



**KARBON FİBER TAKVİYELİ PLAKALARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE
DAVRANIŞINA DÜŞÜK SICAKLIKLARIN ETKİSİ**

Dilara YILMAZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2017

Dilara YILMAZ tarafından hazırlanan “KARBON FİBER TAKVİYELİ PLAKALARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞINA DÜŞÜK SICAKLIKLARIN ETKİSİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. O. Selim TÜRKBAŞ

Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan: Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ

Mekatronik Mühendisliği, Çankaya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Yrd. Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 11/05/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Dilara YILMAZ

11/05/2017

KARBON FİBER TAKVİYELİ PLAKALARIN DÜŞÜK HIZLI DARBE
DAVRANIŞINA DÜŞÜK SICAKLIKLARIN ETKİSİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Dilara YILMAZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2017

ÖZET

Bu çalışmada karbon fiber/epoxy plakaların düşük hızlı darbe davranışına sıcaklığın etkisi araştırılmıştır. 100 mm x 100 mm boyutlarında 2 mm kalınlığında 8 katlı deney numunelerine darbe tam ortadan uygulanarak çalışma gerçekleştirilmiştir. Darbe deneyleri +22,5°C (Strain-gage), +22,5 °C, 0 °C, -30 °C ve -60 °C sıcaklıklarında önceden imal edilmiş olan ağırlık düşürme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Darbe enerjisi 26,5 J'dür. Deneylerden elde edilen Temas Kuvveti - Zaman, Gerinim - Zaman grafikleri incelenmiştir. Darbe sonrası plakalarda meydana gelen hasar tipleri mikroskop ile incelenmiştir.

Bilim Kodu : 91417
Anahtar Kelimeler : Tabakalı Kompozit, Karbon Fiber, Epoksi, Sıcaklık, Düşük Hızlı Darbe, Düşük sıcaklık, Gerinim ölçer
Sayfa Adedi : 125
Danışman : Yrd. Doç. Dr. O. Selim TÜRKBAŞ

THE EFFECT OF LOW TEMPERATURES ON THE LOW VELOCITY IMPACT
RESPONSE OF CARBON FIBER REINFORCED PLATES

(M. Sc. Thesis)

Dilara YILMAZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2017

ABSTRACT

The effect of Low temperatures on the low velocity impact response carbon fiber/epoxy laminates is investigated herein. These studies were carried out on plate dimensions of 100 mm x 100 mm and consisting of 8-ply for tests and a nominal thickness (2 mm) and impact load applied at the center of each plate. Experimental tests were carried out at temperatures ranging from +22,5 °C to -60 °C. The impact tests are applied with drop weight testing machine constructed before. Contact Force – Time and Strain – Time graphs obtained from experiments were investigated. After the impact tests, the damage extension was observed with microscope

Science Code : 91417

Key Words : Laminated Composite, Carbon Fiber, Epoxy, Temperature, Low Velocity Impact, Low Temperature, Strain-gage

Page Number : 125

Supervisor : Assist. Prof. Dr. O. Selim TÜRKBAŞ

TEŞEKKÜR

Proje boyunca beni yönlendiren, tavsiyeleriyle çalışmama katkıda bulunan değerli danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Selim TÜRKBAŞ'a,

Deney numunelerinin üretim aşamasında yardımlarını esirgemeyen Epsilon Havacılık Uzay ve Savunma Sanayi Ticaret Ltd. Şti. firmasına, firma yetkilileri Sayın Barış NALÇACI ve Üzeyir IŞILAK'a, Deney numunelerin üretilmesi için bize sponsor olan DOWAKSA İleri Kompozit Malzemeler Sanayi Ltd. Şti. firmasına ve DOWAKSA firmasından Stratejik planlama yöneticisi Sayın Mustafa Koray ÖZATAY'a, Numunelerin üretilmesi aşamasında desteklerini esirgemeyen Mehmet Ali YAMAN'a ve Gökhan AYDOĞAN'a, Darbe Testleri yapılırken yardımları ve bilgileri ile destek olan Prof. Dr. Özgür ANIL'a ve Araştırma Görevlisi Mehmet Akif AKDOĞAN'a teşekkür ederim.

