

**DEĞİŞİK UÇ GEOMETRİLERİNE SAHİP FİBERLERLE
GÜÇLENDİRİLMİŞ POLYESTER KALSİT KOMPOZİT
MALZEMENİN DARBE DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Yelda KUTLAY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

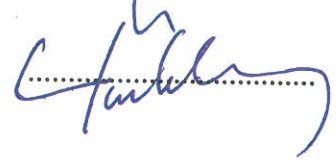
**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2012

ANKARA

Yelda KUTLAY tarafından hazırlanan “DEĞİŞİK UÇ GEOMETRİLERİNE SAHİP FİBERLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ POLYESTER KALSİT KOMPOZİT MALZEMENİN DARBE DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” adlı tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç.Dr. O. Selim TÜRKBAS
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

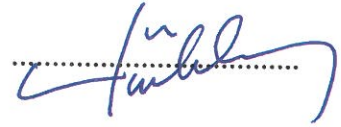


Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

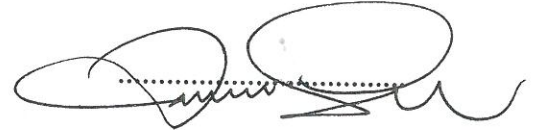
Prof. Dr. Mahmut ÖZBAY
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi



Yrd. Doç.Dr. O. Selim TÜRKBAS
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi



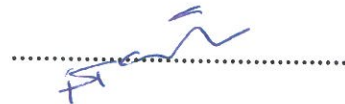
Prof. Dr. Faruk MENDİ
Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi



Tarih: 26 / 09 / 2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

YELDA KUTLAY



**DEĞİŞİK UÇ GEOMETRİLERİNE SAHİP FİBERLERLE
GÜÇLENDİRİLMİŞ POLYESTER KALSİT KOMPOZİT MALZEMENİN
DARBE DAVRANIŞININ İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Yelda KUTLAY

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Eylül 2012**

ÖZET

Bu çalışmada, yüksek ve düşük sıcaklıklarda kürlenmiş ve düşük enerjili darbeye maruz bırakılmış kompozit malzemede darbe sonucu oluşan mekanik değişim incelenmiştir. Kompozit malzeme, değişik uç şekillerine sahip çelik fiberlerle güçlendirilmiş polyester kalsit malzemeden üretilmiştir. Burada kullanılan fiberin malzemesi, şekli ve hacim oranı kompozitin mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Değişik geometrilere sahip fiberlerle güçlendirilmiş kompozit numuneler 40°C, 80°C ve 120°C sıcaklıklarda fırınlanmışlardır. Tüm numuneler ağırlık düşürme test cihazıyla düşük enerjili darbeye tabi tutulmuşlardır. Elde edilen sonuçlar grafikler halinde verilmiştir.

Bilim Kodu :914.1.092

Anahtar Kelimeler :Değişik uç şekilli fiberler, düşük hızlı darbe, polyester kalsit

Sayfa Adedi :99

Tez yöneticisi :Yrd. Doç Dr. O. Selim Türkbaş

**INVESTIGATION OF IMPACT BEHAVIOUR OF POLYESTER CALCITE
REINFORCED WITH VARIOUS END SHAPED FIBERS TO LOW ENERGY
IMPACT
(M.Sc. Thesis)**

Yelda KUTLAY

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
September 2012**

ABSTRACT

In this study, composites which in low and high temperatures cured and exposed to a low energy shock as a result of mechanical change were investigated. Composite material are made of polyester calcite reinforced with various end shaped steel fibers. Fiber's material, shape and volume ratio greatly affects the mechanical properties of the composite. Polyester calcite composite samples reinforced with various fibers are cured 40°C, 80°C and 120°C degrees. All samples were subjected to weight drop impact tester with low enegy. The results obtained are given the form of graphics.

Science Code :914.1.092

Key Words :various end shaped fibers, low velocity impact, polyester calcite

Number :99

Adviser :Yrd. Doç Dr. O. Selim Türkbaş

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince beni yönlendiren, değerli yardımlarını benden esirgemeyen ve bana her konuda destek olan tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Selim TÜRKBAS’a, kıymetli tecrübelerinden yararlandığım Prof. Dr. Süleyman YALÇIN’a ve darbe test uygulaması sırasında yol gösteren ve desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Necati ÖZKAN’a şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca sabır ve özveriyle bana destek olan arkadaşlarıma, sevgili eşim Jehat KUTLAY’a ve oğlum Arjin KUTLAY’a sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiii
RESİMLER LİSTESİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	8
3.1. Kompozit Malzemelerin Tanımı.....	8
3.2. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları	10
3.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	12
3.3.1. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler.....	13
3.3.2. Parçacıklarla takviye edilmiş kompozit malzemeler.....	14
3.4. Takviye Elemanları.....	14
3.4.1. Cam elyaf.....	16
3.4.2. Karbon elyaflar.....	17
3.4.3. Bor elyaflar.....	18
3.4.4. Seramik elyaflar.....	19
3.4.5. Aramid elyaflar.....	19

	Sayfa
3.4.6. Metalik cam elyaflar	19
3.5.Matriks elemanları	20
3.5.1. Metal matriksler ve alaşımları	20
3.5.2. Plastik matriksler	21
3.5.3. Seramikler	26
3.6. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	27
3.6.1. Termoset matriksli kompozitlerin üretimi	29
4. TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELER VE MEKANİK DAVRANIŞLARI	33
4.1. Tabakalı Kompozit Malzemeler	33
4.2. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışı	33
4.2.1. Anizotropik malzemeler için gerilme-şekil değiştirme bağıntıları	33
4.2.2. Ortotropik malzemelerde düzlem gerilme bağıntıları	39
5. DARBE TESTLERİ	43
5.1. Darbe Testlerinin Sınıflandırılması	43
5.2. Darbe Hasarına Etki Eden Parametreler	47
5.3. Malzemelerde Darbe Sonucu Oluşan Hasar Türleri	48
5.3.1. Matriks kırılması	48
5.3.2. Delaminasyon(tabakalar arası ayrılma)	49
5.3.3. Fiber kırılması	49
5.3.4. Nüfuziyet	49
6. DENEYSELÇALIŞMALAR	51
6.1. Test Numunesi, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	51
6.1.1. Fiber malzemesi	51

	Sayfa
6.1.2.Matriks malzemesi.....	51
6.1.3. Hızlandırıcı.....	52
6.1.4. Sertleştirici.....	52
6.2. Malzemelerin Döküldüğü Kalıplar.....	52
6.3. Laboratuar Şartları.....	52
6.4. Darbe Deneyi Numunelerinin Üretilmesi.....	53
6.4.1. Fiberlerin imalatı.....	53
6.4.2. Matriks karışımının hazırlanması.....	53
6.4.3. Döküm yapılması ve numunelerin kalıptan çıkarılması.....	54
6.5. Numunelerin fırınlanması.....	54
6.5.1. Tav fırını özellikleri.....	54
6.5.2. Fırınlama sıcaklıkları ve süreleri.....	54
6.6. Ağırlık Düşürme Testi.....	54
6.6.1. Test cihazının özellikleri.....	54
6.6.2. Testin yapılması.....	68
6.7. Sertlik Ölçme Testi.....	73
6.7.1. Sertlik kavramı ve tanımı.....	73
6.7.2. Sertlik ölçme yöntemleri.....	73
7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	78
7.1. Deneysel Sonuçlar.....	78
7.1.1. Ağırlık düşürme deneyi testi sonuçları.....	78
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	93

Sayfa

KAYNAKLAR.....	96
ÖZGEÇMİŞ.....	99

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Farklı derinliklerdeki fiberlerin ayrılma noktasındaki maksimum yükler.....	5
Çizelge 3.1. Takviye amaçlı kullanılan bazı liflerin ve metallerin çekme modülü ve çekme dayanımları	9
Çizelge 3.2. Seramik elyaf mekanik ve fiziksel özellikleri.....	16
Çizelge 3.3. Cam türleri ve özellikleri.....	16
Çizelge 3.4. Termoset ve termoplastiklerin maksimum sıcaklık değerleri.....	22
Çizelge 3.5. Termoplastiklerin bazı tipik özellikleri.....	24
Çizelge 3.6. Bazı termoset plastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri.....	25
Çizelge 3.7. Seramiklerin tipik özellikleri.....	27
Çizelge 4.1. Love notasyonu.....	34
Çizelge 6.1. Test numunelerinin özellikleri.....	72
Çizelge 6.2. Numunelerin Rockwell HRF sertlik ölçüm sonuçları.....	76
Çizelge 7.1. 40°C’de fırınlanmış 00 tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler.....	80
Çizelge 7.2. 40°C’de fırınlanmış U tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler.....	81
Çizelge 7.3. 40°C’de fırınlanmış Z tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler.....	82
Çizelge 7.4. 40°C’de fırınlanmış numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler.....	83
Çizelge 7.5. 80°C’de fırınlanmış Z tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler.....	84
Çizelge 7.6. 80°C’de fırınlanmış U tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler.....	85

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7.7. 80°C’de fırınlanmış 00 tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler.....	86
Çizelge 7.8. 80°C’de fırınlanmış numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler.....	87
Çizelge 7.9. 120°C’de fırınlanmış U tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler.....	88
Çizelge 7.10. 120°C’de fırınlanmış 00 tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler.....	89
Çizelge 7.11. 120°C’de fırınlanmış Z tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler.....	90
Çizelge 7.12. 120°C’de fırınlanmış numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler.....	91
Çizelge 7.13. Tüm numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler.....	91

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Kompozit malzemenin temel şekli.....	8
Şekil 3.2. Sürekli fiber ve kısa fiber kompozitler	13
Şekil 3.3. Elyaf dokuma türleri.....	15
Şekil 3.4. Kalıplama işlemlerinin basamakları.....	28
Şekil 3.5. Kompozit malzemelerin üretim yöntemlerinin sınıflandırılması.....	29
Şekil 3.6. Hazır kalıplama düzeneği.....	31
Şekil 5.1. Ağırlık düşürme test düzeneği.....	45
Şekil 5.2. Çentik darbe test düzeneği.....	46
Şekil 5.3. Balistik test düzeneği.....	47
Şekil 5.4. (a)Kayma gerilmelerinin ve (b)çeki gerilmelerinin neden olduğu matriks kırıkları.....	48
Şekil 5.5. (a) Kalın ve (b) ince plakalar için matriks kırığı hasarının ilerlemesi.....	48
Şekil 6.1. 30 mm kesilmiş fiberlerin şekilleri.....	51
Şekil 6.2. Kalıp şekli.....	52
Şekil 6.3. 9250 HV Düşürme kulesi.....	59
Şekil 6.4. Impulse data toplama sistemi.....	67
Şekil 6.5. Darbe uygulama noktası.....	70
Şekil 7.1. 40°C’de fırınlanmış 00 tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen kuvvet-enerji-zaman grafiği.....	79
Şekil 7.2. 40°C’de fırınlanmış U tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen kuvvet-enerji-zaman grafiği.....	81
Şekil 7.3. 40°C’de fırınlanmış Z tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen kuvvet-enerji-zaman grafiği.....	82

Şekil	Sayfa
Şekil 7.4. 80°C’de fırınlanmış Z tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen kuvvet-enerji-zaman grafiği.....	84
Şekil 7.5. 80°C’de fırınlanmış U tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen kuvvet-enerji-zaman grafiği.....	85
Şekil 7.6. 80°C’de fırınlanmış 00 tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen kuvvet-enerji-zaman grafiği.....	86
Şekil 7.7. 120°C’de fırınlanmış U tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen kuvvet-enerji-zaman grafiği.....	88
Şekil 7.8. 120°C’de fırınlanmış 00 tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen kuvvet-enerji-zaman grafiği.....	89
Şekil 7.9. 120°C’de fırınlanmış Z tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen kuvvet-enerji-zaman grafiği.....	90

RESİMLER LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Cam elyaf.....	17
Resim 3.2. Karbon elyaf.....	18
Resim 6.1. Fiberlerin kalıplara dökülen matriks üzerine dizilimi.....	53
Resim 6.2. Ağırlık düşürme test cihazı.....	55
Resim 6.3. Ağırlık düşürme deney düzeneği ekipmanları.....	58
Resim 6.4. Kafa düzeneği.....	60
Resim 6.5. Hız detektörü.....	61
Resim 6.6. Geri sıçrama fren sistemi.....	62
Resim 6.7. Test fikstürü.....	63
Resim 6.8. Farklı darbe uçları.....	64
Resim 6.9. Environmental chamber.....	65
Resim 6.10. Kontrol paneli.....	66
Resim 6.11. Data kontrolör gösterimi.....	67
Resim 6.12. Darbe vurucu uç.....	68
Resim 6.13. Pnömatik test fikstürü.....	68
Resim 6.14. Numunenin fikstüre yerleşimi.....	69
Resim 6.15. Oda sıcaklığında darbe uygulanmış numuneler.....	71
Resim 6.16. Rockwell sertlik ölçüm cihazı.....	74
Resim 6.17. Malzeme cinsine göre kullanılan uç çeşitleri.....	75

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A_{ij}	Uzama rijitliği
dak.	Dakika (zaman birimi)
E	Elastisite modülü
G	Kayma modülü
σ	Normal gerilme(MPa, N/mm ²)
ε	Şekil değiştirme
ν	Poisson oranı
γ	Kayma şekil değiştirme
τ	Kayma gerilmesi
00	 tipi kesilip hazırlanmış fiber
J	Joule (enerji birimi)
mm	Milimetre (uzunluk birimi)
mm²	Milimetre kare (alan birimi)
Mpa	Mega paskal (gerilme birimi)
N	Newton (kuvvet birimi)
Q_{ij}	Rijitlik dönüşümü
S	Kayma gerilmesi
S_{ij}	Uygunluk matrisi
t	Sıcaklık, ° C
u	x-ekseni yönündeki şekil değiştirme alanı
U	U tipi kesilip hazırlanmış fiber
w	z- eksen yönündeki şekil değiştirme alanı
v	y-ekseni yönündeki şekil değiştirme alanı
Z	Z Tipi kesilip hazırlanmış fiber

Kısaltmalar	Açıklama
BMC	Bulk Moulding Composites
BSS	Bone Shaped Short Fiber (kemik uç sekilli fiber)
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastic
CSS	Conventionel Straight Short Fiber (bilinen kısa düz fiber)
DCB	Double Cantilever Beam Test (çift taraflı açma deneyi)
E_{absorbe ort.}	Numunelerde penetrasyon durumu için oluşan max enerji ortalaması
F_{max ort.}	Numunelerde penetrasyon durumu için oluşan max kuvvet ortalaması
PULL-OUT	Fiberlerin matriks yapı içerisinde kırılmadan ayrılması(sıyrılma)
PVA	Polivinil Alkol
RTM	Reçine Transfer Kalıplama
SMC	Sheet Moulding Composites
t_{total ort.}	Numunelerde penetrasyon durumu için oluşan max zaman ortalaması

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji beraberinde sanayinin ana girdisi olan malzeme yapısındaki değişiklikleri kaçınılmaz kılmıştır. Bu yönde malzeme bilimi de hızla gelişmiş ve gelişmeye devam etmektedir. Ancak bu gelişim, yeryüzünde bulunan mevcut malzemelerin sınırlı olmasından dolayı teknolojik gelişimin gerisinde kalmıştır. Böylece bilim adamları günümüzün şartlarına uyacak şekilde malzeme üretme yoluna gitmişler ve sonuç olarak kompozit malzemeler ortaya çıkmıştır. Yüksek dayanım, elektrik iletkenliği, hafiflik vs. gibi özelliklerinin yanı sıra imalat kolaylığı ve genel anlamda maliyetlerinin düşük olması kompozit malzemelere olan ilgiyi arttırmıştır [14].

Metalik malzemelerle karşılaştırıldığında kompozit malzemeler düşük yoğunluklu ve yüksek mukavemetli olmaları sebebiyle özellikle hafifliğin istendiği havacılık sanayi, otomotiv sanayi, savunma sanayi ve uzay sanayinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu özellikleri kompozit malzemelerin yüksek performansa ihtiyaç duyulan yapısal parçalarda tercih edilmelerinin en önemli sebebidir [28].

1930'lu yıllarda bilimsel anlamda kabul gören polimerler; metallerle kıyaslandığında düşük yoğunlukta, kolay şekillendirilebilen, üstün yüzey kalitesine sahip ve korozyona dayanıklı olmaları gibi üstün özelliklerinin yanı sıra, düşük dayanıma sahip sert malzemelerdir. Bu sebeple bazı uygulamalar için elverişli değildir. Polimerlerin bu olumsuz yönlerini iyileştirilmek ve uygulama alanlarının genişletilmek için 1950'lerin başlarında polimer esaslı kompozit malzemelerin üretimine başlanmıştır. Polimer kompozit malzemeler yüksek mukavemet, boyut ve termal kararlılık, hafiflik, sertlik, aşınmaya karşı dayanıklılık vs. özellikleriyle pek çok avantajlar sunarlar ve dolayısıyla bu avantajlar polimer kompozitin üretim maliyetinin düşürülmesine önemli katkı sağlar. Günümüzde yaygın olarak uçak, roket, füze gövdeleri, spor malzemeleri, yapay kemik, helikopter motorları gibi yüksek maliyetin öncelikli olmadığı alanların yanı sıra otomotiv sanayi, beyaz eşya ve deniz araçlarının gövde bölümleri gibi geniş bir alanda yaygın olarak işlev görmektedirler [23].

Hafif, mekanik ve ısı dayanımları yüksek olan polimer malzemelerle ilgili yapılan çalışmaların, uçak ve uzay sanayindeki gereksinim ve gelişmeler sonucunda hız kazandığı bilinmektedir [23].

Kısa elyaflarla güçlendirilmiş polimer esaslı kompozit malzemeler denizcilik, otomotiv, inşaat sektörleri ile savunma sanayinde de metallere nazaran hafif olmaları, korozyona dirençleri nedeniyle hızla yaygın uygulama alanları bulmaktadır. Özellikle roket ve füze sistemlerinde yüksek sıcaklığa maruz kalan kısımlarda kısa elyaf takviyeli kompozitler kullanılmaktadır [23].

Yapılan çalışmaların pek çoğunda istenen özelliklerin sağlanabilmesinden dolayı kompozit kullanımı yaygındır. Ancak bazı nedenlerden metallerin yerini tam anlamıyla alamamaktadırlar:

- Titanyum ve çelik gibi metallerin bazı durumlarda istenen kritik seviyede ısı ve mekanik özelliklerini bilinen kompozitler sağlayamamaktadır.
- Geliştirilme aşamasında olan matriks ve elyafların karakteristik özellikleri metaller kadar bilinmemektedir.
- Üretim maliyetleri açısından kıyaslandığında kompozitler alüminyum gibi metallere göre daha pahalıdır [28].

Çalışmamızda değişik uç geometrilerine sahip süreksiz fiberlerle oluşturulmuş polyster kalsit malzeme kullanılacaktır. Bu tip kompozit malzemelerin literatür araştırmasına göre darbe testlerinin yapılmadığı görülmüş olup bu çalışmanın amacı ise uygulanacak darbe deneyi sonucu malzemenin mekanik davranışlarını incelemektir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çeşitli kompozit malzemelere uygulanmış darbe, eğme ve çekme deneyleri ile ilgili yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Bunların bazılarına değinecek olursak:

Taşkıran yaptığı çalışmada, karbon prepreg tabakalı kompozit plakaların termal davranışlarını incelemiştir. 8, 10 ve 16 tabakalı kompozit plakalar üzerine -40°C , -25°C , 25°C (oda sıcaklığı), 40°C , 60°C sıcaklıklarda sırayla 14,5J, 10J ve 7J enerji uygulanarak darbe deneyleri yapılmış, bunun sonucunda meydana gelen hasar alanlarını, hasar mekanizmalarını ve burkulma yüklerini incelemiştir. Yapılan deneyler neticesinde sıcaklığın artmasıyla temas kuvvetinin ve tabakalardaki katılığın azaldığını, eğilme ve yer değiştirmenin arttığını tespit etmiştir. Farklı sıcaklıkta darbe uygulanmış numunelerdeki darbe hasar alanları sıcaklığın artmasıyla artmıştır. Yüksek sıcaklıklarda darbe uygulanmış levhaların burkulma mukavemetleri oda sıcaklığında darbe uygulanmış levhalara nazaran fiber dizilişine ve hasar biçimine bakılmaksızın azalırken, düşük sıcaklıklarda darbeye maruz kalmış levhalarda artış göstermiştir [28].

Demircioğlu yaptığı çalışmada, kısa cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemelerde elyaf boyutunun etkisini incelemiştir. Eğilme testine tabi tutulan farklı elyaf boyutlu numunelerde; elyaf boyu 3mm olan kompozitte eğilme dayanımı 72 MPa iken elyaf boyu 6 mm olan kompozitte eğilme dayanımı 124 MPa bulunmuştur. Eğilme dayanımı değerleri artan cam elyaf boyunun ile artış göstermiştir. Takviyesiz epoksi/sertleştirici karışımından oluşan numunelerde çekme dayanımı ortalama 55 MPa bulunmuştur. Bu değer cam elyaf ilavesiyle geliştirilemediği gözlenmiştir. Ancak yine aynı şekilde 3 mm ve 6 mm elyaf boyları kullanılan numuneler çekme dayanımı yönünden kıyaslandığında, 6 mm elyaf takviyeli kompozitin dayanımının bir miktar daha yüksek olduğu bulunmuştur ve cam elyaf boyu artışı çekme dayanımını olumlu yönde etkileyerek arttırmıştır denebilir [23].

Bagwell ve Wetherhold yaptıkları çalışmada, değişik uç geometrilerine sahip fiberlerle oluşturulmuş epoksi kompozit malzemelerin dayanımlarını incelemişlerdir. Onlar fiber geometrisinin ve gömme derinliğinin ayrılma enerjisi üzerinde etkisi olduğunu göstermişlerdir. Düşük sünekliğe sahip bakır fiberler, büzülme miktarı az olan epoksi matriks içinde kullanılmıştır. Tamamıyla asimetrik olarak gömülmüş fiberler, yine asimetrik olarak hafifçe gömülmüş fiberlerle kıyaslanmışlardır. Bakır fiber kullanılmasının sebebi, bakırın yüksek sünekliğe ve şekillendirilme özelliğine sahip olmasından dolayıdır. Tamamıyla gömülmüş fiberlerin uç noktalarının performansı daha düşük gömme derinliğindeki hafifçe gömülmüş fiberlerden daha iyidir. Hafifçe gömülmüş fiberler tüm derinlik testlerinde matriks ayrılabilir. Tamamıyla gömülmüş fiberler ise daha derin gömme derinliklerinde ayrılma gösterir [4].

Hosur, Jeelani ve Karim yaptıkları çalışmada, VARIM prosesi kullanılarak üretilmiş S2 cam/epoksi dikişli/dikişsiz kompozitlerin darbe sonucu davranışlarını incelemişlerdir. Kullanılan test numuneleri 100 mm X 100 mm boyutlarındadır. Kullanılan vurucu ucun ağırlığı tekli darbelerde 14,91 kg, çoklu darbelerde 7,75 kg ağırlığındadır. Enerji değerleri ise tekli darbelerde 10 J - 80 J, çoklu darbelerde 10 J- 50 J arasında değiştirilmiştir. Çoklu darbelerde 30 J enerji seviyesine kadar tüm numunelere 40 defa vurulmuştur ve 40 J ve 50 J enerji seviyelerinde vuruş sayısı 9'a indirilmiştir. Bu vuruşlar neticesinde kuvvet-zaman, hız-zaman ve yer değiştirme-zaman grafikleri elde edilmiştir. Bunun yanı sıra yapılan çalışmada, yutulan enerji, hasar alanı ve maksimum kuvvet olarak tanımlanmıştır. Yutulan enerji ise toplam enerjiden (numune tarafından absorbe edilen) maksimum kuvvetteki enerji değeri çıkarılarak hesap edilmiştir. Tekrarlı darbelerde 40 J ve 50 J enerjilerde 25,4 mm dikişli olanların, 12,7 mm dikişli olanlara göre darbeye karşı daha dayanıklı oldukları görülmüştür. Yutulan enerji, çarpma sayısı ile benzer davranış göstermiştir. Hasar alanı, çarpma sayısının artmasıyla artmıştır. Fakat belli bir çarpmadan sonra da artış devam etmemiştir [32].

Zhu, Beyerlein ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, düz kısa fiberler(CSS) ve kemik şekilli kısa fiberlerle(BSS) güçlendirilmiş kompozitleri karşılaştırmış ve deneysel

olarak kemik şekilli fiberlerin(BSS) malzeme dayanımını arttırdığını göstermişlerdir. Düz kısa fiberler(CSS) ve kemik şekilli kısa fiberlerle(BSS) güçlendirilmiş kompozit malzeme numuneleri 3,5 mm, 6,5 mm ve 9,5 mm gömme derinliklerinde DCB(double cantilever beam) testine tabi tutulmuşlardır. Gömme derinlikleri kompozit içindeki kısa fiberlerin uzunluklarının yarısına eşittir. Serbest uzunluk 20 mm'dir ve tüm durumlar aynıdır. Bu derinlikte ise fiberler kırılmamış, fakat tamamıyla matriksten ayrılmışlardır. Verilen derinliklerde fiberlerin ayrılması noktasında maksimum yükler tabloda gösterildiği gibidir.

Çizelge 2.1. Farklı derinliklerdeki fiberlerin ayrılma noktasındaki maksimum yükler [1]

	L=3.5 mm		L=6.5 mm		L=9.5 mm	
	BSS	CSS	BSS	CSS	BSS	CSS
<i>F max N</i>	8,31	0,87	9,47	2,23	10,09	4,58
<i>F max(BSS) / F max(CSS)</i>	9,55		4,25		2,2	

Sonuçlar incelendiğinde kemik şekilli fiberlerin(BSS) düz kısa fiberlerle (CSS) karşılaştırıldığında matriksten ayrılmaya karşı daha dirençli oldukları görülmektedir. Ayrıca yine BSS fiberler DCB (double cantilever beam) testinde kırılma meydana gelene kadar daha kararlı davranırlar. Sonuç olarak %5 hacim oranında ve 4,5 mm fiber boyunda kompozit malzemeler kullanıldığında BSS fiber kompozitlerin kırılması için CSS fiber kompozitlerden 3 kat daha fazla kırılma enerjine gerek duyulmaktadır. En düşük gömülme derinliğinde L=3,5 mm 'de (fiber boyu 7 mm olduğunda) BSS fiber kompozitler CSS kompozitlere göre çok daha büyük bir direnç gösterirler ve yapının dayanımını etkili şekilde arttırmış olurlar [1].

