CKTP kompozitlerin karşılaştırmalı Kuvvet-Zaman (F-t) grafikleri

Şekil 4.6 ve 4.7’ de CTP kompozitin 2 m/s ve 3 m/s darbe hızlarında A ve B konfigürasyonlarındaki Kuvvet-Zaman grafikleri görülmektedir. 2 m/s için her iki konfigürasyonda da numunelerde matris çatlama ve delaminasyonlar da görülmüştür fakat 3 m/s hızda numunelerde elyaf kırılmaları ve delaminasyonlar da görülmüştür. 2 m/s darbe hızında B konfigürasyonunda numunenin maksimum temas kuvveti 3425 N iken A konfigürasyonunda bu değer 3270 N’ da kalmıştır. 3 m/s darbe hızında ise B konfigürasyonunda maksimum temas kuvveti 7453,5 iken A konfigürasyonunda 6443,7 N’ u geçememiştir.



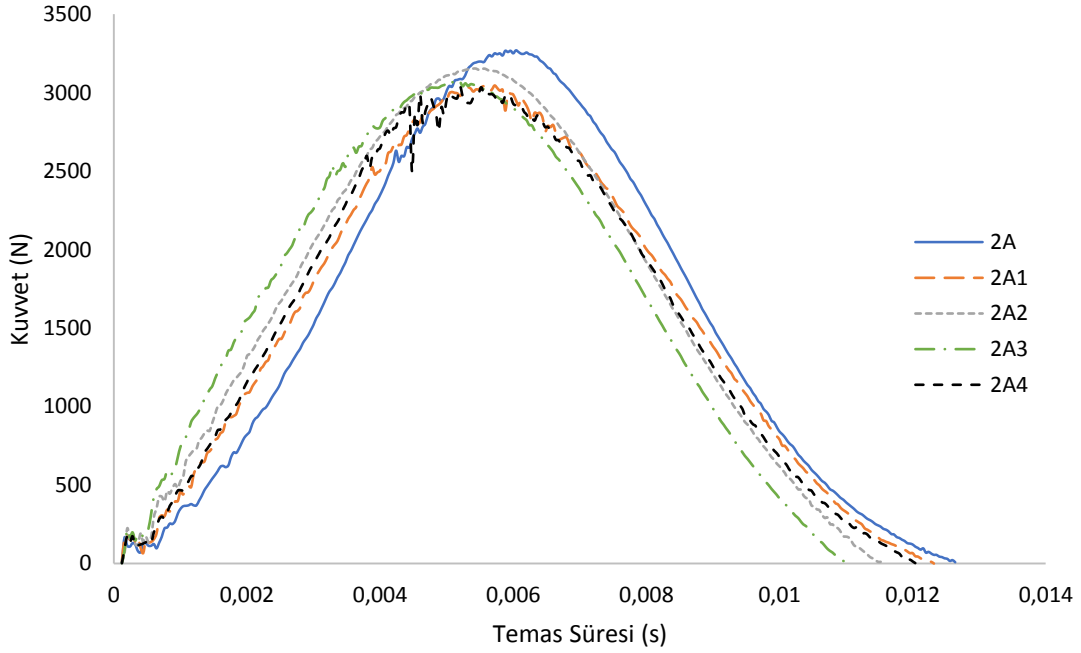
Şekil 4.6 A ve B konfigürasyonlarında CTP kompozitin 2 m/s darbe hızında Kuvvet-Zaman (F-t) grafiği

Şekil 4.7’ deki 3A ve 3B numunelerinin Kuvvet-Zaman grafiklerinde kuvvetin yüklenmesi esnasında görülen büyük titreşimler delaminasyon ve elyaf kırılmalarını gösterirken, kuvvetin geri çekilmesi esnasında CTP numunelerin eğilme rijitliğinin düşük olmasından ve elyaf kırılmalarından kaynaklı vurucu ucun numuneye bir miktar tutunması sonucu iniş eğrisi deve boynu şeklini almıştır.

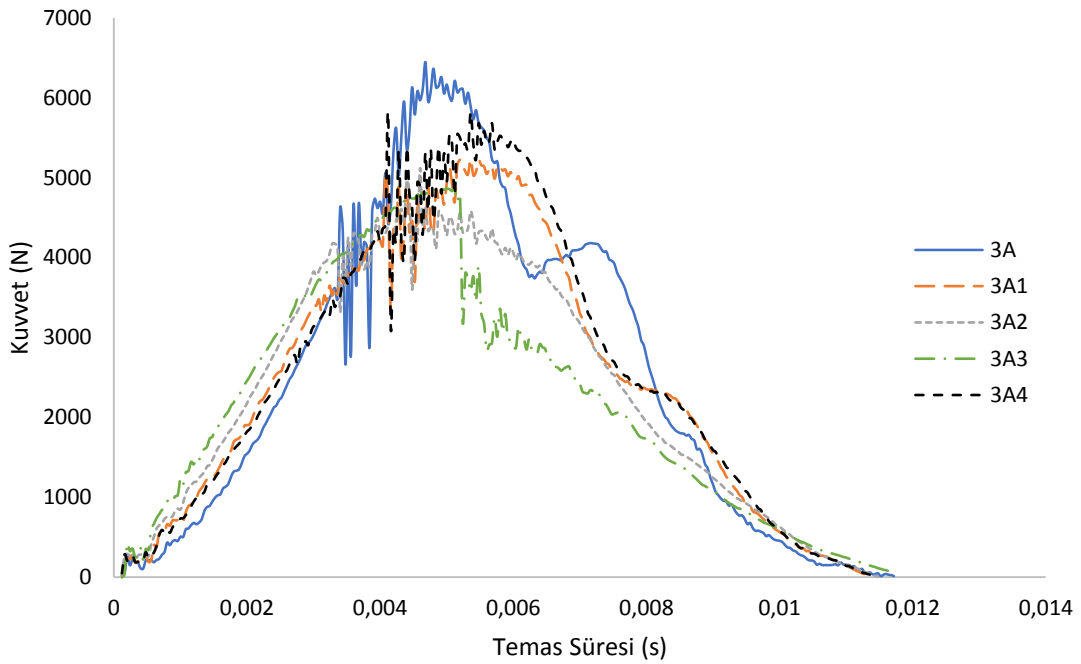


Şekil 4.7 A ve B konfigürasyonlarında CTP kompozitin 3 m/s darbe hızında Kuvvet-Zaman (F-t) grafiği

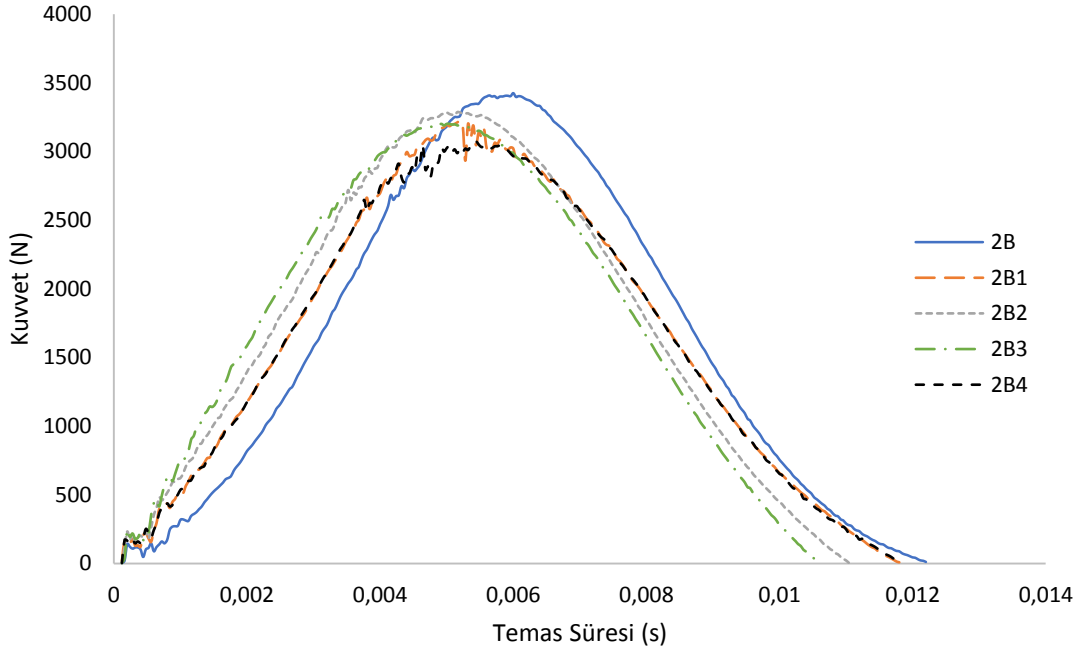
Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’ da A konfigürasyonlu, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’ de ise B konfigürasyonlu numunelerin 2 m/s ve 3 m/s darbe hızlarındaki Kuvvet-Zaman grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



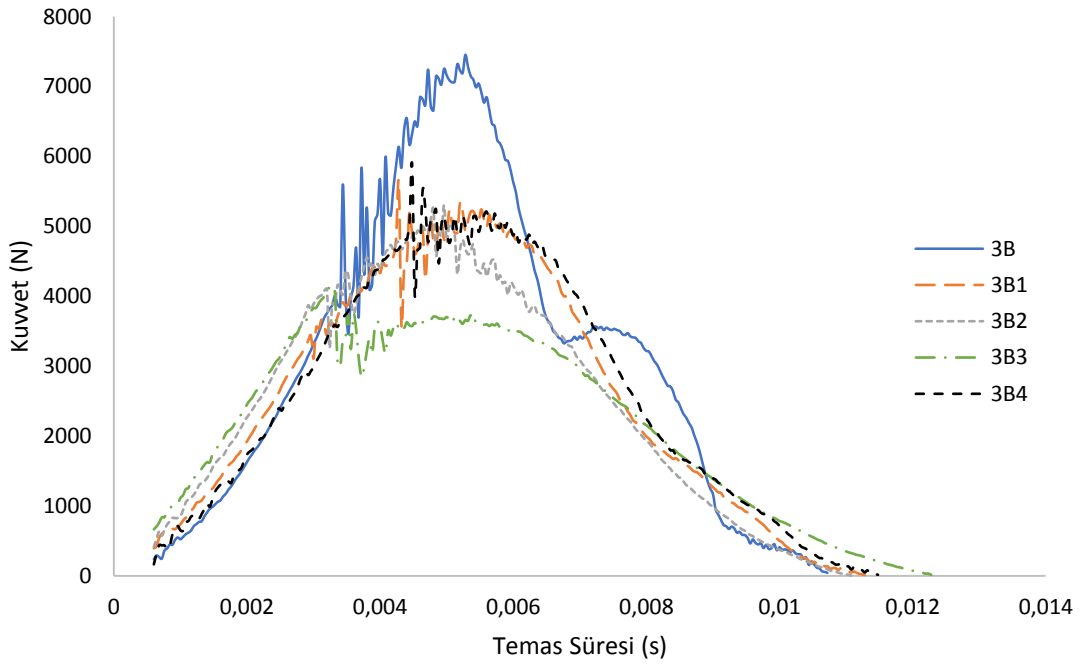
Şekil 4.8 A konfigürasyonlarında 5 farklı dizilimde üretilen kompozitlerin 2 m/s darbe hızında Kuvvet-Zaman (F-t) grafiği



Şekil 4.9 A konfigürasyonlarında 5 farklı dizilimde üretilen kompozitlerin 3 m/s darbe hızında Kuvvet-Zaman (F-t) grafiği



Şekil 4.10 B konfigürasyonlarında 5 farklı dizilimde üretilen kompozitlerin 2 m/s darbe hızında Kuvvet-Zaman (F-t) grafiği



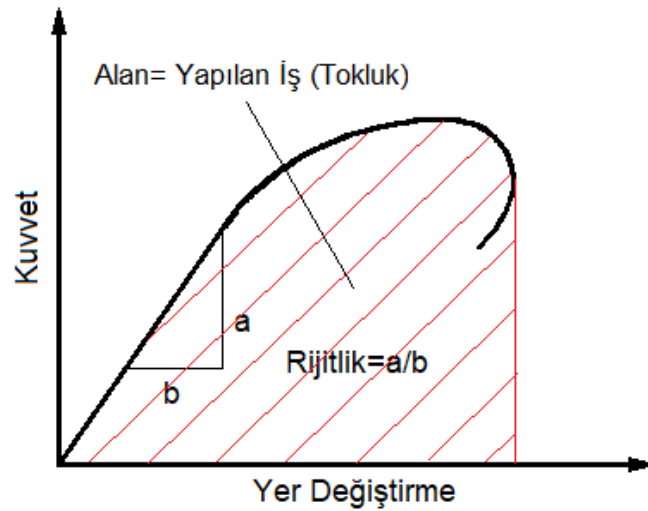
Şekil 4.11 B konfigürasyonlarında 5 farklı dizilimde üretilen kompozitlerin 3 m/s darbe hızında Kuvvet-Zaman (F-t) grafiği

4.1.2. Kuvvetin yer değiştirmeye bağlı değişimi

Bu bölümde darbe testine tabi tutulan CTP ve CKTP kompozit numunelerin Kuvvet-Yer Değiştirme grafikleri gösterilmiş ve açıklanmıştır. Gösterilen değerler aynı numunenin tabi tutulduğu 2 test sonucundan daha yüksek temas kuvvetine sahip olan

numune alınarak oluşturulmuştur. Darbe hızının artması ile temas kuvvetinin de arttığı buna bağlı olarak yer değiştirmenin de arttığı görülmektedir. Kuvvetin maksimuma ulaştıktan sonra azalmasıyla birlikte yer değiştirme de negatif yönde etkilenmektedir. Kuvvetin malzemeden ayrılması sonucu oluşan kalıcı yer değiştirme ise malzemenin hasar boyutunu göstermektedir. Kuvvet-yer değiştirme grafiğinde çıkış eğrisinin eğimi Şekil 4.12’ de görüleceği gibi eğilme rijitliğini tanımlamaktadır ve delaminasyon gibi ağır hasar sonucunda eğilme rijitliğinde azalma görülmektedir. Kuvvet-Yer Değiştirme grafiği altında kalan alan ise numune üzerinde yapılan işi (Tokluk) göstermektedir. Darbe sırasında yapılan iş denklem 4.1.’ deki gibi ifade edilir.

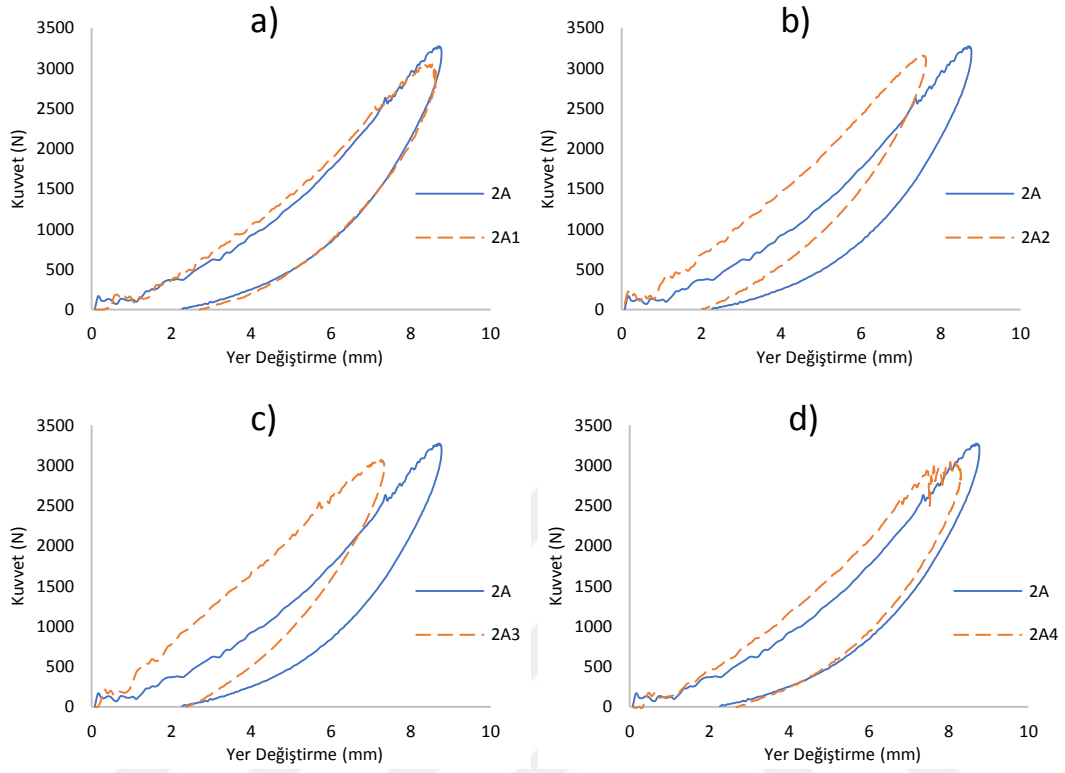
$$W = \int_0^{sf} F(s)ds \quad (4.1)$$



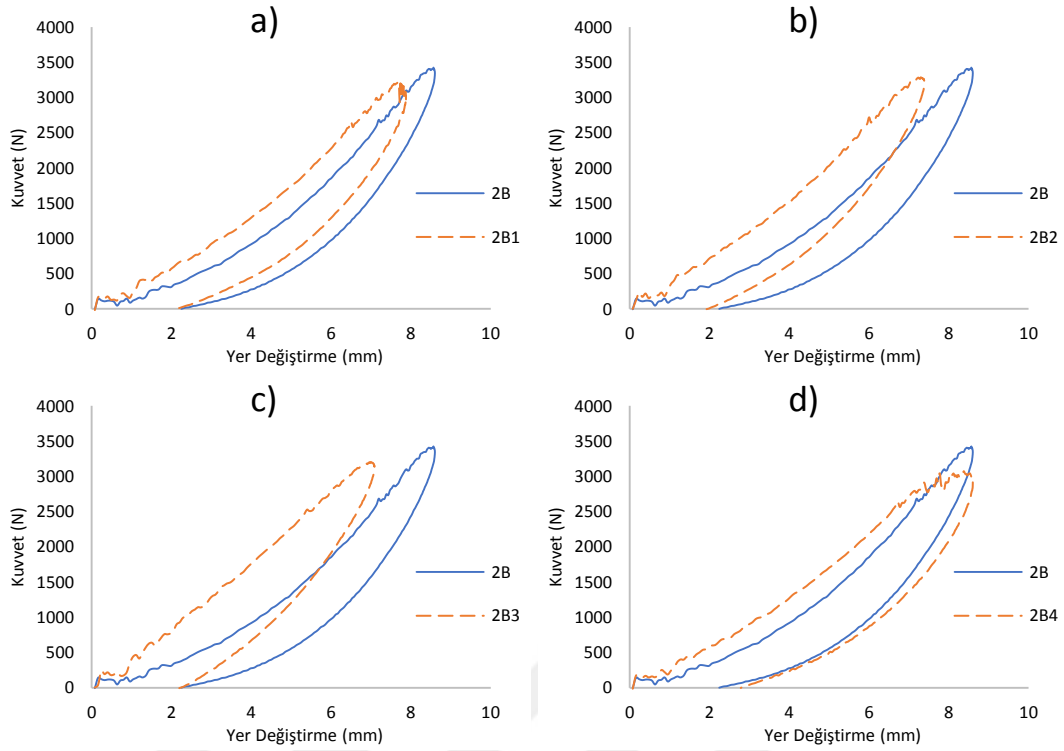
Şekil 4.12 Eğilme Rijitliğinin ve Yapılan İşin Kuvvet-Yer Değiştirme Grafiğinde tanımı