Beni bugünlere getiren, hayatımın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, çalışmalarım boyunca bana sabırla destek olan aileme ve manevi destekleriyle beni yalnız bırakmayan arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	11
2.1. Kompozit Malzemenin Tanımı	11
2.2. Kompozitin Avantaj ve Dezavantajları.....	12
2.3. Kompozit Malzemelerin Geleneksel Malzemelerle Karşılaştırılması	14
2.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	16
2.4.1. Takviye elemanına göre kompozit malzemeler	17
2.4.2. Matris elemanına göre kompozit malzemeler.....	20
2.5. Kompozitlerde Takviye Elemanları	21
2.5.1. Cam elyaflar	23
2.5.2. Karbon elyaflar.....	25
2.5.3. Bor elyaflar	26
2.5.4. Silisyum karbür elyaflar	27
2.5.5. Aramid elyaflar	27
2.5.6. Alümina elyaflar	28

	Sayfa
2.5.7. Metalik cam elyaflar	29
2.6. Kompozitlerde Matris Malzemeleri	30
2.6.1. Metal matrisler ve alaşımları	30
2.6.2. Plastik matrisler	31
2.6.3. Seramik matrisler	38
3. DARBE TESTLERİ	39
3.1. Darbe Testlerinin Sınıflandırılması	40
3.1.1. Ağırlık düşürme darbe testleri	41
3.1.2. Çentik darbe testleri	42
3.1.3. Balistik testler	43
3.2. Darbe Hasarını Etkileyen Parametreler	44
3.3. Tabakalı Kompozitlerde Darbe Sonrası Hasar Modları	45
3.3.1. Matris kırılması	45
3.3.2. Tabakalar arası ayrışma (Delaminasyon)	46
3.3.3. Fiber kırılması	47
3.3.4. Nüfuziyet (Batma)	48
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ve TEST CİHAZI	49
4.1. Test Numunesinin Özellikleri	49
4.2. Test Numunesinin Hazırlanması	50
4.3. Ağırlık Düşürme Testi	55
4.3.1. Ağırlık düşürücü deney düzeneği	55
4.3.2. Kuvvet algılayıcısı	58
4.3.3. Veri toplayıcı	60
4.3.4. Ölçüm aygıtları bağlantı kabloları	62

	Sayfa
4.3.5. Optik fotosel.....	62
4.4. Darbe Testinin Aşamaları.....	64
4.4.1. Testin yapılması	64
4.4.2. Darbe parametreleri	66
4.4.3. Numunelerin çentik derinliklerinin ölçülmesi.....	74
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	75
5.1. Darbe Test Sonuçları	75
5.2. Hasarların Mikroskop ile İncelenmesi.....	102
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	117
KAYNAKLAR	119
ÖZGEÇMİŞ	125

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Metallerin özellikleri	15
Çizelge 2.2. Kompozit ve klasik malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması	15
Çizelge 2.3. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	16
Çizelge 2.4. Bazı seramik elyafların mekanik ve fiziksel özellikleri.....	23
Çizelge 2.5. Cam türleri ve özellikleri	25
Çizelge 2.6. Karbon ve grafit elyafların karşılaştırılması	25
Çizelge 2.7. Termoplastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri	34
Çizelge 2.8. Bazı termoset plastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri	37
Çizelge 2.9. Seramik matrislerin mekanik ve fiziksel özellikleri	38
Çizelge 4.1. Numunelerin dizilimleri.....	50
Çizelge 4.2. 201B03 Model ICP halka kuvvet algılayıcısı teknik özellikleri.....	60
Çizelge 4.3. NI 9233-USB-9162 veri toplayıcı teknik özellikleri	61
Çizelge 4.4. Darbe parametreleri.....	67
Çizelge 5.1. [0/+45/-45/90] _s levhanın oda sıcaklığındaki ağırlık düşürme testinden elde edilen değerler	76
Çizelge 5.2. Tüm numunelerin darbe süreleri	97
Çizelge 5.3. Tüm numunelerin Temas Kuvveti - Gerinim değerleri ve çökme miktarları.....	114