Jiang,Valdez, Zhu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, kemik şekilli kısa çelik fiberler(BSS) ve düz kısa çelik fiberlerle(CSS) güçlendirilmiş kompozitleri deneysel olarak kıyaslamışlardır. Deney için güçlendirilmiş kompozit numuneler 240 mm x 38 mm x 25 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Kullanılan çelik fiberlerin

akma dayanımı 260 MPa'dır. Fiber çapı 0,84mm ve uzunluğu 25 mm'dir. Kemik şekilli fiberlerin elde edilmesi için öncelikle çelik çubuklar 28 mm uzunluğunda kesilir. Daha sonra her iki ucu alev yardımıyla eritilir. Eriyen uç kısım top şeklini alır, bu uçların çapı da yaklaşık 1,6 mm civarındadır. Numune toplamda 4 tabakadan oluşmaktadır. Fiberlerin 25 mm kalınlığındaki numune içinde düzgün bir şekilde yerleştirilmesi ve dağılımı sağlanmıştır. Kemik şekilli fiberlerin (BSS) ve düz kısa fiberlerin (CSS) fiber-matriks oranı sırasıyla %1 ve %0,86 'dır. Farklı karışım oranı sebebi BSS fiberlerin uçlarının uzamasından kaynaklanmaktadır. Numunelere kütleme işlemi 4 nokta eğme testine maruz kalmadan önce 20 boyunca sızdırmaz plastik kapta ve daha sonra 15 gün hava ortamında uygulanmıştır. Test sonuçları incelendiğinde üç önemli karakteristik belirlenmiştir. Bunlar ilk kırılma noktası, maksimum yük ve dayanımdır. Fiber ilavesi olmayan numunede maksimum yük 965N ve yer değiştirme 0,19 mm 'dir. İlk kırılma başladıktan sonra hızlı bir şekilde yayılmış; sonuç olarak 0,08 J'lük enerji kırılmaya sebep olmuştur. CSS ile güçlendirilmiş kompozit numunede maksimum yük 1280N olup fiber ilavesi olmayan numuneye göre %32 artış söz konusudur. Yani %0,86 düz kısa fiber ilavesi ilk kırılma noktasında maksimum yükün artmasını sağlamıştır. CSS ile güçlendirilmiş kompozit numune dayanımı ise 2,11 J'dür. BSS ile güçlendirilmiş kompozit numune değerleri incelendiğinde kırılma 1500N yük altında başlamıştır. Bu da fiber ilavesi olmayan numuneyle kıyaslandığında yaklaşık %55 artış olduğunu göstermektedir. BSS fiberlerde kırılma başladıktan sonra kırılma hızla ilerlemez. Son numunemizde kırılma 1500N 'da başlamış ve yük 1780N'a ulaşana kadar devam etmiştir. Numunenin yer değiştirmesi 4,3 mm olmuştur. Bu seviyeden sonra kırılma tamamıyla gerçekleşmiştir. BSS ile güçlendirilmiş kompozit numune dayanımı 7,62 J'dür. DeneySEL sonuçlar göz önüne alındığında BSS ile güçlendirilmiş kompozit numunenin en yüksek dayanıma sahip olduğu, kırılmanın başlamasından sonra ayrılmanın hemen gerçekleşmediği ve yük artışına rağmen belli bir seviyeye kadar malzeme yapısının korunduğu açıkça görülmüştür [5].

Fidan, Bora ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, düşük hızlı darbe yüklemeleri sonrası (0/90)_s oryantasyonlu cam fiber takviyeli polyester matriksli kompozitlerde ortaya çıkan hasar hacmini incelemişlerdir. Darbe enerjisine maruz kalan kompozitin

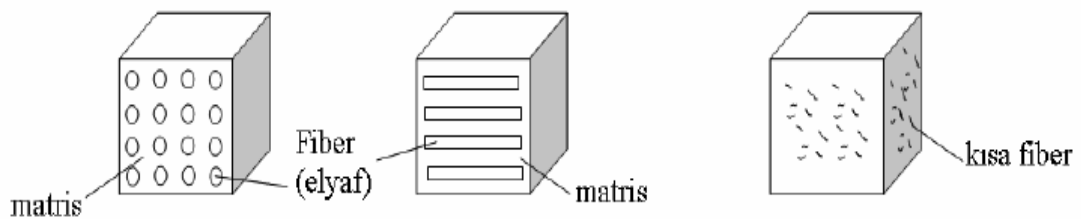
içyapısında ortaya çıkan hasar mekanizmasını gözlemlemiş, darbe sonucu oluşan hasar konisi hacmi arasında bağıntı kurmuş ve grafiksel olarak irdelemişlerdir. Kompozit numunenin darbe uygulanan yüzeyindeki hasar alanlarını hesaplamış, hasar konisi içinde fiber kırılması ve tabakalar arası ayrılma(delaminasyon) gibi hasar mekanizmalarının ortaya çıktığını gözlemlemişlerdir. Gerçekleştirdikleri ön testler ile kompozit numunenin tam penetrasyona uğradığı enerji eşik değerini 74 J olarak saptamışlardır. Ayrıca numunede oluşan ilk hasarın yani matriks çatlamasının 4 J enerji seviyelerinde oluştuğunu görmüşlerdir. Hasar mekanizmalarının belirlenmesi için uyguladıkları darbe enerjilerini kademeli olarak arttırmışlar, son olarak darbe enerjisinin 74 J'a çıkartılmasıyla darbe ucunun lokal olarak yüksek gerilme ve delme etkisi yaratması nedeniyle fiber kırılmalarının meydana geldiğini gözlemlemişler ve delaminasyon hasarının ana hasar mekanizması olduğunu belirlemişlerdir [24].

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Kompozit Malzemelerin Tanımı

Kompozit malzeme, kullanılacağı yere göre tek başına yeterli olmayan farklı özelliklere sahip iki ya da daha fazla malzemenin istenen amaca uygun olarak belirli şartlar altında ve belirli oranlarda fiziksel olarak birleştirilmesiyle meydana getirilen yeni özelliklere sahip malzeme şeklinde tanımlanır [16].

Her kompozit malzeme yapısında matriks ve elyaf malzeme çifti bulunur. Bu iki malzeme birbirinden farklı özelliklere sahiptir ve oluşturulan kompozit malzeme ise ikisinden de farklı özellikler gösterir. Kompozit malzemelerde çekirdek olarak kullanılan bir elyaf malzeme ve elyafın çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu meydana getiren bir matriks malzeme bulunur (Şekil 3.1.). Bu iki malzemeden elyaf malzeme kompozitin mukavemet ve yük taşıma özelliğini, matriks malzeme plastik deformasyona geçiş aşamasında çatlak ilerlemelerini engelleyici bir görev üstlenmekte ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Matriks malzemenin başka bir görevi de elyaf malzemeleri yük altında tutarak yükün elyaflar arasında homojen olarak dağılmasını sağlamaktır. Sonuç olarak elyaf malzemelerde plastik deformasyon meydana geldiğinde oluşabilecek çatlakların yayılması engellenmiş olur [16]. Kompozit malzemelerde elyaf yapısı yüksek mukavemete sahiptir, matriksin dayanımı ise elyaflara göre zayıftır ve matriksin asıl görevi elyafların bir arada tutulmasını sağlayarak üretilen parçanın şeklinin verilmesidir.



Şekil 3.1. Kompozit malzemenin temel şekli

Kompozit malzemelerde kullanılan liflere örnek vermek gerekirse dokuma, doğal lif, polyamit, polyester, karbon, cam, aramid, bor, polietilen vs. Aşağıdaki çizelgede sıklıkla kullanılan liflerin mekanik özelliklerinden bazıları verilmiştir. Belirtilen lifler içerisinde genel amaçlı ticari kompozitlerde en çok kullanılan cam lifler, ileri kompozit malzemelerde ise karbon ve aramid liflerdir [18].

Çizelge 3.1. Takviye amaçlı kullanılan bazı liflerin ve metallerin Çekme modülü ve Çekme Dayanımları[18].

Lif veya Metal	Çekme Dayanımı (Mpa)	Çekme Modülü(Gpa)
Karbon lifi	2000-3500	325-440
Aramid lifi	310-3600	60
E-camı lifi	2400	70
S-camı lifi	3450	85
Alüminyum	130-180	72
Titanyum	250-400	105
Paslanmaz Çelik	206-520	196

Günümüzde elyaflar ince çaplı üretilmektedir. Bu sayede büyük kütsel yapılara oranla yapısal hata olasılıkları en aza indirilmiştir ve üstün mekanik özellikler gösterirler. Ayrıca elyafların bazı özelliklerde üretilmesiyle yüksek performanslı malzeme olmaları aşağıda belirtilen özelliklere bağlıdır:

- Mekanik özelliklerin üstün oluşu, küçük tane boyutu, küçük çapta üretim.
- Boy/çap oranının artmasıyla matriksin elyaflara ilettiği yükün artması.
- Elastisite modülünün yüksek olması.

Matriks malzeme içerisine mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için kimyasallar ve katkı maddeleri eklenebilir. Bu maddeler kompozite ilave edildiklerinde yanma geciktiricilik, yağlayıcılık ve oksit gidericilik gibi özellikler sağlarlar [18].

3.2. Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit malzemeler metallerle kıyaslandığında pek çok farklı özelliğe sahiptirler. Kompozitler düşük yoğunluklarından dolayı hafif konstrüksiyon yapılarında kullanıldıklarında büyük avantaj sağlarlar. Ayrıca, fiberlerle güçlendirilmiş kompozitler korozyona karşı dayanımları, ısı, ses vs yalıtımı sağlamaları sebebiyle kullanıldıkları alanlar için üstünlük oluştururlar [15]. Avantajlarından söz edecek olursak:

- Yüksek Mukavemet: Kompozit malzemelerin çekme ve eğilme mukavemetleri pek çok metal malzemeye nazaran daha yüksektir. Kalıplanabilme yeteneklerinden dolayı kompozitlere istenilen bölgede ve yönde gerekli mukavemeti vermek mümkündür. Böylece fire oranı en aza indirilmiş ve malzemeden tasarruf sağlanarak daha ucuz ve hafif malzemeler elde edilir [15].
- Elektriksel Özellikler: Çok üstün elektriksel özellikler uygun malzeme kombinasyonlarıyla elde edilebilir. Günümüzde enerji nakil hatlarında kullanılacağı yere göre iyi bir iletken veya iyi bir yalıtkan malzemesi şeklinde kullanılabilir [15].
- Kolay Şekillendirme: Karmaşık ve büyük parçalar tek seferde kalıplanıp ürün elde edilebilir. Daha ucuz ürün daha kısa sürede oluşturulur [15].
- Korozyona ve Kimyasal Etkilere Karşı Mukavemet: Havanın olumsuz etkilerinden ve birçok kimyasalın etkisinden zarar görmemeleri nedeniyle kompozit malzemeler kimyasal madde tankları, boru ve aspiratörler, deniz taşıtlarının gövde kısmında güvenle kullanılır. Korozyona karşı dirençleri ise endüstride avantaj sağlamaktadır [15].
- Isıya ve Ateşe Dayanıklılık: İçeriğinde ısı iletim katsayısı düşük olan malzemelerden oluşmuş kompozitler ısıya karşı dayanıklılık özellikleri sayesinde yüksek ısı altında kullanılabilirler. Çeşitli katkı maddeleriyle de kompozitlerde iyileştirme yapılabilir [15].

Yukarıda sayılan avantajlarının yanında kompozit malzemeler günümüz şartlarında pek çok dezavantaja da sahiptirler:

- Kompozit malzemeler değişik doğrultularda farklı mekanik özellikler gösterirler.
- Kompozit malzemelere delik delme, kesme gibi operasyonlar uygulandığında bu işlemler malzeme yapısındaki liflerin açılmasına yol açar, bu yüzden kompozitlerde hassas imalattan söz etmek pek mümkün değildir.
- Kompozit malzemenin üretimi esnasında oluşma ihtimali olan hava zerrecikleri yorulma ömrünü kötü yönde etkiler [15].
- Maliyetler yüksektir ve istenilen yüzey kalitesi genellikle elde edilemez [28].
- Geri dönüştürülebilen malzemeler değildir [28].

Kompozitler pek çok dezavantajının yanında çelik ve alüminyumla kıyaslandığında üstün özelliklere sahiptirler ve bu özellikleriyle bina cephe ve panolarından banyo ünitelerine, ev eşyalarına kadar sanayinin çeşitli kollarında kullanılan ve karşılaşılan problemlerin çözümünde kullanılan malzemelerdir. Kompozit malzemeler kullanılarak iyileştirilebilecek özellikleri sıralarsak:

- Mukavemet
- Rijitlik
- Korozyon Direnci
- Ağırlık
- Aşınma Direnci
- Görünüm güzelliği
- Yorulma Ömrü
- İmalat Kolaylığı
- Isı izolasyonu

Belirtilen özellikler bir arada sağlanamaz. Kullanım yerine göre uygun malzeme seçilip istenilen özellikler sağlanmaya çalışılır [15].

3.3. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler farklı şekillerde sınıflandırılabilir. En yaygın sınıflandırma kompozitin takviye elemanı ve matriksin türüne göre yapılır [23].

Yüksek performanslı kompozit üretimi için matriks malzemesi elyaflar arasına emdirilmeli, elyafları ıslatarak bağ oluşturmali, düşük basınç ve sıcaklık seviyelerinde kolayca katılaşabilmelidir. Üretim süresince ve sonrasında matriks ve elyaflar arasında kimyasal etkileşim olmamalı, matriks kararlı kalmalıdır. Bunun yanı sıra elyaflar fiziksel hasara maruz kalmamalıdır. Kompozit malzemenin neme ve kimyasallara karşı direnci matriks tarafından belirlenir beraberinde elyaflar da sıcaklığa karşı kararlı olmalıdır. Ancak parçacık takviyeli kompozitlerde matriks malzemesi, parçacıkları bir arada tutarken elyaf takviyeli kompozitlerde ise matriksin başlıca fonksiyonları:

- Düzenlenmiş elyafları bir arada tutarak kuvvetleri elyafa iletmek.

Bu durum çekme, kayma ve basma kuvvetleri için büyük önem taşır.

- Elyafları darbe ve çevre etkilerinden korumak.

Cam-elyaf takviyeli kompozitlerdeki matriks malzemelerinin çoğu suya ve korozyona aşırı duyarlıdır.

- Çatlak ilerleyişini durdurmak.

Elyaf malzemeler yüksek dayanım ve elastik modüle sahip olmalarına karşın çok gevrekler. Elyaflar ayrı malzeme gibi davranırken matriks kırılma meydana gelene kadar yük taşıyıcı gibi davranır. Böylece oluşan çatlaklar ani kırılmalara sebep olmaz. Herhangi bir elyaf kırılırsa yük matrikse sonra diğer elyafa transfer olur. Bu yüzden elyafla matriks arasındaki bağın kompozit malzemenin tokluğu üzerinde önemli etkisi vardır [13]. Kompozit malzemeleri takviye elemanlarına göre sıralarsak:

1. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler,
2. Parçacık takviyeli kompozit malzemeler,
3. Tabakalı kompozit malzemeler,

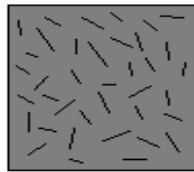
Bu takviye elemanları kullanılarak oluşturulan kompozitler plastik, metal veya seramik matriks içinde olabilir. Takviye elemanı istenen özelliklerin sağlanması için matriksten daha serttir [13].

3.3.1. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler

Yumuşak ve sünek matriks malzemesi içine dayanıklı, elastikliği yüksek elyaflar ilave edilerek üretilen elyaf takviyeli kompozitlerin; çekme ve yorulma dayanımları takviye elemanı yardımıyla iyileştirilmiş olur. Matriks malzemesi kuvveti elyaflara ileterek yumuşaklık ve tokluk özelliği sağlarken, elyaf da yükün büyük kısmını taşımaktadır. Takviyeli kompozitlerde kullanılan elyaflar, örme, şerit fitil şeklinde veya tabakalı halde yönlü elyaflar da olabilir. Sürekli elyaflar yönlendirilme özelliklerinden dolayı diğer takviye elemanlarına göre daha üstün özelliklere sahiptirler. Tek yönde çekme dayanımına maruz kalan bölgelerde yönlendirilmiş elyaflar bu doğrultuda yüksek mukavemet gösterirken dik doğrultuda çok düşük mukavemet gösterirler [28]. Bu durumu gidermek için değişik açılarda takviyelendirme yapılarak her iki yönde de daha yüksek özelliklerin elde edilmesi mümkün olabilmektedir [13].



**Sürekli Fiber
Kompozit**



**Kesik Fiber
Kompozit**

Şekil 3.2. Sürekli fiber ve kısa fiber kompozitler [13]

Kısa Elyaf Takviyeli Kompozitler

Kısa elyaflar yaklaşık 3-5 μm çapında ve 0,5-6 mm uzunlukta üretilirler. Kısa elyaf takviyeli kompozitler, takviye elemanının eriyik içinde malzeme ile birleştirilmesi ile oluşturulur. Üretim işleminin sürekli elyaflara göre hızlı ve maliyetinin düşük olması ve şekil verme yeteneğinin yüksek olmasından dolayı tercih edilirler [13].

Rastgele Düzlemsel Yönlendirilmiş Kompozitler

Bu kompozitler kısa elyafların rastgele iki boyutlu olarak yönlendirilmesiyle oluşturulur. Elyafların kompozit içinde gelişigüzel yerleştirilmeleri ne kadar düzenli olursa elyaf hacim oranı o kadar artar ve tüm yönlerdeki mekanik özellikler elyafların yerleştirilmesine bağlı olarak değişir. İşlem iyi yapılırsa mekanik özellikler tüm yönlerde aynı hale getirilebilir [13].

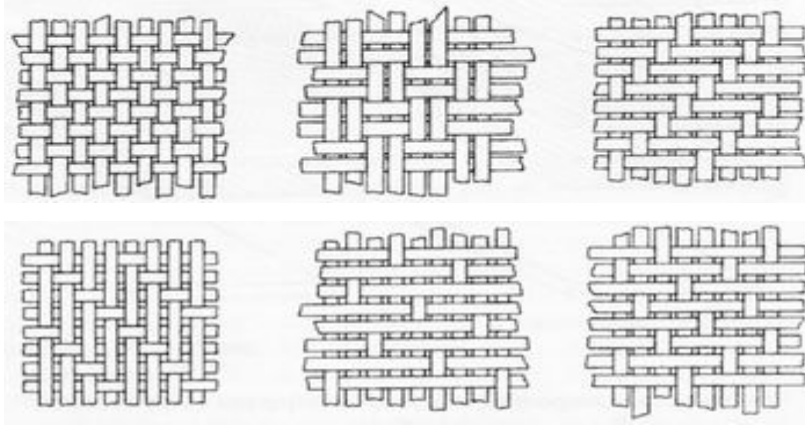
3.3.2. Parçacıklarla takviye edilmiş kompozit malzemeler

Tanecik takviyeli kompozitlerde, takviye elemanının üç yöndeki boyutları arasında önemli bir fark bulunmamaktadır. Granül, disk, pul gibi geometrilerde ya da şekilsiz küçük parçalar örnek verilebilir [23]. Döküm yöntemiyle üretilen bu kompozitlerde; sıvı metalin seramik parçacıkları ıslatamaması, tozların karıştırma zorluğu gibi problemlerle karşılaşılabilir [13]. Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğiyle ilişkilidir.

3.4. Takviye Elemanları

Mühendislikte takviye elemanlarının çoğu elyaf şeklinde üretilir ve bu halleri katı hallerinden yaklaşık 30-50 kat dayanıklı ve 3 kat daha rijit olduğundan kütle halindeki özelliklerinden daha üstün performans gösterirler. Kompozitlerin özelliklerini etkileyen en önemli faktörler elyafların şekli, boyu ve yönlendirilmeleri ile matriksin mekanik özellikleri ve elyaf/matriks ara yüzey bağıdır. Takviye elemanları üzerine gelen yükün büyük kısmını taşırlar. Yükün elyaflara iletilebilmesi

için fazlar arasında fiziksel ve kimyasal bir uyumun olması yanında ara yüzey bağının da güçlü olması gereklidir. Elyaf ve matriks malzemesinin arasındaki ısı genleşme katsayıları ilişkisi kalıcı yapısal gerilmelerin oluşması açısından önemli olmaktadır [13].



Şekil 3.3. Elyaf dokuma türleri [28]

Kompozit üretilirken elyaf seçimi, üretim yöntemi, matriksin elyafları iyi ıslatabilmesi, yönlendirilmeleri ve elyaf içeriği kompozitin mekanik özelliklerini belirleyen ana unsurlardır. Bu yüzden takviye elemanı seçimi ve özellikleri iyi bilinmelidir. Elyaf seçiminde:

- Yüksek modül ve dayanım,
- Düşük yoğunluk,
- Üretim kolaylığı,
- Kimyasal uyum,
- Isıl direnç gibi özellikler istenir.

Son zamanlarda takviye elemanı olarak kullanılan başlıca seramikler; cam, karbon, boron, alümina ve silisyum karbürdür. Bunun yanında metalik camlar da takviye malzeme olarak kullanılır [13].

Çizelge 3.2. Seramik elyaf mekanik ve fiziksel özellikleri [13]

Malzeme Cinsi	Yoğunluk(kg/m ³)	Elyaf	Elastik	Çekme
		Çapı (µm)	Modülü (Gpa)	Dayanımı (Gpa)
E-Camı	2500	12	70	1,5-2
S-Camı	2600	10	90	4,6
Karbon(PAN)	1800	7-10	400	2-2,8
Karbon(YD)	1700	7-10	200	3-3,5
Karbon(Mesa-faz)	1900	7-10	220	3,2
Boron	2600	140-160	400	3,4
Al ₂ O ₃ (FP)	3950	20	380	1,4-2,1
Al ₂ O ₃	3300	3	300	2
Al ₂ O ₃ /SiC	3100	10	206	1,7
SiC	3200	1-50	480	7
SiC (Nicalon)	2250	12	200	2,5

3.4.1. Cam elyaf

Ana maddesi SiO₂ olan cam elyaflar belli oranlarda sodyum, kalsiyum, alüminyum, bor ve demir gibi elementlerin oksitlerinden oluşur. Polimer esaslı kompozitlerde kullanılan en ucuz takviye elemanıdır.

Çizelge 3.3. Cam türleri ve özellikleri [13]

Malzeme Cinsi	Formülü	E-camı	S-camı	C-camı
Kum	SiO ₂	52,4	64,4	64,6
Al ve demir oksit	Al ₂ O ₃ - Fe ₂ O ₃	14,4	25	4,1
Kalsiyum oksit	CaO	17,2	---	14,3
Magnezyum oksit	MgO	4,6	10,3	3,3
Sodyum ve Potasyum oksit	Na ₂ O - K ₂ O	0,8	0,3	9,6
Baryum iki oksit	B ₂ O ₃	10,6	---	4,7
Baryum oksit	BaO	---	---	0,9



Resim 3.1. Cam elyaf

Plastik esaslı kompozitlerde kullanılan genel tipi E-Camı iyi elektrik yalıtım özellikleri için geliştirilirken S-Camı daha pahalı ancak daha yüksek modüle sahiptir. Camların dayanımı yüzey üzerinde kusurlar ve mikro-çatlaklara bağlıdır. Yüksek kalitedeki elyafların üretimi için yüksek saflıkta malzemelerin homojen ergimiş olması, yüksek sıcaklıkta çekilmesi ve hemen koruyucu malzemeyle kaplanması gerekmektedir [23].

3.4.2. Karbon elyaflar

Günümüzde karbon fiber çok yüksek mukavemete sahip malzemelerden biridir. Çekme dayanımı 5,17 GPa 'dır ve 1500 °C gibi yüksek sıcaklıklarda bile diğer fiberlerle kıyaslandığında yüksek dayanıma sahiptir. Sürekli fiberler şeklinde imal edilmektedir. Yüksek mekanik özellikleri onun uçak endüstrisinde kullanılmasına imkân sağlar. Ayrıca yüksek tokluk ve düşük ağırlığa sahiptir [17].



Resim 3.2. Karbon elyaf

Epoksi matriksler ile birleştirildiğinde olağanüstü dayanıklılık ve sertlik özelliği gösterir. Mukavemet yönünden cam ve aramid elyaftan daha iyidir. Aşınma mukavemetleri yüksek olup nemden etkilenmezler [28]. Normal sıcaklıklarda yorulma direnci ile sabit bir yük altındaki deformasyonları düşüktür. Bunun yanı sıra kırılmandırılar, düşük basma direnci gösterirler ve pahalı malzemelerdir. En çok kullanım alanları; uçak kanatları, kontrol yüzeyleri, otomobil ve denizcilik sektöründe yapısal destek elemanları, bisiklet pedalları, raket, olta vs. dir. Isısal özelliklerinden dolayı havacılık sanayinde, kimyasal reaksiyonlardan az düzeyde etkilenmelerinden dolayı da depolama tanklarında sıklıkla kullanılırlar [17].

3.4.3. Bor elyaflar

Boron elyaflar, oda sıcaklığında katı fazda bulunan hafif elementlerden biridir ve çok seyrek olduğundan klasik yöntemlerle üretimi oldukça zordur. Çekirdek diye adlandırdığımız tungsten tel üzerine bor kaplanmasıyla elde edilir. Son yıllarda tungsten telin yaklaşık $19,3 \text{ gr/cm}^3$ gibi yüksek yoğunluğu sahip olmasından dolayı karbon çekirdek kullanılmaya başlanmıştır. Bunun avantajı ise düşük yoğunluklu elyaflar elde edilmesidir. ($1,8 \text{ gr/cm}^3$) Yüksek dayanımlı metallerle birleştirilmesi

kolay olduğundan ilk MMK'ler boron takviyeli alüminyum esaslı borular pahalı olmalarına rağmen uzay sanayinde kullanılmışlardır [13].

3.4.4. Seramik elyaflar

Alüminyum oksit “alümina” elyaflar, özellikle metal matriksli kompozit malzemelerde kullanılmaktadırlar [13]. Seramik fiberler çekme mukavemetleri dışında yüksek mukavemet ve elastik modül özelliklerini ısıya dayanıklılık ve çevresel şartlardan çok etkilenmeme özellikleriyle birleştirmektedir. Bu sebeple uçak motorlarında kullanılırlar. Ayrıca basma mukavemetleri de yüksektir. Örnek olarak silisyum karbür (SiC) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) verilebilir [17].

3.4.5. Aramid elyaflar

Rengi genellikle sarı olan aramid fiberler ticari olarak kevlar diye adlandırılırlar. Yüksek çekme mukavemeti, aşınma ve yorulma dayanımına sahip olmakla birlikte, düşük ağırlıklı ve maliyetlidirler. Cam elyaflı kompozitlerle kıyaslandığında yaklaşık %35 daha hafiftirler [28].