Şekil 4.13’ de A konfigürasyonunda, Şekil 4.14’ de B konfigürasyonunda 2 m/s darbe hızında Kuvvet-Yer Değiştirme grafikleri görülmektedir. A konfigürasyonunda maksimum temas kuvveti esnasında 2A2 ve 2A3 numunelerinin minimum deplasmana sahip oldukları ve temas kuvveti malzemeden ayrıldıktan sonra 2A2 numunesi minimum 2A1 numunesi maksimum kalıcı şekil değiştirmeye uğradıkları gözlenmiştir. B konfigürasyonu için ise yine aynı şekilde 2B2 ve 2B3 numuneleri minimum deplasman, temas kuvveti ayrıldıktan sonra 2B2 numunesi minimum kalıcı şekil değiştirme ve diğer numuneler aynı seviyede kalıcı şekil değiştirmeye uğramışlardır. Eğilme rijitliği bakımından değerlendirecek olursak 2A3

numunesi 431537,9 N/m, 2B3 numunesi 454634,7 N/m ile maksimum; 2A numunesi 280586,1 N/m, 2B numunesi 289823,9 N/m ile minimum değerlere sahip olmuşlardır.

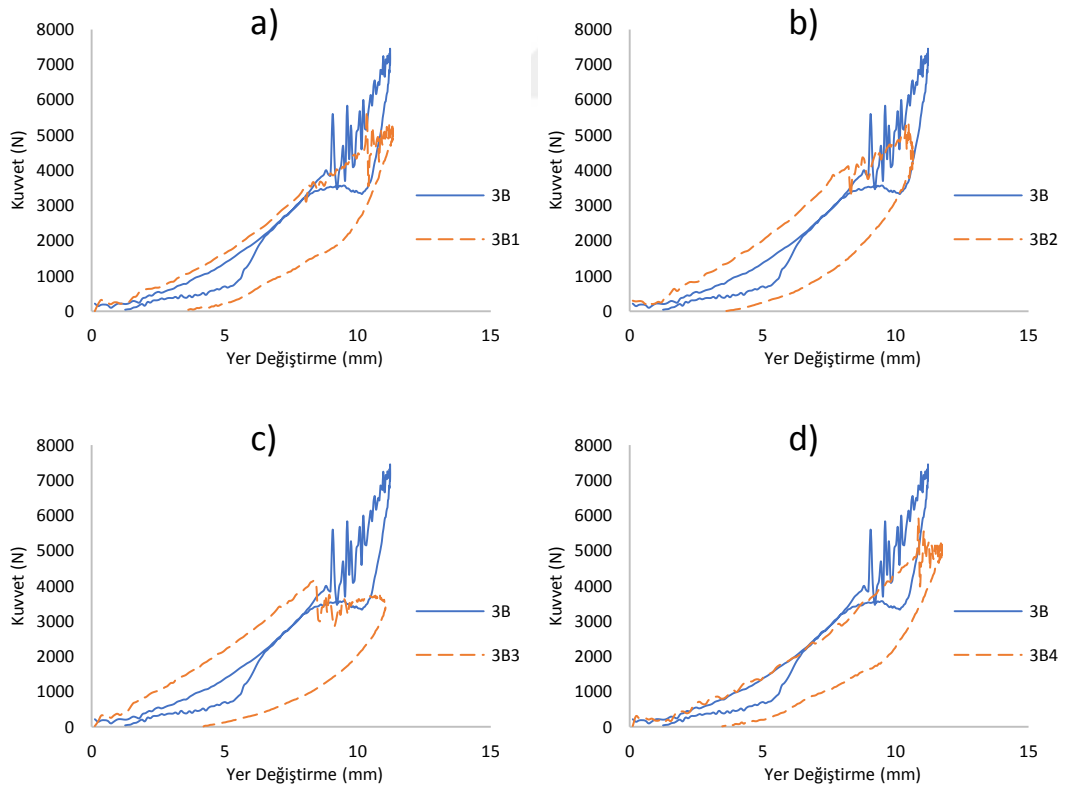
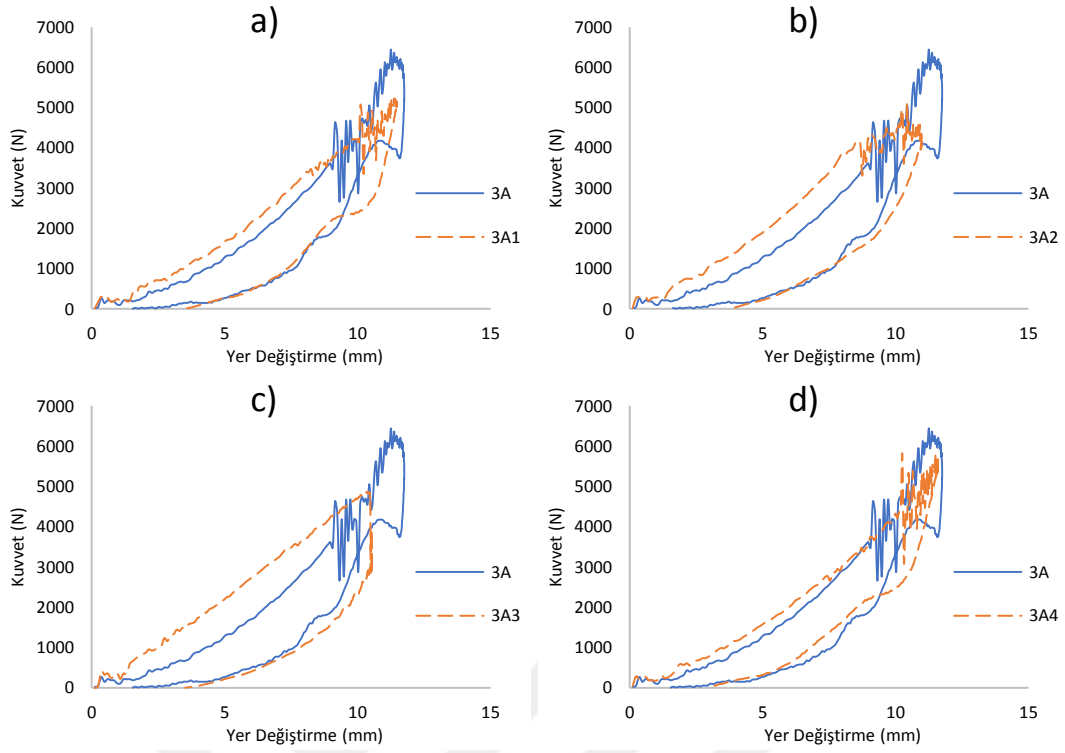


Şekil 4.13 A konfigürasyonunda 2 m/s darbe hızında CTP ve CKTP kompozitlerin karşılaştırmalı Kuvvet-Yer değiştirme (F- Δd) grafikleri



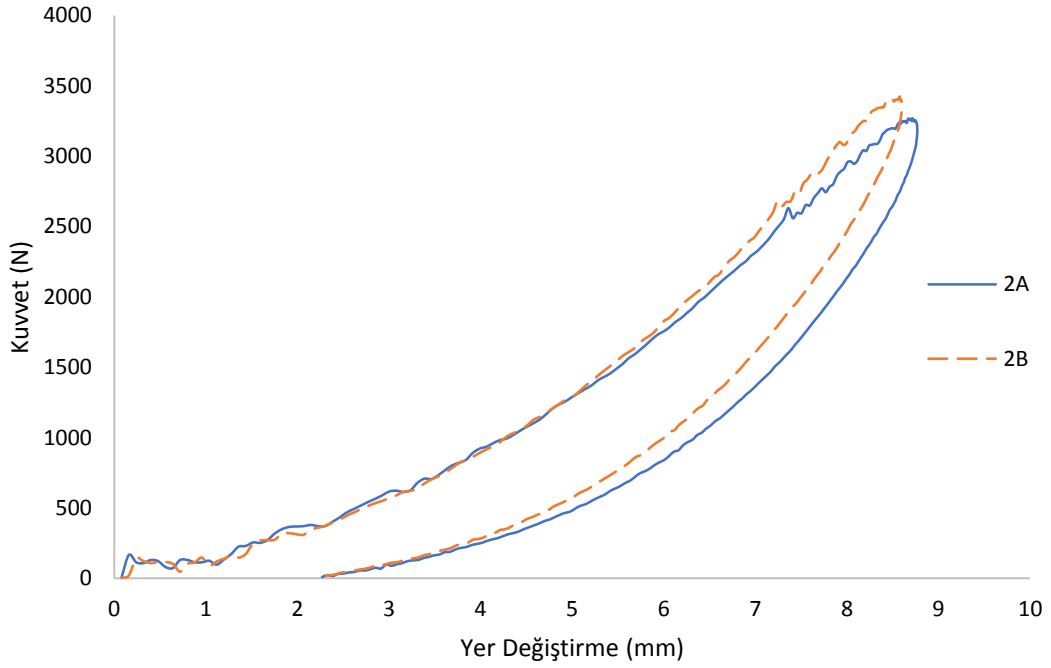
Şekil 4.14 B konfigürasyonunda 2 m/s darbe hızında CTP ve CKTP kompozitlerin karşılaştırmalı Kuvvet-Yer değiştirme (F- Δd) grafikleri

Darbe hızının artması ile Kuvvet eğrisindeki salınımların da arttığı dikkat çekmektedir. Şekil 4.15' de A konfigürasyonunda, Şekil 4.16' da B konfigürasyonunda 3 m/s darbe hızında Kuvvet-Yer Değiştirme grafikleri görülmektedir. A konfigürasyonunda maksimum temas kuvveti esnasında 3A2 ve 3A3 numunelerinin minimum deplasmana sahip oldukları ve temas kuvveti malzemeden ayrıldıktan sonra 3A numunesi minimum 3A2 numunesi maksimum kalıcı şekil değiştirmeye uğradıkları gözlenmiştir. B konfigürasyonu için ise 3B2 numunesi minimum deplasman, temas kuvveti ayrıldıktan sonra 3B numunesi minimum kalıcı şekil değiştirme ve 3B3 numunesi maksimum şekil değiştirmeye uğramışlardır. Eğilme rijitliği bakımından değerlendirecek olursak 3A3 numunesi 451532 N/m, 3B3 numunesi 486966 N/m ile maksimum; 3A numunesi 366240,9 N/m, 3B numunesi 363324,3 N/m ve 3B4 numunesi 362340,9 N/m ile minimum değerlere sahip olmuşlardır.

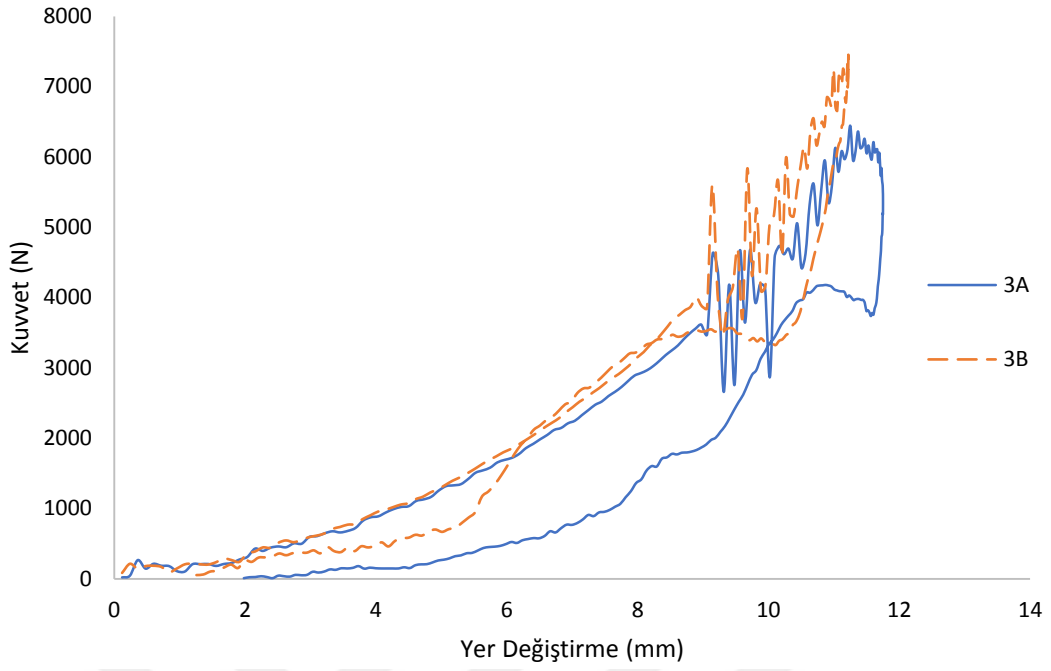


Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’ de her iki konfigürasyonda CTP kompozitlerin Kuvvet-Yer Değiştirme grafikleri gösterilmiştir. Burada da B konfigürasyonuna sahip numunenin her iki hız için daha düşük yer değiştirme hareketi gösterdiği görülmüştür.

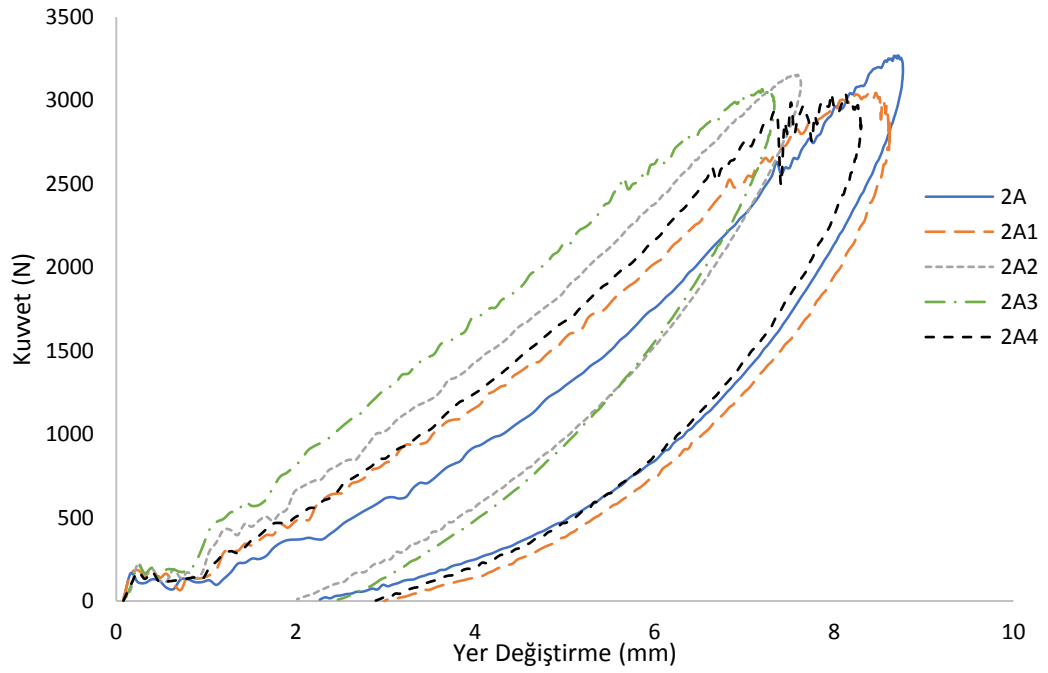
Şekil 4.19- Şekil 4.2 arasında ise A ve B konfigürasyonlu, 5 farklı dizilimli ve 2, 3 m/s darbe hızlarında kompozit numunelerin Kuvvet Yer Değiştirme grafikleri görülmektedir.