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kompozit malzemelerle diğer malzemelerin özelliklerinin karşılaştırılması	13
Şekil 2.2. En genel kullanımlı takviye elemanlı kompozitler	17
Şekil 2.3. Şekillerine göre elyaf takviyeli kompozit malzeme çeşitleri	18
Şekil 2.4. Tabakalı kompozit levha	19
Şekil 2.5. Elyaf dokuma türleri	22
Şekil 3.1. Ağırlık düşürme test düzeneği	41
Şekil 3.2. Charpy ve Izod darbe test düzeneği	42
Şekil 3.3. Balistik test düzeneği	43
Şekil 3.4. (a) Kayma gerilmelerinin ve (b) çeki gerilmelerinin neden olduğu matris kırıkları	45
Şekil 3.5. (a) Kalın ve (b) ince plakalar için matris kırığı hasarının ilerlemesi	46
Şekil 3.6. Tipik delaminasyon biçimi	47
Şekil 3.7. Kalın ve ince numunelerde batma ve delinme olayı	48
Şekil 4.1. Ağırlık düşürücü deney düzeneğinin tasarım şeması	55
Şekil 5.1. Tekrarlı darbeye maruz deney numunesinden alınan kuvvet sinyalleri	75
Şekil 5.2. Tek darbeye maruz kalan [0/+45/-45/90] _s dizilimli strain-gage takılmış numunenin oda sıcaklığındaki Kuvvet - Zaman grafiği	76
Şekil 5.3. [0/+45/-45/90] _s dizilimine ait Kuvvet-Zaman grafiği, a) 1N1 ₋ +22,5°C, b) 1N2 ₋ +22,5 °C, c) 1N3 ₋ -60 °C, d) 1N4 ₋ -30 °C, e) 1N5 ₀ °C	79
Şekil 5.4. [90/+45/0/-45] _s dizilimine ait Kuvvet-Zaman grafiği, a) 2N1 ₋ +22,5°C, b) 2N2 ₋ +22,5 °C, c) 2N3 ₋ -60 °C, d) 2N4 ₋ -30 °C, e) 2N5 ₀ °C	82
Şekil 5.5. [+45/0/-45/90] _s dizilimine ait Kuvvet-Zaman grafiği, a) 3N1 ₋ +22,5°C, b) 3N2 ₋ +22,5 °C, c) 3N3 ₋ -60 °C, d) 3N4 ₋ -30 °C, e) 3N5 ₀ °C	84
Şekil 5.6. [0/+45/90/-45] _s dizilimine ait Kuvvet-Zaman grafiği, a) 4N1 ₋ +22,5°C, b) 4N2 ₋ +22,5 °C, c) 4N3 ₋ -60 °C, d) 4N4 ₋ -30 °C, e) 4N5 ₀ °C	86

Şekil	Sayfa
Şekil 5.7. [0/-45/90/+45]s dizilimine ait Kuvvet-Zaman grafiği, a) 5N1_+22,5°C, b) 5N2_+22,5 °C, c) 5N3_-60 °C, d) 5N4_-30 °C, e) 5N5_0 °C.....	88
Şekil 5.8. [+45/0/90/-45]s dizilimine ait Kuvvet-Zaman grafiği, a) 6N1_+22,5°C, b) 6N2_+22,5 °C, c) 6N3_-60 °C, d) 6N4_-30 °C, e) 6N5_0 °C.....	91
Şekil 5.9. “1” nolu numunelerin 5 farklı sıcaklığa ait Kuvvet - Zaman grafiği.....	93
Şekil 5.10. “2” nolu numunelerin 5 farklı sıcaklığa ait Kuvvet - Zaman grafiği.....	94
Şekil 5.11. “3” nolu numunelerin 5 farklı sıcaklığa ait Kuvvet - Zaman grafiği.....	94
Şekil 5.12. “4” nolu numunelerin 5 farklı sıcaklığa ait Kuvvet - Zaman grafiği.....	95
Şekil 5.13. “5” nolu numunelerin 5 farklı sıcaklığa ait Kuvvet - Zaman grafiği.....	95
Şekil 5.14. “6” nolu numunelerin 5 farklı sıcaklığa ait Kuvvet - Zaman grafiği.....	96
Şekil 5.15. Farklı dizilişlere ait Gerinim-Zaman grafiği, a) 1N1, b) 2N1, c) 3N1, d) 4N1, e) 5N1, f) 6N1.....	99