3.4.6. Metalik cam elyaflar

Karbon, bor ve fosfor ile nikel, silisyum, demir ve kromun çeşitli oranlarda birleştirilmesiyle metalik cam üretilmektedir. Genellikle izotrop davranış gösterirler. Bu tür fiberler oldukça yumuşak ve tokurlar. Korozyona karşı dirençleri yüksek, ısı ve elektrik iletkenlikleri de iyidir. Tel şeklinde birçok metal yüksek mukavemet ve elastik modül özellikleri göstermektedir. Berilyum, çelik ve tungsten en önemlilerindendir. En nemli özellikleri seramik fiberlerden daha kararlı mukavemet değerlerine sahip olmalarıdır [23].

3.5. Matriks Elemanları

3.5.1. Metal matriksler ve alaşımları

Hafif metal malzemeler kompozitler de matriks elemanı olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Metaller plastiklerden daha yüksek elastik modül, dayanım ve tokluğu sahiptir ve yüksek sıcaklıklardaki özellikleri de daha iyidir. Metal matriksli kompozit üretimi zordur ve her elyafla iyi bir ara yüzey oluşturamaz. Silisyum karbür ve kaplanmış boron elyaf metallerle en kolay bağı oluşturan takviye elemanlarıdır. Ancak pahalıdır. MMK’lerde düşük yoğunlukta, iyi tokluk ve mekanik özelliklerde olan hafif metaller ve alaşımlarının kullanımı yaygındır. Bunlar hafif yapı konstrüksiyonlarında tercih edilirler. Atmosfere karşı korozyon dayanımları yüksektir. En çok kullanılan matriks elemanları Al, Ti, Mg, Ni, Cu ve Zn ‘dır [13].

Alüminyum ve Alaşımları

Demir içeren malzemelerin yanı sıra alüminyum ve alaşımları

1. Dayanım/ölgül ağırlık oranının yüksek olması,
2. Elektrik iletkenliğı/ölgül ağırlığının yüksek olması,
3. Atmosfere ve diğler ortamlara karşı iyi korozyon direncine sahip olmalarından dolayı en yaygın kullanılan malzemelerdir.

Bunun yanında alüminyum çok küçük gerilmelerde bile kırılabilir ve yüksek sıcaklıklarda kullanılamazlar [13].

Magnezyum Alaşımları

Magnezyum metali alüminyum kadar mukavemetli olmamasına rağmen, düşük ölgül ağırlığa sahiptir ve ölgül dayanımı(dayanım/ağırlık) daha iyidir. Bu nedenle uzay araçlarında, yüksek hızlı makine vs. kullanılır. Döküm ve talaşlı imalatla ise:

1. Oksijene karşı duyarlı olması,
2. Düşük elastisite modülü ve yorulma direncine sahip olması,
3. Yüksek sıcaklıkta sünme ve aşınma özelliklerinin düşük olmasından dolayı daha az tercih edilir [13].

Çinko Alaşımları

Çinko ve alaşımları düşük ergime derecesine sahip olduklarından ve döküm kabiliyetlerinin iyi olması sebebiyle 0,5 mm kalınlığında ince cidarlı, çok küçük delikler ve karışık şekilli parçalar kolaylıkla elde edilir. Çok sayıda parça üretimiyle maliyet düşürülmüş olur. Çinko ve alaşımlarının oda sıcaklığında yorulma dayanımı iyidir fakat düşük sıcaklıklarda kırılgan hale gelirler [13].

Titanyum Alaşımları

Metaller arasında alüminyumdan daha dayanıklı olan titanyumun ısı genleşme katsayısı çok düşüktür. Yüksek sıcaklıklarda kullanım için uygundur. Oda sıcaklığında ise mükemmel korozyon direnci sağlar. Dayanım/ağırlık oranının da iyi olması göz önüne alındığında titanyumun bu özelliklerinden uzay ve uçak sanayinde de faydalanılır [13].

3.5.2. Plastik matriksler

Plastikler, monomerlerden meydana gelen zincir şeklinde sentetik malzemelerdir. Hafif malzemelerdir ve kolay işlenirler. Karışık geometrilerde malzemeler bile kalıp içine enjekte edilmek suretiyle üretilmekte bu yüzden reçine ismiyle de anılmaktadırlar. Yaygın kullanıma sebepleri:

- Karmaşık şekilli geometrilerin kalıplanabilmesi,
- Metal ve seramiklere göre düşük yoğunluğa ve yüksek dayanım/yoğunluk oranına sahip olması,

- Yüksek korozyon direnci ve düşük ısı ve elektrik iletkenliğine sahip olması,
- Üretimleri sırasında çalışma sıcaklıklarının metallerden düşük olması sebebiyle daha az enerjiye gereksinim duyulması,
- Bazı plastiklerin ışığı yansıtması ve saydam olmasının çeşitli uygulamalarda camın yerine kullanılmasına olanak sağlaması,

Plastiklerin avantajları dışında dezavantajları da söz konusudur:

- Metaller ve seramiklerden daha düşük dayanıma sahiptirler,
- Elastisite modülleri düşüktür,

Çizelge 3.4. Termoset ve termoplastiklerin maksimum sıcaklık değerleri [33]

Malzemeler	Maksimum Kullanılan Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
Termosetler	
Vinil Ester	230-320
Polyester	150-250
Fenolikler	80-125
Epoksi	70-150
Cynate Ester	60-150
Bismaleimid	60-150
Termoplastikler	
Polietilen	50-80
Polipropilen	50-75
Asetal	70-95
Nylon	75-100
Polyester	70-120
Polifenilen Sulfid	120-220
Teflon	200-260

Kompozitlerde plastik matriks olarak genellikle üç tip malzeme kullanılır [13].

Termoplastikler

Termoplastikler oda sıcaklığında katı malzeme olarak adlandırılır. Isıtılırsa yumuşar soğuyunca tekrar sertleşirler. Kolay şekillendirilirler. Kimyasal etkilere karşı hassastırlar. Özelliklerinden söz edecek olursak:

- Çok düşük rijitlik,
- Düşük çekme dayanımı ve düşük sertlik,
- Daha büyük süneklik, yaklaşık %1 -500 arası,
- Kuvvet etkisinde oda sıcaklığında sünme ve zamana bağlı şekil değiştirmeler,

Fiziksel özellikleri:

- Metaller ve seramiklerden daha düşük yoğunluğa sahiptirler. Polimerlerin özgül ağırlıkları $1,2 \text{ g/cm}^3$, seramikler $2,5 \text{ g/cm}^3$, metaller 7 g/cm^3 yoğunluktadır,
- Çok yüksek termal uzama katsayısına sahiptirler,
- Ergime sıcaklıkları düşüktür,
- Yalıtkan elektriksel özelliklere sahiptirler,

Termoplastikler, üretilen tüm sentetik polimerlerin yaklaşık %70'ini, termosetler ve elastomerler geri kalan %30'luk kısmı oluşturur. Önemli ticari termoplastiklerden bazıları şunlardır:

Poliamid(PA): Dayanıklı olup elastik modülü yüksek ve aşınmaya karşı dirençlidir. Kendi kendini yağlama özelliğine sahiptir ve 125°C civarında mekanik özelliklerini korur ancak, suyu emme özelliği mevcuttur. Dayanım ve düşük sürtünmenin gerektiği dişli ve yatak gibi parçaların üretiminde metaller yerine kullanılır. Diğer grup poliamidler ticari ismi Kevlar olan aramidlerdir. Kevların tercih sebebi ise çelikle aynı dayanıma sahip olup %20 daha hafif olmasıdır [13].

Çizelge 3.5. Termoplastiklerin bazı tipik özellikleri [13]

Özellikleri	Poliamid(PA)
Elastik Modülü(Mpa)	700
Çekme Dayanımı(Mpa)	70
Uzama Miktarı(%)	300
Özgül Ağırlığı(g/cm ³)	1,14
Ergime Derecesi(°C)	260

Polyester(PET): Bunlar bağ durumlarına göre termoplastik ya da termoset olabilirler. Yapıları şekilsiz veya %30 civarı kristalleşmiş olabilir. Hızlı soğutularak meydana gelen yapı şekilsiz ve oldukça saydamdır. Şişirilerek elde edilen küçük kaplar, fotografik filmler ve manyetik bantların üretiminde kullanılırlar [13].

Polietilen(PE): Deformasyona ve neme karşı dirençli olan bu malzeme; düşük maliyet, kimyasal kararlılık ve kolay işlenebilme yeteneğine sahiptir. Düşük ve yüksek yoğunluklu olmak üzere iki çeşittir. Yüksek olanın yoğunluğu 0,96 g/cm³ olup bu onları daha dayanıklı yapar. Şişe, boru vs. yapımında kullanılır [13].

Polipropilen(PP): Enjeksiyon kalıplarında kullanılan en önemli ve hafif plastiktir.

Polivinil klorür(PVC): Su boruları, tel ve kablo yalıtımı, yiyecek paketlenme vs. üretiminde kullanılır ancak, ısı ve ışığa karşı kararsızdır.

Termosetler

Epoksi ve polyesterler elyaf takviyeli kompozitlerde matriks malzemesi olarak en çok kullanılan plastiklerdir. Polyesterler cam elyafı iyi ıslatır ve dolgu malzemesi olarak da kullanılır. Ancak sertleşme sırasında %10 kadar büzülürler ve bu da liflerin basma gerilmeleri altında burkulmasına sebep olur. Termosetler termoplastiklere göre daha yüksek dayanıma sahiptir.

Epoksi: Isıl işlem görmüş epoksilerin dayanımları yüksek, ısı ve kimyasal dirençleri de iyidir [13]. Genellikle gevrek malzemelerdir. İstenilen niteliklerin sağlanması için dayanıklı bir termoplastik ve mükemmel termal özelliklerde bir termoset birleştirilerek dayanıklı epoksi malzemeler geliştirilme aşamasındadır [28]. Uygulama alanları; yüzey kaplamaları, cam takviyeli kompozitler ve yapıştırıcılar olarak sayılabilir. Yalıtım özelliklerinden dolayı çeşitli elektronik uygulamalarda sıklıkla bu malzemelerden yararlanılır [13].

Fonelik: Ticari ismi bakalit olan bu malzeme dolgu maddeleri ile birleştirilerek kullanılabilir. Gevrek olmalarının yanında ısı, kimyasal ve en önemlisi boyutsal kararlılıkları iyidir. Tahta yapıştırıcı, fren balatası vs. için bağlama maddesidir [13].

Polyester: Termoset polyesterler boru, tank, gemi iskeleti, otomotiv gövde kısımları, yapı panelleri gibi büyük parçaların üretiminde kullanımı yaygındır [13].

Katkı Maddeleri: Bir polimerin özellikleri dolgu maddesi yardımıyla değiştirilebilir ve maliyetin azaltılması açısından değişik elyaf ve parçacık ilavesi yapılabilir. Böylece polimer kompozite dönüştürülebilir. Bu tür işlemlerin yapılmasının sebebi ısı ve boyutsal kararlılığın iyileştirilmesidir. Ayrıca katkı maddeleri yağlayıcı, yanma geciktirici ve oksit giderici etkiler de sağlarlar [13].

Çizelge 3.6. Bazı termoset plastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri [13]

Malzeme Cinsi	Epoksi	Polyester	Fonelik
Yoğunluk (g/cm ³)	1,11	1,04-1,46	1,24-1,32
Elastik Modül(Mpa)	7000	3400	4800
Çekme Dayanımı(Mpa)	70	41-90	34-62
Kopma Uzaması(%)	3 - 6	42	1,5-2,0
Isıl İletkenlik	0,19	0,19	0,15
Isıl Genleşme Katsayısı(1/°C)	45-60	55-100	68

Elastomerler

Bilinen en önemli elastomer kauçuktur. İki çeşittir:

- Doğal kauçuk: Belli biyolojik bitkilerden çıkartılır.
- Sentetik Polimerler: Termoset ve termoplastik polimerler için kullanılır.

Daha fazla çapraz bağ sağlanırsa daha rijit malzeme elde edilmiş olur [13].

3.5.3. Seramikler

Metal ve metal olmayan elemanlardan oluşan inorganik bileşiklerdir. Çok sert, gevrek ve yüksek sıcaklığa dayanıklıdır. Seramik malzemeler endüstriyel fırınlar, tuğla, optik araçlar vs. de kullanılırlar. İyi bir yalıtıcıdır. Gevrek olmaları dolayısıyla mikro çatlaklar gerilme yığılmasına yol açar çekme dayanımları düşüktür. Kayma direnci yüksek olduğundan plastik şekil verme olmaksızın kırılırlar. Al_2O_3 ve SiC aşındırıcı malzeme olarak kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklık özelliğine olan sahip seramik malzemeler takviye elemanı olarak kırılabilirliği azaltıcı etki gösterir. Kompozit oluşturulduğunda yaklaşık $1200\text{ }^{\circ}C$ 'ye kadar kullanılabilir. Karbon matriks iine gömülen karbon elyaflardan oluşan kompozitler ise $3000\text{ }^{\circ}C$ gibi olağanüstü sıcaklıklarda da kullanılır. Seramiklerin birbirleriyle karşılaştırıldığı çizelge aşağıda sunulmuştur [13].

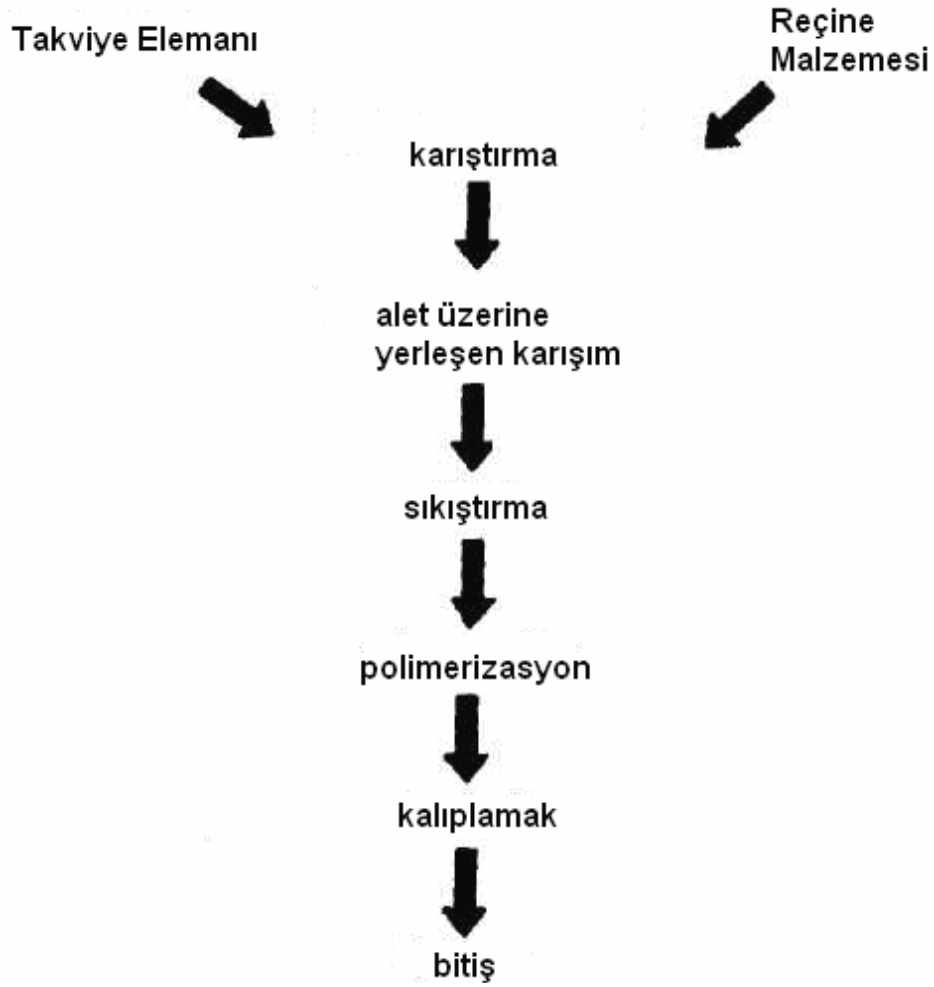
Çizelge 3.7. Seramiklerin tipik özellikleri [13]

Malzeme Cinsi	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	Si ₃ N ₄	SiC
Eğilme Dayanımı (Mpa)	440	1020	880	500
Oda Sıcaklığında Dayanım (Mpa)	500	1200	1000	1100
1200 °C de Dayanım (Mpa)	300	350	350	480
Kırılma Tokluğu	4	9	6	4
Termal Şok Direnci	200	350	900	370

3.6. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

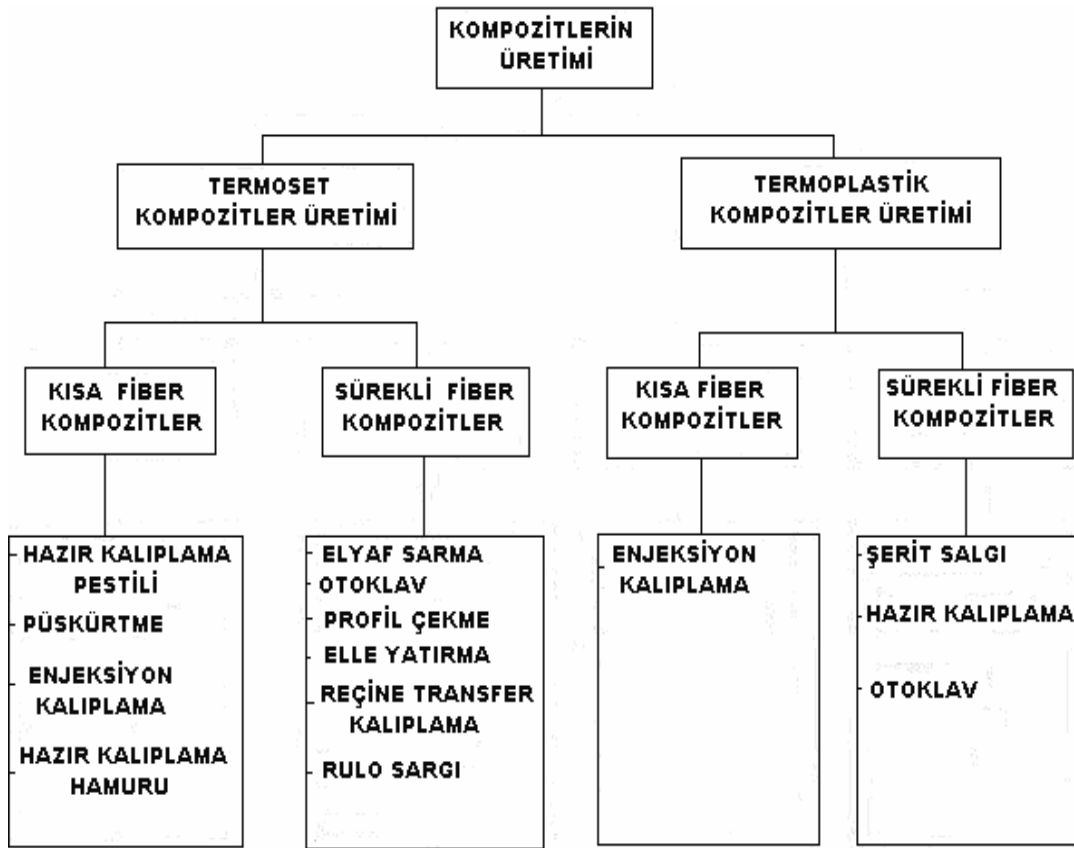
Takviye malzemesi ile reçine malzemesinin karışımından oluşan yeni malzemede matriks malzemesi sertleştikten sonra malzeme kompozit malzeme olabilir. Bununla birlikte oluşan malzemeyi değiştirmek mümkün değildir.

Polimer matriksli kompozitlerde, reçine polyester olduğundan malzemenin polimerize edilmesi gereklidir. Katılaştırma işlemi boyunca bir katkı malzemesi ile karıştırılan reçine, malzeme polimerize edilirken malzeme sıvı halden katı hale geçer. Kompozit malzemelerin üretim işlemleri kalıplama yöntemleri ile olmaktadır. Kalıplama işlemlerinin basamakları Şekil 3.6.'da gösterilmiştir. Kalıplama yöntemleri malzemenin yapısına, malzemelerin sayısına ve malzemenin maliyetine bağlıdır. Kalıplama malzemesi olarak metal, polimer, ağaç ya da alçı kullanılabilir [33].



Şekil 3.4. Kalıplama işlemlerinin basamakları [33]

Kompozit malzemelerin üretimi reçine malzemesine göre iki kısma ayrılır. Bunlar termoset reçineli ve termoplastik reçineli kompozit malzemelerdir [33].



Şekil 3.5. Kompozit malzemelerin üretim yöntemlerinin sınıflandırılması [33]

3.6.1. Termoset matriksli kompozitlerin üretimi

Termoset matriksli kompozit malzemenin üretiminde matriks malzemesi olarak genellikle epoksi, doymamış polyester ve vinil ester kullanılmaktadır. Yapılacak çalışmamızda malzememiz kısa fiberlerle takviye edilmiş epoksi kalsit kompozit malzeme olduğundan sadece termoset olan matriks malzemeleriyle ilgili üretim tekniklerinden bahsedilecektir.

Hazır Kalıplama

Hazır kalıplama yöntemi; cam elyaf, reçine, katkı ve dolgu malzemeleri içeren, kalıplamaya hazır kompozit malzemelerin, sıcak pres kalıplarla ürüne

dönüştürülmesidir. Karmaşık şekilli parçaların üretilmesi, metal parçaların matriks içine gömülebilmesi, farklı cidar kalınlıklarının elde edilebilmesi şeklinde avantajları mevcuttur. Ayrıca parçanın her iki yüzeyi de kalıp ile şekillendirilebilmektedir. Fire malzeme ve bozuk malzeme oranı düşüktür. Kalıplama bileşimlerinin buzdolaplarında saklanması gerekliliği, kalıpların metal olmasından dolayı daha maliyetli olması ve büyük parçaların üretimi için büyük ve pahalı preslere ihtiyaç duyulması ise yöntemin dezavantajları olarak sayılabilir. Hazır kalıplama yönteminde kullanılan bileşimler içeriklerine göre çeşitlilik göstermekle beraber en çok iki tür hazır kalıplama bileşimi kullanılmaktadır [33].

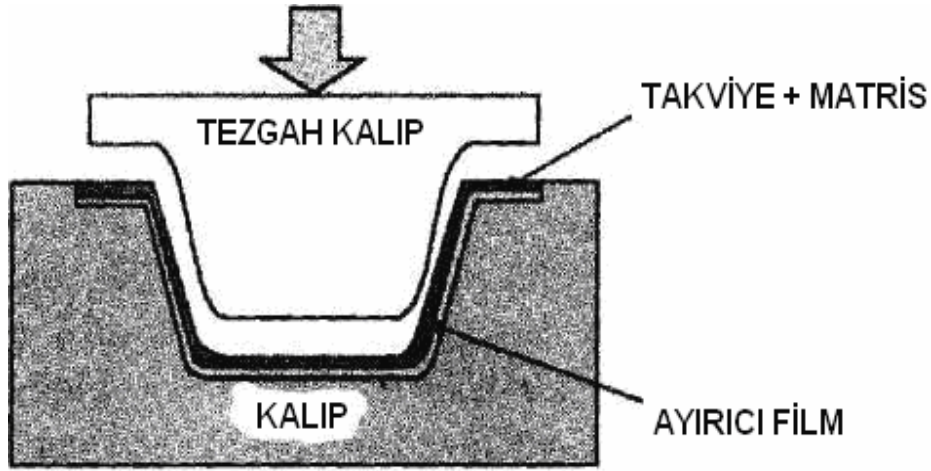
Hazır kalıplama pestili / SMC (sheet moulding composites); SMC takviye malzemesi olarak kırılmış lif ile dolgu malzemesi içeren bir reçinenin birleştirilmesi ile meydana getirilen pestil biçiminde malzemedir. Sürekli fiberler, 25-50 mm kırılmış olarak ve kompozitin toplam ağırlığının %25-30 oranında kullanılır. Genellikle 1m genişliğinde ve 3 mm kalınlığında üretilir.

Hazır kalıplama hamuru / BMC (bulk moulding composites); BMC takviye malzemesi olarak kırılmış lif ve dolgu malzemesi içeren bir reçinenin önceden birleştirilmesi ile oluşan hamur biçiminde malzemedir.

Hazır kalıplama bileşimlerinin avantajları;

- Tasarım esnekliği,
- Yüzey düzgünlüğü,
- Kolayca boyanabilme ve kalıp içinde yüzeyin kaplanabilmesi,
- Geri dönüştürülebilme,
- Metal gömme parçaların yerleştirilmesi ile montaj kolaylığı,
- Yüksek sıcaklık dayanımı,
- Soğukta kırılgan olmama

şeklinde sayılabilir.



Şekil 3.6. Hazır kalıplama düzeneği [33]

Enjeksiyon Kalıplama (injection moulding)

Bu yöntem Reçine Transfer Kalıplamaya benzer bir yöntemdir. RTM’de termoset malzemeler enjeksiyon kalıp ünitesine yerleştirilir ve ısıtılmış kalıp içerisine uygun miktarda termoset plastikler enjekte edilirken; bu yöntemde reçine/elyaf karışımının kalıp dışarısında karışmış ve eritilerek basınç altında boş kalıp içine enjekte edilmesidir. Sadece düşük viskoziteye sahip termoset reçineler bu yöntemde kullanılabilir. Diğer yöntemlere göre daha hızlıdır. Çocuk oyuncakları, uçak parçaları vs. birçok farklı ürünün bu yöntemle üretilmesi söz konusudur.

Püskürtme Metodu

Bu yöntemde kırıcı ve püskürtme işlevlerini yapan bir tabanca arasından sürekli cam elyaf demeti transfer edilmektedir. Bu aygıt aynı anda elyafları kırarak kalıp üzerine reçineyi kataliz eder. Bu nedenle kalıplanan laminate havayı yok etmek ve reçine içindeki takviye elemanlarını ıslatabilmek için rulolar kullanılır. Gerekli kalınlıklar elde edilinceye kadar kırılmış elyaf ve reçine ilavesine devam edilir. Katılaşma genellikle oda sıcaklığında gerçekleşir. Bunun yanı sıra ısı kullanılarak katılaşma hızlandırılabilir. Malzeme püskürtülmeden önce kalıp içerisine silikon sürülerek daha

iyi bir yüzeyin elde edilmesi sağlanır. Özgül dayanım için örgü elyaflar da ilave edilebilir. Reçine olarak yine polyesterler kullanılır. Parça karmaşıklığı fazla ise bu yöntemin kullanılması daha uygun olur. Yöntemin en büyük avantajı maliyetin düşük olması; aynı zamanda basit, taşınabilir olması, aygıt ve parça boyutu sınırlamasının olmamasıdır [13].

4. TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELER VE MEKANİK DAVRANIŞLARI

4.1. Tabakalı Kompozit Malzemeler

Tabakalı kompozit, iki veya daha fazla sayıda tabakacığın tek ve bütün bir eleman gibi rol alacak şekilde üst üste konularak bir araya getirilmesiyle elde edilebilir [34]. Tabakalı kompozitlerde, tabakaların birbirine tam olarak yapıştığı varsayılır. Katmanlar, matriks içine tek yönlü, rastgele yönlendirilmiş, ya da farklı elyaf takviyeli tabakadan meydana gelebilir [13].

4.2. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışı

4.2.1. Anizotropik malzemeler için gerilme-şekil değiştirme bağıntıları

Bütün doğrultularda özellikleri birbirinden farklı olan malzemeler anizotropik olarak ifade edilir. Anizotropik malzemelerde genelleştirilmiş Hooke kanunu gerilme-şekil değiştirme bağıntıları şu şekilde yazılabilir [35].

$$\sigma_{ij} = A_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3) \quad (4.1)$$

Burada σ_{ij} gerilme tansörü, ϵ_{kl} şekil değiştirme tansörü ve A_{ijkl} elastisite tansörüdür. (1,2,3) rakamları ise sağ el kuralı gereğince düzenlenmiş koordinat sisteminin eksenlerini göstermektedir. Kütle kuvvetlerinin olmadığı ve gerilme-şekil değiştirme tansörlerinin simetrik olduğu hallerde

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \text{ ve } \epsilon_{kl} = \epsilon_{lk} \quad (4.2)$$

eşitlikleri yazılabilir [35]. Bu durum Çizelge 4.1.'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Love notasyonu [35]

Gerilme		Şekil Değişirme	
Tansör Notasyonu	Kısaltılmış Notasyon	Tansör Notasyonu	Kısaltılmış Notasyon
σ_{11}	σ_1	ϵ_{11}	ϵ_1
σ_{22}	σ_2	ϵ_{22}	ϵ_2
σ_{33}	σ_3	ϵ_{33}	ϵ_3
$\tau_{23} = \sigma_{23} = \sigma_{32}$	σ_4	$\gamma_{23} = \gamma_{32} = 2 \epsilon_{23}$	ϵ_4
$\tau_{31} = \sigma_{31} = \sigma_{13}$	σ_5	$\gamma_{31} = \gamma_{13} = 2 \epsilon_{31}$	ϵ_5
$\tau_{12} = \sigma_{12} = \sigma_{21}$	σ_6	$\gamma_{12} = \gamma_{21} = 2 \epsilon_{12}$	ϵ_6

Gerilme-şekil değişirme tansörünün simetrikliğinden dolayı A_{ijkl} elastisite tansörünün 81 elemanı 36 elemana indirgenmiş olur. Böylece Genel Hooke kanunu da dört boyutlu tansörel ifadeden kurtulmuş, 2 boyutlu tansörel ifadelerle (matrislerle) tanımlanabilir hale gelmiş olur [35].

$$\sigma_i = C_{ij}\epsilon_j \quad (i,j = 1,2,3,4,5,6) \quad (4.3)$$

Love notasyonuna göre iki boyutlu tansörle ifade edilen anizotropik malzemelerde gerilme-şekil değişirme bağıntısının matris olarak ifadesi [35]

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (4.4)$$

şeklinde yazılabilir. Şekil değişirme matrisi elemanları ise deplasmanlar cinsinden;

$$\begin{aligned}\epsilon_1 &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_2 = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \epsilon_3 = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \epsilon_4 = \gamma_{23} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \epsilon_5 &= \gamma_{31} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \quad \epsilon_6 = \gamma_{12} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\end{aligned}\quad (4.5)$$

şeklindedirler. Burada x, y, z doğrultularındaki deplasmanlar u, v, w fonksiyonları şeklinde gösterilmiştir. 36 bağımsız elemana sahip olan rijitlik matrisi elastik malzemeler için birbirinden bağımsız 36'dan daha az sabit ile ifade edilebilir. Bu yüzden şekil değiştirme-enerji yoğunluğu fonksiyonunu ele almamız gerekir. Elastik potansiyeli, elastik malzemelerde bir birim hacme karşılık gelen σ_i gibi bir gerilme bu malzemede $d\epsilon_i$ kadar şekil değişikliği meydana getirdiğinde, bu şekil değişimi elastik malzemenin birim hacim elemanı içinde d_w kadar bir şekil değiştirme enerjisinin meydana gelmesine sebep olur [35]. Bu enerji

$$dw = \sigma_i d\epsilon_i \quad (4.6)$$

Eş. 4.6 'da $\sigma_i = C_{ij} \epsilon_j$ ifadesi yerine yazılırsa:

$$dw = C_{ij} \epsilon_j d\epsilon_i \quad (4.7)$$

Böylece birim hacim elemanı için şekil değiştirme enerjisi bulunmuş olur. Bu ifadenin integrali alınırsa [35]:

$$w = \frac{1}{2} C_{ij} \epsilon_j \epsilon_i \quad (4.8)$$

yada

$$w = \frac{1}{2} C_{ji} \epsilon_i \epsilon_j \quad (4.9)$$

şeklinde elde edilir. Bu denklemlerin ayrı ayrı kısmi türevleri alınır Eş. 2.8'den

$$\partial W = C_{ij} \epsilon_j \partial \epsilon_i \quad (4.10)$$

Eş. 2.9'dan

$$\partial W = C_{ji} \epsilon_i \partial \epsilon_j \quad (4.11)$$

elde edilir ve bu ifadeler şu şekilde yazılabilir [35].

$$\frac{\partial W}{\partial \epsilon_i} = C_{ij} \epsilon_j \quad , \quad \frac{\partial W}{\partial \epsilon_j} = C_{ji} \epsilon_i \quad (4.12)$$

Şekil değiştirme enerjisi fonksiyonunun ikinci kez kısmi türevi alınır:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial \epsilon_i \partial \epsilon_j} = C_{ij} \quad \text{ve} \quad \frac{\partial^2 W}{\partial \epsilon_j \partial \epsilon_i} = C_{ji} \quad (4.13)$$

ifadeleri yazılabilir. Kısmi türev alma sırası türevin değerini değiştirmez bu yüzden w değerinin diferansiyeli matematiksel bir ifadedir ve malzemeye bağlı değildir [35].

Böylece Eş. 4.13'ün sonucu olarak:

$$C_{ij} = C_{ji} \quad (i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (4.14)$$

yazılabilir. Eş. 4.14'ten de görüldüğü üzere rijitlik matrisi simetriktir ve yalnızca 21 bağımsız elemanla ifade edilebilir. Aynı şekilde bir ifade ile Eş. 4.8, S_{ij} elastiklik matrisi ve gerilmeler cinsinden Eş. 4.16 ile yazılabilir. Burada S_{ij} şekil değiştirmeler ile gerilmeler arasındaki bağıntıyı veren matris olarak tanımlanır [35].

$$\varepsilon_i = S_{ij} \sigma_j \quad (i,j = 1,2,3,4,5,6) \quad (4.15)$$

$$W = \frac{1}{2} S_{ij} \sigma_i \sigma_j \quad (4.16)$$

Aynı işlemler uygulanırsa S_{ij} elastiklik matrisinin de C_{ij} rijitlik matrisi gibi simetrik bir matris olduğu görülür. Anizotropik malzemelerde 21 bağımsız sabitle ifade edilir [35].

$$S_{ij} = S_{ji} \quad (i,j = 1,2,3,4,5,6) \quad (4.17)$$

Eş. 4.4 ile yazılmış olan gerilme-şekil değiştirme bağıntısı $C_{ij} = C_{ji}$ eşitliğinin yardımıyla matris olarak şöyle ifade edilebilir [35].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (4.18)$$

Elastiklik matrisi de 21 bağımsız sabitle ifade edilebilir. Eğer malzemede karşılıklı olarak iki düzlemde simetri varsa, yani malzemede iki tane ortogonal simetri düzlemi bulunuyorsa bu durum ortogonal anizotropi olarak tanımlanır. Rijitlik matrisi de sadece 9 bağımsız elemanla ifade edilebilir [35].

$$[C_{ij}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Gerilme-şekil değiştirme bağıntıları ortogonal anizotropi “ortotropi” hali için aşağıdaki şekilde yazılabilir [35].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (4.20)$$

Elastiklik matrisi de aşağıda şekildedir [35].

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

4.2.2. Ortotropik malzemelerde düzlem gerilme bağıntıları

Bir kompozit malzemede; elyaflar tek yönlü sürekli veya iki yönlü takviyeli olarak düzenlenirse elyaf doğrultusunda yüksek dayanım ve rijitlik elde edilebilir. Bunun sonucunda tek yönlü doğrultuda yapılan elyaf diziliminde yüksek dayanım ve elastik modülü değeri, elyaf eksenine paralel doğrultuda elde edilecektir. İki yönlü doğrultuda ise, yani elyafların hem eksene paralel hem de dik yönde takviyelendirildiği kompozit malzemede ise iki ortogonal yönde dayanım ve elastik modülü eşit olur. Böyle kompozitler, birbirlerine dik doğrultuda iki eksenle simetrik malzeme özelliği gösterir ve "ortotropik" olarak tanımlanır [37].

Herhangi bir elastik malzemede düzlem gerilme durumunu ifade etmek için üç eksenli gerilme hali denklemlerindeki üçüncü düzlemle ilgili gerilmelerin sıfır olduğu kabul edilir [35].

$$\sigma_3 = 0 \quad \tau_{23} = 0 \quad \tau_{31} = 0$$

Ortotropik malzemelerde şekil değiştirmeler Eş. 4.21'den yazılırsa

$$\epsilon_3 = S_{13}\sigma_1 + S_{23}\sigma_2 + S_{33}\sigma_3 \quad (4.22)$$

Eş. 4.22 düzlem gerilme hali için

$$\gamma_{12} = \epsilon_3 = S_{13}\sigma_1 + S_{23}\sigma_2$$

$$\gamma_{23} = \epsilon_4 = S_{44}\sigma_4 = S_{44}\tau_{23} = 0$$

$$\gamma_{13} = \epsilon_5 = S_{55}\sigma_5 = S_{55}\tau_{13}$$

(4.23)

Ortotropik kompozit malzemelerde düzlem gerilme hali için şekil değiştirme-gerilme bağıntısı aşağıdaki gibidir.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} \quad (4.24)$$

Eş. 4.24'deki elastiklik matrisinin elemanlarını mühendislik sabitleri cinsinden ifade etmek istersek [35]:

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{E_1} \\ S_{12} &= -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} \\ S_{22} &= \frac{1}{E_2} \\ S_{66} &= \frac{1}{G_{12}} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Eş. 4.25'den anlaşılacağı üzere malzemeye bağlı dört tane bağımsız değişken yardımıyla şekil değiştirme-gerilme bağıntıları tanımlanabilmektedir. Şekil değiştirmeleri gerilmeler cinsinden ifade etmek yerine, gerilmeleri şekil değiştirmeler cinsinden Q_{ij} matrisi ile ifade etmek birçok kolaylıklar sağlar. Bu yüzden iki eksenli gerilme haline ait gerilme-şekil değiştirme bağıntısı aşağıdaki şekilde yazılır [35].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_6 \end{Bmatrix} \quad (4.26)$$

Rijitlik matrisinin elemanlarını elastiklik matrisi elemanları cinsinden yazarsak [35]:

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{S_{22}}{S_{11}S_{12} - S_{12}^2} & Q_{22} &= \frac{S_{11}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \\ Q_{12} &= \frac{S_{12}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} & Q_{66} &= \frac{1}{S_{66}} \end{aligned} \quad (4.27)$$

Mühendislik sabitleri cinsinden[35]

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{12} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}, \quad Q_{66} = G_{12} \quad (4.28)$$

Ortotropik malzemelerde rijitlik matrisi elemanları düzlem gerilme durumu için dört bağımsız mühendislik sabiti ile ifade edilebilir. İzotropik malzemelerde düzlem gerilme hali için şekil değiştirme-gerilme bağıntıları aşağıdaki gibidir [35].

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} \quad (4.29)$$

$$S_{11} = \frac{1}{E} \quad S_{12} = -\frac{\nu}{E}$$

şeklindedir.

Gerilme-şekil değıştirme bağıntıları:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{11} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (4.30)$$

şeklinde yazılır. Elemanlar Eş. 4.25 ve Eş. 4.28 yardımıyla elde edilebilir [35].

$$E_1=E_2=E; G_{12}=G$$

$$Q_{11} = \frac{E}{1-\nu^2} \quad , \quad Q_{12} = \frac{\nu E}{1-\nu^2} \quad , \quad Q_{66} = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.31)$$

5. DARBE TESTLERİ

Mühendislik uygulamalarında, farklı malzemelerin üstün özelliklerinin biraraya getirilmesiyle üretilmiş olan kompozit malzemelerin davranışlarının bilinmesi, özellikle mekanik uygulamalarda dışarıdan gelebilecek beklenmeyen darbelere karşı istenmeyen sonuçların meydana gelmemesi için önem taşımaktadır. Malzemelerin kullanıldığı yer ve kullanım amacı önemli olmakla birlikte, malzemeler çok farklı şekillerde darbeye maruz kalabilir. Metal ve metal alaşımlı malzemelerin oluşabilecek darbelere karşı cevabı, öncelikle elastik daha sonra plastik şekil değiştirmeye başlar ve darbe hasarı çoğunlukla çarpma yüzeyinde olduğu anda tespit edilebilir. Darbe hasarı metal malzemelerde genellikle çok kötü sonuçlara sebep olmaz. Çünkü malzemeler elastik şekil değiştirme bölgesinden plastik şekil değiştirme bölgesine geçene kadar çok büyük oranlarda enerji absorbe edebilirler. Sabit gerilme durumunda yapıda sertleşme meydana gelmeden büyük oranda elastik şekil değiştirip akarlar ve sonuçta oluşacak kopmalar ani ve beklenmeyen şekilde olmaz. Kompozit malzemelerde oluşan darbe hasarı darbenin direkt olarak etkilemediği farklı bir yüzeyde meydana gelebilir ve içyapıda delaminasyonlar (tabakalar arası ayrılma) başlayabilir. Yine bu hasar plastik şekil değiştirme sonucunda kopma şeklinde olmasına karşın, kompozit malzemeler değişik modlarda hasara uğrayabilir ve bu hasar çeşitleri parçanın yapısal bütünlüğünde önemli değişiklikler meydana getirmez. Hasarlar gözle görülemeyebilir. Matriks malzemesi olarak plastik malzemenin kullanıldığı durumlarda yapı kırılındı ve darbe enerjisini elastik deformasyon ve matriks ya da fiber kırılması veya delaminasyonlar yardımıyla absorbe eder. Darbe hasarı, kompozit malzemenin yapısının katılığında ve dayanımında gözle görülür bir azalmaya sebep olabilir. Darbe sırasında kompozite aktarılacak enerji, malzemenin aktarılan bu enerjiyi sönümleyebilmesi için oluşacak hasar türlerini belirleyecektir [12].

5.1. Darbe Testlerinin Sınıflandırılması

Darbe testleri, günlük hayatta karşılaşılabileceğimiz çekiçle dövmek, otomobil çarpışmaları, hareket halinde araca sıçrayan taş, kompozit yapılara çeşitli hallerde

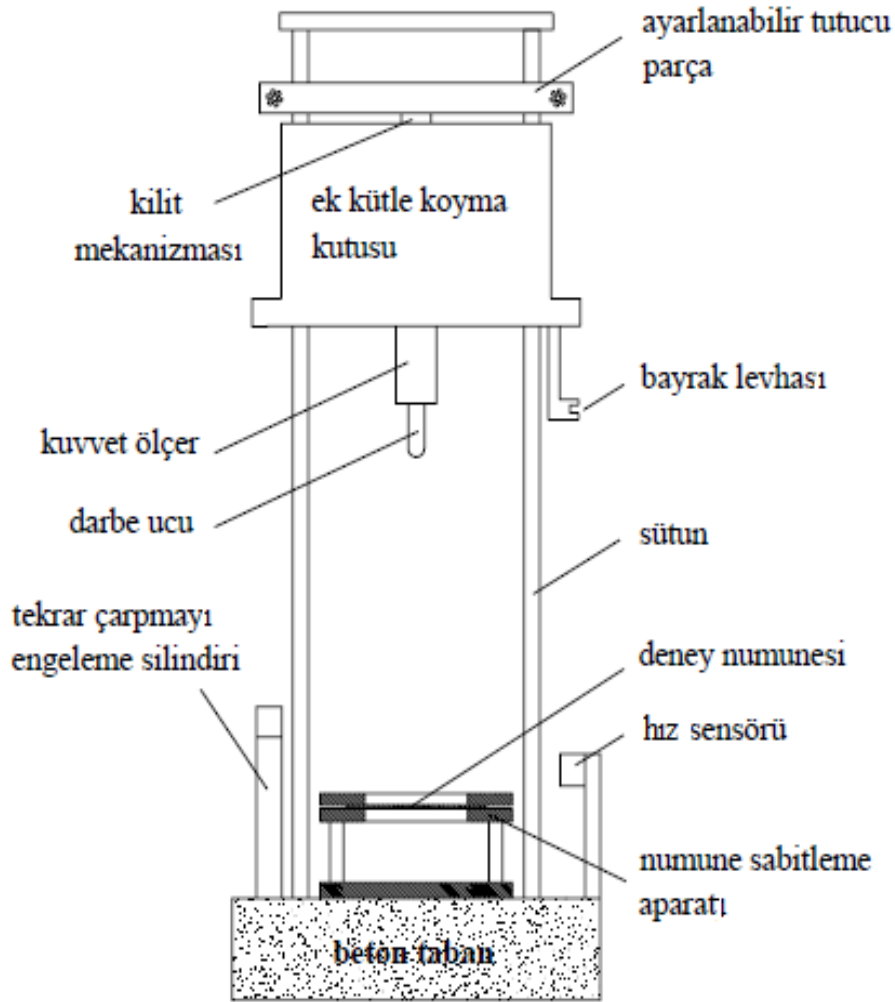
düşürülen aletlerin etkileri şeklinde benzeşim yapılarak oluşturulmaktadır. Darbe testleri malzemelerin hasar tiplerinin belirlenmesinde ve dinamik deformasyonlarının ölçülmesinde kullanılmaktadır. Darbe direnci ile malzeme ömrü ve malzeme güvenliğinin de belirlenmesi sağlanmaktadır [31].

Darbeler arasında net bir geçiş olmamasına rağmen çoğunlukla düşük ve yüksek hızlı olarak sınıflandırılırlar. Genel olarak yapılan çalışmalar düşük hızlı darbeyi malzeme özelliklerine, hedefin rijitliğine ve çarpan cismin kütlesine ve rijitliğine bağlı olarak hızın 1-10 m/sn arasında değiştiği şeklinde tanımlamışlardır. Bu tür darbeye örnek vermek gerekirse, kompozit malzeme üzerine bakım veya imalat aşamasında herhangi bir parçanın düşürülmesi söylenebilir. Düşük hızlı darbeler çarpışmanın gerçekleştiği temas anında malzemenin içyapısında deformasyon meydana getiren; oluşan hasar bakımından matriks kırılması, delaminasyon (tabakalar arası ayrılma) ve fiber kırılmalarının görüldüğü darbelerdir. Bu darbeler düşük enerjili olarak ta tanımlanır. Çarpma hızı ve absorbe edilen enerji düşük düzeylerde olmaktadır. Düşük hızlı darbede malzemenin içyapısında darbeye karşı cevap verebilmek için gereken temas süresi yeterli olmakla birlikte böylece daha fazla enerji elastik bölgede absorbe edilmiş olur. Bu yüzden hedefin dinamik yapısal cevabı büyük önem taşımaktadır. Yüksek hızlı darbeden sonra malzemenin oluşturduğu darbe tepkisinde ise malzeme boyunca yayılan gerilme dalgası hâkimdir ve bu durumda malzemenin darbeye karşı cevap verebilecek yeterli süresi oluşmaz. Çok küçük bir bölgede hasar meydana gelir. Darbe türünün, darbe hız sınırının belirlenmesinin tespiti çalışmalarının yanı sıra darbe sınıflandırılmasının darbe sonucunda oluşan hasara göre yapılması da savunulmaktadır. Bu yönde sınıflandırma yapıldığında hasarları oluşturan darbe testleri genellikle üçe ayrılır. Ağırlık düşürme testi, çentik darbe testleri ve balistik testler [25].

Ağırlık Düşürme Darbe Testi:

Bu yöntem özellikle kompozit malzemelerin darbe testleri için son zamanlarda kullanılan bir yöntem olamaya başlamıştır. Bu test yönteminin tercih edilmesinin en önemli sebebi geniş bir alanda test parametrelerinin tespitinin mümkün olması ve

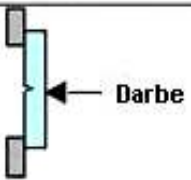
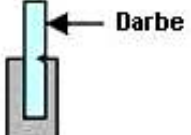
sonuçların çok daha kolay analiz edilebilmesidir. Test için kullanılan cihazların bazılarının yer değiştirme ve ivmeyi ölçme gibi özellikleri de bulunmaktadır. Böylece yük, yer değiştirme ve ivmelenmenin çarpma anındaki değişimi kaydedilebilir ve elde edilen bu veriler darbe yükü-zaman ve darbe enerjisi-zaman değişimlerine dönüştürülebilir. Sonuç olarak en uç noktadaki yük ve malzeme tarafından absorbe edilen enerji malzemede oluşan kırılma işlemiyle ilişkilendirilebilir [30].



Şekil 5.1. Ağırlık düşürme test düzeneği [30]

Çentik Darbe Testleri:

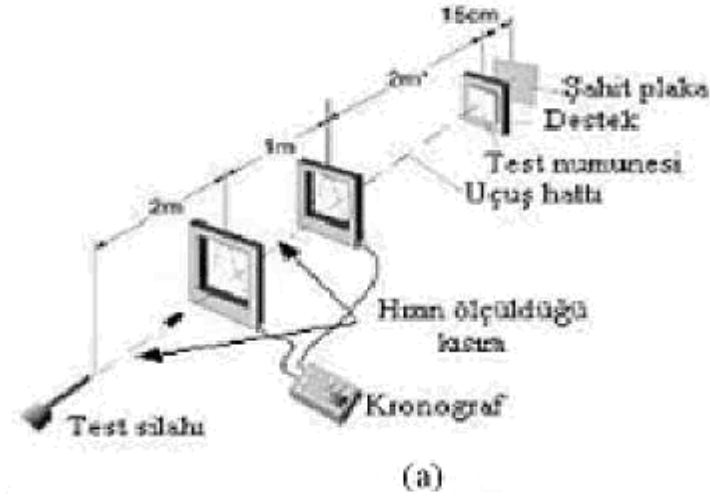
Burada iki yöntem vardır. Bunlar Charpy ve Izod darbe test yöntemleridir. Çentik açılmış olan numuneler standart bir yükseklikten bırakılan sarkaç yardımıyla darbeye maruz bırakılırlar. Darbe uygulandıktan sonra sarkacın çıktığı yükseklik tespit edilir, sarkacın ilk ve son konumdaki enerji farkı numune tarafından absorbe edilen darbe enerjisi olarak ölçülür. Darbeden sonra sarkacın yüksekliği az ise malzemenin absorbe ettiği enerji fazla ve tokluğu yüksektir denilebilir. İki test yöntemi arasındaki fark numunenin desteklenme şekli ve darbenin uygulandığı konumdur.

Yöntem	İsim	Açıklama	Şekil
A	Charpy Darbe Dayanımı	Numune basit mesnetli kiriş şeklinde düzleme sabitlenir.	
B	Izod Darbe Dayanımı	Numune dikey ankastre kiriş şeklinde deney düzeneğine yerleştirilir. Genellikle numunenin ortasında bir çentik açılır.	

Şekil 5.2. Çentik darbe test düzeneği

Balistik Darbe Testleri:

Balistik testlerde çok yüksek hızlar kullanılır. Bu sebeple kompozit malzemeye bu hızla bir cisim çarpıtrabilmek için silah sistemlerinden faydalanılmaktadır.



Şekil 5.3. Balistik test düzeneği [12]

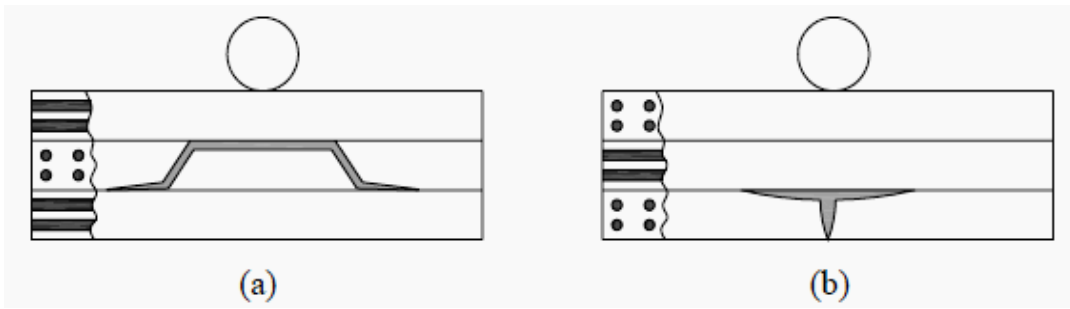
5.2. Darbe Hasarına Etki Eden Parametreler

Kompozit yapılarda hasarın meydana gelmesi genellikle lokal gerilme yığılmaları sebebiyle olur. Meydana gelen hasar, kompozit malzemenin rijitliğini, mukavemetini yani kısacası ömrünü azaltır. Darbe sırasında uygulanan darbe enerjisi malzemenin elastik sınırını aşmazsa hasar gözlenmez. Matriks kırılması, fiber kırılması ve delaminasyon gibi hasar türlerini etkileyen parametrelerden olan vurucu özellikleri; vurucunun elastisite özelliğinin yüksek olması, daha yüksek temas kuvvetinin ortaya çıkması ve vurucu ile kompozit malzeme arasındaki temas alanının azalması demektir. Vurucu kütlesinin değişimi enerji miktarını dolayısıyla darbe hasar miktarının değişimine sebep olacaktır. Kütlesi daha fazla olan vurucunun neden olduğu temas kuvveti ve temas süresi daha fazla olacaktır. Kinetik enerjileri aynı olmasına karşın, kütlesi az yüksek hızlı vurucu ile kütlesi fazla olan düşük hızlı vurucunun oluşturacağı hasar aynı olmayacaktır [19].