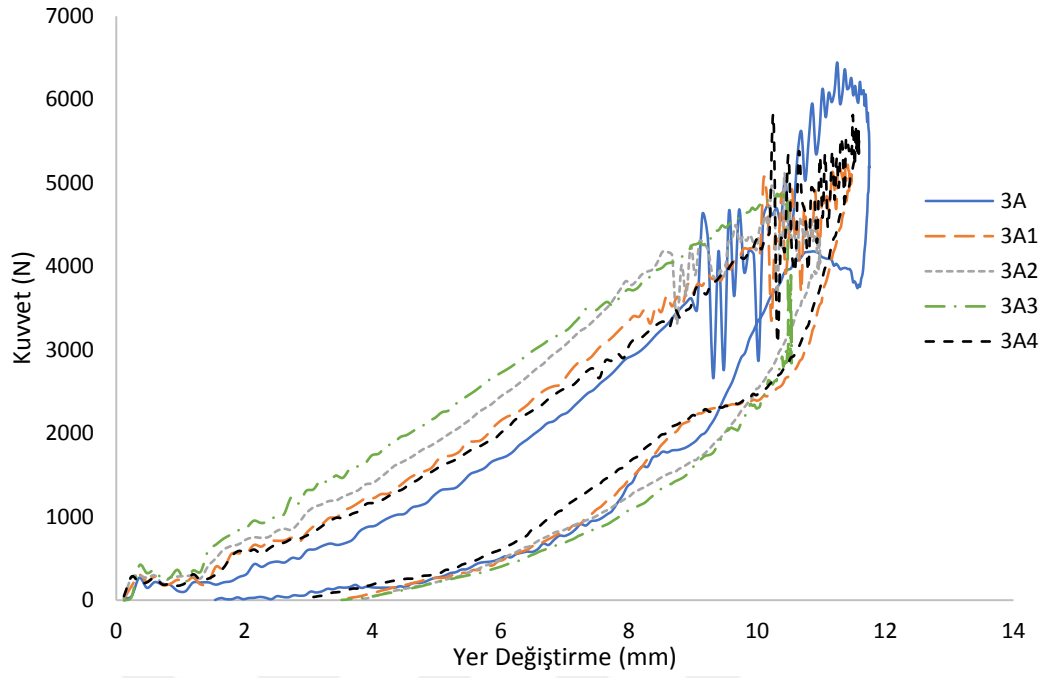
Şekil 4.17 A ve B konfigürasyonlarında cam elyaf takviyeli polimer kompozitin 2 m/s darbe hızında Kuvvet-Yer Değiştirme (F- Δd) grafiği



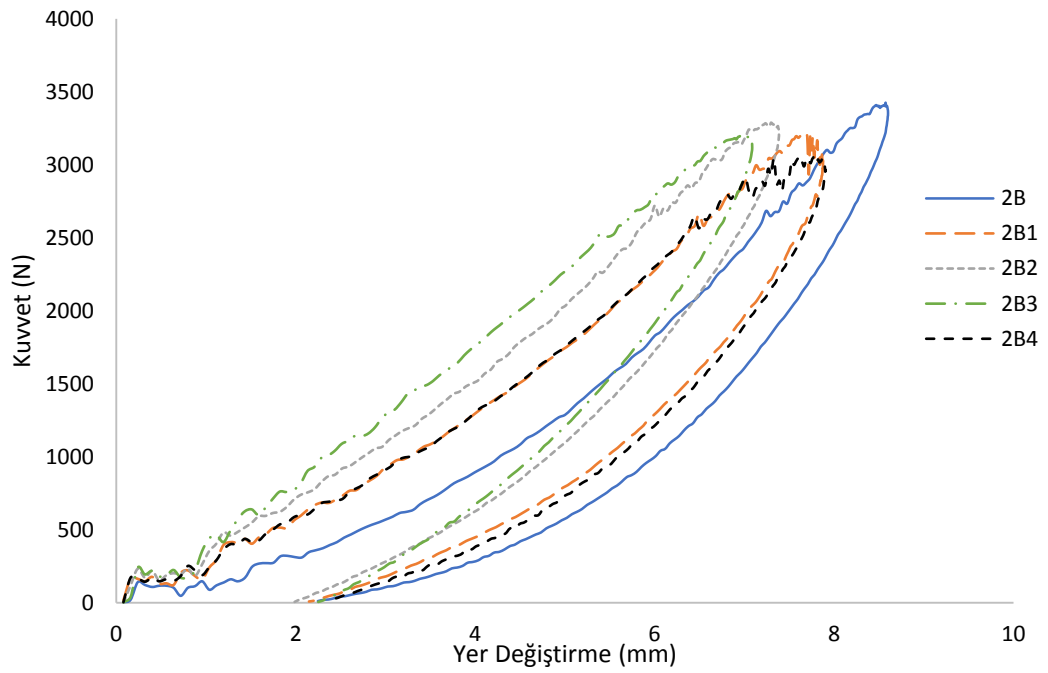
Şekil 4.18 A ve B konfigürasyonlarında cam elyaf takviyeli polimer kompozitin 3 m/s darbe hızında Kuvvet-Yer Değiştirme (F-Δd) grafiği



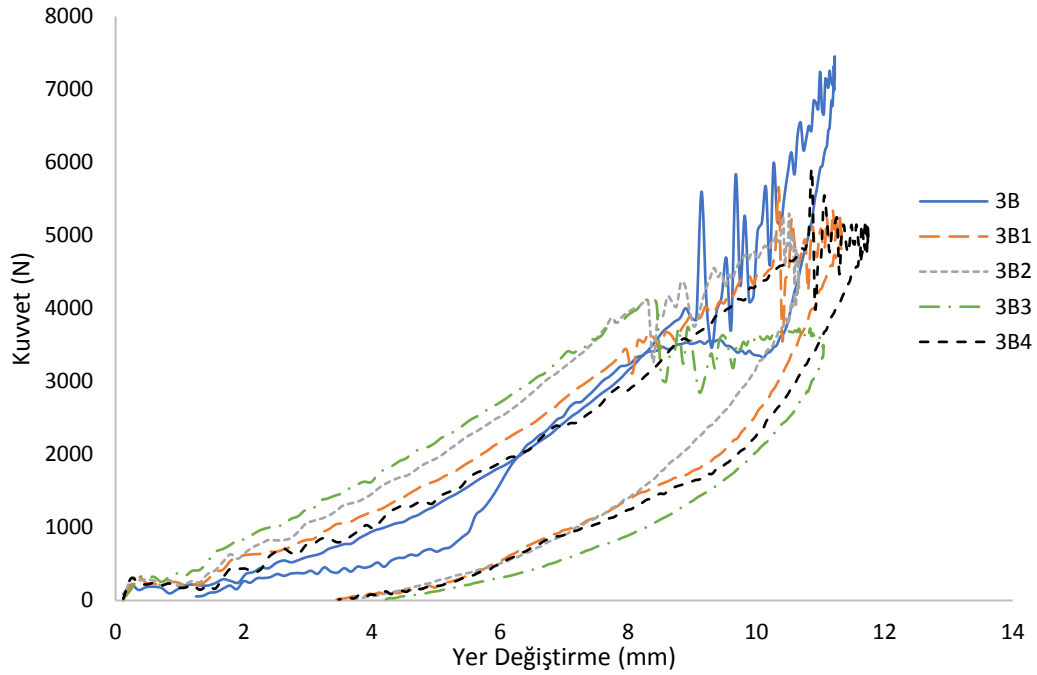
Şekil 4.19 A konfigürasyonlarında ve 5 farklı dizilimde üretilen kompozitlerin 2 m/s darbe hızında Kuvvet-Yer Değiştirme (F-Δd) grafiği



Şekil 4.20 A konfigürasyonlarında ve 5 farklı dizilimde üretilen kompozitlerin 3 m/s darbe hızında Kuvvet-Yer Değiştirme (F- Δd) grafiği



Şekil 4.21 B konfigürasyonlarında ve 5 farklı dizilimde üretilen kompozitlerin 2 m/s darbe hızında Kuvvet-Yer Değiştirme (F- Δd) grafiği



Şekil 4.22 B konfigürasyonlarında ve 5 farklı dizilimde üretilen kompozitlerin 3 m/s darbe hızında Kuvvet-Yer Değiştirme (F-Δd) grafiği

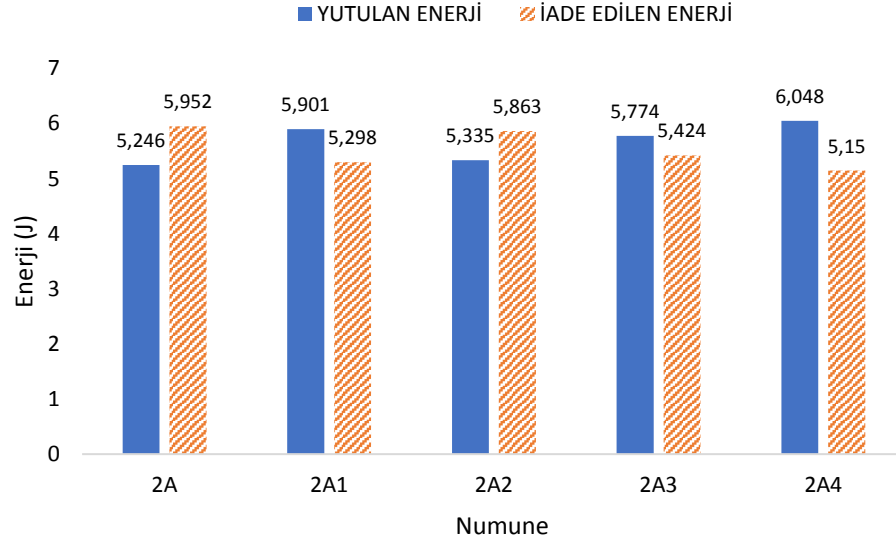
4.1.3. Birim kesit alanda yutulan ve iade edilen enerjinin konfigürasyon ve elyaf dizilimine göre değişimi

Bu bölümde farklı hız, konfigürasyon ve dizilimli numunelerin yutulan ve iade edilen darbe enerjileri grafik şeklinde gösterilmiştir. Yutulan enerji miktarı malzemenin tokluğunu ifade etmektedir. Gösterilen değerler aynı numunenin tabi tutulduğu 2 test sonucunun ortalaması alınarak oluşturulmuştur.

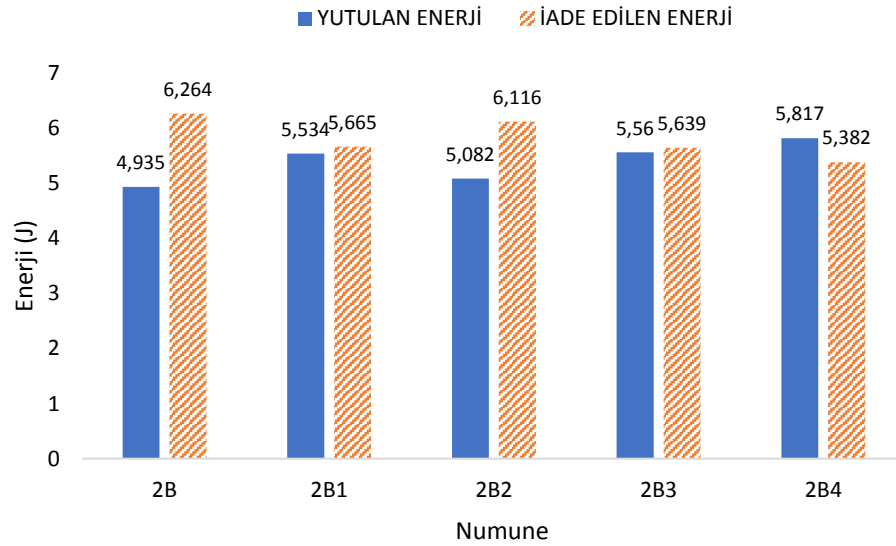
Şekil 4.23 ve Şekil 4.24 incelendiğinde malzeme üzerindeki konfigürasyon etkisi bariz şekilde görülmektedir. B konfigürasyonundaki malzemelerin yutulan ve iade edilen enerji seviyeleri daha tutarlı bir davranış göstermiştir. A ve B konfigürasyonları için 2A4 numunesi 6,048 J ile 2B4 numunesi 5,817 J ile maksimum enerji absorbe etmişler, 2A ve 2B numuneleri ise sırasıyla 5,246 J ve 4,935 J ile minimum enerji absorbe etmişlerdir. Tüm numunelerde toplam enerji 11,2 J olmuştur.

2 m/s testler için tüm numunelerde yutulan ve iade edilen enerji miktarları darbe hızının düşük olmasından ve malzemelerde hasar oluşumunun genellikle matris çatlağından öteye gidememesinden dolayı birbirlerine yakın olmuştur. Elyaf/matris oranı ve hibrit numunelerdeki keten elyaf/cam elyaf oranı eğilme rijitliğini etkilemiş dolayısı

ile bazı numunelerde yutulan enerji yüksek çıkarken bazı numunelerde iade edilen enerji yüksek çıkmıştır.



Şekil 4.23 A konfigürasyonunda 2 m/s darbe hızı ile teste tabi tutulmuş numunelerin yutulan ve iade edilen enerji seviyeleri

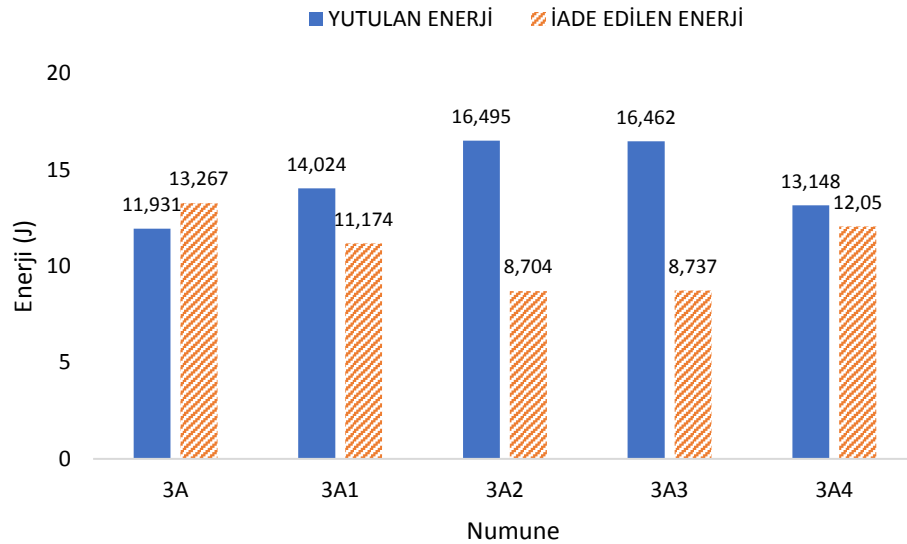


Şekil 4.24 B konfigürasyonunda 2 m/s darbe hızı ile teste tabi tutulmuş numunelerin yutulan ve iade edilen enerji seviyeleri

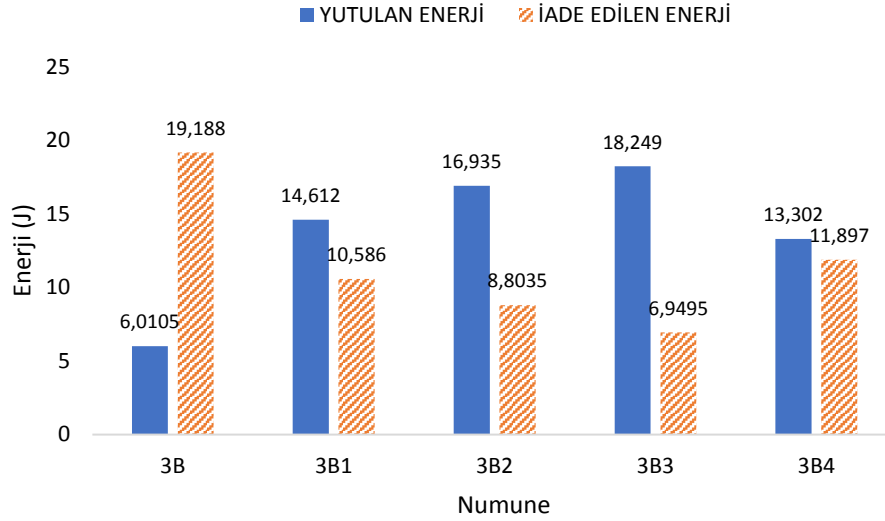
Genel olarak bakıldığında darbe hızının yüksek olduğu deneylerde yutulan enerjinin iade edilen enerjiden yüksek olduğu söylenebilir. 3A2, 3A3, 3B2, 3B3 numunelerinde yutulan enerjinin iade edilen enerjiye göre çok fazla olduğu görülmektedir

ve bu durum bu numunelerin eğilme rijitliklerinin yüksek olmasına dolayısı ile malzemede oluşan hasarın büyüklüğüne bağlanabilir.

Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 incelendiğinde darbe hızının artması ve malzemelerde oluşan hasarların etkisi sonucu yutulan ve iade edilen enerji seviyelerinde büyük farklılıklar meydana gelmiştir. A ve B konfigürasyonları için 3A2 numunesi 16,495 J ile 3B3 numunesi 18,249 J ile maksimum enerji absorbe etmişler, 3A ve 3B numuneleri ise sırasıyla 11,931 J ve 6,01 J ile minimum seviyede enerji absorbe etmişlerdir. 3A2, 3A3, 3B2 ve 3B3 numunelerinde yutulan enerjinin diğer numunelere kıyasla fazla olmasının en büyük nedenlerinden biri ise bu numunelerde matris oranının elyafa göre fazla olmasındandır. Tüm numunelerde toplam enerji 25,2 J olmuştur.



Şekil 4.25 A konfigürasyonunda 3 m/s darbe hızı ile teste tabi tutulmuş numunelerin yutulan ve iade edilen enerji seviyeleri



Şekil 4.26 B konfigürasyonunda 3 m/s darbe hızı ile teste tabi tutulmuş numunelerin yutulan ve iade edilen enerji seviyeleri

4.1.4. Test sonucu elde edilen tepe ve toplam değerler

Bu bölümde darbe testine tabi tutulmuş olan kompozit numunelerin tepe kuvvet, tepe deplasman, toplam temas süresi, toplam impuls, temas rijitlikleri ve eğilme rijitlikleri çizelge ve grafik şeklinde sunulmuştur. Çizelge 4.1' de 2 m/s hızında darbeye uğramış olan numunelerin tepe ve toplam değerleri ile temas, eğilme rijitlikleri görülmektedir. Burada malzemedeki konfigürasyonun etkisi çizelgedeki değerlerden açık bir şekilde görülmektedir. B konfigürasyonuna sahip numunenin, yani $-45^{\circ}/0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}$ elyaf yönü ile dizilimin, maksimum temas kuvveti bakımından A konfigürasyonundaki aynı dizilime sahip numuneye göre daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmektedir. Şekil değiştirme bakımından B konfigürasyonlu numuneler daha az şekil değiştirmiş, bununla bağlantılı olarak daha düşük toplam temas süresine sahip olmuştur. Toplam impuls ve temas rijitiği ise kuvvet ve zaman ile bağıntılı olmalarından dolayı ve temas süresinin B konfigürasyonunda kuvvete nazaran daha düşük olduğundan, B konfigürasyonuna sahip numunelerin toplam impulsları daha düşük fakat temas rijitlikleri daha yüksek olmuştur.

Çizelge 4.1 2 m/s hızında darbeye uğramış numunelerin değerleri

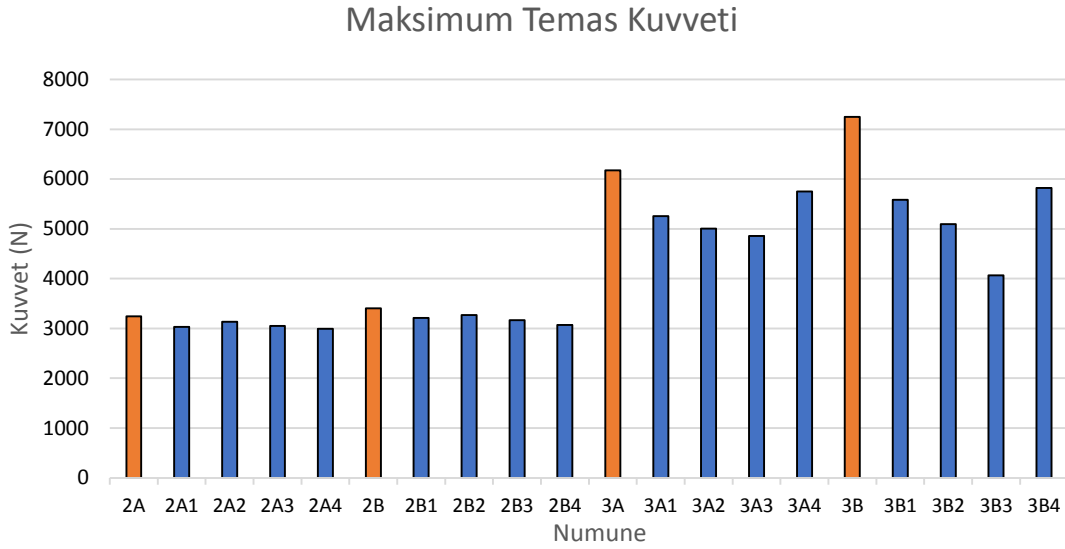
Numune	Tepe Kuvvet (N)	Tepe Deplasman (mm)	Toplam Temas Süresi (s)	Toplam İmpuls (N.s)	Temas Rijitliği (N/s)	Eğilme Rijitliği (N/m)
2A	3245,36	8,9	0,0128	5947,27	524464,7	274245,5
2A1	3030,94	8,45	0,01225	5591,31	601680	318186,8
2A2	3131,92	7,8	0,0116	5416,73	686915,6	366577,4
2A3	3047,54	7,25	0,01105	5002,18	786137,8	426566
2A4	2989,44	8,35	0,01225	5480,06	624143,1	331229,4
2B	3403,06	8,55	0,01215	5785,31	557437,5	291580,9
2B1	3210,78	7,9	0,01175	5354,84	657974,8	351614,7
2B2	3270,26	7,4	0,0111	5203,83	740952,4	397865,1
2B3	3167,89	7	0,01065	4894,87	831813,3	451208,2
2B4	3069,68	8	0,0119	5348,12	649469,4	346652,3

Çizelge 4.2’ de ise 3 m/s hızında darbeye uğramış numunelerin tepe ve toplam değerleri ile temas, eğilme rijitlikleri görülmektedir. Burada da aynı şekilde malzemedeki konfigürasyonun etkisi çizelgedeki değerlerden açık bir şekilde görülmektedir fakat darbe hızının artması ile meydana gelen delaminasyonlar ve elyaf kırılmaları 2 m/s hızındaki darbe test sonuçlarına göre numuneler arasında daha tutarsız sonuçların ortaya çıkmasına neden olmuştur.

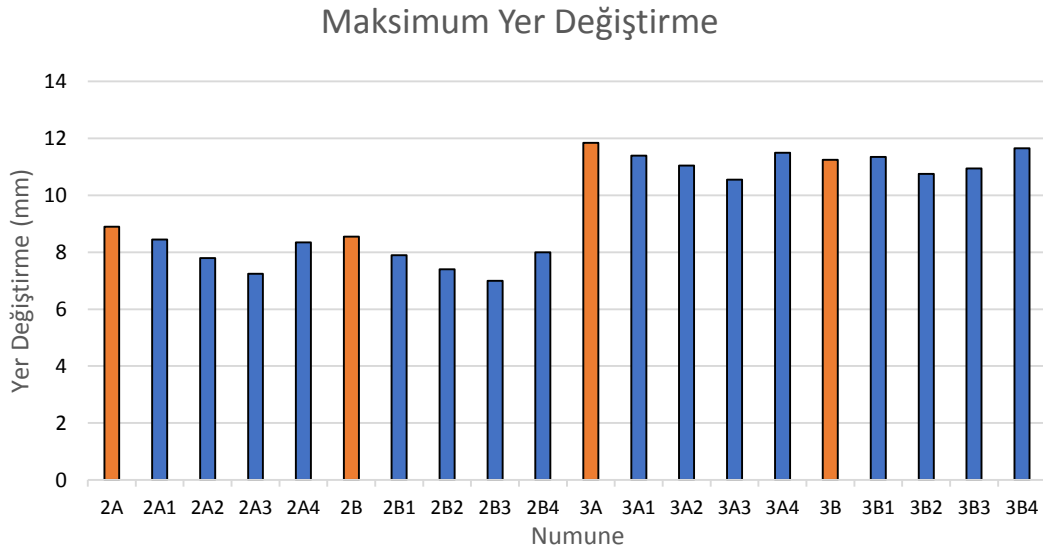
Çizelge 4.2 3 m/s hızında darbeye uğramış numunelerin değerleri

Numune	Tepe Kuvvet (N)	Tepe Deplasman (mm)	Toplam Temas Süresi (s)	Toplam İmpuls (N.s)	Temas Rijitliği (N/s)	Eğilme Rijitliği (N/m)
3A	6176,72	11,85	0,0117	7902,2	1010706	322571,3
3A1	5252,63	11,4	0,01145	7435,36	1137957	404247,8
3A2	5005	11,05	0,01165	6850,29	1264133	454195,1
3A3	4854,22	10,55	0,0114	6621,62	1262968	461887
3A4	5747,87	11,5	0,0113	7589,05	1068416	377896,7
3B	7247,44	11,25	0,0107	8320,25	1051612	364976,9
3B1	5581,87	11,35	0,01125	7253,9	1131430	400628
3B2	5097,69	10,75	0,0112	6673,816	1316568	471884,5
3B3	4068,46	10,95	0,01225	6644,43	1308675	486945,9
3B4	5823,96	11,65	0,0113	7607,43	1036476	365060,5

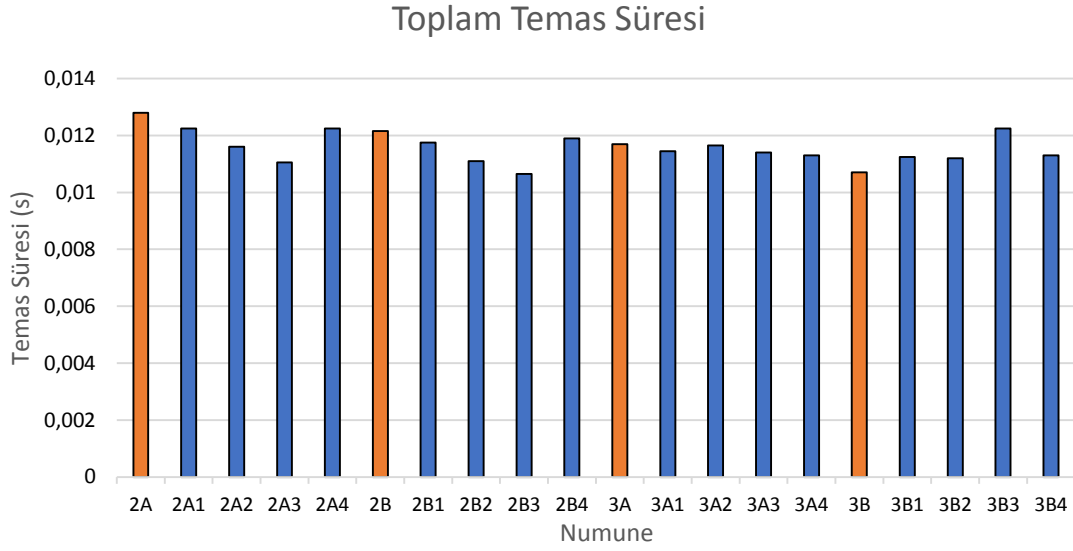
Şekil 4.27- Şekil 4.32 arasında tüm numunelere ait maksimum temas kuvvetleri, maksimum yer değiştirmeler, toplam temas süreleri, toplam impulslar, temas rijitlikleri ve eğilme rijitlikleri grafik şeklinde görülmektedir.



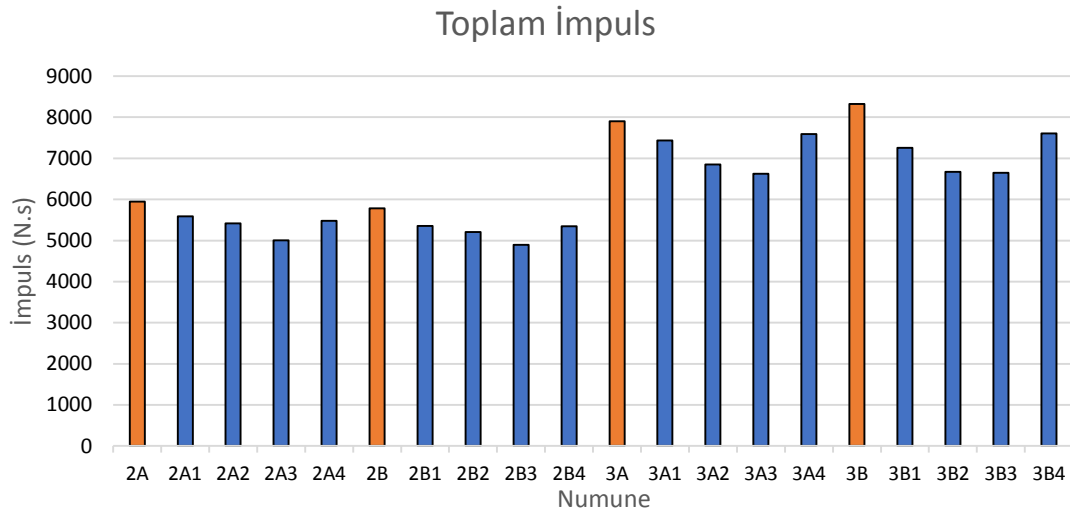
Şekil 4.27 Tüm numunelerin maksimum temas kuvvetleri



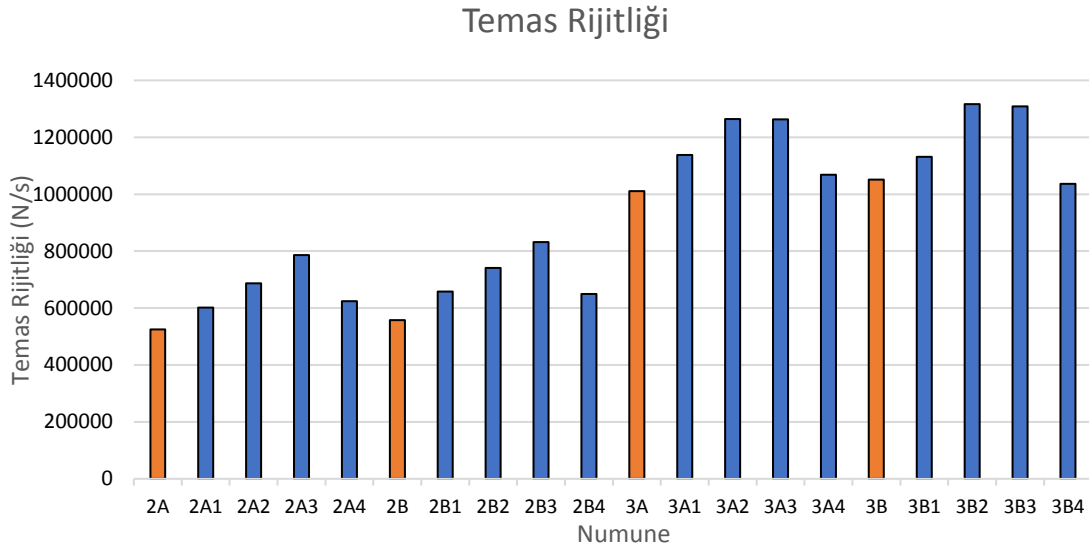
Şekil 4.28 Tüm numunelerin maksimum yer değiştirmeleri



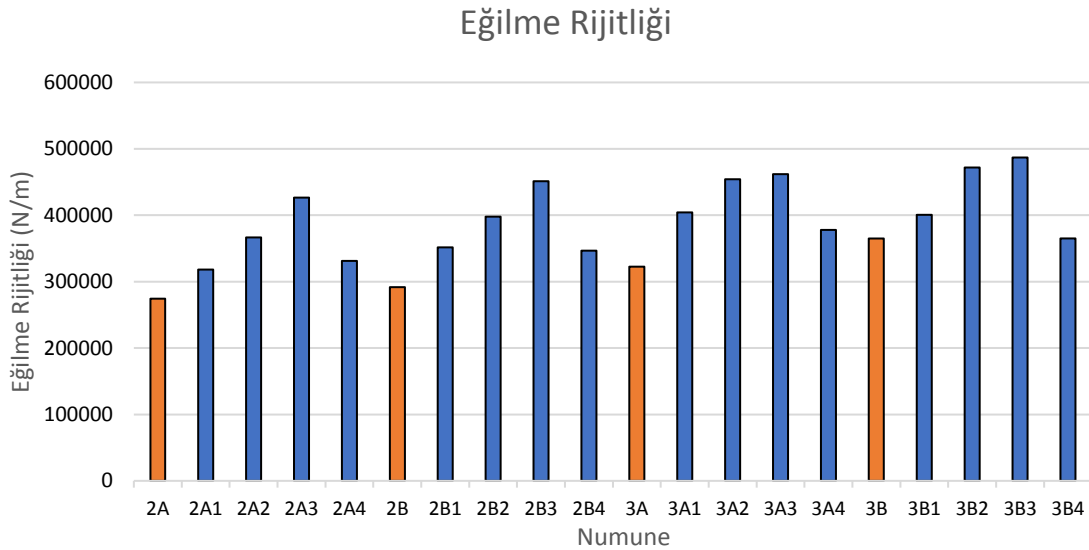
Şekil 4.29 Tüm numunelerin toplam temas süreleri



Şekil 4.30 Tüm numunelerin toplam impulsları



Şekil 4.31 Tüm numunelerin temas rijitlikleri



Şekil 4.32 Tüm numunelerin eğilme rijitlikleri

4.2. Hasar davranışları

Anizotropik ve heterojen oldukları için elyaf takviyeli tabakalı kompozitlerde genellikle dört çeşit darbe hasar modu meydana gelmektedir. Şekil 4.33' de bu hasar modları görülmektedir (Kara, 2006). Burada;

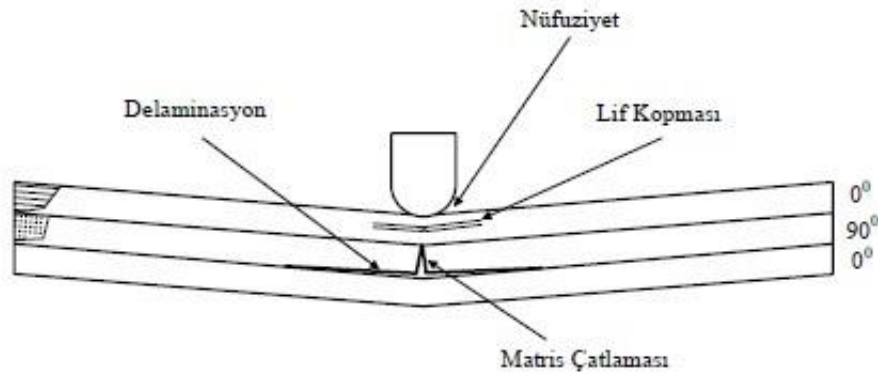
1. **Matris Çatlaması:** Elyafların birbirlerine tutunmasını sağlayan matris malzemede oluşan çatlaklardır. Basma ve kesme gerilmeleri yüzünden genel olarak elyaflara paralel yapıda oluşurlar. Düşük hızlı darbede oluşan ilk hasardır. Tabakalı

kompozit malzemenin darbe sonrası özelliklerinin belirlenmesinde bu çatlakların fazla bir önemi yoktur fakat hasar matris çatlakları ile başladığı için ardından delaminasyon ve diğer hasarların oluşumuna yol açacaktır. Kalın cidarlı kompozitlerde yüksek bölgesel gerilmelerden dolayı matris çatlakları darbenin uygulandığı ilk katmanlarda görülür. İnce cidarlı kompozitlerde ise arka yüzdeki eğilme gerilmeleri bu bölgede matris çatlamasına sebep olur.