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Kompozit malzemelerden örnekler.....	11
Resim 2.2. Cam Elyaf.....	24
Resim 2.3. Karbon Elyaf.....	26
Resim 2.4. Bor elyaf	27
Resim 2.5. Aramid elyaf	28
Resim 2.6. Alümina elyaf.....	29
Resim 4.1. Numunenin boyutları.....	49
Resim 4.2. Kesme planı.....	51
Resim 4.3. Kumaşların kesilmesi	51
Resim 4.4. Ayırıcı film serilmiş cam panelin üzerinde serim işlemine başlanması	52
Resim 4.5. Vakum port, Ayırıcı film, Airweave ve Vakum paketi yerleştirilmiş panelin kenarlarının bantla çevrilmesi.....	52
Resim 4.6. Hava çıkışını engellemek için kullanılan bantın yerleştirilmesi.....	53
Resim 4.7. Vakumlama işlemi.....	53
Resim 4.8. Kırılma işlemi sonrası plakalar	54
Resim 4.9. Plakaların kesilmesi.....	54
Resim 4.10. Deney düzeneği	56
Resim 4.11. Çekiç.....	57
Resim 4.12. 201B03 Model ICP kuvars halka kuvvet algılayıcısı.....	59
Resim 4.13. NI 9233-USB-9162 Veri toplayıcı.....	61
Resim 4.14. 003A20 Model düşük gürültülü koaksiyal kablo	62
Resim 4.15. Optik fotoseller ve yerleşimi	63
Resim 4.16. Kalıp.....	64

Resim	Sayfa
Resim 4.17. Darbe uygulanan nokta	65
Resim 4.18. Strain-gage bağlanmış numune	65
Resim 4.19. Azot gazı	66
Resim 4.20. Strain-gage bağlı +22,5°C’de darbe uygulanmış numunelerin arka, ön, sol yan ve kesit alınmış yan görüntüsü	69
Resim 4.21. -60°C’de darbe uygulanmış numunelerin arka, ön, sol yan ve kesit alınmış yan görüntüsü	70
Resim 4.22. 0°C’de darbe uygulanmış numunelerin arka, ön, sol yan ve kesit alınmış yan görünüşü	71
Resim 4.23. -30°C’de darbe uygulanmış numunelerin arka, ön, sol yan ve kesit alınmış yan görünüşü	72
Resim 4.24. +22,5°C’de darbe uygulanmış numunelerin arka, ön, sol yan ve kesit alınmış yan görünüşü	73
Resim 4.25. +22,5°C , +22,5°C (strain-gage), -30°C, -60°C ve 0°C darbe uygulanmış numuneler	74
Resim 4.26. Plakaların kesilmesi	74
Resim 5.1. Numunelerin kesit alınmış ve arka yüzey görünüşü, a) 1N1_+22,5°C, b) 1N2_+22,5°C, c) 1N3_-30°C, d) 1N4_-60°C, e) 1N5_0°C	102
Resim 5.2. Numunelerin kesit alınmış ve arka yüzey görünüşü, a) 2N1_+22,5°C, b) 2N2_+22,5°C, c) 2N3_-30°C, d) 2N4_-60°C, e) 2N5_0°C	104
Resim 5.3. Numunelerin kesit alınmış ve arka yüzey görünüşü, a) 3N1_+22,5°C, b) 3N2_+22,5°C, c) 3N3_-30°C, d) 3N4_-60°C, e) 3N5_0°C	106
Resim 5.4. Numunelerin kesit alınmış ve arka yüzey görünüşü, a) 4N1_+22,5°C, b) 4N2_+22,5°C, c) 4N3_-30°C, d) 4N4_-60°C, e) 4N5_0°C	108
Resim 5.5. Numunelerin kesit alınmış ve arka yüzey görünüşü, a) 5N1_+22,5°C, b) 5N2_+22,5°C, c) 5N3_-30°C, d) 5N4_-60°C, e) 5N5_0°C	110
Resim 5.6. Numunelerin kesit alınmış ve arka yüzey görünüşü, a) 6N1_+22,5°C, b) 6N2_+22,5°C, c) 6N3_-30°C, d) 6N4_-60°C, e) 6N5_0°C	112

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
Al	Alüminyum
Al₂O₃	Alüminyum oksit
BaO	Baryum oksit
B₄C	Bor karbür
BCl₃	Bor triklorür
B₂O₃	Bor trioksit
CaO	Kalsiyum oksit
cm	Santimetre
Cu	Bakır
dB	Desibel
E	Elastisite modülü
E₁	Lif yönündeki elastisite modülü
E₂	Fibere dik yöndeki elastisite modülü
G₁₂	Kayma modülü
GPa	Gigapascal
gr/cm³	Gram/Santimetre küp
gr/ml	Gram/Milisaniye
hz	Hertz
j	Joule
kg	Kilogram
kg/m³	Kilogram/Metre küp
kHz	Kilohertz
kN	Kilonewton
m	Metre
mA	Miliamper
Mg	Magnezyum
MgO	Magnezyum oksit