5.3. Malzemelerde Darbe Sonucu Oluşan Hasar Türleri

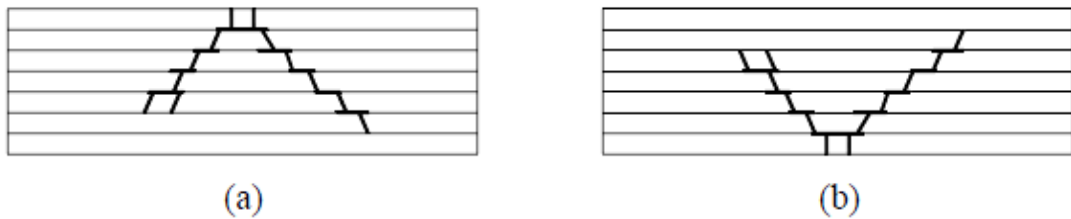
5.3.1. Matriks kırılması

En çok görülen hasar tiplerinden biridir. Matriks kırılması çoğunlukla epoksi gibi gevrek malzemelerde görülür. Matriks malzemesi elyaf malzemeden daha az şekil değişimine sahip olması sebebiyle kırılma öncelikle matrikste başlayacaktır. Matriks kırığı tabakalı kompozitlerde tabak lif yönlenme açılarına bağlıdır. Kırık hasar gören tabakada lif yönlenme açısına paralel olarak yayılır. Literatürde basma ve çekme gerilmelerinin sebep olduğu iki kırılma çeşidi söz konusudur [19].



Şekil 5.4. (a)Kayma gerilmelerinin ve (b)çeki gerilmelerinin neden olduğu matriks kırıkları [19]

Matriks kırılmasının oluşması kompozit malzemenin rijitliğinin azalmasına yol açar. Kalın kompozitlerde matriks kırılması vurucu ucun çarptığı ilk tabakada başlar. Hasar tabakanın en üst katmanından en alt katmana doğru ilerler. İnce kompozitlerde ise plakanın eğilmesi sebebiyle hasar en alt tabakada başlar. Yine hasar busefer ters yönde alt tabakadan üst tabakaya doğrudur [19].



Şekil 5.5. (a) Kalın ve (b) ince plakalar için matriks kırığı hasarının ilerlemesi [19]

5.3.2. Delaminasyon(Tabakalar arası ayrılma)

Delaminasyon hasarı birbirine komşu olan farklı fiber oryantasyonlarına sahip iki tabaka arasında matriks açısından zengin olan bölgede başlayan kırılma sonucunda meydana gelen ayrılmadır [12]. Ayrılma her bir katman arasında bulunan ve tabakalar arasındaki bölgedeki ince matriks malzemesinde meydana gelir [20]. Her tabakada oluşan matriks kırılmaları sonucu tabakalar arasında meydana gelen gerilmeler delaminasyonu tetikler. Delaminasyonla malzemenin yük taşıma kapasitesi ve darbe sonrası bası mukavemetleri azalır [19]. Kompozit malzemede katmanlar arasındaki fiber yönlenmelerindeki farklılıktan dolayı katmanların eğilme rijitlikleri de farklı olmaktadır. Delaminasyonun en önemli sebebi; katmanlardaki eğilme rijitlik farklılığı ve eğilme sonucu oluşan gerilmelerdir. Sonuç olarak malzemenin özellikleri, tabaka kalınlığı gibi faktörler de delaminasyonu etkilemektedir [20].

5.3.3. Fiber kırılması

Genellikle matriks kırılması ve delaminasyondan çok daha sonra meydana gelen ve matriks içerisinde bulunan liflerin kırılmasıdır. Bu kırılma en alt tabaka yüzeyinde görüleceği gibi matriks kırılması neticesinde malzemenin iç katmanlarında da görülebilir. Bu kırılma matriks malzemesi ve fiber ara yüzeyindeki yapışma özelliğinin azalması ile artış gösterir. Malzemenin tamamıyla hasara uğraması tüm fiberlerin kırılmasıyla olur. Darbe sırasında ucun keskin olması, kör uçlu bir vurucuya göre daha fazla fiberin kırılmasına sebep olur. Kompozit malzemede fiber kırılması başladığında tabakaların yük taşıma kapasitesi tamamen bitmemiştir. Çünkü diğer tabakalarda yük taşıyabilecek fiberler halen mevcuttur. Yük taşıma kapasitesi tüm fiberler kırıldığında tamamen biter [19].

5.3.4. Nüfuziyet

Hasarın makroskobik bir modudur ve malzemeye çarpan cismin malzemeye tamamıyla nüfuz etmesine müsaade eden, fiberlerin kritik bir uzama miktarına

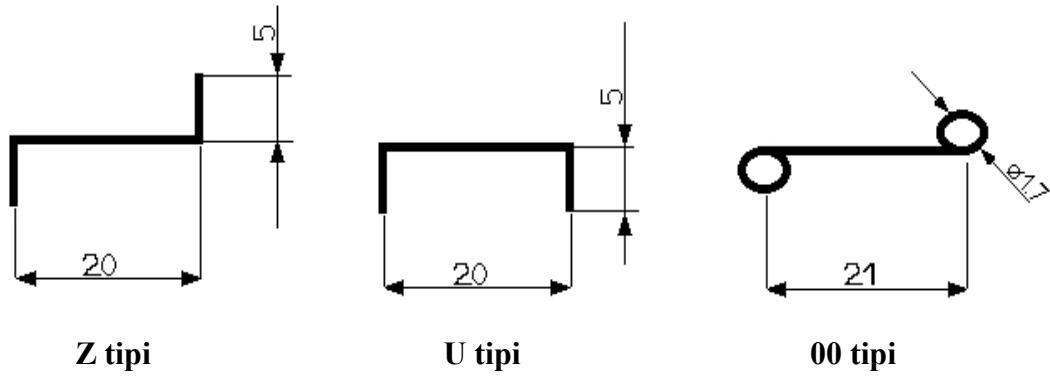
ulaştığı seviyede oluşur. Nüfuziyetin meydana geldiği darbeler esas olarak balistik ve üstündeki hız seviyelerindeki darbeleri oluşturmaktadır. Malzemeyi delmek için gerekli darbe enerjisi eşiği karbon-fiber takviyeli plastik kompozit malzemeler (CFRP) için kalınlığın artmasıyla artmaktadır. Balistik hızda meydana gelen darbelere kompozit malzemedeki nüfuziyetin olduğu bölgeden genellikle çarpan cisim büyüklüğünde bir parça kesilip dışarı çıkmaktadır. Malzemedeki bu şekilde bir parçanın dışarı çıkartılmasıyla absorbe edilen enerji miktarı, toplam absorbe edilen enerji miktarının tabaka kalınlığına bağlı olarak yaklaşık %50-60'ını oluşturur [20].

6 . DENEYSELÇALIŞMALAR

6.1. Test Numunesi, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

6.1.1. Fiber malzemesi

Kullanılan tel çekme mukavemeti ($\sigma_c = 200 \text{ MPa}$), çapı 0,6 mm olan alaşımsız çelik teldir. Teller 30 mm uzunlukta kesildikten sonra % 5'lik aseton ile temizlenmiş, Şekil 6.1.' de gösterilen U, Z ve 00 şekillerinde hazırlanmıştır [2].



Şekil 6.1. 30 mm kesilmiş fiberlerin şekilleri

Tüm karışımlardaki fiber oranı hacimsel olarak %1 dir.

6.1.2. Matriks malzemesi

Matriks malzemesi olarak polyester kalsit karışımı kullanılmıştır. Polyester genel döküm amaçlı kullanılan polyesterdir. Yoğunluğu $1,135 \text{ gr/cm}^3$, çekme dayanımı 90 Mpa, elastik modülü 4000 Mpa, izod darbe dayanımı ise 12 kJ/m^2 dir. Kullanılan kalsit (CaCO_3) genel amaçlı kullanım içindir. Matriks karışımında viskoziteyi arttırmak, homojen dağılım sağlamak ve fiberlerin matriks içerisinde asılı kalabilmeleri sağlamak amacıyla kullanılmıştır [1,6,7,27]. Yoğunluğu $0,785 \text{ gr/cm}^3$ tür. Hacimsel olarak yaklaşık %40 oranında polyestere katılmıştır.

6.1.3. Hızlandırıcı

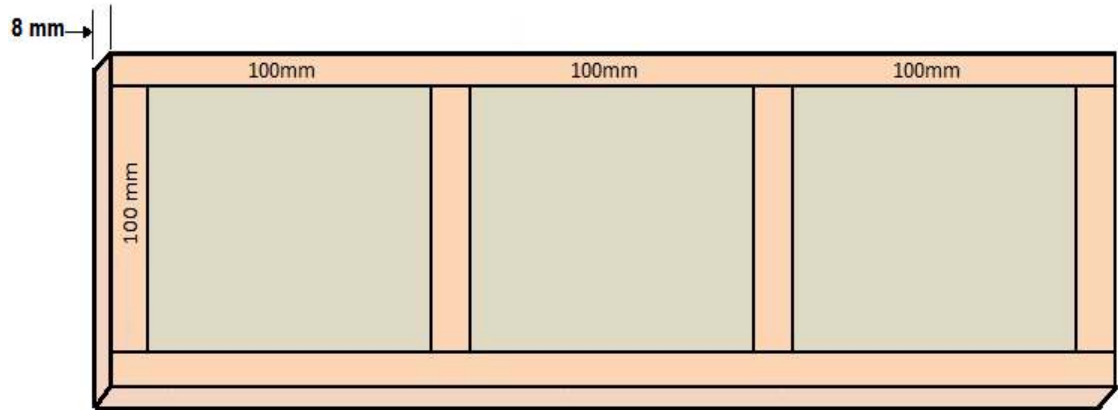
Matriks malzemede kullanılan hızlandırıcı Kobalt esaslıdır ve poliestere ağırlıkça yaklaşık %1 oranında ilave edilmiştir [1,27].

6.1.4. Sertleştirici

Matriks malzemede kullanılan sertleştirici Katalizör Hidrojen Peroksittir ve poliestere ağırlıkça %1,5 oranında ilave edilmiştir [1,27].

6.2. Malzemelerin Döküldüğü Kalıplar

Polietilen levha malzemeden kesilen şeritlerden 100mm X 100mm X 8mm boyutlarında kare kalıplar imal edilmiştir.



Şekil 6.2. Kalıp şekli

6.3. Laboratuvar Şartları

Döküm işlemi 20-25 °C civarında ortam sıcaklığında, tozdan arınmış bir ortamda gerçekleştirilmiştir.

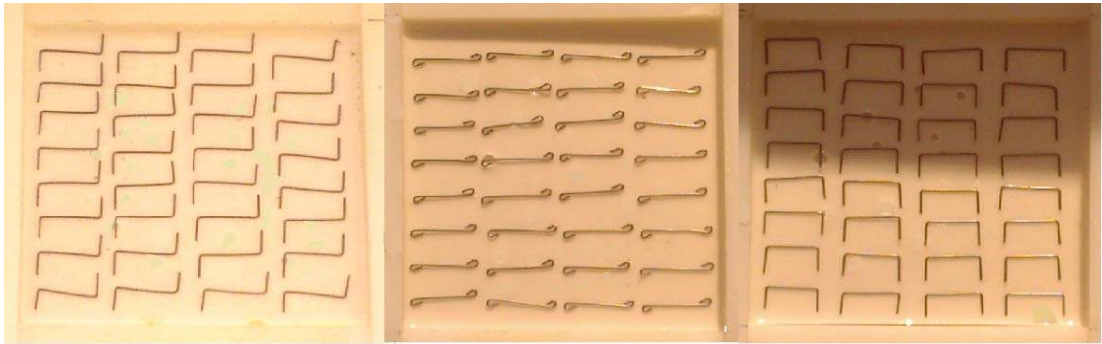
6.4. Darbe Deneyi Numunelerinin Üretilmesi

6.4.1. Fiberlerin imalatı

Şekil 6.1.'de gösterilen fiberler alaşımsız çelik malzemedendir. Çekme dayanımı 200 MPa'dır. Tek tek makasla 30 mm uzunluğunda kesilerek hazırlanan fiberlere pense yardımıyla son şekilleri verilmiştir. Fiberler kuru ve tozdan arındırılmış ortamda döküm yapılına kadar muhafaza edilmiştir.

6.4.2. Matriks karışımının hazırlanması

Toz ve kirden arındırılmış plastik kap içerisine öncelikle belirli miktarda polyester konulmuş ve sırayla ağırlıkça %1,5 oranında sertleştirici daha sonra yine ağırlıkça %1 oranında hızlandırıcı ilave edilmiştir. Tüm malzemeler yavaşça tahta bir çubuk yardımıyla karıştırıldıktan sonra ise içine ağırlık olarak eşit miktarda kalsit konulmuş ve mikser yardımıyla homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmaya devam edilmiştir.



Resim 6.1. Fiberlerin kalıplara dökülen matriks üzerine dizilimi

6.4.3. Döküm yapılması ve numunelerin kalıptan çıkarılması

Elde edilen bu karışım temizlenip tozdan arındırılmış ve numunelerin kalıptan çıkarken deformasyona uğramaması için PVA esaslı kalıp ayırıcı sürülen kalıplara dökülmüştür. Numuneler 3 kat matriks ve 2 kat fiber diziliminden oluşmaktadır. Matriks karışımında oluşan hava kabarcıklarının numuneye geçişini önlemek için sıvı karışım bir süre titreşime maruz bırakılmıştır. Hazırlanmış kalıplara ilk döküm işlemi 8mm kalınlığın yaklaşık 1/3 üne yapılmıştır. Polimerizasyon işlemi başlayıp matriks malzemesi katı bir duruma gelince fiberler (32 adet) dizilmiştir. Daha sonra yine matriks karışımı hazırlanıp dökülmüş, fiber dizilimi ve matriks malzemesinin dökümüyle işlem son bulmuştur. Döküm işleminden sonra en az 24 saat bekletilen numuneler kalıplardan deformasyona uğramadan çıkartılmıştır. Numuneler dokuzar adet olmak üzere fırınlanmaları için temiz ve tozdan arındırılmış naylonlarda bekletilmiştir.

6.5. Numunelerin Fırınlanması

6.5.1 Tav fırını özellikleri

Etüv fırını 0-250 °C ‘de elektrikle çalışan endüksiyon fırınıdır.

6.5.2. Fırınlama sıcaklıkları ve süreleri

Fırınlama tüm numunelere uygulanmıştır. 40 °C, 80 °C, 120 °C sıcaklıklarda numuneler üçerli gruplar şeklinde 8’er saat bekletilmişlerdir.

6.6.Ağırlık Düşürme Testi

6.6.1.Test cihazının özellikleri

Ağırlık düşürme testinde kullanılan cihaz, farklı değerlerdeki hız ve ağırlıklar kullanılarak çeşitli yüksekliklerden ağırlıkların malzeme üzerine düşürülmesiyle

malzemede hasar meydana gelmesine sebep olmaktadır. Bu testten elde edilen veriler malzemenin mekanik özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılır. Bu cihazla ağırlıklar ve yükseklik değiştirilerek çeşitli darbe enerjilerine ulaşılır [28].

Oluşturulan kompozit numunelere uygulanan darbe testlerinde Instron Dynatup 9250 Drop Weight Impact Tester marka cihaz kullanılmıştır.



Resim 6.2. Ağırlık düşürme test cihazı [28]

Cihazın Boyutsal Özellikleri

Yükseklik	:2858 mm
Genişlik	:584 mm
Derinlik	:508 mm

Derinlik (Kapılar açık)	:1334 mm
Altlık Yüksekliği	:559 mm
Ağırlık	:336,5 kg

Instron Dynatup 9250 Drop Weight Impact Tester cihazıyla;

Maksimum Hız: 20m/sn

Enerji aralığı(düşük ağırlıktaki kafa düzenekli): 2,6 J - 826 J

Enerji aralığı(orta ağırlıktaki kafa düzenekli) : 4,6 J - 945 J

Enerji aralığı(fazla ağırlıktaki kafa düzenekli) : 25 J - 1603 J

değer aralıklarındaki ağırlık düşürme testleri yapılabilmektedir [28].

Instron Dynatup 9250 HV ağırlık düşürme test düzeneği geniş bant aralıklı dijital sinyal sistemi, yük ölçer, kuvvet kontrolü ve data toplama programından oluşmaktadır. Geniş uygulama alanlarında kullanılması için farklı darbe enerjileri ve hız değerleri mevcuttur. Numune yerleştirme fikstüründe çeşitli ölçülerdeki parçaları yerleştirebilmek amacıyla destek plakası bulunmaktadır. Deney sırasında parça sıçramalarını önlemek için cihazın ön kısmında kapılar yer almaktadır ve cihazın iç kısmındaki kilitler yardımıyla test esnasında cihaza müdahale önlenir. Acil durumlarda acil durum butonu ile sistem hemen kapatılır. Cihazdaki kapılar sertleştirilmiş camdan üretilmiştir test sırasında numunenin fırlaması söz konusu değildir. Ayrıca kapıların herhangi biri açıldığında cihazın çalışmasını önlemek için kapılar güvenli bir şekilde kilitlenir [28].

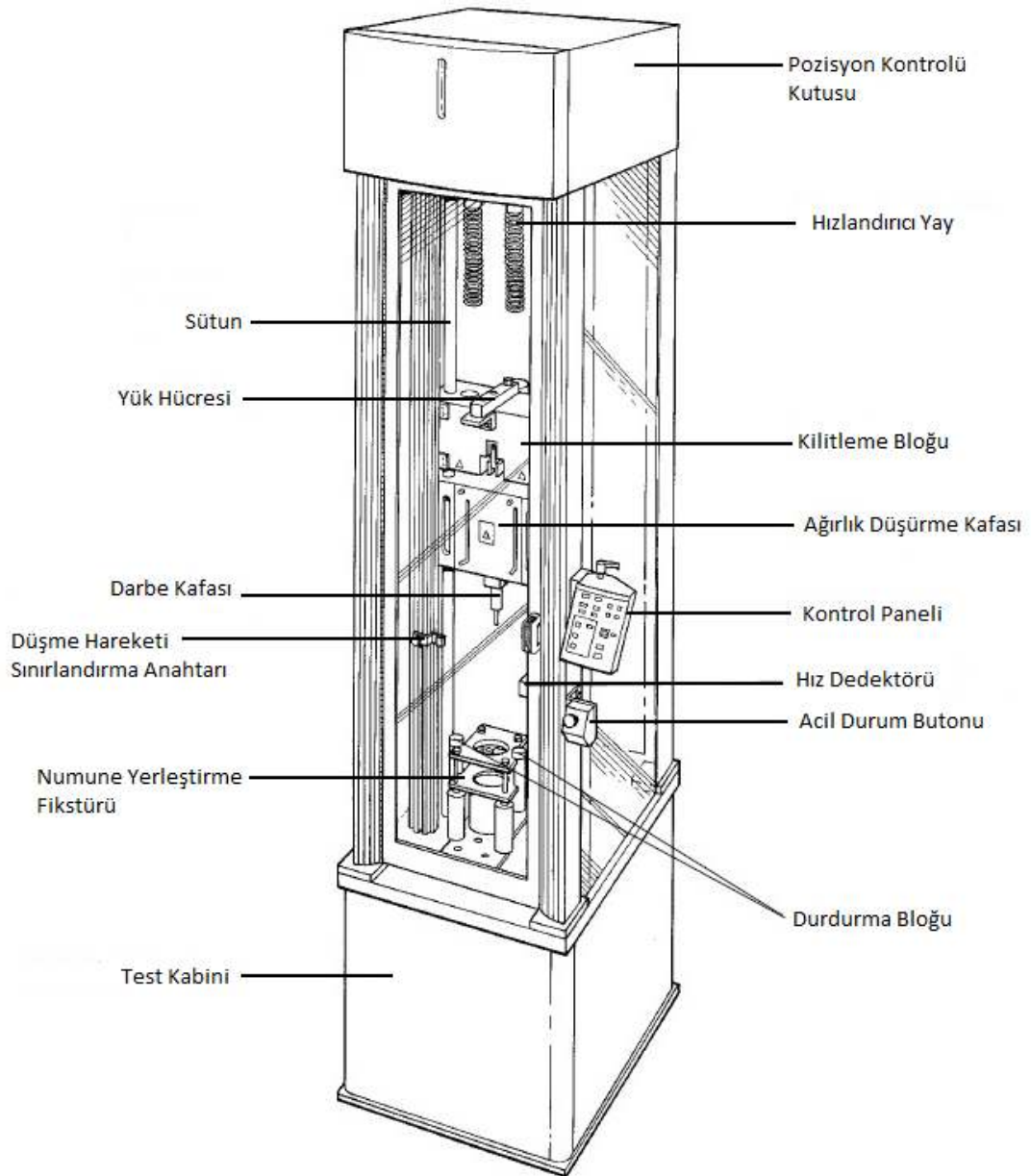
Sistem, güvenliği sağlamak adına testi yapan operatörün fonksiyonunu en aza indirme çalışma prensibi göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Dynatup Instron 9250 HV ağırlık düşürme test cihazı yüksek ve düşük sıcaklıklarda darbe testi yapılmasına izin vermektedir [28].

Dynatup Instron 9250 HV ağırlık düşürme test düzeneğini oluşturan parçalar Resim 6.2’de belirtilmiştir.

- A: Üzerinde hız sensörü bulunan yükseklik sütunu
- B: Üzerinde T kızaklar bulunan alüminyum çerçeve
- C: Yüksekli ayarını sağlayan optik sensör bulunan bölüm
- D: Darbe uçlarının bağlandığı ağırlık düşürme kafa düzeneği
- E: Doğru pozisyon kontrolü sağlayan dijital kapalı döngü pozisyon kontrollü yüksek tork servomotor bölgesi
- F: Uçan parçalardan operatörü koruyan ve test boyunca girişi önleyen polikarbon kapı
- G: Acil durumlarda sistemi kapatmak için acil sistem kapatma butonu
- H: Açılabilme özelliğine sahip arka servis kapısı
- I: Düşen ağırlıkları, test kafasını, darbe ucu ağırlıklarını kapsayan hassas kuvvetölçer
- J: Çevre sıcaklığından daha düşük ve daha yüksek sıcaklıklar için kullanılan bölme
- K: Tekrar çarpmayı engelleme silindiri [28]



Resim 6.3. Ağırlık düşürme deney düzeneği ekipmanları [28]



Şekil 6.3. 9250 HV Düşürme kulesi

Sistemde hava basıncı her zaman gösterilir. Eğer basınç 20 psi (140 kPa)'ın altına düşerse sistem otomatik olarak kapanır, çalışmaz. Eğer aşırı hava basıncı uygulanırsa, fazla basınç relief valfları cihazda kaza eseri oluşacak hasarları önler [28].

Numune cihazın alt kapalı kısmında pnömatik tutucularla tutturularak fikstüre sabitlenmektedir. Kuvvet sensörü vurucu ucun alt kısmına yerleştirilmiş olup

numuneye çarpma anında oluşan kuvvet değerleri bilgisayar yardımı ile okunmaktadır. Darbe test cihazı, uygulanan darbenin başlangıcından sonuna kadar meydana gelen darbeyi kaydeder ve kullanılan yazılım programı aracılığıyla bir grafiğe dönüştürür [28].

Numunelere darbe uygulandığı zaman cihazda mevcut fren sistemi ile ikinci bir darbe engellenir. Bu fren sistemi, kafa düzeneğini yakalamak ve çoklu darbeleri engellemek için kullanılır [28].

Farklı ağırlıklarda da test yapabilmek için kafa düzeneğinde yer alan kütleler değiştirilir [28].



Resim 6.4. Kafa düzeneği

Darbe testinden önce kafa düzeneğine monte edilmiş olan bayrak, hız detektör bloğu boyunca ilerler ve vurucu uç numuneyle temas ettiği andaki darbe hızını ölçer [28].



Resim 6.5. Hız detektörü [28]

Geri sıçrama fren sistemi hız detektör çıktısı tarafında elektronik olarak harekete geçirilir. Bir süre sonra pistonlar, durdurma blok desteklerine ulaşır. Uygun zamanda numuneye gelecek olan ikinci darbeyi engeller ve durdurucu bloklar yukarıya hareket ederler. Durdurucu bloklar, kafa düzeneğine sürgü blokları ile yükseltilene kadar destekler tarafından engellendiği konumda kalır. Daha sonra durdurucu bloklar daha düşük bir pozisyonda sıfırlanacaktır. Model 9250 test cihazında sıfırlama fonksiyonu otomatik olarak ta gerçekleşir [28].



Resim 6.6. Geri sıçrama fren sistemi

Sistem çalışmaya başladığında, durdurucu blok yükseltilmiş pozisyondayken kapıların herhangi biri açık olduğunda sistem darbe testini gerçekleştirmez ve hata olduğuna dair uyarı verir [28].

Şok emiciler durdurucu blok desteklerinin yerine yerleştirilebilir. Ancak bu durumdayken geri sıçrama fren sistemi kapatılmalıdır. Bu sistem şok emicilerle kullanılmak için tasarlanmamış olup, pnömatik olarak yüksek hız modlarında test edildiği zaman kullanılmaz [28].

Darbe testi boyunca numuneleri sıkıştırarak sabit kalmalarını sağlamak için pnömatik test fikstürü kullanılmıştır. Bu fikstür, test cihazı plakasının yukarısında veya sıcaklık ayarının yapıldığı bölmenin içerisinde kullanılabilir. Burada önemli olan konu, fikstürün farklı sıcaklıklarda kullanılmasına karşın fikstür için belirtilen sıcaklık

değerleri dışına çıkılmamasıdır. Aşırı sıcaklıklar fikstür üzerinde büyük hasarlar meydana gelmesine sebep olabilir. Dolayısıyla oda sıcaklığı ve -51°C ve $+60^{\circ}\text{C}$ arasındaki sıcaklık değerleri için düşük sıcaklık, sıkıştırma ve $+3^{\circ}\text{C}$ ve $+177^{\circ}\text{C}$ arasındaki sıcaklık değerleri için ise yüksek sıcaklık sıkıştırma fikstürü tercih edilmelidir [28].

Pnömatik sıkıştırma fikstür ölçüleri:

- 102 mm çapında dairesel numuneler
- 102 mm kare numuneler
- 102 mm x 127 mm dairesel numuneler



Resim 6.7. Test fikstürü

Testte kullanılacak numunenin kalınlığı 25 mm'den küçük olmalıdır. Fikstür kendini numune kalınlıklarındaki değişimler için otomatik olarak dengeler. Sıkıştırma kuvveti, testi yapılan numunenin şekline veya kalınlığına bağlı olmadan testten teste

uyumlu kalır. Farklı çap, şekil ve boyutlarda darbe uçları Resim 6.8.'de gösterilmiştir [28].