2. Delaminasyon: Kompoziti oluşturan tabakaların birbirinden ayrılmasına denir. Bu ayrılma darbe sonucu eğilmeden kaynaklanan kayma gerilmesi neticesinde oluşur. Malzemenin özellikleri, tabaka dizilimi ve kalınlığı delaminasyonu etkileyen faktörlerden bazılarıdır. Delaminasyonun başlaması için matris çatlağı gerekli bir unsurdur ve bu ikisi arasında sıkı bir ilişki vardır. Delaminasyon oluşumuna liderlik eden matris çatlakları kritik matris çatlakları olarak adlandırılır.

3. Elyaf kırılması: Matris çatlağı ve tabaka ayrılmasından sonra oluşur ve elyafların yükü taşıyamayıp kırılmasıdır. Elyaf kırılmasındaki en önemli faktörler yüksek bölgesel gerilmeler ve yüksek eğilme gerilmesidir. Bölgesel gerilmelerden dolayı oluşan kırılmalar darbenin meydana geldiği yerde oluşan ve nüfuziyet kaynaklı kırılmalar. Eğilme gerilmesi kaynaklı kırılmalar ise malzemenin diğer yüzünde oluşan yüksek eğilme gerilmesi sonucu elyafın dayanamayıp kırılmasıdır.

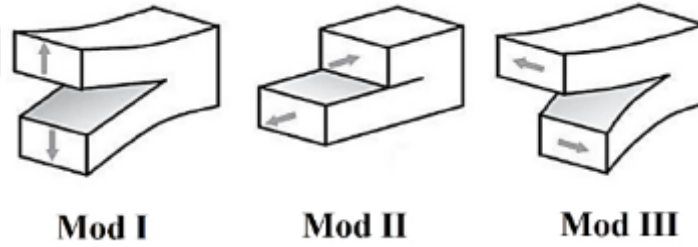
4. Nüfuziyet: Cismin malzemeye çarpması sonucu malzemeyi delme miktarıdır ve hasarın makro boyutta bir modudur. Nüfuziyet miktarı elyaf hacim oranı ile doğrudan bağlantılıdır ve bu oranın aynı olduğu farklı boyuttaki malzemelerde nüfuziyet miktarı hemen hemen aynıdır.



Şekil 4.33 Darbe sonucu kompozitlerde oluşabilen hasarlar (Kara, 2006)

Tabakalar arası kırılma matris bakımından yoğun olan yerlerde başlar ve çatlak ilerlemesi esnasında elyaflara yapışan matris elemanı, bu elyafların tiftiklenmesini sağlar. Elyaplardan ayrılan mikro yapıdaki lifler kırılma yüzeyleri arasında bir köprü oluşturur. Çatlak oluşumunun hemen ardından oluşan bu lif köprüsü delaminasyon ilerlemesine karşı gösterilen direnci artırır. Açılı tabakalanmış kompozit malzemelerde oluşan lif köprüsü tek yönlü tabakalanmış kompozitlere göre daha yoğundur (Darıcık ve Çelebi). Bu yüzden takviye elemanının açılı dizilmesi durumunda, delaminasyon ilerlemeleri daha büyük bir direnç ile karşılaşmakta ve malzemede oluşacak hasarlar azalırken mekanik özellikler iyileşmektedir.

Şekil 4.34’ de delaminasyon yüklemelerine göre hasar modları görülmektedir. Bu yüklemeler normal ve kayma doğrultusunda meydana gelir. Mod I yüklemelerde yer değiştirme çatlak yüzeyine diktir ve açılma (çekme) olarak isimlendirilir. Mod II ve Mod III yüklemelerinde yer değiştirme çatlak düzleminde ve sırayla kesme ve yırtılma yüklemesi olarak isimlendirilir. Bu her üç modun birlikte olduğu yüklemeye ise karışık mod yüklemesi denir.

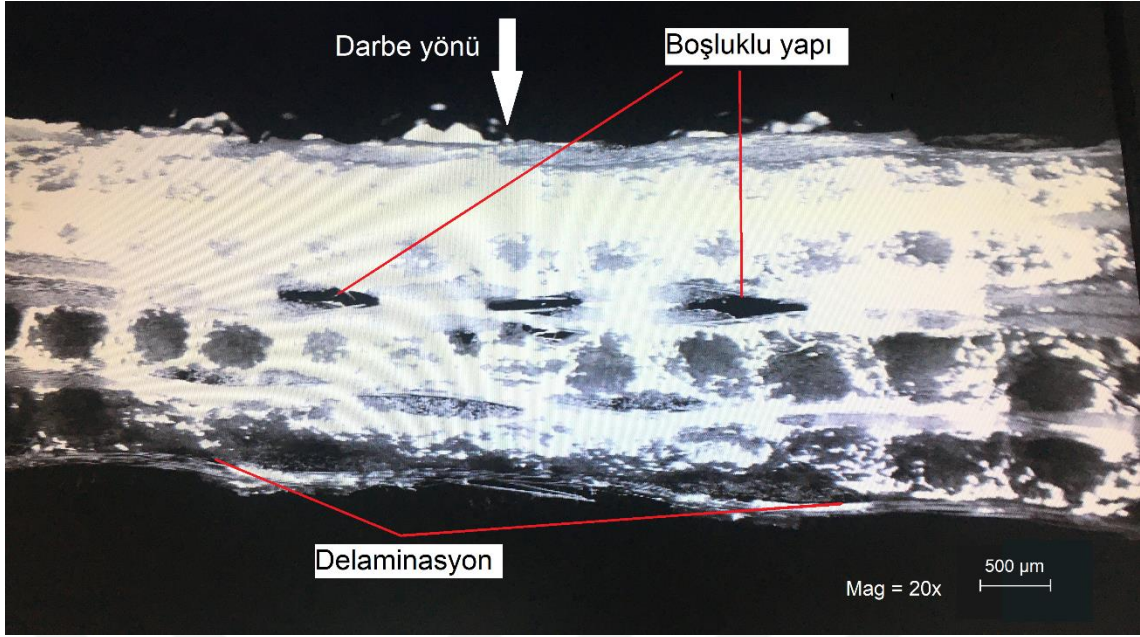


Şekil 4.34 Hasar modları

4.2.1. Hasar bölgelerinin taramalı elektron mikroskobu ile tespiti

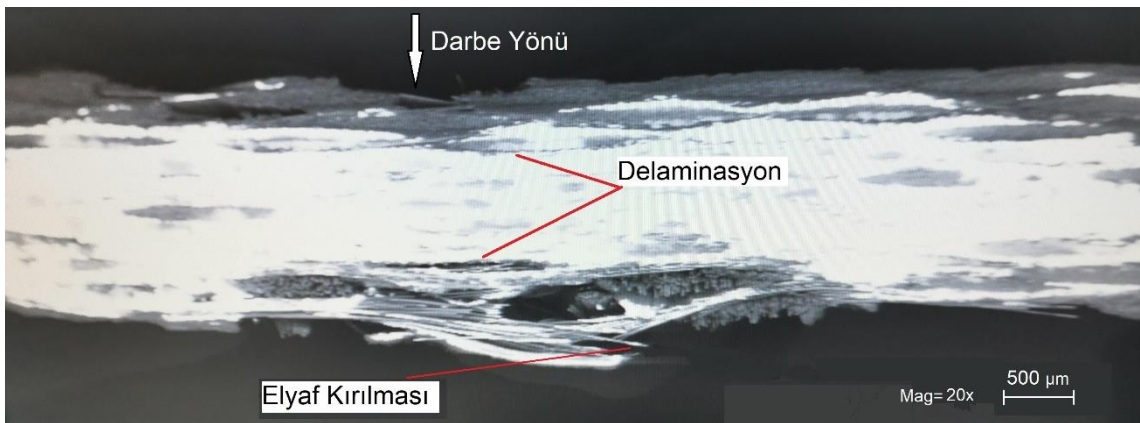
Bu bölümde düşük hızlı darbe uygulanan kompozit numunelerde meydana gelen hasarlar taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri üzerinden değerlendirilmiştir. Kullanılan elektron mikroskobu Zeiss markasının Evo 18 modelidir. Numuneler elektron mikroskobunda incelenmeden önce hasarlı bölgenin ortasından geçecek şekilde, darbeye paralel, numunenin enine kesitinde kesilmiştir.

Şekil 4.35’ de 2A1 numunesinin taramalı elektron mikroskobundaki görüntüsü bulunmaktadır. Burada malzemenin tam ortasında bulunan cam elyafların üst tarafında bulunan keten elyaf yoğunluklu kısımda sıkışmaların olduğu açık tonlu renklerden anlaşılmaktadır. Orta kısımdaki 2 kat cam elyaf bölgesinde ve en fazla çekme gerilmesine maruz kalan alt bölümde delaminasyonların olduğu görülmektedir.



Şekil 4.35 2A1 numunesinin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü

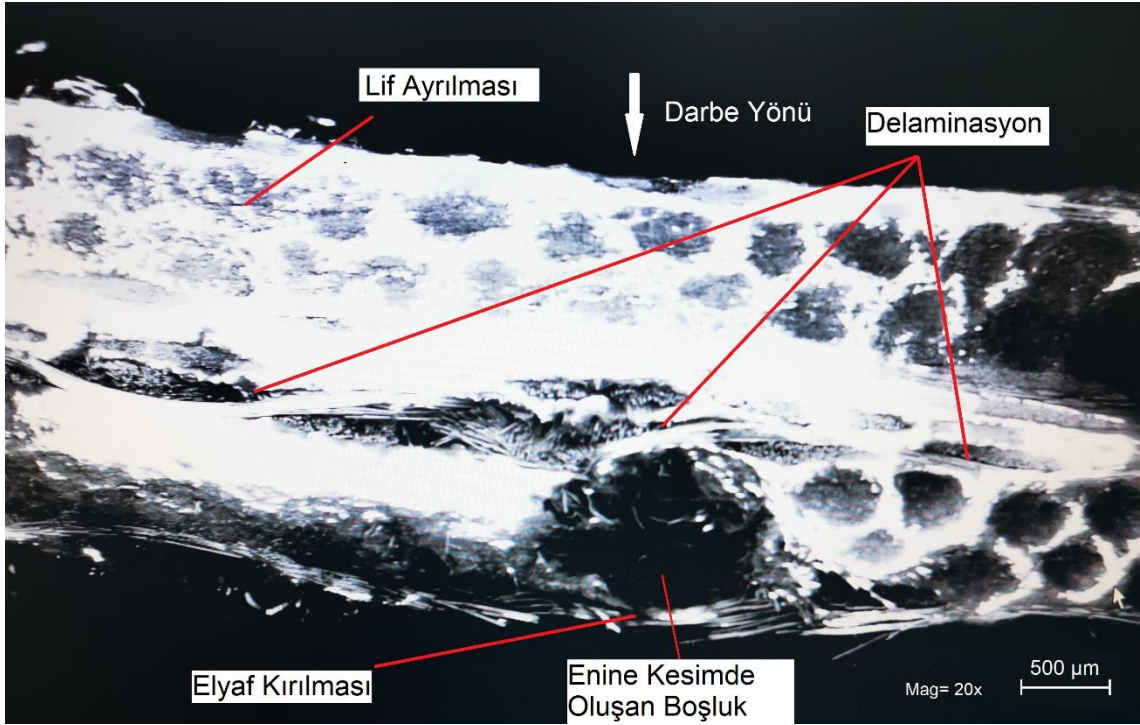
Şekil 4.36’ da 3 m/s darbe hızında yapılan deneyler sonucunda, 3A numunesinde elyaf kırılması ve delaminasyonlar gibi ağır hasarların oluştuğu görülmektedir. Darbe hızının artması ile numune daha fazla bir kuvvetle yüklenmiş bu yükleme neticesinde ise sahip olduğu enerjiyi delaminasyon ve elyaf kırılmaları ile boşaltmıştır. Bu enerji boşaltımıyla oluşan hasar, malzemenin mekanik özelliklerini ciddi derecede düşürmektedir.



Şekil 4.36 3A numunesinin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü

3A4 numunesinin darbe hasarına uğramış bölgesinin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri Şekil 4.37’ de görülmektedir. Cam elyafın malzemenin dışında ve tek tabaka olarak bulunması malzemenin arka yüzeyinde oluşan çekme gerilimlerine

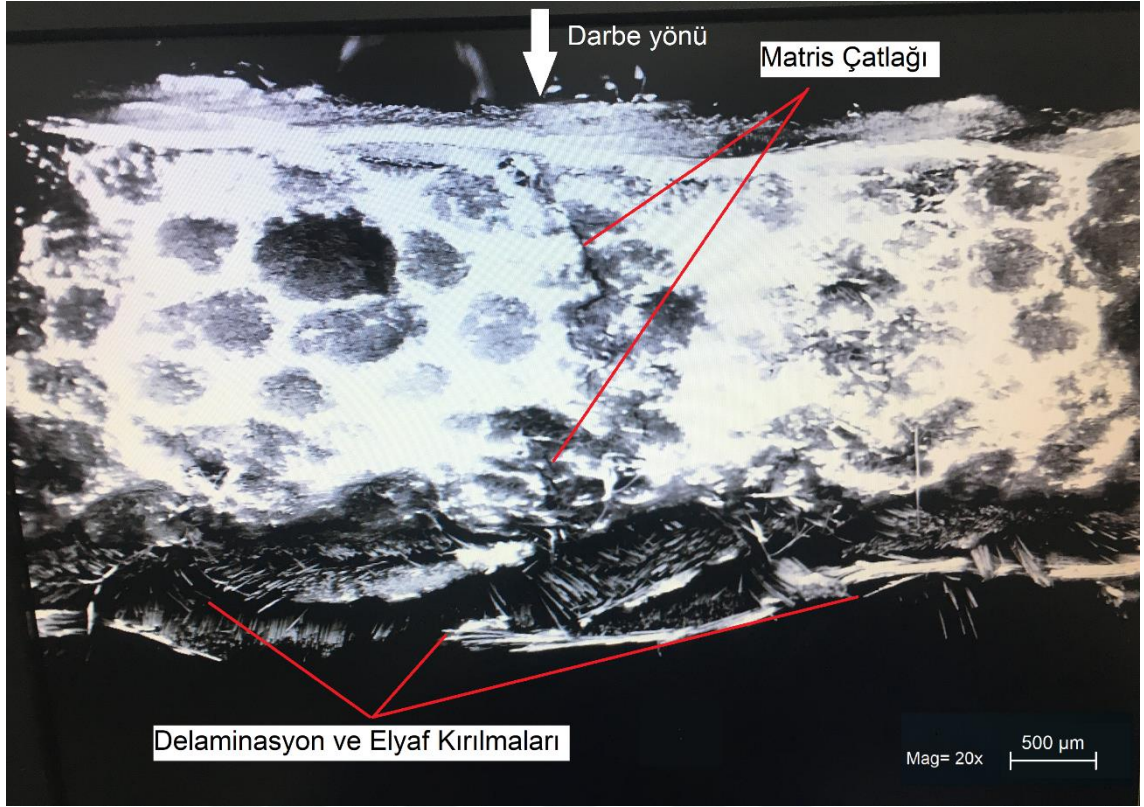
karşı göstereceği mukavemeti düşürmüş ve cam elyafın kırılması ile şekilde görüleceği üzere malzemede büyük hasarlar meydana gelmiştir. Şekilde görülen elyaf kırılmasının üst bölümünde görülen boşluk ise hasarlı bölgenin enine kesimi sırasında kırılan elyafların o bölgeden ayrılması ve orada boşluk oluşturmamasından kaynaklanmıştır. Aynı zamanda delaminasyon bölgelerinde görülen elyafların lif lif yapıda olması numune üretiminde elyaf ıslanmasının düşük olduğunu göstermiştir.