Resim 6.8. Faklı darbe uçları [28]

Instron Dynatup 9250 HV test cihazında bulunan çevresel sıcaklık kabini, yüksek ve düşük sıcaklarda malzemenin test edilmesi için ısıtma ya da soğutma işlemi sağlar. Kabindeki sıcaklık mikroişlemci tarafından kontrol edilir. Sıcaklık kabininin dış tarafı soğuk haddelenmiş çelik ile çevrelenmiş, iç tarafı ise paslanmaz çelikten üretilmiştir. Kapı ayarlanabilir mandala sahiptir. Kapıda bulunan silikon conta, kapı kapalı olduğunda sızdırmazlık sağlar. Aynı zamanda kapının açık ve kapalı olduğu durumlarda anahtar algılayıcı özelliğine sahiptir [28].

Sıcaklık kontrolünde, yüksek sıcaklık değerleri için açık bobin ısıtıcısı (open-coil heater) kullanılır. Düşük sıcaklık değerleri ise sıvı azot kullanılarak sağlanır [28].

Aşırı sıcaklarda çevresel sıcaklık kabinini kullanan personel, özellikle numune tutulacağı zaman koruyucu kıyafet, eldiven ve gözlük kullanılmalıdır. Bunun yanı sıra aşırı yüksek ve düşük sıcaklıklarda oluşabilecek yanma tehlikelerinin farkında olmalıdır. Bahsedilen aşırı sıcaklık, işletim sıcaklığı 60°C (140°F) aşması ve 0°C (32°F) altında olan sıcaklık değerleridir [28].

Soğutma tankı ile kabin arasındaki sıvı gaz bağlantısı, gaz besleme vanası kapatılıncaya kadar kesilmemeli ve sistem basıncı ve depolanan basınç sıfıra indirilmelidir [28].

Sıvı azot kullanıldığında kabinin bulunduğu oda iyice havalandırılmalıdır. Azot gazı kapalı ve havalandırılmamış ortamlarda oksijen azlığından boğulma ve ölüme neden olabilir [28].



Resim 6.9. Environmental chamber

Test için kullanılacak numunelere istenilen sıcaklıklarda darbe testi uygulayabilmek için kabinin depolama sıcaklık limitleri -40°C 've $+66^{\circ}\text{C}$ arasında olmalıdır [28].

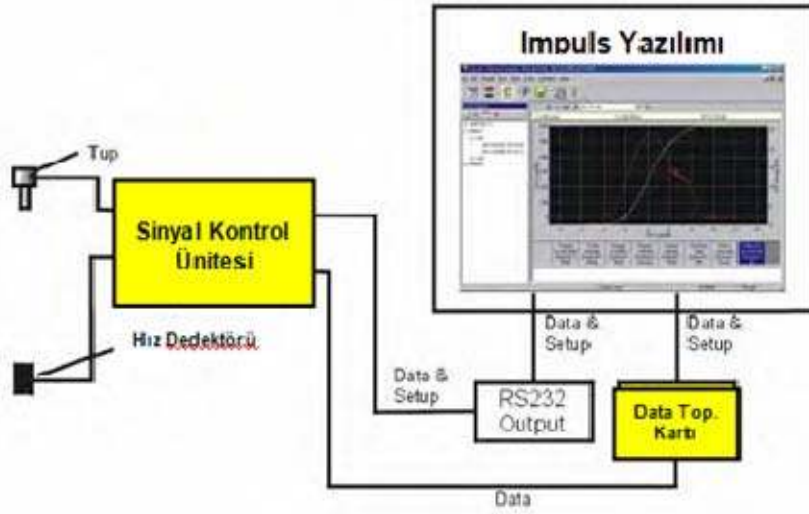
Teste başlamadan önce vurucu darbe ucu, numune kalınlığına göre kontrol panelinde bulunan sıfır pozisyonlama butonu ile sıfır konumuna getirilir [28].



Resim 6.10. Kontrol paneli

Instron Dynatup 9250 HV ağırlık düşürme test cihazında bulunan data toplama sistemi yardımıyla piezo tup ve hız detektöründen alınan veriler sinyal kontrol ünitesine iletilir. Data toplama sistemiyle test analiz sonuçları hem grafiksel hem de sayısal olarak elde edilmektedir. Bu sistem, impuls data toplama yazılımı, data toplama kartı ve sinyal kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Burada bulunan Piezoelektrik sensör, ağırlık düşürme testindeki temas kuvvetini ölçmeye yarayan kuvvet sensörüdür. Sensörden alınan elektronik veriler bilgisayara aktarılarak okunur [28].

Impuls data toplama ve analiz sistemi sayesinde ekipman kontrolü, veri toplama, veri analizi ve veri görüntüleme sağlanarak üretkenlik arttırılır. Bu sistem, impuls data toplama ve analiz programı, impuls alarm durum birimi ve hız detektörünü birleştirmektedir. Impuls alarm durum birimi, yüksek hız performansı elde etmek amacıyla dijital sinyal üretim teknolojisini ve güvenilir data toplama yeteneğini kullanır. Yazılım ise raporlama yapar [28].



Şekil 6.4. Impulse data toplama sistemi [28]

Instron Dynatup 9250 HV ağırlık düşürme test cihazı çalışırken impuls data toplama yazılımı, impuls kontrolör yazılımı ile bağlantılı olarak çalışmaktadır [28].



Resim 6.11. Data kontrolör gösterimi [28]

Cihazdaki impuls data toplama ve analiz yazılımı sistemi sayesinde, yapılan testlerin ölçüm sonuçları enerji-zaman, kuvvet-zaman, kuvvet-yer değiştirme, hız-yer değiştirme, yer değiştirme-zaman, hız-zaman gibi bilgiler grafikler şeklinde elde edilmektedir. Bunun yanı sıra toplam enerji, maksimum kuvvetteki enerji değeri, darbe hızı, toplam yer değiştirme, toplam darbe zamanı, test sıcaklığı gibi bilgileri de içermektedir [28].

6.6.2. Testin yapılması

Instron Dnatup 9250 HV test cihazı ile yapılan testlerde kullanılan darbe vurucu, küresel uçlu bir geometriye sahiptir ve çapı 12,7 mm' dir [28].



Resim 6.12. Darbe vurucu uç

Kullanılan pnömatik sıkıştırma fikstürü 76 mm çapında dairesel fikstürdür [28].



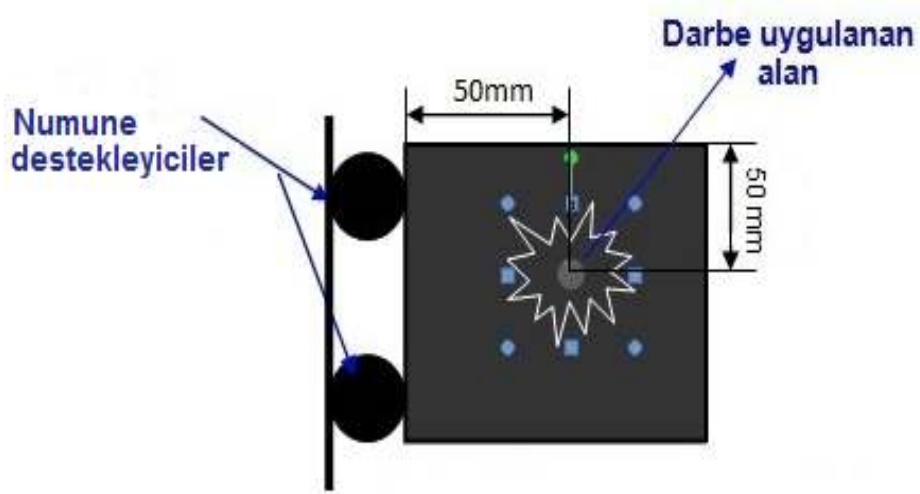
Resim 6.13. Pnömatik test fikstürü [28]

Teste öncesinde yk hücreleri kalibre edilmiş olmalıdır. Numune, pnömatik sıkıştırma fikstrne arkadaki desteklere dayanacak şekilde yerleştirilir. Buradaki amaç uygulanacak olan darbenin numunenin her defasında aynı noktasına gelmesini sağlamaktır. Düşük hızlı darbe uygulama işlemi, oda sıcaklığında test cihazı tablasının yukarısında gerçekleştirilmiştir [28].



Resim 6.14. Numunenin fikstüre yerleşimi

Test esnasında vurucu ucun temas ettiği nokta desteklerden boy 50 mm, genişlik olarak 50 mm' ye tekabül etmektedir [28].

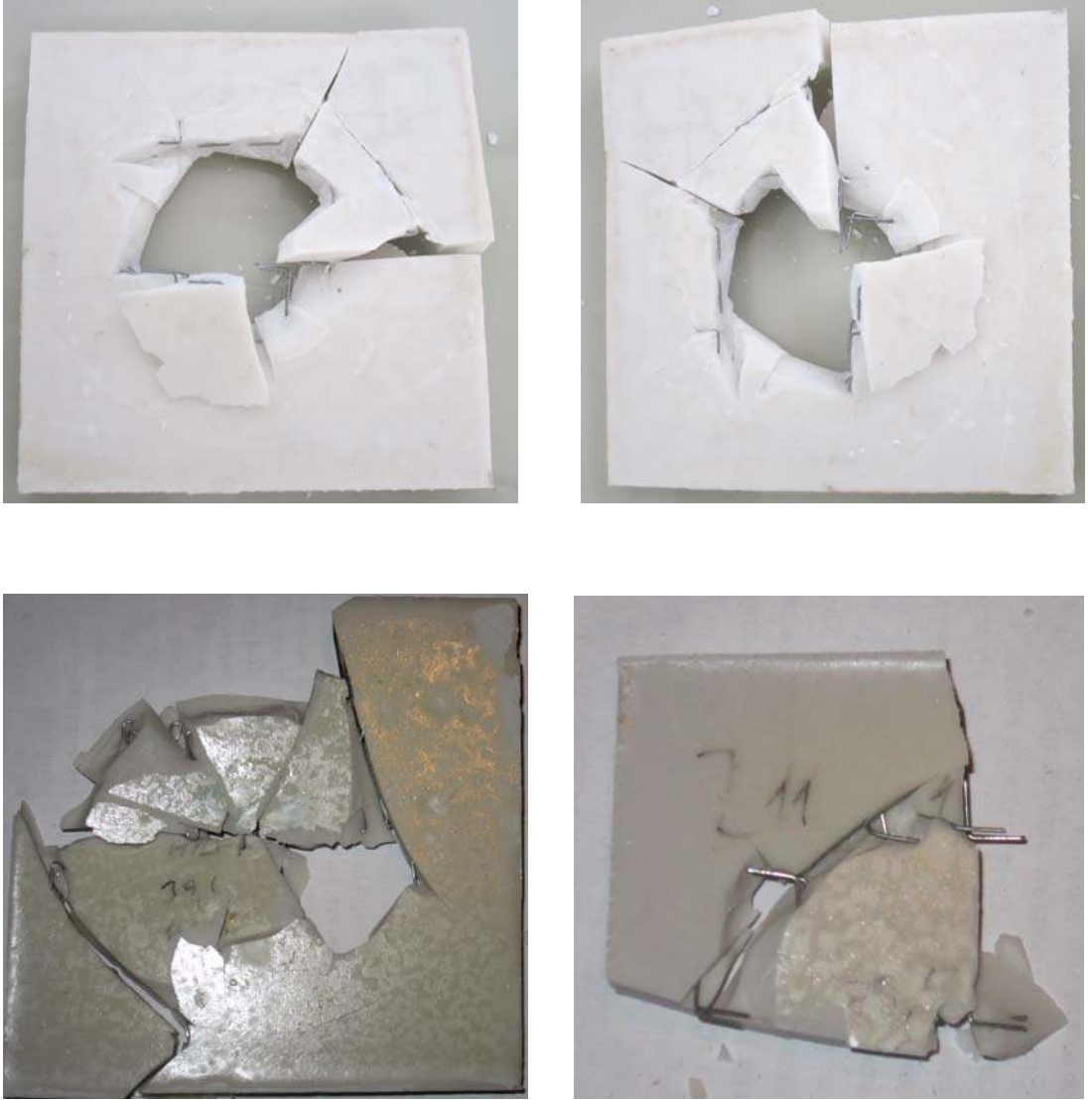


Şekil 6.5. Darbe uygulama noktası [28]

Numune fikstüre yerleştirildikten sonra bilgisayardan impuls data toplama yazılımı ve impuls kontrolör açılır. Vurucu uç numuneye temas ettirilerek, kontrol panelindeki sıfırlama butonuyla sıfır konumuna getirilir. İstenilen darbe enerjisinin uygulanabilmesi için veriler girilir ve cihaz otomatik olarak hesapladığı yüksekliğe ilerler. Hız detektörü yardımıyla dataların kaydedilmesi açısından bayrak ayarı kontrol edilir [28]. Kapılar kapatılır ve darbe uygulanması istenilen enerji miktarı impuls kontrolörde belirtilerek darbe uygulanır. Darbe sonucunda elde edilen impuls data toplama yazılımı aracılığıyla grafiksel ve nümerik olarak kaydedilir [28].

Darbe testi esnasında geri sıçrama fren sistemi aracılığıyla ikinci kez darbe uygulanması engellenmiştir [28].

40°C, 80°C ve 120°C’ de fırınlanmış numunelere yukarıda bahsedilen işlem basamakları uygulanmış ve tüm testler oda sıcaklığında (25°C)’ de yapılmıştır.



Resim 6.15. Oda sıcaklığında darbe uygulanmış numuneler

Çizelge 6.1.'de Instron Dynatup 9250 HV ağırlık düşürme test cihazında testi yapılan numune özellikleri gösterilmiştir. Oda sıcaklığı (25°C) kabul edilmiştir.

Çizelge 6.1. Test numunelerinin özellikleri

Numune Adı	Fiber Dizilimi	Fırınlama Sıcaklıkları	Uygulanan Enerji	Tabaka Sayısı	Kalınlık (mm)
40deg-00-1	00	40°C	25 J	3	8
40deg -00-2	00	40°C	25 J	3	8
40deg -00-3	00	40°C	25 J	3	8
80deg-00-1	00	80°C	25 J	3	8
80deg-00-2	00	80°C	25 J	3	8
80deg-00-3	00	80°C	25 J	3	8
120deg-00-1	00	120°C	25 J	3	8
120deg-00-2	00	120°C	25 J	3	8
120deg-00-3	00	120°C	25 J	3	8
40deg-U-1	U	40°C	25 J	3	8
40deg-U-2	U	40°C	25 J	3	8
40deg-U-3	U	40°C	25 J	3	8
80deg-U-1	U	80°C	25 J	3	8
80deg-U-2	U	80°C	25 J	3	8
80deg-U-3	U	80°C	25 J	3	8
120deg-U-1	U	120°C	25 J	3	8
120deg-U-1	U	120°C	25 J	3	8
120deg-U-1	U	120°C	25 J	3	8
40deg -Z-1	Z	40°C	25 J	3	8
40deg -Z-2	Z	40°C	25 J	3	8
40deg -Z-3	Z	40°C	25 J	3	8
80deg -Z-1	Z	80°C	25 J	3	8
80deg -Z-2	Z	80°C	25 J	3	8
80deg -Z-3	Z	80°C	25 J	3	8
120deg -Z-1	Z	120°C	25 J	3	8
120deg -Z-2	Z	120°C	25 J	3	8
120deg -Z-3	Z	120°C	25 J	3	8

6.7. Sertlik Ölçme Testi

6.7.1. Sertlik kavramı ve tanımı

Sertlik, daha sert bir malzemeye göre kıyaslanan bir malzeme özelliğidir. Bir malzemenin, kendisinden daha sert başka bir malzemenin batmasına, çizmesine yani kalıcı şekil değiştirmesine karşı gösterdiği direnç sertlik olarak tanımlanır [36].

6.7.2. Sertlik ölçme yöntemleri

Malzemelerin sertliğini ölçmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler sırasıyla aşağıda belirtilmiştir [36].

-Statik sertlik ölçme yöntemleri:

- Brinell
- Rockwell
- Vickers

Rockwell Yöntemiyle Sertlik Ölçmek

Koni ya da küre biçiminde bir ucun belli bir yük altında bir malzeme üzerinde oluşturduğu izin derinliğinden yararlanarak ölçülen sertlik değerine Rockwell sertliği denir [36].



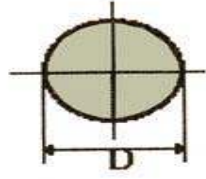
Resim 6.16.Rockwell sertlik ölçüm cihazı

Malzeme Cinsine Göre Batıcı Uçun Şekli ve Uygulama Basıncı

Rockwell sertlik ölçme yönteminde batıcı uç olarak tepe açısı 120^0 olan basık elmas, konik ya da küresel çaplı çelik bilye kullanılır. Kullanılan batıcı uçun türü, yöntemin simgesinde belirtilir. Elmas uç kullanıldığında yöntem HRC ve HRA olarak, çelik bilye kullanıldığında ise HRB ve HRF olarak ifade edilir. Bunlar arasındaki fark deney esnasında uygulanan kuvvet değerleridir [36].



konik uç



küresel uç

Resim 6.17. Malzeme cinsine göre kullanılan uç çeşitleri

Bu çalışmada malzeme sertliği düşük olduğundan numunelere çelik bilye kullanılarak HRF yöntemiyle sertlik ölçümü uygulanmıştır. HRF yönteminde sertlik ölçme ucu bilye çapı 1/16", ön yük 10 kg, toplam yük 60 kg'dır. Aşağıda Çizelge 6.2.'de kompozit numunelerin ölçülen sertlik değerleri görülmektedir.

Çizelge 6.2. Numunelerin Rockwell HRF sertlik ölçüm sonuçları

ÖLÇÜM <i>HRF</i> BİRİMİNDE YAPILMIŞTIR. <i>BİLYE ÇAPI</i> : 1/16" <i>UYGULANAN YÜK</i> : 60KG													
	40°C		80°C		120°C			40°C		80°C		120°C	
001	74,0		74,6		86,1		U1	81,0		76,2		81,9	
	79,5	78,33	81,2	79,53	76,2	82,73		84,3	82,83	83,7	82,2	85,5	85,00
	81,5		82,8		85,9			83,2		86,8		87,6	
002	72,4		70,0		85,7		U2	85,4		85,7		84,3	
	81,5	78,47	73,6	75,47	83,5	85,47		86,3	84,10	86,6	85,5	87,0	85,97
	81,5		82,8		87,2			80,6		84,1		86,6	
003	76,8		84,4		87,4		U3	83,3		81,0		87,9	
	57,5	70,23	81,0	82,80	87,4	88,23		75,8	80,43	82,2	82,0	87,6	87,57
	76,4		83,0		89,9			82,2		82,8		87,2	
004	80,2		67,2		84,4		U4	79,9		83,8		87,9	
	72,2	78,57	79,0	76,40	85,2	86,13		58,6	70,97	84,7	84,7	87,6	87,87
	83,3		83,0		88,8			74,4		85,6		88,1	
005	78,8		83,0		87,7		U5	79,1		83,9		85,7	
	72,9	77,43	65,4	77,97	87,6	86,77		84,4	83,37	85,0	81,9	86,5	86,53
	80,6		85,5		85,0			86,6		76,8		87,4	
006	74,0		87,2		87,6		U6	85,4		85,0		86,5	
	85,9	80,70	87,6	87,63	84,4	86,83		77,5	81,30	86,6	85,3	87,9	86,90
	82,2		88,1		88,5			81,0		84,4		86,3	
007	76,4		83,0		80,8		U7	81,7		86,6		80,8	
	77,3	78,47	85,2	84,93	84,8	84,13		84,3	82,37	86,1	85,7	87,6	85,57
	81,7		86,6		86,8			81,1		84,4		88,3	
008	74,7		86,3		39,4		U8	82,8		76,2		88,5	
	77,9	78,63	85,5	85,00	83,5	70,03		80,1	82,33	84,4	81,9	83,3	81,03
	83,3		83,2		87,2			84,1		85,0		71,3	
009	77,5		86,6		82,4		U9	81,7		85,9		87,4	
	77,7	78,10	85,5	85,87	82,8	83,20		75,8	74,30	83,7	85,1	86,3	86,73
	79,1		85,5		84,4			65,4		85,7		86,5	
Z1	74,7		84,4		84,6		Z5	76,6		86,2		86,3	
	67,2	66,67	80,2	82,10	86,6	86,43		87,4	83,37	80,4	84,7	87,4	87,03
	58,1		81,7		88,1			86,1		87,4		87,4	
Z2	78,4		83,0		86,8		Z6	76,8		84,8		86,1	
	80,6	80,83	85,9	84,80	83,9	84,93		72,9	77,50	83,3	84,8	84,6	86,13
	83,5		85,5		84,1			82,8		86,3		87,7	
Z3	84,6		81,3		85,4		Z7	83,2		75,7		87,2	
	86,1	84,63	52,8	72,43	82,4	85,07		80,1	81,90	78,2	79,9	85,7	86,10
	83,2		83,2		87,4			82,4		85,9		85,4	
Z4	74,9		76,6		84,3		Z8	80,6		82,1		87,2	
	83,0	79,73	83,7	82,00	85,0	84,93		79,9	80,43	83,0	82,6	87,4	87,77
	81,3		85,7		85,5			80,8		82,6		88,7	

Polyester-kalsit matriks malzemeli alaşımsız elik fiberlerle güçlendirilmiş kompozit numunelerin sertlikleri Rockwell lm cihazında HRF yöntemiyle ölçülmüştür. Çizelge 6.2.’deki sonuçlar incelendiğinde değerlerin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Bu durumda kompozit numunelerin farklı sıcaklıklarda fırınlanmasının sertlik üzerinde bir etkisi olmadığı saptanmıştır. Numunelerin fırınlanma sıcaklıkları arttıkça sertliklerinde gözle görülür bir farklılık olmamıştır.

7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

7.1. DeneySEL Sonuçlar

7.1.1. Ağırlık düşürme deneyi testi sonuçları

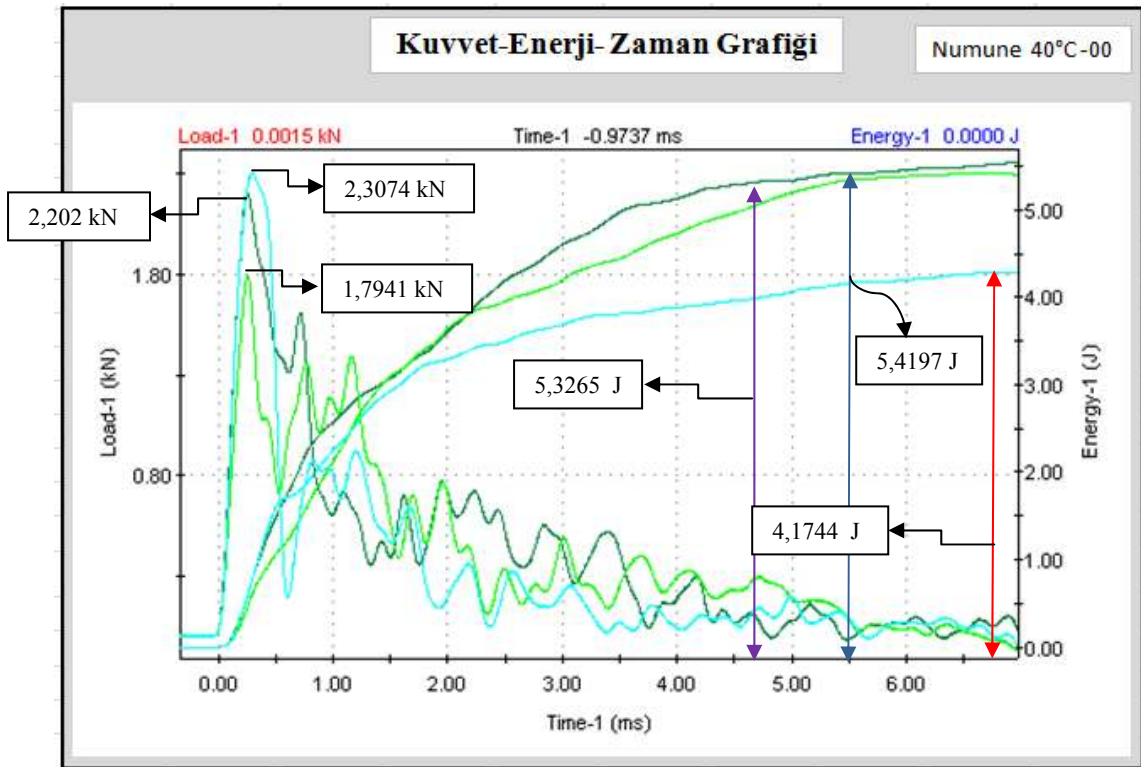
Darbe enerjisi ve absorbe edilen enerji kompozit plakaların darbe davranışlarının belirlenmesinde önemli parametrelerden ikisidir. Darbe enerjisi numuneye uygulanan darbe sırasında vurucudan numuneye aktarılan enerjidir. Vurucunun istenilen yüksekliğe getirilmesiyle kazanılmış potansiyel enerji yardımıyla darbe uygulanmasıdır. Absorbe edilen enerji miktarı ise darbe sonucunda numune tarafından absorbe edilen tüm enerji miktarıdır. Burada absorbe edilen enerji darbe sonucu test cihazı yazılımı tarafından hesaplanmış olan enerji değeridir [21]. Düşük enerjili darbe testi, polyester-kalsit matriks malzemesinden oluşmuş ve değişik uç geometrilerine sahip alaşımsız çelik fiberlerle güçlendirilmiş kompozit numunelere darbe uygulanması sonucunda meydana gelen hasar mekanizmalarının ve numunelerin absorbe ettiği enerji seviyelerinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Bu çalışmada sadece ilk darbenin etkileri incelenmiş ve darbe uygulanmasından sonra oluşacak ikinci darbe etkisi için vurucu uç frenleme sistemi tarafından engellenmiştir. Gerçekleştirilen denemelerde örnek numunelere yaklaşık olarak 2 m/s çarpma hızında ve oda sıcaklığında (25°C)'de 25 J enerjiyle darbe uygulanmıştır. Daha önceden sekizer saat fırınlanmış numunelere ayrıca bir soğutma ya da ısıtma işlemi yapılmamıştır. Numunenin darbeye maruz kalmasıyla vurucu uç numune yüzeyinden geri sekebilir, numuneye saplanabilir ya da numuneyi delip geçebilir [21]. Sonuç olarak deneyin devamında seçilen bu 25 J enerji değeri tüm numunelere uygulanmış ve 4-12 J enerji seviyelerinde vurucu ucun numuneyi delip geçtiği yani kompozit plakaların tamamıyla kırıldığı gözlenmiştir.

İmpuls data toplama sistemi yardımıyla kuvvet-enerji-zaman grafikleri elde edilmiş olup grafiklerin altında bulunan tablolarda ise değerler nümerik olarak yer almaktadır.