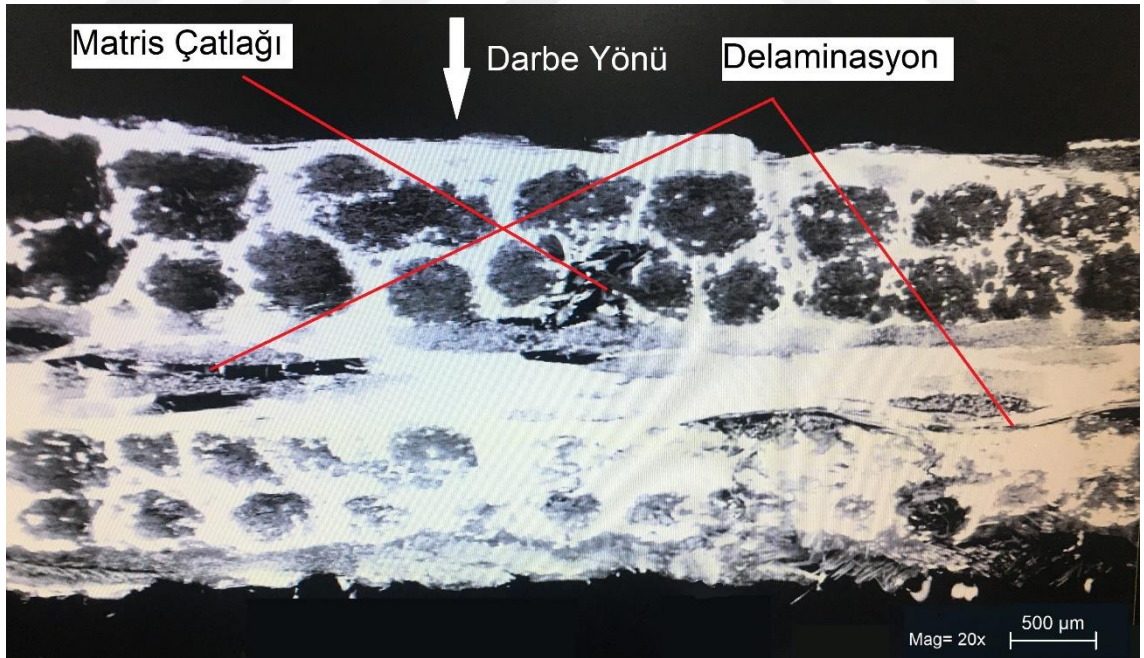
Şekil 4.37 3A4 numunesinin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü

Şekil 4.38’ de ise keten elyafın 6 tabaka şeklinde numunenin orta kısmında bulunduğu 3B3 numunesi görülmektedir. Burada keten oranının fazla olması malzemenin maksimum temas kuvvetini düşürmüş, yutulan enerji miktarını artırmıştır. Bunun neticesinde malzemede oluşan ağır hasarlar şekilde görülmektedir. Yutulan enerjinin artmasının malzemede oluşan hasarların çokluğunun bir neticesi olduğu değerlendirilmiştir.

Numune 3B4’ in Şekil 4.39’ daki hasar görüntülerine bakılacak olunursa malzemede konfigürasyonun önemi dikkat çekmektedir. 3A4 numunesi ile kıyaslandığında, 3B4 numunesi çok daha az hasara uğramıştır.



Şekil 4.38 3B3 numunesinin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü

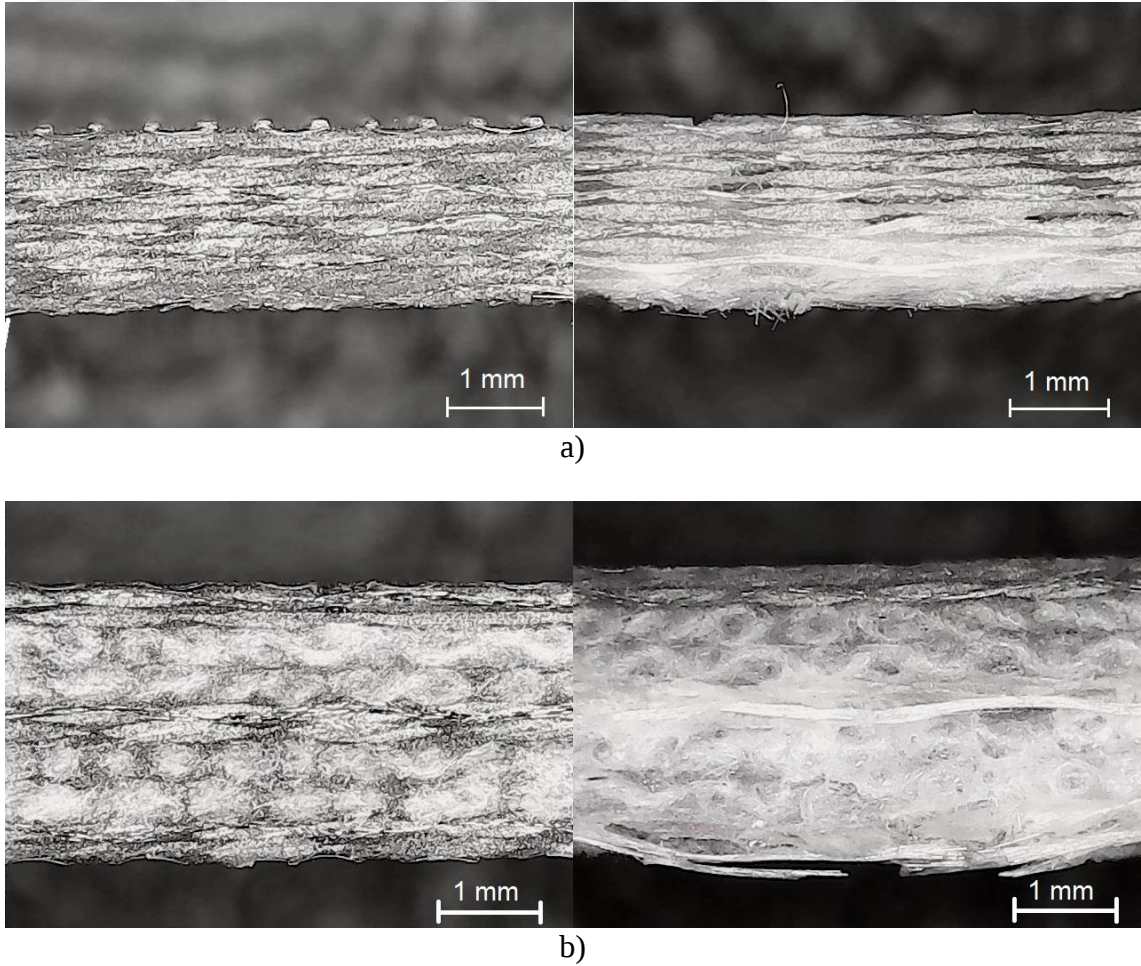


Şekil 4.39 3B4 numunesinin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü

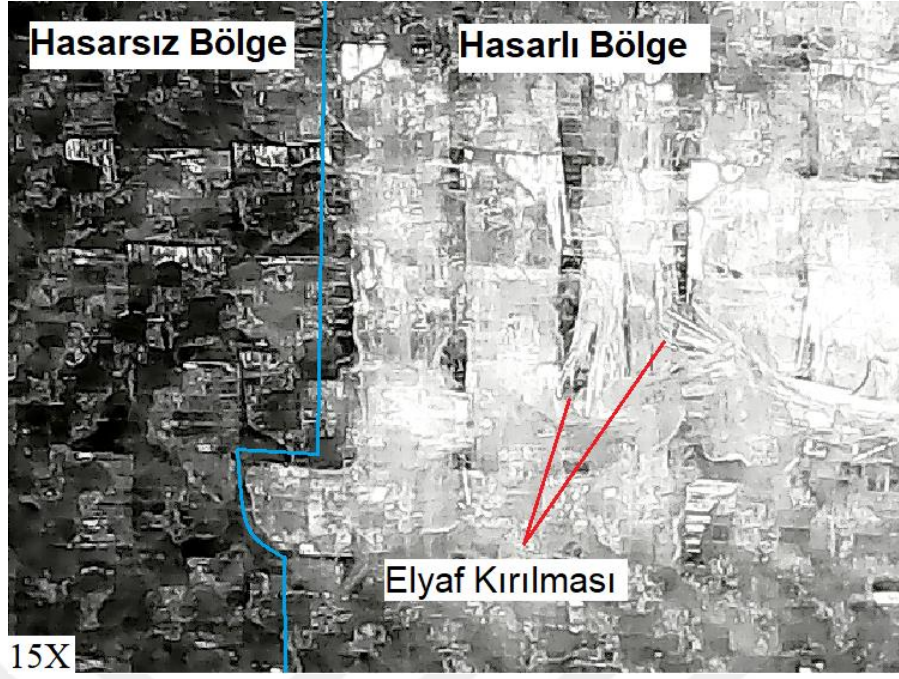
4.2.2. Hasar bölgelerinin makro boyutta tespiti

Bu bölümde düşük hızlı darbe yüklemelerine maruz bırakılmış hibrid tabakalı kompozit malzemelerde darbe sonrasında oluşan hasarlar mikroskop görüntülerinden faydalanılarak değerlendirilecektir.

Şekil 4.40’ da düşük hızlı darbe testine tabi tutulmuş 3B ve 3B2 numunelerinin darbe öncesi ve sonrası görüntüleri örnek olarak verilmiştir. Darbe öncesi elyaf dizilimi orantılı bir şekilde ilerlerken darbe sonrası bu yapı bozulmaya uğramıştır. Genel itibarı ile malzemelerde en büyük hasarlar çekme gerilmelerinin en çok yaşandığı arka yüzeyde meydana gelmiştir. Şekil 4.41’ da 3B2 numunesinin arka yüzeyinin mikroskop görüntüsü bulunmaktadır.

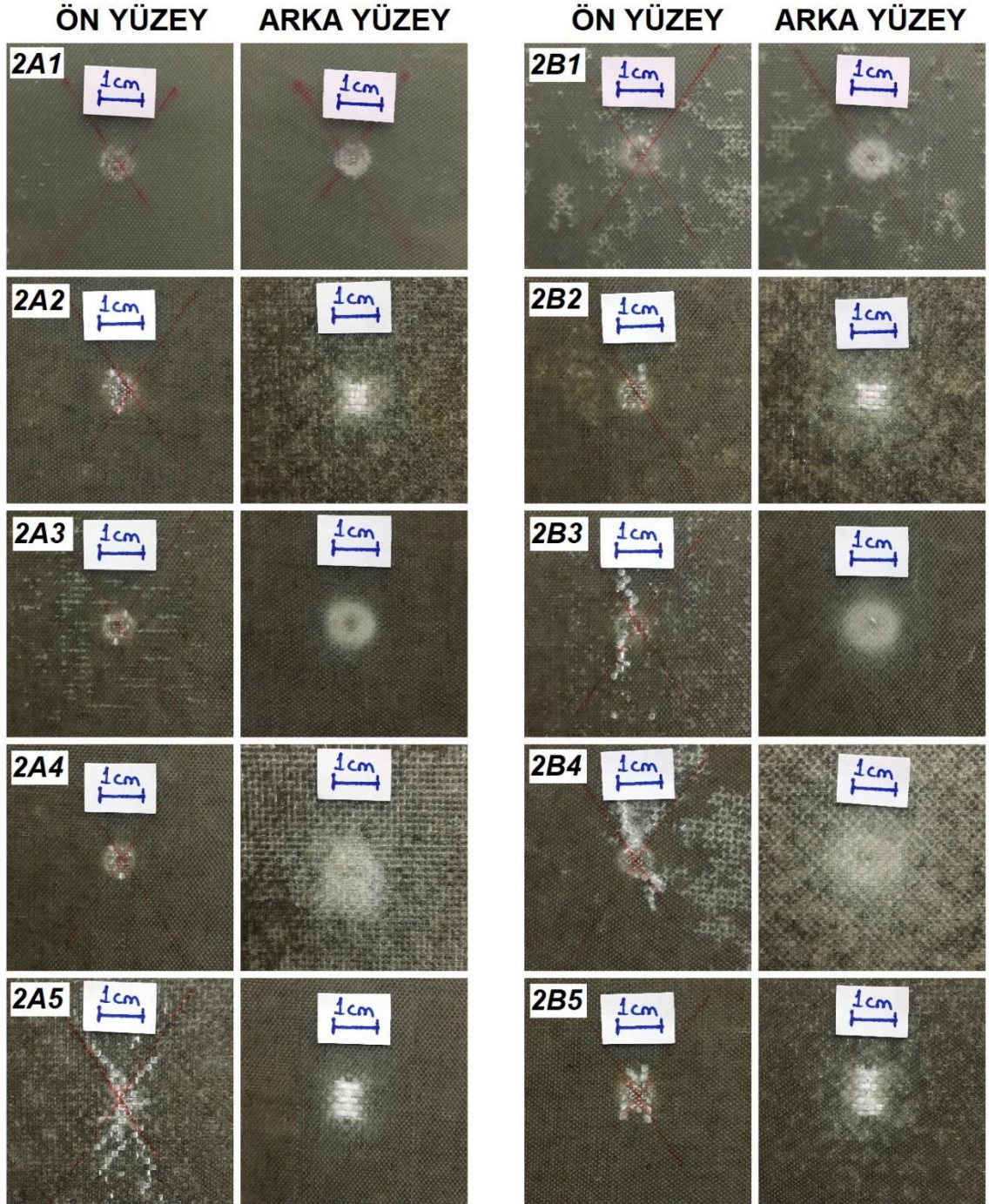


Şekil 4.40 Darbe öncesi ve sonrası numunelerin mikroskop altındaki yan görünüşleri a) 3B numunesi
b) 3B2 numunesi

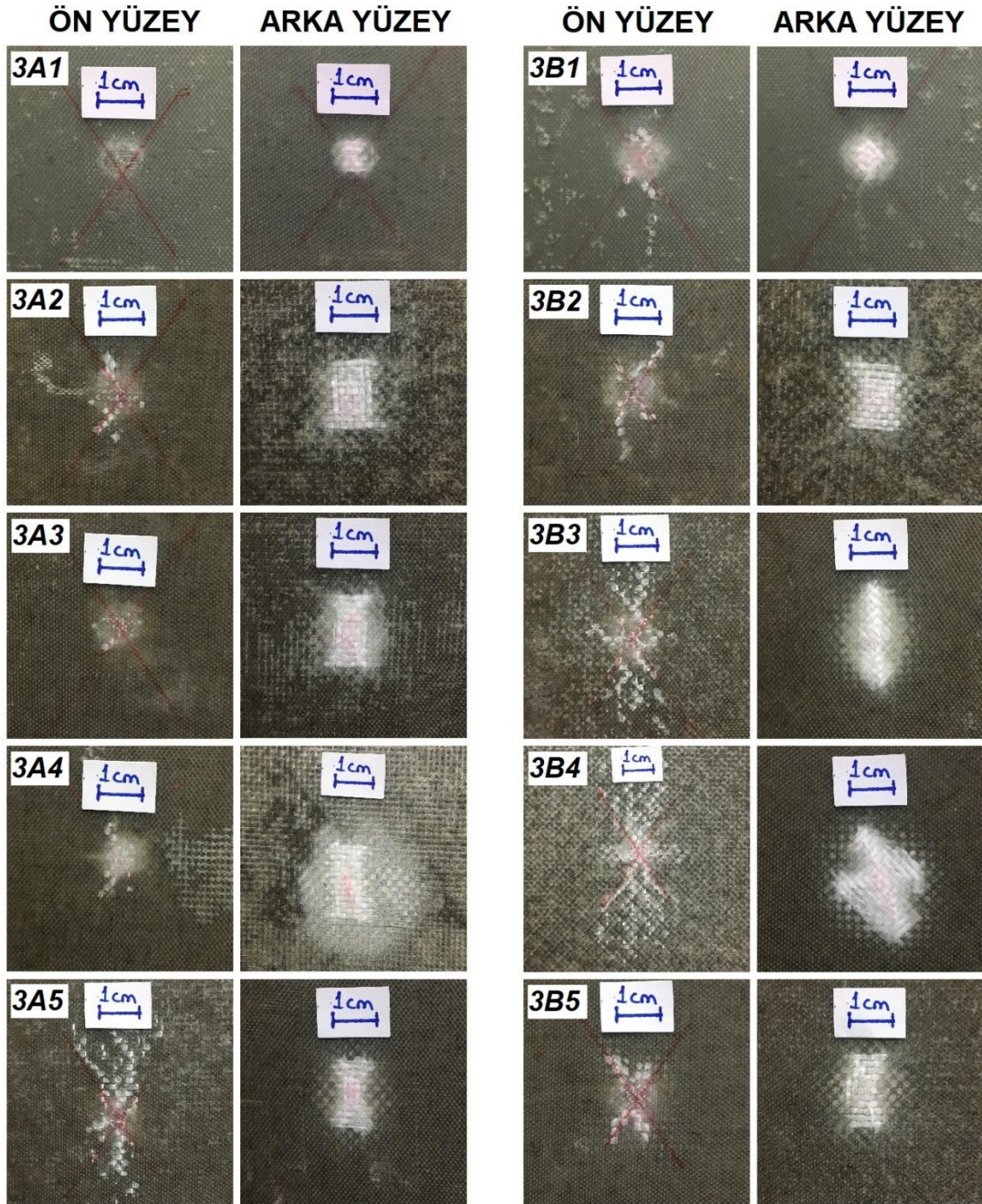


Şekil 4.41 3B2 numunesi arka yüzey mikroskop görüntüsü

Meydana gelen hasarlar incelendiğinde en fazla hasarın malzemenin arka yüzeyinde olduğu ve beklendiği gibi 3 m/s darbe hızına tabi tutulan numelerde oluşan hasarların daha fazla olduğu Şekil 4.42 ve Şekil 4.43’ de açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.42 2 m/s hızında darbe uygulanmış numunelerin ön ve arka yüzeylerinde oluşan hasarlar

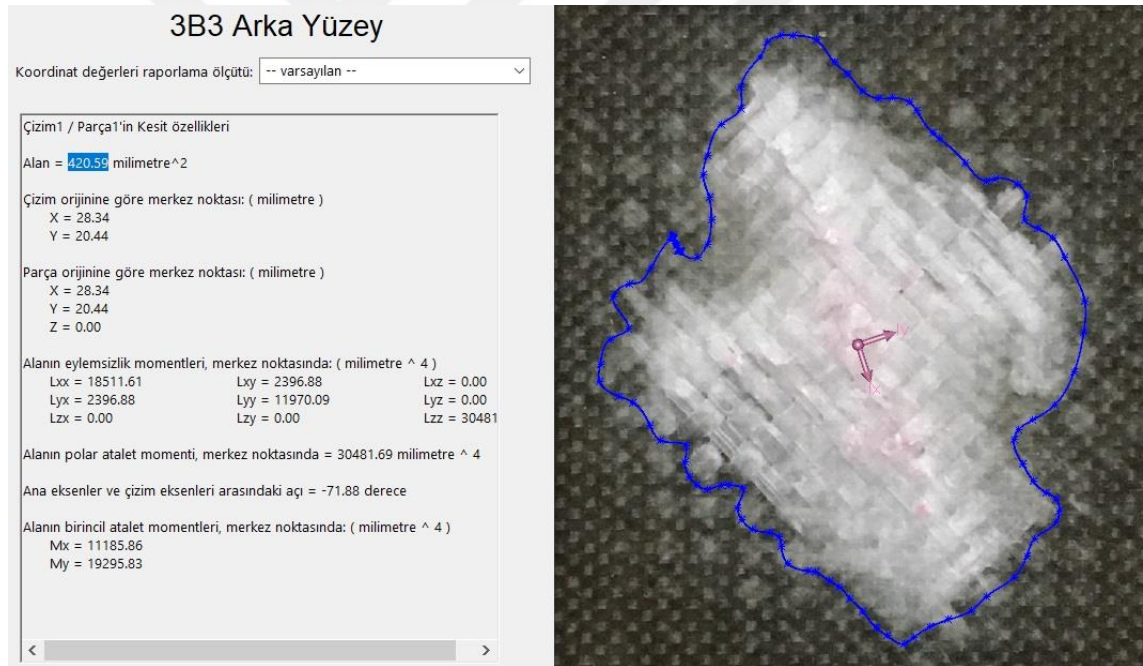


Şekil 4.43 3 m/s hızında darbe uygulanmış numunelerin ön ve arka yüzeylerinde oluşan hasarlar

Oluşan hasarlar, Şekil 4.44’ de görüleceği gibi görsellerin Solidworks programına aktarılması ile hesaplanmıştır. 2 m/s darbe hızına tabi tutulan numuneler incelendiğinde; A konfigürasyonu ve ön yüzey için hasarın 4 numaralı numunede maksimum seviyeye çıktığı görülmekte ve bunun 4 numaralı numunede cam elyafın dış yüzeylerde tek katman halinde bulunmasından dolayı delaminasyonların artmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Aynı numunenin B konfigürasyonu incelendiğinde; 0°/45° açılı dizilimin hasar alanının genişlemesini engellediği anlaşılmaktadır. Arka yüzeylere

bakacak olursak; A ve B konfigürasyonları için hasarın maksimum 3 numaralı numunede olduğu görülmüştür. Diğer numunelerde hasar gelişimi ön ve arka yüzeyde

3 m/s darbe hızındaki hasarlar değerlendirilecek olunursa; yine 3 numaralı numune dikkat çekmektedir. A konfigürasyonu için hasar numunenin arka yüzeyinde maksimum seviyeye ulaşırken, B konfigürasyonu için hasar ön yüzeyde maksimum olmuştur. Bunu şu şekilde açıklayabiliriz; B konfigürasyonundaki 0°/45° dizilimi darbe esnasında arka yüzeyde oluşan çekme gerilmesine daha iyi mukavemet gösterebilmiş ve ön yüzeydeki basma gerilmesi, hasarı daha yüksek seviyeye ulaştırmıştır. A konfigürasyonunda ise arka yüzeydeki çekme gerilmesine dayanamayan elyaflarda büyük hasarlar oluşarak kırılmış ve enerjinin çoğu burada absorbe edilerek ön yüzeyde hasar oluşumu nispeten düşük seviyede kalmıştır. Tüm numunelere ait darbe hasar alanları Çizelge 4.3' de verilmiştir.

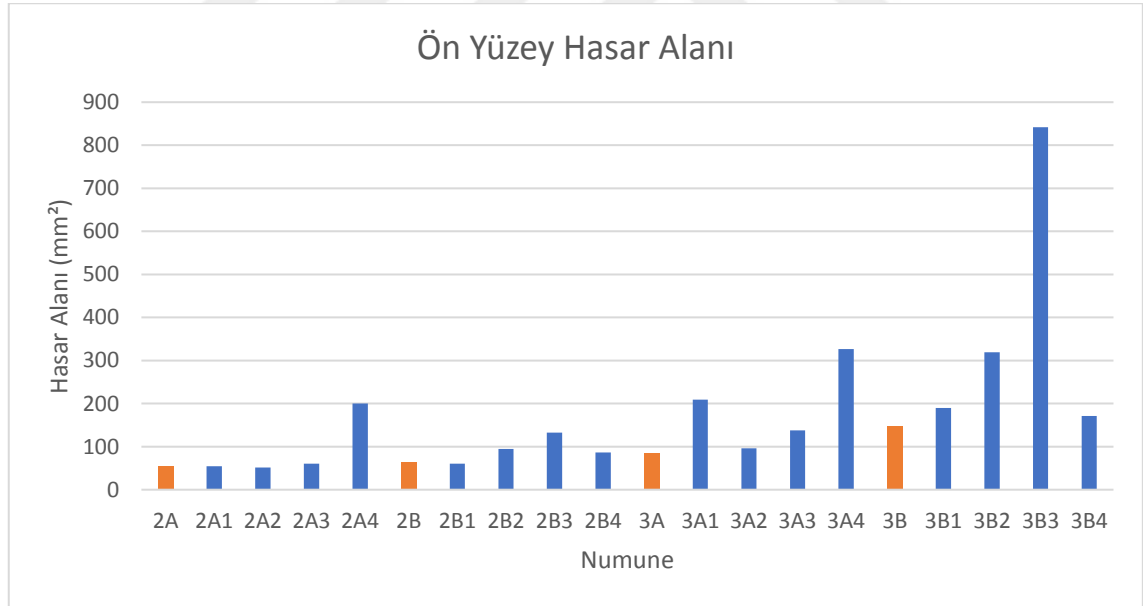


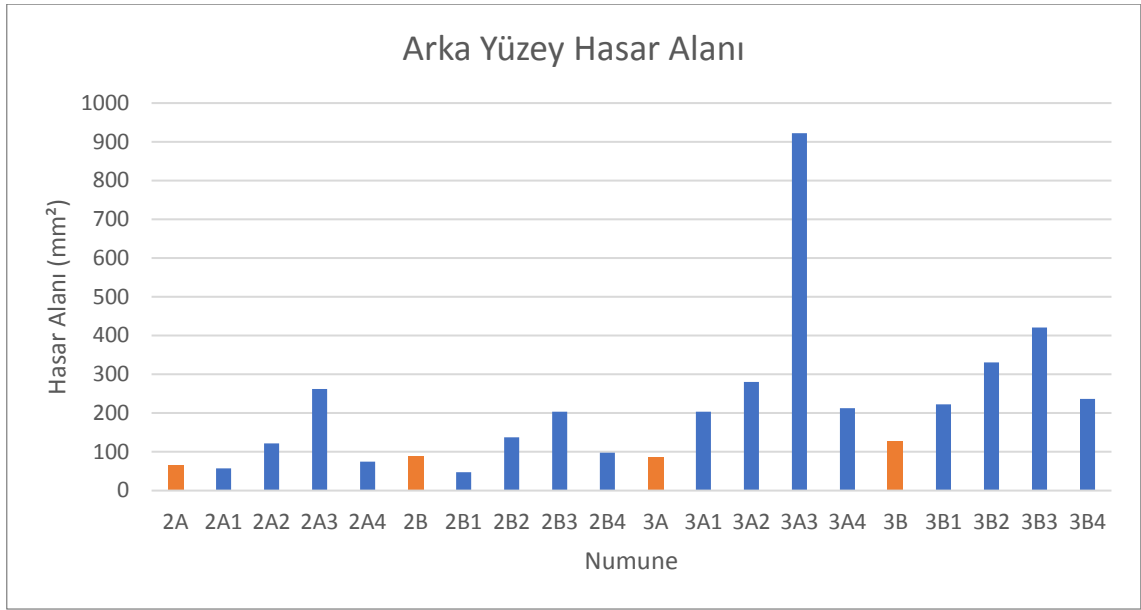
Şekil 4.44 Hasar alanının solidworks programı ile hesaplanması

Çizelge 4.3 Numunelerde oluşan hasarların alanları

Numune	Hasar Alanı (mm ²)		Numune	Hasar Alanı (mm ²)	
	Ön Yüzey	Arka Yüzey		Ön Yüzey	Arka Yüzey
2A	54,5	65,7	3A	84,2	86,8
2A1	54,8	57,5	3A1	209,4	203,9
2A2	51,4	122	3A2	95,8	280,2
2A3	60,6	262,6	3A3	137,4	921,9
2A4	200	74,9	3A4	326,5	213
2B	62,9	88,3	3B	147,5	126,9
2B1	60,4	47,2	3B1	189,7	222,6
2B2	95	137,8	3B2	319,4	330,9
2B3	132,2	203,4	3B3	841,9	420,5
2B4	86,8	98,1	3B4	171	236,7

Büyük hasar meydana gelen numuneler için ön yüzeyinde yüksek hasar olan numunelerin arka yüzeylerinde, arka yüzeyinde yüksek hasar olan numunelerin ise ön yüzeylerinde nispeten daha düşük hasar olduğu görülmektedir. Bu olguyu 3A3-3B3 numunelerinde ve 2A3-2A4 numunelerinde Şekil 4.45 ve Şekil 4.46 incelendiğinde açıkça görebilmekteyiz.

**Şekil 4.45** Ön yüzeyde oluşan hasarların grafiksel gösterimi



Şekil 4.46 Arka yüzeyde oluşan hasarların grafiksel gösterimi

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada CTP kompozit malzemenin keten elyaf ile hibritleştirilmesinin darbe davranışlarına etkileri araştırılmış ve değerlendirmelerin sonuçları aşağıdaki işlem maddelerinde açıklanmıştır.

- 1- Darbe hızının artması ile meydana gelen hasarın boyutu da artmıştır. Hasar alanlarının ortalamasına bakılacak olunursa 2 m/s hızında darbeye uğrayan numunelerde 100,8 mm², 3 m/s hızında darbeye uğrayan numunelerde ise 278,3 mm² fiziki hasar meydana gelmiştir.
- 2- Enerji grafiklerinden görüleceği üzere darbe hızındaki artışla birlikte darbe enerjisi dolayısıyla malzeme üzerinde yapılan iş de artmıştır. Bu iş ile birlikte oluşan deformasyondaki elastik kısım, vurucu kütleyi geri itmede kullanılmış, plastik kısım kalıcı deformasyona sebep olmuştur.
- 3- Darbe hasarları grafiklerden anlaşılabileceği üzere darbe yüklemesi esnasında küçük salınımlar olan matris çatlaması olarak kendini göstermiş, sonrasında grafiklerdeki büyük salınımlarda görülen delaminasyon ve elyaf kırılması ile devam etmiştir. Elyaf kırılmaları çekme gerilmesinin en yüksek olduğu numunenin arka yüzeyinde gerçekleşmiştir.
- 4- Darbe testine tabi tutulan numunelerin hiçbirinde nüfuziyet görülmemiştir.
- 5- Kuvvet-Zaman eğrilerindeki küçük salınımların matris çatlaması, büyük salınımların delaminasyon ve elyaf kırılması olduğu görülmüştür.
- 6- Darbe hızının artması ile malzemedeki ağır hasarların belirtisi olan ani kuvvet düşüşlerinin olduğu gözlemlenmiştir.
- 7- 2 m/s darbe hızında oluşan hasarlar genelde matris çatlağı olarak gelişirken, 3 m/s darbe hızında bu hasarlara ek delaminasyonlar ve elyaf kırılmaları gözlenmiştir.
- 8- B konfigürasyonlu numunelerin A konfigürasyonlu numunelere göre darbe davranışlarının daha iyi olduğu görülmüştür. Bunun sebebinin ise; elyaf diziliminin 0°/45°/90°/-45° olduğu B konfigürasyonlu numunelerde A konfigürasyonunda olmayan 45° açılı ara tabakaların delaminasyon ilerlemesini engellemesi olduğu değerlendirilmiştir.

- 9- 2 m/s darbe hızındaki testlerde tüm numunelerin maksimum temas kuvvetleri orantılı ve birbirine yakın değerler çıkarken, darbe hızının artması ile bu değer farklılaşmıştır.
- 10- A ve B dizilimindeki CTP numunelere en yakın darbe davranışları gösteren CKTP numuneler A4 ve B4 dizilimi numuneler olmuştur.
- 11- 2 m/s için yer değiştirme en düşük 7 mm ile 2B3, en yüksek 8,9 mm ile 2A numunesinde; 3 m/s için en düşük 10,55 mm ile 3A3, en yüksek 11,85 mm ile 3A numunesinde gerçekleşmiştir.
- 12- Toplam enerji 2 m/s darbe hızı için 11,2 J, 3 m/s darbe hızı için 25,2 J olmuştur.
- 13- 2 m/s darbe hızı için A konfigürasyonunda 2A4 numunesi 6,04 J ile en yüksek, 2A numunesi 5,24 J ile en düşük, B konfigürasyonunda 2B4 numunesi 5,81 J ile en yüksek, 2B numunesi 4,93 J ile en düşük enerjiyi absorbe etmişlerdir.
- 14- 3 m/s darbe hızı için A konfigürasyonunda 3A2 numunesi 16,49 J ile en yüksek, 3A numunesi 11,93 J ile en düşük, B konfigürasyonunda 3B3 numunesi 18,24 J ile en yüksek, 3B numunesi 6,01 J ile en düşük enerjiyi absorbe etmişlerdir.
- 15- Darbe hızı 3 m/s olduğu durumda yutulan enerjinin iade edilen enerjiden yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu değişikliğin malzemedeki delaminasyon ve elyaf kırılması gibi ağır hasarlardan kaynaklandığı değerlendirilmiştir.
- 16- 4 numaralı numunelerde oran olarak keten elyafın fazla bulunması bu malzemenin darbe davranışlarını kötü yönde etkilemiştir.
- 17- Keten elyafın Çizelge 3.1’de görüleceği üzere yoğunluğunun düşük olması dolayısı ile matris emiliminin fazla olmasından dolayı hibrit kompozitlerde fiber matris oranları CTP kompozite göre daha yüksek olmuştur. Bu durum darbe davranışını olumsuz etkilemiştir.
- 18- Delaminasyonlar elastiklik modülleri farklı olduğu için genellikle cam ve keten elyaf tabakaları arasında görülmüştür.
- 19- Genel olarak kompozite keten elyaf takviyesinin malzemenin tokluğunu artırdığı, fakat bu olgunun malzemede oluşan hasarın artmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.
- 20- Yapılan testlerde 2A2 numunesi 2A CTP kompozitin maksimum temas kuvveti bakımından %96,4’ ü kadar, 2B2 numunesi 2B CTP kompozitin maksimum temas kuvveti bakımından %95,9’ u kadar temas kuvvetine dayanmıştır. 2 numaralı numunelerde cam elyaf oranının ketene göre fazla

olması (%60-%40) ve yoğunluklarından dolayı oluşan matrise göre elyaf oranının da fazla olması, bu numuneleri CTP' e en yakın maksimum temas kuvvetine dayanabilmesine neden olmuştur.

21- Yapılan testlerde 3A4 numunesi 3A CTP kompozitin maksimum temas kuvveti bakımından %90,2' si kadar, 3B4 numunesi 3B CTP kompozitin maksimum temas kuvveti bakımından %79' u kadar temas kuvvetine dayanmıştır. 4 numaralı numunelerde cam elyaf oranının ketene göre fazla olması (%60-%40) ve yoğunluklarından dolayı oluşan matrise göre elyaf oranının da fazla olması, aynı zamanda cam elyafların numunenin orta bölümünde 4 tabaka halinde bulunması artan darbe hızına karşı davranışın daha iyi olmasını sağlamıştır.