- Peak Load : Malzemeye uygulanan darbe sonucu ölçülen maksimum kuvvet (kN)
- Total Enerji : Numune tarafından absorbe edilen enerji değerini gösterir.
- Impact Velocity : Vurucu ucun numuneye darbe uyguladığı hız (m/s)
- Total Time : Toplam zaman (ms)

40°C’de fırınlanmış numunelerin ağırlık düşürme test sonuçları

40°C’de fırınlanmış numuneler 8 mm kalınlıktadır ve üç farklı tip 00,u,z alaşımsız çelik fiberle güçlendirilerek ayrı ayrı oluşturulmuşlardır. Numunelere 25 J enerji uygulanmıştır. Sonuçta numunelerin 4-8 J enerji seviye aralığında tamamen kırıldığı gözlenmiştir. Numunelerin kırılma sonucunda absorbe ettikleri enerjiler kuvvet-enerji-zaman grafiklerinde görülmektedir.



Şekil 7.1. 40°C’de fırınlanmış 00 tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen kuvvet-enerji-zaman grafiği

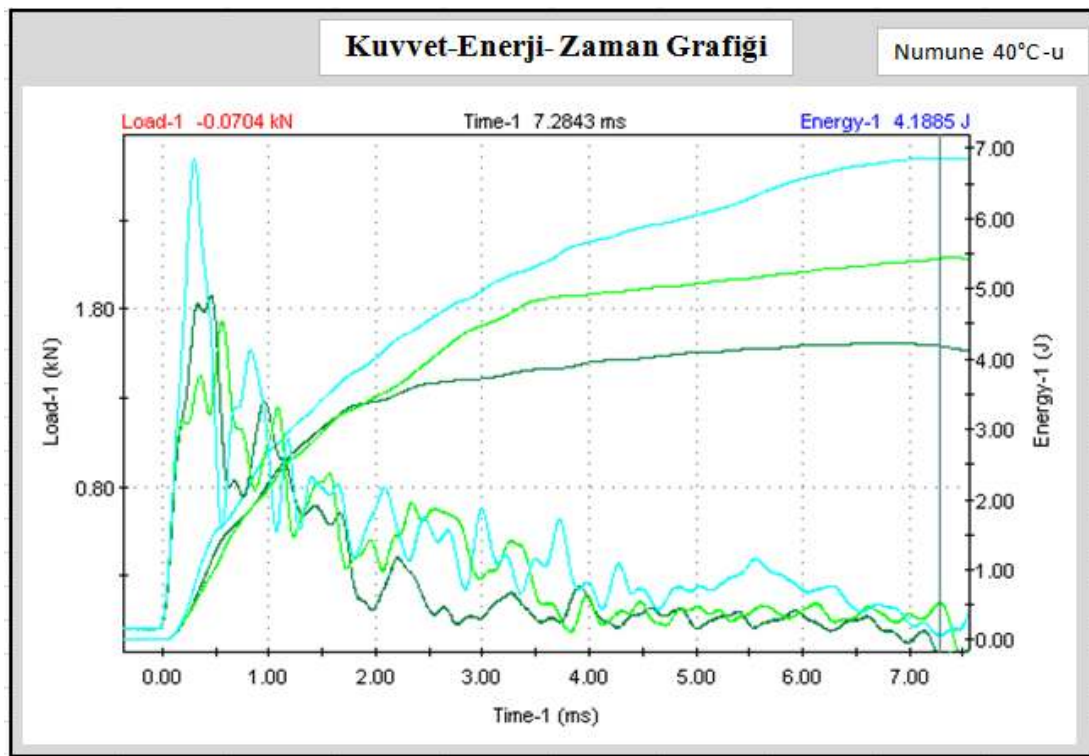
Bu numuneler için impuls data toplama tablosundan elde edilen değerler Çizelge 7.1. 'de gösterilmiştir:

Çizelge 7.1. 40°C'de fırınlanmış 00 tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler

Test no	Peak Load-1 (kN)	Deflection at Peak Load-1 (mm)	Energy to max load-1 (J)	Total energy-1 (J)	Impact velocity-1 (m/s)	Total time-1 (ms)
1	2.2020	0.5058	0.5848	5.3265	1.9753	4.7974
2	1.7941	0.5132	0.4664	5.4197	1.9735	6.6467
3	2.3074	0.5911	0.7673	4.1744	1.9752	5.6213
Average	2.1012	0.5367	0.6062	4.9735	1.9747	5.6885

Şekil 7.1.'deki kuvvet-enerji-zaman grafiği incelendiğinde burada 40°C'de fırınlanmış 00 tipi fiberle güçlendirilmiş 3 tane farklı numuneye ayrı ayrı darbe uygulanması sonucunda numunelerin kırılması anında oluşan max kuvvetler ve absorbe edilen toplam enerji değerleri görülmektedir. Numunelerin vurucu tarafından delinmesiyle meydana gelen kuvvet eğrileri açık tip eğrilerdir [21]. Çalışmamızda numunelerde kırılma meydana geldiğinden dolayı grafiklerde açık tip eğriler görülmektedir. Grafik incelendiğinde kırılma anına gelene kadar kuvvette ani bir artma, daha sonra ise yavaş bir azalma meydana gelmektedir. Tüm grafiklerde darbe başlangıcında bir salınım meydana gelmiştir. Bu salınım numunenin merkezi üzerinde hasar mekanizması oluştuğunu göstermektedir. Ayrıca darbe başlangıcında kompozit plakada oluşan titreşim sonucunda kuvvet sensörü üzerinde bir normal kuvvet oluştuğu ve bunun sonucunda darbe başlangıcında salınım meydana geldiği öngörülmektedir [26]. Maksimum kuvvet noktasından sonra görülen salınımlar kırılmaların kompozit levhalar içerisinde yayıldığını göstermektedir. Kuvvet değeri maksimum seviyeye ulaşıncaya kadar hasar oluşumunun devam ettiği düşünülmekte ve salınım miktarı arttıkça oluşan hasar miktarı da artmaktadır. Daha sonra kuvvet değeri sıfıra düşmektedir. 40°C'de fırınlanmış 00 tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin maksimum kuvvet değerleri Çizelge 7.1.'de görülmektedir. Bu üç numune için maksimum kuvvet değerlerine 2 m/s hızda ulaşılmış ve bu değerler 2,2020 kN, 1,7941 kN ve 2,3074 kN olarak ölçülmüştür.

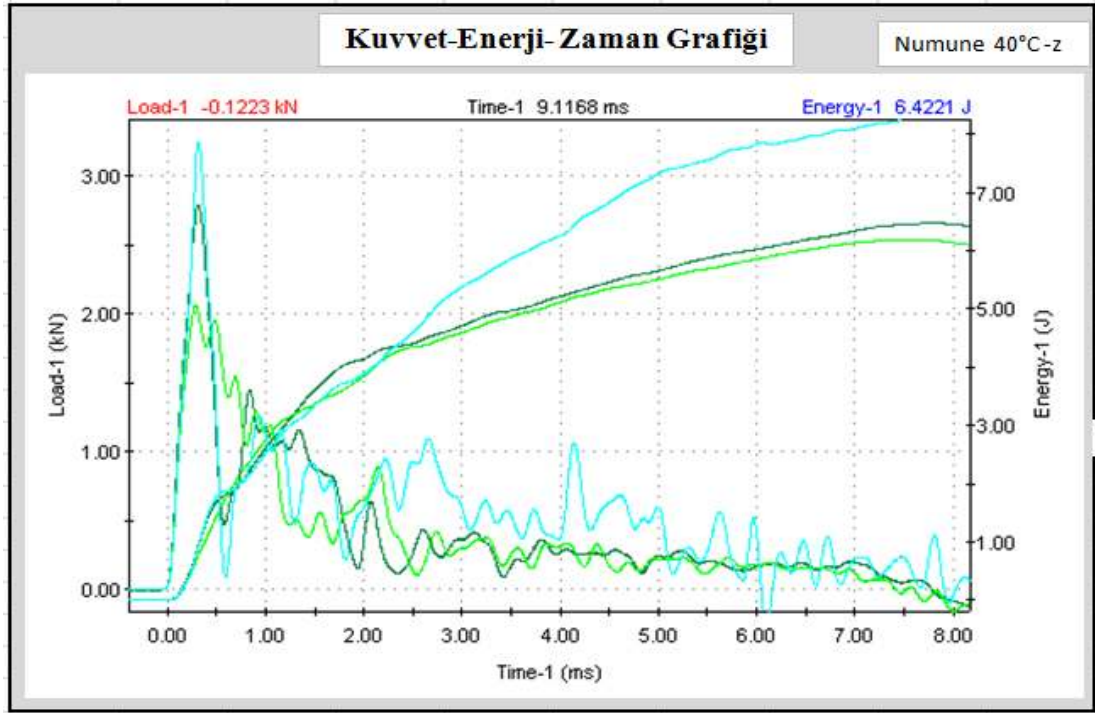
Düşük hızlı darbe kompozit plakalarda iki şekilde depolanır. Rebond (geri sekme) elastik enerji darbe ucunun geri dönmesine sebep olur, kalan enerji ise malzeme tarafından absorbe edilerek hasara uğramasına sebep olan plastik enerjiyi simgeler [24]. Grafikte numuneler tarafından absorbe edilen enerji miktarları incelendiğinde numunelerin elastik sınırı geçtiği, rebond meydana gelmediği ve tüm enerjinin absorbe edilerek tam penetrasyonun olduğu görülmektedir. Bu enerji değerleri ise 5,3265 J, 5,4197 J ve 4,1744 J olarak ölçülmüştür.



Şekil 7.2. 40°C’de fırınlanmış U tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen kuvvet-enerji-zaman grafiği

Çizelge 7.2. 40°C’de fırınlanmış U tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler

	Peak Load-1 (kN)	Deflection at Peak Load-1 (mm)	Energy to max load-1 (J)	Total energy-1 (J)	Impact velocity-1 (m/s)	Total time-1 (ms)
	1.8768	0.9066	1.0875	4.0898	1.9765	5.0110
	1.7320	1.1217	1.2241	4.8925	1.9754	3.7842
	2.6484	0.6035	0.7514	6.8479	1.9751	7.2021
	2.0857	0.8773	1.0210	5.2767	1.9756	5.3324



Şekil 7.3. 40°C’de fırınlanmış Z tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen kuvvet-enerji-zaman grafiği

Çizelge 7.3. 40°C’de fırınlanmış Z tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler

Test no	Peak Load-1 (kN)	Deflection at Peak Load-1 (mm)	Energy to max load-1 (J)	Total energy-1 (J)	Impact velocity-1 (m/s)	Total time-1 (ms)
1	2.7952	0.6322	0.9285	6.4735	1.9746	7.7881
2	2.0660	0.5784	0.6544	6.1882	1.9740	7.4158
3	3.2492	0.6377	0.9420	7.8522	1.9714	6.0516
Average	2.7035	0.6161	0.8417	6.8380	1.9733	7.0852

Darbe sırasında belirli bir anda temas kuvvetinin yaptığı iş her iki cismin hızının sıfır değerine ulaşmasını sağlar. Sonuç olarak sıkışma sırasında biriktirilen enerji iki cismi birbirlerinden ayırmaya zorlar ve cisimler birbirlerinden belli bir izafi hızla ayrılırlar. Uygulanan darbeye çarpışma boyunca etki eden temas kuvveti, vurucu uç ve numune yüzeyleri arasında bir temas alanı oluşturması için gerekli yerel deformasyonların bir sonucudur [28].

$F_{\max \text{ ort.}}(\text{kN})$:Numunelerde penetrasyon durumu için oluşan max kuvvet ortalaması

$E_{\text{ absorbe ort.}}(\text{J})$:N umunelerde penetrasyon durumu için oluşan max enerji ortalaması

$t_{\text{ total ort.}}(\text{ms})$:Numunelerde penetrasyon durumu için oluşan max zaman ortalaması

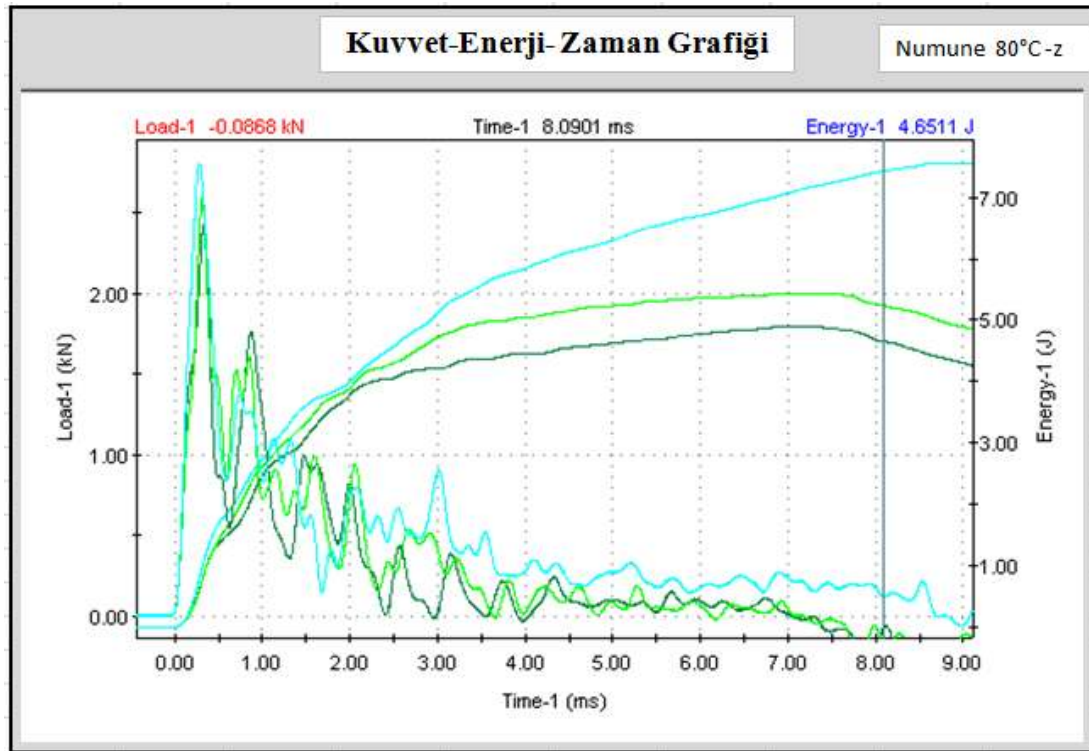
Çizelge 7.4. 40°C’de fırınlanmış numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler

<i>Numune Adı</i>	<i>Uygulanan Enerji</i>	<i>Tabaka Sayısı</i>	<i>Kalınlık (mm)</i>	<i>Fmax ort. (kN)</i>	<i>E absorbe ort. (J)</i>	<i>t total ort. (ms)</i>
40deg-00	25 J	3	8	2,1012	4,9735	5,6885
40deg -U	25 J	3	8	2,0857	5,2767	5,3324
40deg -Z	25 J	3	8	2,7035	6,838	7,0852

Değişik uç geometrilerine sahip fiberle güçlendirilmiş ve 40°C’de fırınlanmış numunelerin absorbe ettikleri enerji değerleri fiberler açısından kıyaslandığında Çizelge 7.4.’teki enerjiler incelenirse, Z tipi fiberlerle güçlendirilmiş numunelerin 6,8380 J ortalama değerle en fazla enerji absorbe ettikleri söylenebilir. Yine maksimum kuvvet değeri de ortalama olarak 2,7035 kN ile en yüksek değerdedir. Z tipi fiberler bu durumda 40°C’de fırınlanmış numuneler için aynı darbe enerjisi değerinde kompozit malzemenin mukavemetini en çok arttıran fiber şeklidir.

80 °C’de fırınlanmış numunelerin ağırlık düşürme test sonuçları

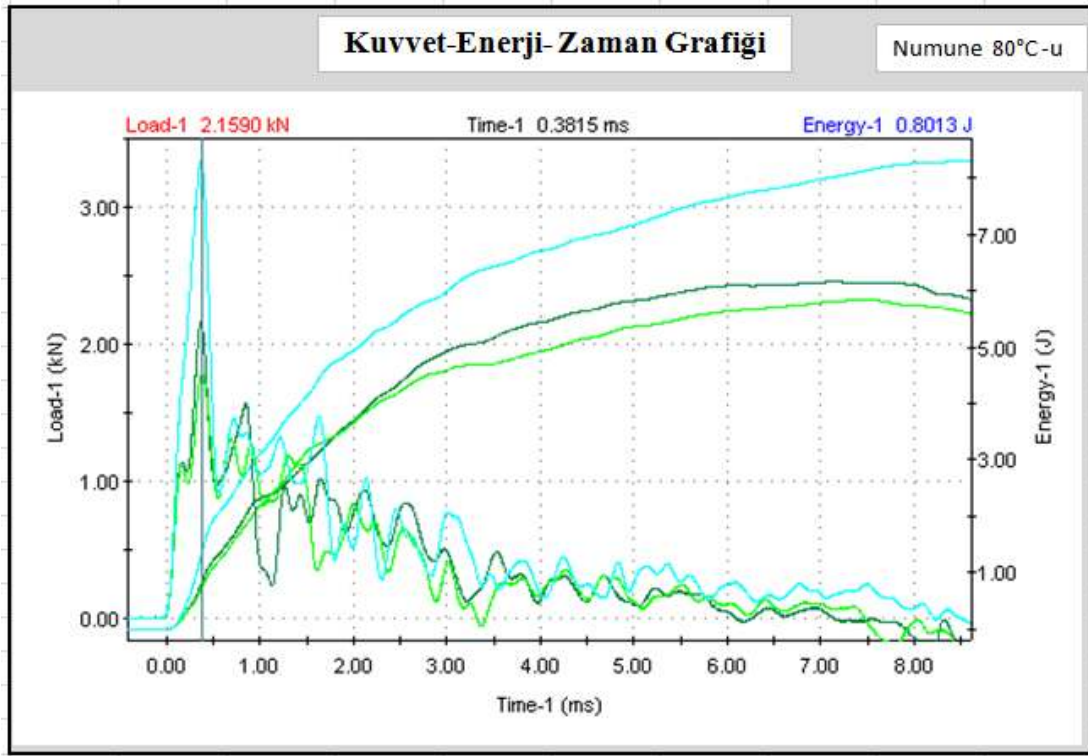
80°C’de fırınlanmış numuneler 8 mm kalınlıktadır ve üç farklı tip 00, U, Z tipi alaşımsız çelik fiberle ayrı ayrı güçlendirilerek oluşturulmuşlardır. Numunelere 25 J enerji uygulanmıştır. Sonuçta numunelerin 6-10 J enerji seviye aralığında tamamen kırıldığı gözlenmiştir. Numunelerin kırılma sonucunda absorbe ettikleri enerjiler kuvvet-enerji-zaman grafiklerinde görülmektedir.



Şekil 7.4. 80°C’de fırınlanmış Z tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen kuvvet-enerji-zaman grafiği

Çizelge 7.5. 80°C’de fırınlanmış Z tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler

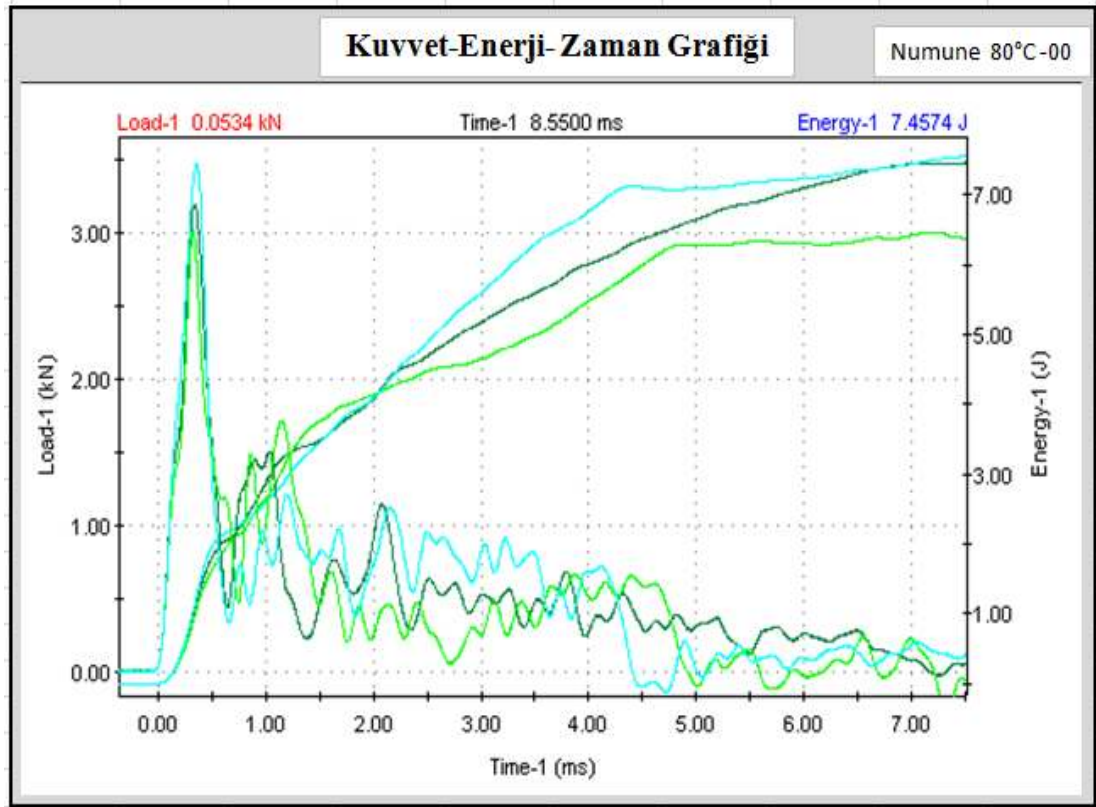
Test no	Peak Load-1 (kN)	Deflection at Peak Load-1 (mm)	Energy to max load-1 (J)	Total energy-1 (J)	Impact velocity-1 (m/s)	Total time-1 (ms)
1	2.4200	0.6635	0.8350	4.2061	1.9739	2.9297
2	2.5949	0.6268	0.7470	4.9778	1.9724	3.6285
3	2.8085	0.5527	0.7730	7.5618	1.9767	8.6823
Average	2.6078	0.6143	0.7850	5.5819	1.9743	5.0802



Şekil 7.5. 80°C’de fırınlanmış U tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen kuvvet-enerji-zaman grafiği

Çizelge 7.6. 80°C’de fırınlanmış U tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler

Test no	Peak Load-1 (kN)	Deflection at Peak Load-1 (mm)	Energy to max load-1 (J)	Total energy-1 (J)	Impact velocity-1 (m/s)	Total time-1 (ms)
1	2.1636	0.7433	0.7883	6.0912	1.9764	6.0913
2	1.7855	0.7666	0.7406	4.6926	1.9723	3.3234
3	3.3365	0.7377	1.2829	8.2839	1.9746	8.2062
Average	2.4285	0.7492	0.9373	6.3559	1.9744	5.8736



Şekil 7.6. 80°C’de fırınlanmış 00 tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen kuvvet-enerji-zaman grafiği

Çizelge 7.7. 80°C’de fırınlanmış 00 tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler

Test no	Peak Load-1 (kN)	Deflection at Peak Load-1 (mm)	Energy to max load-1 (J)	Total energy-1 (J)	Impact velocity-1 (m/s)	Total time-1 (ms)
1	3.1882	0.6866	1.0402	7.4485	1.9756	7.1564
2	3.0102	0.6565	0.8854	6.2890	1.9744	4.9164
3	3.4753	0.7146	1.2297	7.1206	1.9732	4.4067
Average	3.2246	0.6859	1.0518	6.9527	1.9744	5.4932

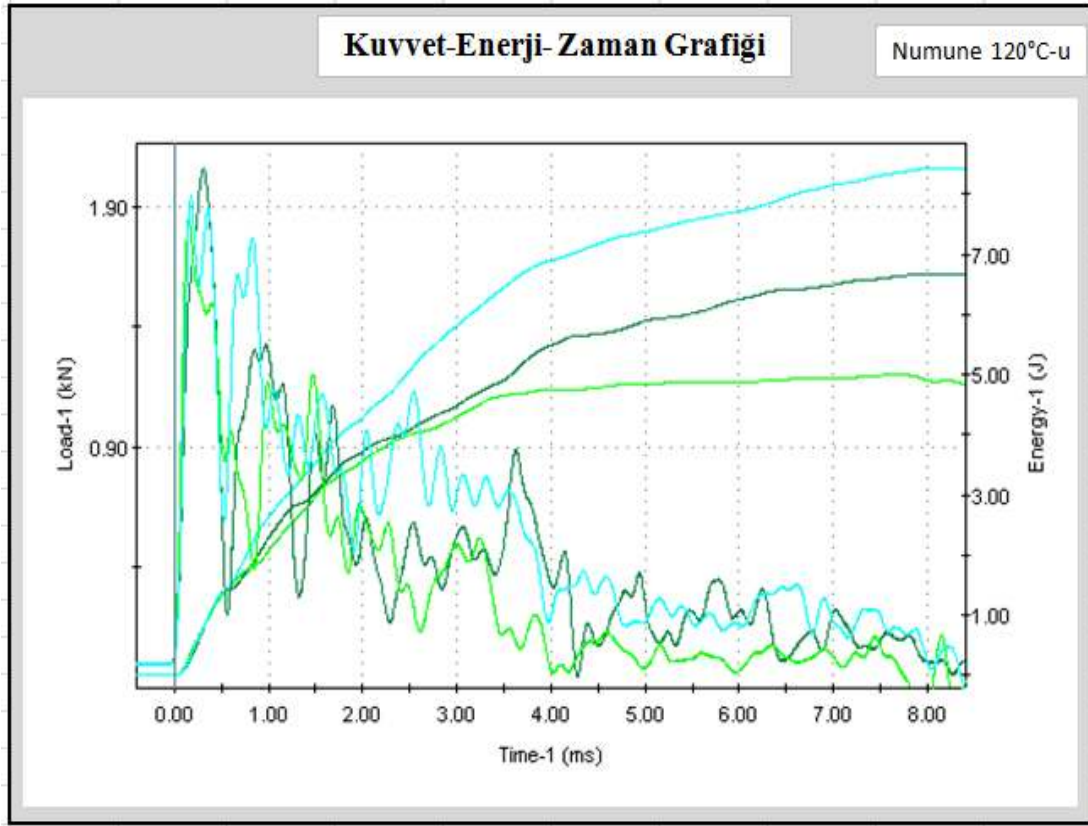
Çizelge 7.8. 80°C’de fırınlanmış numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler

<i>Numune Adı</i>	<i>Uygulanan Enerji</i>	<i>Tabaka Sayısı</i>	<i>Kalınlık (mm)</i>	<i>Fmax ort. (kN)</i>	<i>E absorbe ort. (J)</i>	<i>t total ort. (ms)</i>
80deg-Z	25 J	3	8	2,6078	5,5819	5,0802
80deg-U	25 J	3	8	2,4285	6,3559	5,8736
80deg-00	25 J	3	8	3,2246	6,9527	5,4932

Değişik uç geometrilerine sahip fiberle güçlendirilmiş ve 80°C’de fırınlanmış numunelerin absorbe ettikleri enerji değerleri fiberler açısından kıyaslandığında Çizelge 7.8.’deki enerjiler incelenirse, 00 tipi fiberlerle güçlendirilmiş numunelerin 6,9527 J ortalama değerle en fazla enerji absorbe ettikleri söylenebilir. Yine maksimum kuvvet değeri de ortalama olarak 3,2246 kN ile en yüksek değerdedir. 00 tipi fiberler bu durumda 80°C’de fırınlanmış numuneler için aynı darbe enerjisi değerinde kompozit malzemenin mukavemetini en çok arttıran fiber şeklidir.