22- CKTP kompozit malzeme 2 m/s darbe hızında yapılan testlerde CTP kompozitin maksimum temas kuvveti bakımından %95 mertebelerine, 3 m/s darbe hızında yapılan testlerde ise %90 mertebelerine kadar çıkmıştır. Bu oran gayet yüksek olup hibrit kompozitin 2A2, 2B2, 3A4, 3B4 gibi konfigürasyonlar ile, düşük hızlı darbelere maruz kalabilecek uygulamalarda kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

5.2. Öneriler

Keten elyafın matris emiliminin fazla olması mekanik özellikleri önemli derecede etkilediği için, üretim aşamasında matris oranını düşürecek tekniklerin uygulanması daha verimli olacaktır.

Darbe hızının artması ile malzeme özellikleri değişiklikler göstermiş olup, keten elyafın farklı uygulamalarda kullanımını belirlemek adına yüksek hızlı darbe testlerinin yapılmasının faydalı olacağı değerlendirilmiştir.

CKTP kompozite keten nanopartikül takviyesi ile testlerin yapılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Al-Hajaj, Z., Sy, B. L., Bougherara, H. ve Zdero, R., 2019, Impact properties of a new hybrid composite material made from woven carbon fibres plus flax fibres in an epoxy matrix, *Composite Structures*, 208, 346-356.
- Alemour, B., Badran, O. ve Hassan, M. R., 2019, A review of using conductive composite materials in solving lightening strike and ice accumulation problems in aviation, *Journal of Aerospace Technology and Management*, 11.
- Association, A. C. M., 2016, History Of Composites, <http://compositeslab.com>.
- Awais, H., Nawab, Y., Anjang, A., Akil, H. M. ve Abidin, M. S. Z., 2020, Effect of fabric architecture on the shear and impact properties of natural fibre reinforced composites, *Composites Part B: Engineering*, 108069.
- Barouni, A. K. ve Dhakal, H. N., 2019, Damage investigation and assessment due to low-velocity impact on flax/glass hybrid composite plates, *Composite Structures*, 226, 111224.
- Bensadoun, F., Depuydt, D., Baets, J., Verpoest, I. ve Van Vuure, A. W., 2017, Low velocity impact properties of flax composites, *Composite Structures*, 176, 933-944.
- Bozkurt, L., 2011, Hibrit Kompozit Levhaların Düşük Hızlı Darbe Davranışı, *Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya*.
- Callister Jr, W. D. ve Rethwisch, D. G., 2020, Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach, John Wiley & Sons, p.
- Carvalho, L. H. d., Canedo, E., Neto, S. F., de Lima, A. B. ve Silva, C., 2013, Moisture transport process in vegetable fiber composites: theory and analysis for technological applications, In: Industrial and technological applications of transport in porous materials, Eds: Springer, p. 37-62.
- Ceyhun, V. ve Turan, M., 2003, Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı, *Mühendis ve Makina*, 44 (516), 35-41.
- Darıcık, F. ve Çelebi, K., Karbon Lifi/Epoksi Tabakalı Kompozit Malzemelerin Farklı Ortam Şartlarındaki Mod I Kırılma Davranışı, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32 (1), 223-234.
- Demirci, M. T., 2015, SiO₂ nanopartikül katkısının yüzey çatlaklı ve çatlaksız bazalt elyaf takviyeli kompozit boruların yorulma davranışlarına etkisi.
- Doğan, M., 2015, Yünlü kumaşın fiziksel özellikleri üzerine yeni izolat Bacillus sp. suşundan elde edilen proteaz enziminin etkisinin araştırılması, *Uludağ Üniversitesi*.
- Gassan, J., Mildner, I. ve Bledzki, A., 1999, Influence of fiber structure modification on the mechanical properties of flax fiber-epoxy composites, *Mechanics of composite materials*, 35 (5), 435-440.
- Gurusamy, P., Bestall, L. C. ve Pandian, J. A., 2015, Experimental Investigation of Sisal, Coir and Sugarcane Fibre Reinforced Polymer Matrix Composites, *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, 7 (4), 169.
- Güneş, A., 2013, Üzerinde yüzey çatlağı bulunan hibrid tabakalanmış kompozit levhaların dinamik davranışlarının incelenmesi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Güneş, A. ve Şahin, Ö. S., 2020, Investigation of the effect of surface crack on low- velocity impact response in hybrid laminated composite plates, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42 (348), 348.
- İzci, R., 2015, Hibrit kompozit bir dişlinin tasarımı, üretimi ve analizi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Joshi, S. V., Drzal, L., Mohanty, A. ve Arora, S., 2004, Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?, *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 35 (3), 371-376.
- Kara, M., 2006, Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozitlerin dinamik cevabı, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Karsli, N. G. ve Aytac, A., 2014, Properties of alkali treated short flax fiber reinforced poly (lactic acid)/polycarbonate composites, *Fibers and polymers*, 15 (12), 2607-2612.
- Karthi, N., Kumaresan, K., Sathish, S., Gokulkumar, S., Prabhu, L. ve Vigneshkumar, N., 2020, An overview: Natural fiber reinforced hybrid composites, chemical treatments and application areas, *Materials Today: Proceedings*.
- Kashyap, S., Nath, D. ve Das, D., 2020, Characterization, weathering and modeling of natural fibre based composites, *Materials Today: Proceedings*.
- Kumar, S. S., 2020, Dataset on mechanical properties of natural fiber reinforced polyester composites for engineering applications, *Data in brief*, 28, 105054.

- Lefeuvre, A., Bourmaud, A., Morvan, C. ve Baley, C., 2014, Tensile properties of elementary fibres of flax and glass: Analysis of reproducibility and scattering, *Materials Letters*, 130, 289-291.
- Liang, S., Gning, P.-B. ve Guillaumat, L., 2012, A comparative study of fatigue behaviour of flax/epoxy and glass/epoxy composites, *Composites Science and Technology*, 72 (5), 535-543.
- Mahesh, V., Joladarashi, S. ve Kulkarni, S. M., 2020, Influence of laminate thickness and impactor shape on low velocity impact response of jute-epoxy composite: FE study, *Materials Today: Proceedings*.
- Marom, G., Fischer, S., R. Tuler, F. ve Wagner, D., 1978, Hybrid effects in composites: Conditions for positive or negative effects versus rule-of-mixtures behaviour, p.
- Mazumdar, S., 2001, Composites manufacturing: materials, product, and process engineering, CrC press, p.
- Metin, M., 2008, E-camı/epoksi tabakalı kompozitlerde düşük hızlı darbe hasarının burkulma özelliklerine etkisi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Nagaraj, C., Mishra, D. ve Reddy, J. D. P., 2020, Estimation of tensile properties of fabricated multi layered natural jute fiber reinforced E-glass composite material, *Materials Today: Proceedings*.
- Öztürk, M., 2007, Sic ilaveli alümina seramik kompozitler, *Sakarya Üniversitesi*.
- Pegoretti, A., Fabbri, E., Migliaresi, C. ve Pilati, F., 2004, Intraply and interply hybrid composites based on E- glass and poly (vinyl alcohol) woven fabrics: tensile and impact properties, *Polymer International*, 53 (9), 1290-1297.
- Pirmohammad, S., Shokorlou, Y. M. ve Amani, B., 2020, Influence of natural fibers (kenaf and goat wool) on mixed mode I/II fracture strength of asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 239, 117850.
- Pothan, L. A., George, C. N., John, M. J. ve Thomas, S., 2010, Dynamic Mechanical and Dielectric Behavior of Banana-Glass Hybrid Fiber Reinforced Polyester Composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29 (8), 1131-1145.
- Prabhakaran, S., Krishnaraj, V. ve Zitoune, R., 2014, Sound and vibration damping properties of flax fiber reinforced composites, *Procedia Engineering*, 97, 573-581.
- Prabhuram, T., Somurajan, V. ve Prabhakaran, S., 2010, Hybrid composite materials, 27-31.
- Rajesh, G., Nadh, B. H. ve Guduru, R. C. C., 2018, Evaluating Tensile Properties of Animal and Hybrid Fiber Reinforced Polyester Composites, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 012011.
- Rajpurohit, A., Singery, V., Joannès, S., Sanial, P. ve Laiarinandrasana, L., 2018, Manufacturing and performance of hybrid fabric reinforcements and their composites, *ECCM 18-18th European Conference on Composite Materials*, 8 p.
- Ramesh, M. ve Sudharsan, P., 2018, Experimental investigation of mechanical and morphological properties of flax-glass fiber reinforced hybrid composite using finite element analysis, *Silicon*, 10 (3), 747-757.
- Ramnath, B. V., Elanchezhian, C., Nirmal, P., Kumar, G. P., Kumar, V. S., Karthick, S., Rajesh, S. ve Suresh, K., 2014, Experimental investigation of mechanical behavior of jute-flax based glass fiber reinforced composite, *Fibers and polymers*, 15 (6), 1251-1262.
- Rodriguez-Castellanos, W. ve Rodrigue, D., 2016, Production and characterization of hybrid polymer composites based on natural fibers, *Composites from Renewable and Sustainable Materials; InTech: London, UK*, 273-302.
- Sarasini, F., Tirillò, J., D'Altilia, S., Valente, T., Santulli, C., Touchard, F., Chocinski-Arnault, L., Mellier, D., Lampani, L. ve Gaudenzi, P., 2016, Damage tolerance of carbon/flax hybrid composites subjected to low velocity impact, *Composites Part B: Engineering*, 91, 144-153.
- Sathishkumar, T., Naveen, J. a. ve Satheeshkumar, S., 2014, Hybrid fiber reinforced polymer composites—a review, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 33 (5), 454-471.
- Sparnins, E., 2009, Mechanical properties of flax fibers and their composites, *Luleå tekniska universitet*.
- şahin, y., 2015, Kompozit Malzemelere Giriş, Seçkin Yayıncılık, p.
- T P, S., Satheeshkumar, S. ve J, N., 2014, Hybrid fiber reinforced polymer composites - A review, p.
- Temel, E., 2015, Melez kompozit levhaların düşük hızlı darbe cevabına numune genişliğinin etkisinin incelenmesi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Topal, E., 2014, Kompozit delikli kare levhalarda iki yönlü yükleme altında mekanik burkulmalarının incelenmesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Tuncer, C., 2018, CACO₃, SiO₂ ve grafen nano partikül katkısının tabakalı cam elyaf kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Uzay, Ç., Acer, D. ve Geren, N., 2017, Impact Strength of Interply and Intraply Hybrid Laminates Based on Carbon-Aramid/Epoxy Composites, p.

- Wang, W., Zhang, X., Mo, Z., Chouw, N., Li, Z. ve Xu, Z.-D., 2020, A comparative study of impact behaviour between natural flax and glass FRP confined concrete composites, *Construction and Building Materials*, 241, 117997.
- Wu, Z., Wu, C., Liu, Y., Cheng, X. ve Hu, X., 2020, Experimental study on the low-velocity impact response of braided composite panel: Effect of stacking sequence, *Composite Structures*, 112691.
- Yalçın, E. B., 2012, Farklı kumaş ve farklı yöntemlerle üretilmiş CTP kompozitlerin balistik davranışlarının incelenmesi.
- Yan, L. ve Chouw, N., 2015, Effect of water, seawater and alkaline solution ageing on mechanical properties of flax fabric/epoxy composites used for civil engineering applications, *Construction and Building Materials*, 99, 118-127.
- Yıldızhan, H., 2008, Polimer matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi, *SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Yuhazri, M. Y., Amirhafizan, M. H., Abdullah, A., Sihombing, H., Nirmal, U., Saarah, A. B. ve Fadzol, O. M., 2016, The Effect of Lamina Intraply Hybrid Composites on the Tensile Properties of Various Weave Designs, *International Engineering Research and Innovation Symposium (Iris)*, 160.
- Yüce, İ., 2007, Dairesel kompozit tabakalarda düşük hızlı darbe hasarının incelenmesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Zhang, Y., Li, Y., Ma, H. ve Yu, T., 2013, Tensile and interfacial properties of unidirectional flax/glass fiber reinforced hybrid composites, *Composites Science and Technology*, 88, 172-177.

EKLER

EK-1 Doğal elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özellikleri

Hybrid fiber	Fiber length (mm)	Fiber content %	Resin	Chemical treatments	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (GPa)	Impact strength	Ref
Bamboo/ Glass		30	Polypropylene	Untreated	17.5	3	34	3.4	—	[39]
				MAPP	18.5	3.25	42	4.5		
PALF/ Glass		25	Polyester	Untreated	72	—	101.25	—	129	[7]
Sisal/ Glass		30	Polyester	Untreated	99	—	140	—	149	
				Alkali treatment (5%alkali solution)	130	—	150	—	169	
				Cyanoethylation	112	—	151.57	—	156	
				Acetylation	117	—	145	—	165	
Bamboo/ Glass		25	Unsaturated polyester	Untreated	—	—	—	—	32	[40]
Coir/ Glass		45	Unsaturated polyester	Untreated	—	—	—	—	40	
Jute/ Glass		14	Unsaturated polyester	Untreated	—	—	—	—	44	
Sisal/ Glass		8	Unsaturated polyester	Untreated	—	—	—	—	5.76	
Flax/ Glass		50	Polypropylene	Untreated	—	—	—	—	43.2	
Flax/ Glass		41	Soybean oil	Untreated	—	—	—	—	33.6	
Hemp / Glass		40	Polypropylene	Untreated	—	—	—	—	75	
Palmyra/Glass	30	41	Rooflite	Untreated	26.20	1.398	44.45	1.38	1.75	[49]
		49			35.04	1.168	49.15	2.05	3.73	
	40	54			39.83	1.405	56.25	2.62	3.83	
		32			26.05	1.395	26.64	1.55	1.77	
		36			28.96	1.379	43.02	1.67	2.45	
		42			31.04	1.498	51.85	2.43	3.76	
		48			35.91	1.596	54.80	2.45	5.46	
		54			39.30	1.433	56.24	2.60	5.43	
	50	31			26.30	1.315	39.85	1.34	1.76	
		37			32.03	1.312	45.67	1.85	3.58	
		42			32.58	1.106	55.15	2.18	4.29	
		47			38.15	1.526	56.12	2.69	5.10	
		55			42.65	1.515	59.19	3.54	6.05	
		63			33.25	1.277	—	—	—	
		71			24.82	1.356	—	—	—	
Sisal/Silk	10		Unsaturated polyester	Untreated	16.573	—	33.498	—	—	[8]
	20				18.948		46.184			
	30				17.548		34.024			
	10		NaOH treatment		20.866		50.452			
	20				23.605		54.737			
	30				21.311		53.811			

Hybrid fiber	Fiber length (mm)	Fiber content %	Resin	Chemical treatments	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (GPa)	Impact strength	Ref
Coir/Glass	20	100:0	Phenolic	Untreated	22.27	3.83	53.40	4.8	–	[47]
		2:1			34.63	8.46	109.58	8.3		
		1:1			50.69	8.52	128.63	7.7		
		1:2			71.58	8.54	179.21	8.6		
		0:100			100.4	10.42	220.70	11.50		
		100:0		Alkali-treatment	25.6	4.3	68.3	5.60		
		2:1			35.3	8.49	121.6	8.91		
		1:1			51.7	9.5	143.5	8.10		
		1:2			74.58	9.91	192.8	9.74		
		0:100			100.4	10.42	220.7	11.50		
Sisal/Glass		SF	GF	Untreated					(kJ/m ²)	[41]
		20			29.62	2.33	66.74	4.03	16.67	
		15			31.48	2.42	68.49	4.04	18.35	
		10			31.59	2.43	68.84	4.13	20.01	
		5-8								
Roystonea regia/Glass		RR	GF	Untreated					(J/m)	[51]
		20			28.86	2.386	39.84	3.845	124.23	
		15			31.98	2.416	40.12	3.982	151.26	
		10			33.43	2.522	46.44	3.996	158.43	
		05			34.42	2.644	48.66	4.011	168.46	
		0			36.42	2.888	52.18	4.126	169.33	
		10			–	37.419	–			
		–								
		20			15.624		43.744			
		30			12.924		39.692			
Coir/Silk		10	Unsaturated polyester	Alkali treatment	15.014		39.533			[50]
		20			17.24		45.067			
		30			16.144		42.018			
		50-60			25.3±0.26	2.62±0.09	–			
		40			28.3 ±0.59	2.90±0.05				
		–			37.9 ±0.76	3.31±0.02				
		35			68.55	–				
		–			62.99					
		30			176.20				18 (I)	
		–			229.54				10	
EFB:jute (4:1)		–	Epoxy	Untreated	200.00				12	[43]
		–								
		–								
		–								
		–								
EFB:jute (1:1)		–	Epoxy	Untreated						[44]
		–								
		–								
		–								
		–								
EFB:jute (1:4)		–	Epoxy	Untreated						[43]
		–								
		–								
		–								
		–								
Sisal /Glass		–	Epoxy	Untreated						[43]
		–								
		–								
		–								
		–								
Jute /Glass		–	Epoxy	Untreated						[43]
		–								
		–								
		–								
		–								
Glass/Sisal		–	Epoxy	Untreated						[43]
		–								
		–								
		–								
		–								
Glass/Jute		–	Epoxy	Untreated						[43]
		–								
		–								
		–								
		–								
Glass/Sisal/Jute		–	Epoxy	Untreated						[43]
		–								
		–								
		–								
		–								