120 °C’de fırınlanmış numunelerin ağırlık düşürme test sonuçları

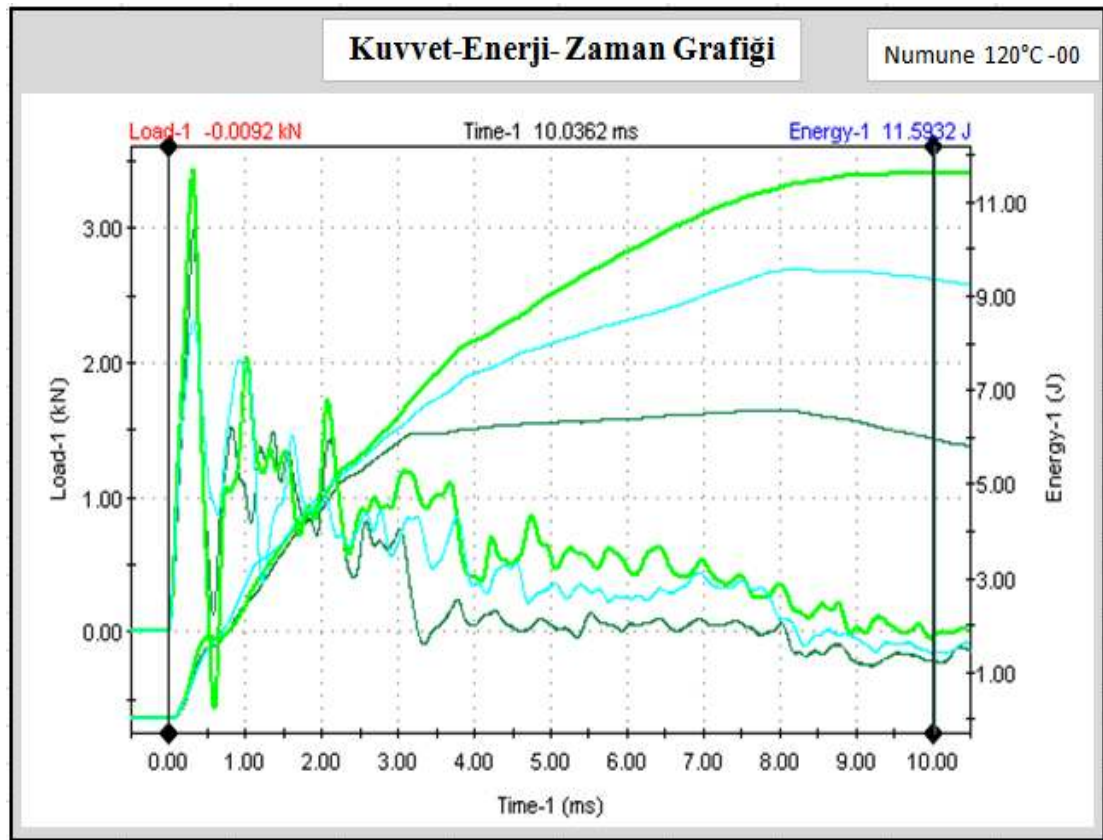
120°C’de fırınlanmış numuneler 8 mm kalınlıktadır ve üç farklı tip 00,u,z alaşımsız çelik fiberle ayrı ayrı güçlendirilerek oluşturulmuşlardır. Numunelere 25 J enerji uygulanmıştır. Sonuçta numunelerin 8-12 J enerji seviye aralığında tamamen kırıldığı gözlenmiştir. Numunelerin kırılma sonucunda absorbe ettikleri enerjiler kuvvet-enerji-zaman grafiklerinde görülmektedir.



Şekil 7.7. 120°C’de fırınlanmış U tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen kuvvet-enerji-zaman grafiği

Çizelge 7.9. 120°C’de fırınlanmış U tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler

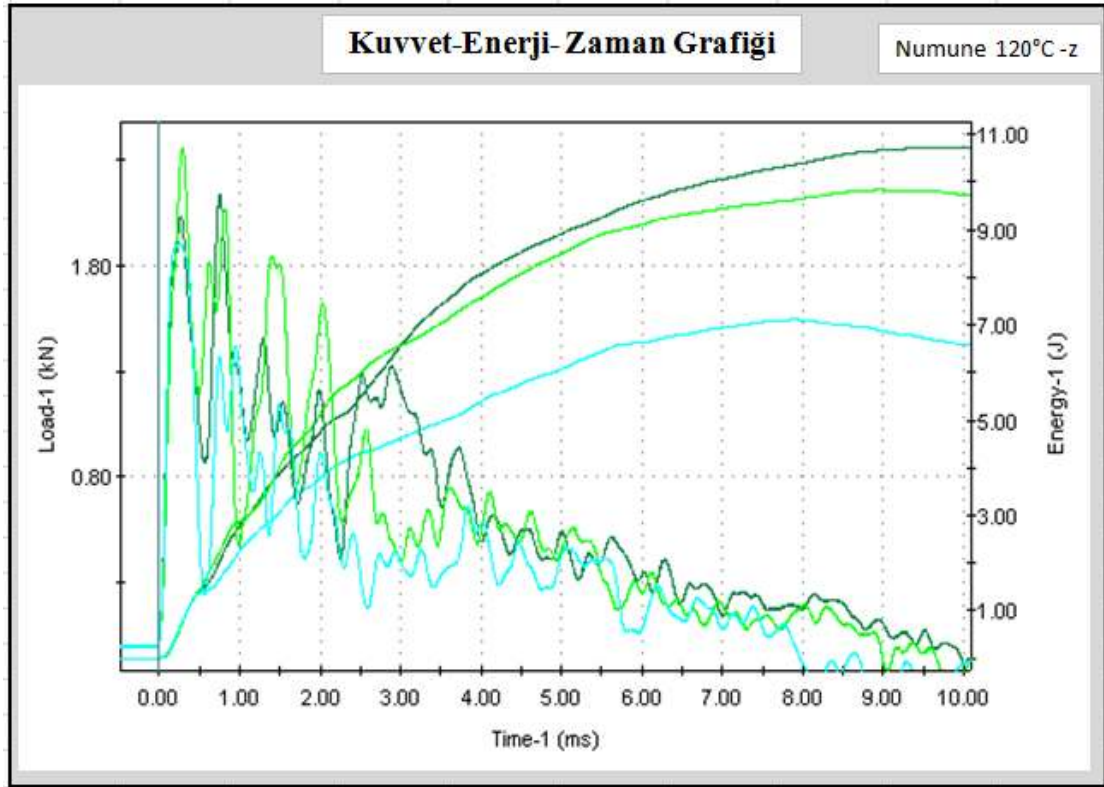
Test no	Peak Load-1 (kN)	Deflection at Peak Load-1 (mm)	Energy to max load-1 (J)	Total energy-1 (J)	Impact velocity-1 (m/s)	Total time-1 (ms)
1	2.0584	0.6249	0.7794	5.6394	1.9710	4.2572
2	1.8449	0.3105	0.2963	4.7613	1.9720	3.9795
3	1.9425	0.3604	0.3360	8.4191	1.9767	8.0048
Average	1.9486	0.4320	0.4706	6.2733	1.9732	5.4138



Şekil 7.8. 120°C’de fırınlanmış 00 tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen kuvvet-enerji-zaman grafiği

Çizelge 7.10. 120°C’de fırınlanmış 00 tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler

Test no	Peak Load-1 (kN)	Deflection at Peak Load-1 (mm)	Energy to max load-1 (J)	Total energy-1 (J)	Impact velocity-1 (m/s)	Total time-1 (ms)
1	2.9839	0.6268	0.8770	5.9766	1.9775	3.2623
2	3.4372	0.6249	1.0180	11.5991	1.9756	0.5310
3	2.3161	0.6145	0.7945	9.3663	1.9757	8.2214
Average	2.9124	0.6221	0.8965	8.9807	1.9763	4.0049



Şekil 7.9. 120°C’de fırınlanmış Z tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen kuvvet-enerji-zaman grafiği

Çizelge 7.11. 120°C’de fırınlanmış Z tipi fiberle güçlendirilmiş numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler

Test no	Peak Load-1 (kN)	Deflection at Peak Load-1 (mm)	Energy to max load-1 (J)	Total energy-1 (J)	Impact velocity-1 (m/s)	Total time-1 (ms)
1	2.1297	1.4752	2.0250	10.7229	1.9788	9.6161
2	2.3601	0.5835	0.7603	9.8383	1.9780	8.9661
3	1.9083	0.5103	0.6464	7.1095	1.9714	7.9010
Average	2.1327	0.8563	1.1439	9.2236	1.9761	8.8277

Çizelge 7.12. 120°C’de fırınlanmış numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler

<i>Numune Adı</i>	<i>Uygulanan Enerji</i>	<i>Tabaka Sayısı</i>	<i>Kalınlık (mm)</i>	<i>Fmax ort. (kN)</i>	<i>E absorbe ort. (J)</i>	<i>t total ort. (ms)</i>
120deg-U	25 J	3	8	1,9486	6,2733	5,4138
120deg-00	25 J	3	8	2,9124	8,9807	4,0049
120deg-Z	25 J	3	8	2,1327	9,2236	8,8277

Değişik uç geometrilerine sahip fiberle güçlendirilmiş ve 120°C’de fırınlanmış numunelerin absorbe ettikleri enerji değerleri fiberler açısından kıyaslandığında Çizelge 7.12.’deki enerjiler incelenirse, Z tipi fiberlerle güçlendirilmiş numunelerin 9,2236 J ortalama değerle en fazla enerji absorbe ettikleri söylenebilir. Yine kuvvet değeri de ortalama olarak 2,1327 kN değerindedir. Z tipi fiberler bu durumda 120°C’de fırınlanmış numuneler için aynı darbe enerjisi değerinde kompozit malzemenin mukavemetini en çok arttıran fiber şeklidir.

Çizelge 7.13. Tüm numunelerin ağırlık düşürme testinden elde edilen veriler

<i>Numune Adı</i>	<i>Uygulanan Enerji</i>	<i>Tabaka Sayısı</i>	<i>Kalınlık (mm)</i>	<i>Fmax ort. (kN)</i>	<i>E absorbe ort. (J)</i>	<i>t total ort. (ms)</i>
40deg-00	25 J	3	8	2,1012	4,9735	5,6885
40deg -U	25 J	3	8	2,0857	5,2767	5,3324
40deg -Z	25 J	3	8	2,7035	6,838	7,0852
80deg-Z	25 J	3	8	2,6078	5,5819	5,0802
80deg-U	25 J	3	8	2,4285	6,3559	5,8736
80deg-00	25 J	3	8	3,2246	6,9527	5,4932
120deg-U	025 J	3	8	1,9486	6,2733	5,4138
120deg-00	25 J	3	8	2,9124	8,9807	4,0049
120deg-Z	25 J	3	8	2,1327	9,2236	8,8277

Tüm numuneler için kuvvet ve enerji değerleri kıyaslandığında genel olarak numunelerin fırınlanma sıcaklıkları arttıkça tam penetrasyon için absorbe ettikleri enerjilerin de arttığı saptanmıştır. Kuvvet değerleri incelendiğinde ise 40°C'den 120°C'ye kadar olan bölümde bir artma, 120°C'den sonra kuvvet değerlerinde azalma görülmüştür. Bu kuvvet azalma durumunun kompozit malzemenin imalatı sırasında oluşan döküm hatalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yani döküm işleminden sonra malzeme içerisinde kireç artığı yada hava boşluğu kalma ihtimali söz konusudur.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen çalışmada polyester-kalsit matriks malzemeli ve alaşımsız çelik fiberlerle güçlendirilmiş kompozit plakalara düşük enerjili darbe uygulanması sonucu değişik uç geometrilerine sahip fiberlerin ve fırınlanma sıcaklıklarının etkisi incelenmiştir. Kompozit plakalar üzerine oda sıcaklığında (25°C)'de 25 J enerji uygulanmıştır. Darbe deneyleri sonucunda meydana gelen yükler ve absorbe edilen enerji miktarları kıyaslanmıştır.

Darbe uygulanması sırasında vurucu ucun numuneye temasından sonra kompozit plakanın yüzeyinden geri sekmesiyle veya plakaya saplanmasıyla elde edilen veriler sonucundaki grafiklerde kapalı tip eğriler oluşur. Numunelerin vurucu tarafından delinmesiyle meydana gelen kuvvet eğrileri ise açık tip eğrilerdir [21]. Çalışmamızda numunelerde tam penetrasyon meydana geldiğinden dolayı grafiklerde açık tip eğriler görülmektedir. Testler sonrasında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Değişik uç geometrilerine sahip fiberlerle güçlendirilmiş 40°C ve 80°C'de fırınlanmış kompozit numunelerin absorbe ettikleri toplam enerji değerleri ve maksimum kuvvet değerleri birbirine yakın çıkmıştır.
- 120°C'de fırınlanmış kompozit numunelerin absorbe ettikleri enerji değerleri diğer numunelerle kıyaslandığında en yüksektir.
- 40°C'de fırınlanmış numunelerde uygulanan darbe sonucunda Z tipi fiberlerle takviye edilmiş kompozitin absorbe ettiği enerjinin daha yüksek çıktığı gözlenmiştir. Yine vurucu ucun numuneye temas ettiği andaki maksimum kuvvet değeri de bu numunelerde en yüksek değerine ulaşmıştır.
- 80°C'de fırınlanmış numunelerde uygulanan darbe sonucunda 00 tipi fiberlerle takviye edilmiş kompozitin absorbe ettiği enerjinin daha yüksek çıktığı gözlenmiştir. Yine vurucu ucun numuneye temas ettiği andaki maksimum kuvvet değeri de bu numunelerde en yüksek değerine ulaşmıştır.

- 120°C’de fırınlanmış numunelerde uygulanan darbe sonucunda Z tipi fiberlerle takviye edilmiş kompozitin absorbe ettiği enerjinin daha yüksek çıktığı gözlenmiştir. Vurucu ucun numuneye temas ettiği andaki maksimum kuvvet değeri ise bu numunelerde en yüksek değerine ulaşmamıştır. Bu durum darbe uygulanan malzemelerin imalatı sırasında meydana gelmiş döküm hatalarından kaynaklanmış olabilir.
- Her durum için aynı özelliklere sahip üçer tane numuneye darbe uygulanmıştır. Bu sayı artırılarak daha düzgün sonuçlar elde edilebilir.
- Numunelerin fırınlanma sıcaklıkları arttıkça absorbe ettikleri enerji ve maksimum kuvvet değerlerinde artış gözlenmiştir. Sıcaklık aralığı daha dar tutulup yada 8 saat yerine numunelerin farklı fırınlama sürelerinde bekletilerek yapılacak deneylerde fırınlama şartlarının mukavemet üzerindeki etkisi inceleme konusu olabilir.
- Fiber takviyesinin kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirmesinin yanı sıra numune tam penetrasyona uğradıktan sonra matriks malzeme fiberler yardımıyla birbirine tutunmuş tam anlamıyla parçalanmamıştır. Darbe sonucu artan kuvvetle ortaya çıkan çatlak önüne çıkan fiberi geçemeyip fiberin etrafından kayarak başka doğrultulara yönelmiştir. Bu durum çatlak oluşumunun ve ilerleyişinin kontrol altında tutabilmesi açısından, gerilme yığılmasının büyük olduğu noktalarda farklı doğrultularda ya da farklı yoğunluklarda fiber katkısının önemini vurgulamaktadır [27].
- Değişik uç geometrili fiberler elde edilen enerji ve kuvvet değerlerinde belirgin bir farklılık yaratmamıştır.
- Kuvvet ve enerji değerlerinin yakın çıkması kullanılan fiberin orta dayanımda (çekme dayanımı 200-300 N/mm² arasında) çelik tel olmasından kaynaklanmış olabilir [27].
- Kullanılan fiberler standart (özel imalat) ve çok yüksek (≥ 500 N/mm²) mekanik özelliklere sahip malzemeden olsa idi, numuneler arasındaki farkın daha belirgin olacağı tahmin edilmektedir. Bu ilerde yapılacak çalışmalarda değerlendirilebilir. Kompozit malzemede kullanılan fiber oranının artırılmasının da mukavemeti artırmada önemli bir etken olacağı düşünülmektedir [27].

- Fiberlerin elle imal edilmiş olması, malzeme içine yine elle dizilmiş olması elde edilen numune değerlerinin yakın çıkmasına sebebiyet vermiş olabilir.
- Fiber malzemesi ve elle üretim yöntemleri sonucu fiberlerin değişik uç geometrilerinin etkisi tam anlamıyla anlaşılamamıştır.
- Fiber üretimi için bir CNC tezgah kullanımı veya bir makine yardımıyla fiberlerin matriks malzeme içine dizilimi sağlanırsa değerlerde belirgin bir farklılık ve iyileşme gözlenebilir.
- Malzeme imalatında kullanılan kalsit yada sertleştirici karışım oranı değiştirilebilir. Malzeme mekanik özelliklerine etkisi incelenebilir.
- Malzemedeki fiber dizilimi, oranı yada fiber uzunlukları arttırılarak test sonuçları daha net görülebilir. Bu durum ileriki çalışmalarda planlanabilir [27].
- Malzeme imalatı sırasında döküm hatalarından kaynaklanmış olumsuz durumlar söz konusu olabilir. Örneğin malzeme kalınlığının düzgün dağılmamış olması, malzeme içinde oluşmuş hava boşlukları yada kalsit artıkları absorbe edilen enerji ve maksimum kuvvet değerlerinde bir azalmaya sebep olmuş olabilir.
- Kullandığımız malzemeler özellikle pratikte uygulanabilirliği olan malzemelerdir. Öneri olarak bu çalışma standart imalatlı, farklı şekilli, farklı uzunlukta ve değişik fiber oranlarında uygulamalar yapılarak geliştirilebilir. Aynı zamanda fırınlama daha yüksek bir sıcaklıkta ve farklı bekletme sürelerinde yapılarak dayanım incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Zhu Y. T. , Beyerlein I. J. , “Bone-Shaped Short Fiber Composites – An Overview”, *Materials Science and Engineering* , A 326 , 208 –227 , (2002)
2. Zhu Y. T. , Beyerlein I. J. , Valdez J. A. , “Mechanical Properties Of Bone Shaped Short Fiber Reinforced Composites” , *Materials Science and Engineering* , 47(6): 1767– 1781 , (1999)
3. Zhu Y. T. , Beyerlein I.J. ,Mahesh S., “OnThe Influence Of Fiber Shaped Short Fiber Composites”, *Composites Science and Technology*, 61: 1341-1357, (2001)
4. Bagwell R.M., Wetherhold R.C., “End Shaped Copper Fibers In An Epoxy Matrix– Predicted Versus Actual Fracture Toughening”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 43: 181 – 188 , (2005)
5. Zhu Y. T. , Beyerlein I. J. , Valdez J. A. , Lowe T.C. , Jiang H. , “The Strength And Toughness Of Cement Reinforced With Bone Shaped Steel Wires”, *Composites Science and Technology*, 60: 1753 – 1761 , (2000)
6. Zhu Y. T. , Beyerlein I. J. , Valdez J. A. , Lowe T.C. , “Fracture Toughness Of A Composite Reinforced With Bone Shaped Short Fibers”, *Materials Science and Engineering* , A 317: 93 – 100 , (2001)
7. Bagwell R.M., Wetherhold Robert C. , “Improvement In Fracture Toughness Of An Epoxy Copper Composite Through The Use Of Various End Shaped Fibers”, *Materials Science And Engineering* , A 361: 294-301 ,(2003)
8. Wong P.M.H., Davies J.M., Wang Y.C., “An Experimental and Numerical Study Of The Behaviour Of Glass Fibre Reinforced Plastics (GRP) Short Columns At Elevated Temperatures”, *Composites Structures*, 63: 33-43 , (2004)
9. Sirivedin S.,Fenner D.N.,Nath R.B.,Galiotis C., “Matrix Crack Propagation Criteria For Model Short-Carbon Fibre/Epoxy Composites”, *Composites Science and Technology*, 60: 2835-2847 , (2000)
10. Zhou Y. , Li C., Mason J.J., “Fiber-End Deformation Effects In Enlarged-End, Fiber-Reinforced Composites”, *Engineering Fracture Mechanics*, 72: 1980-1992,(2005)
11. Chawla Krishan K., “Composite Materials Science And Engineering”, *Dept. Of Materials & Mechanical Engineering The University Of Alabama at Birmingham*, 78-87, (1998)
12. Ceyhun V., Turan M., “Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı”, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, *Mühendis Ve Makine*, 516: 19-25, (2003)

13. Şahin Y., “Kompozit Malzemelere Giriş”, **Gazi Kitabevi**, Ankara, (2000)
14. Karakılçık S., “Tek Eksenli Çekmeye Maruz Ortasında Dairesel Delik Bulunan Kompozit Levhada Gerilme Yığılmasının İncelenmesi”, **Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü**, (2006)
15. Evcimen A., “Pim Bağlantılı Kompozitlerde Tabaka Sayısı Ve Oryantasyon Açısının Gerilmeye Etkisi”, **Dokuz Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü**, (2005)
16. Yücedağ S., “Pim İle Birleştirilmiş Tabakalı Kompozit Plakalarda Eksenel Yük Altında Gerilme Ve Yer Değiştirme Analizi”, **Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü**, (2007)
17. Özaydın M.B., “Kompozit Malzemelerin Balistik Özelliklerinin İncelenmesi”, **Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü**, (1999)
18. Demirel A., “Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu”, **Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü**, (2007)
19. Karakuzu R., İçten M.B., “Kompozit Plaklarda Sıcaklığın Darbe Davranışına Etkisi”, **TÜBİTAK**, Proje No: 104M426, İzmir (2007)
20. Turan M., “Tabakalı Kompozit Malzemelerde Yüksek Hızlı Darbe Hasarı”, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, **Mühendis Ve Makina**, 575: 3-8, (2008)
21. Sayer M., Bektaş N.B., “Darbe Yüğü Altındaki Hibrit Kompozit Plakalarda Sıcaklığın Etkisi”, **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 15(3): 337-343, (2009)
22. Ece Z., “Fiber Kompozit Malzemelerde Fiber-Matriks Etkileşimlerinin Analitik Ve Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi”, **Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü**, (2003)
23. Demircioğlu G., “Kısa Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerde Elyaf Boyutunun Etkisi”, **Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü**, (2006)
24. Fidan S., Sınmazçelik T., Bora M. Ö., Çoban O., “Düşük Hızlı Darbe Yüklemleri Sonrası Cam Fiber Takviyeli Polyester Kompozitlerde Ortaya Çıkan Hasar Konisinin İncelenmesi”, **Kocaeli Üniversitesi, TÜBİTAK**
25. Şenel M., Karakoç F., “Özgün Bir Tasarım: Öngerilmeli Düşük Hızlı Darbe Test Düzenegi”, Dumlupınar Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, **Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi**, 41-50, (2008)

26. Uyaner M., Kara M., Ataberk N., “E-camı/Epoksi Tabakalı Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe Davranışına Numune Boyutlarının Etkisi”, **8.Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı**, (2007)
27. Özdemir Z., “Değişik Uç Şekline Sahip Fiberlerle Güçlendirilmiş Polyester Kalsit Kompozitin Dayanımına Farklı Kür (Fırınlama) Şartlarının Etkisi”, **Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü**, (2006)
28. Taşkiran C., “Tabakalı Kompozit Levhaların Sıcaklığa Bağlı Düşük Enerjili Darbe Davranışının İncelenmesi”, **Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü**, (2010)
29. Liou W.J., “Stress Distributions Of Short Fiber Composite Materials”, **Computers & Structures**, 62(6): 999-1012, (1997)
30. İçten M.B., Karakuzu R., “Tabakalı Kompozit Malzemelerin Üretilmesi Ve Darbe Deneyi”, **Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Makine Tek**, 4: 166-168, (2006)
31. Şenel M., Kırılı A., “Düşük Hızlı Darbe Deney Düzeneği İçin Geri Sekme (Rebound) Frenleme Ve Kontrol Sistemi”, **5. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu**, Karabük, (2009)
32. Hosur M.V., Karim M.R., Jeelani S., “Experimental Investigations On The Response Of Stitched/Unstitched Woven S2-glass/SC15 Epoxy Composites Under Single And Repeated Low-Velocity Impact Loading”, **Journal Of Composite Structures**, 61;89-102, (2003)
33. Yıldızhan H., “Polimer Matriksli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, **Süleyman Demirel Üniversitesi Makine Eğitimi Anabilim Dalı**, (2008)
34. Şahin M., “Burkulmaya Maruz Tabakalı Kompozit Plakların Deneysel ve Nümerik Analizi”, **Cumhuriyet Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü**, (2008)
35. Atmaca A., “Çelik Fiber Takviyeli Alüminyum Metal Matriksli Kompozit Plakaların Elasto-Plastik Gerilme Analizi”, **Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü**, (2006)
36. Mesleki eğitim ve öğretim sisteminin güçlendirilmesi projesi, “ Sertlik Ölçme Yöntemleri”, **MEB Metal Teknolojisi**, Ankara (2006)
37. Yılmazoğlu Ü., “Kompozit Malzemelerin Elasto-Plastik Davranışının İncelenmesi”, **Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü**, (2004)

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KUTLAY, Yelda
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 15.11.1980 / Almanya
 Medeni hali : Evli
 Telefon (iş) : 0 (312) 863 46 80-2404
 Faks : 0 (312) 863 54 42
 e-mail : yeldakutlay@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Müh. Bölümü	2012
Lisans	Osmangazi Üniversitesi / Makine Müh. Bölümü	2004
Lise	Eskişehir Atatürk Lisesi	1997

İş Deneyimi

(Ay/Yıl)	Yer	Görev
02/2010-	MKE BARUTSAN ROKET VE PATLAYICI FABRİKASI	Üretim Planlama Mühendisi
05/2005-09/2006	FORD OTOSAN A.Ş.	Teknik Destek Mühendisi
09/2004-05/2005	TEKİN MAKİNE SANAYİ A.Ş.	Kalite Sistem Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Müzik, Sinema, Latin dansları