Simgeler**Açıklamalar**

mm	Milimetre
mm/mm	Milimetre/Milimetre
msn	Milisaniye
m/sn	Metre/Saniye
MPa	Megapascal
mV/kN	Megavolt/Kilonewton
N	Azot
Na₂O.K₂O	Sodyum oksit. Potasyum oksit
Ni	Nikel
ppm	Milyonda bir
s	Simetri
SiC	Silisyum karbür
sn	Saniye
Si₃N₄	Silisyum nitrür
SiO₂	Silisyum dioksit
Ti	Titanyum
V	Volt
Zn	Çinko
°C	Santigrat
ρ	Yoğunluk
μm	Mikrometre
ν₁₂	Poisson oranı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ABS	Akrilonitril Bütadien Stiren
BSD	Brinell sertlik değeri
CF/EPOXY	Karbon fiber/Polieter eter keton
CF/PEEK	Karbon fiber/Polieter eter keton
CFRP	Carbon fibre reinforced polymer
KFGP	Karbon fiberle güçlendirilmiş polimer
MMK	Metal matrisli kompozitler

Kısaltmalar**Açıklamalar****NDT**

Non-destructive testing

PA

Poliamids

PAN

Poliakilonitril

PE

Polietilen

PEEK

Polieter eter keton

PET

Polyester

PMMA

Polimetil metakrilat

POM

Polioksimetilen

PP

Polipropilen

PTFE

Politetrafloretilen

PVC

Polivinil klorür

SAM

Taramalı akustik mikroskobu

YYPE

Yüksek yoğunluklu polietilen

1. GİRİŞ

Kompozit malzeme teknolojisindeki gelişmelerle birlikte, sanayi ve teknoloji uygulamalarında gittikçe artan oranlarda kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle uçak sanayisinde ve daha pek çok sektörde önemli ölçüde kullanılan kompozitler üzerindeki bilimsel çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Kompozit malzemeler yapıları ve özellikleri sayesinde çok çeşitli alanlarda kullanılır. Her sektörün farklı ihtiyaçları ve beklentileri olduğundan, kompozit malzemelerin, ürün esneklikleri önemli bir avantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Kompozitler, farklı sektörlerde hammadde olarak kullanıldığı gibi imalat yardımcı ekipmanları olarak da kullanılırlar [1].

Kelime olarak “kompozit”, iki veya daha fazla ayırık parçadan oluşan anlamına gelmektedir. Kompozit malzemeler; makro ölçekte kimyasal olarak birbirinden ayrı, iki veya daha fazla bileşenden oluşan ve bu bileşenler arasında bir ara yüzeyin bulunduğu malzemelerdir [2].

Kompozit malzeme genel olarak matris ve takviye elemanı olarak iki ana bileşenden meydana gelir. Takviye elemanı olarak adlandırılan bileşen; fiber, partikül veya ince levha şeklinde olabilir. Matris bileşeni ise takviye edilmiş olan ana yapıdır. Bu malzemelerin bir araya getirilmesi, bir takım çalışma karakteristiklerinin bu bileşenler tek olarak değerlendirildiği durumdakinden daha iyi olmasına müsaade eder. Buna karşılık bu malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede bazı güçlükler mevcuttur. Bu durum kompozit malzemelerin metalik malzemelere nazaran daha kompleks bir yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi, bu malzemelerin kullanılabilirliklerinin tespiti açısından önemlidir. Her malzeme gibi kompozit malzemelerin de ısı özellikler, mukavemet, elastikiyet, rijitlik, darbe davranışı gibi birçok özelliği vardır. Kompozit malzemeyi meydana getiren bileşenlerin bu ve benzeri özellikleri genel olarak belirli olmasına rağmen iki veya daha fazla malzemenin beraber kompozit malzeme olarak bir araya gelmesi sonucu oluşan kompozit malzemenin özelliklerini önceden tespit etmek veya hesaplayabilmek oldukça zordur [3].

Kompozit malzemelerin bahsedilen alanlarda kullanılmasının nedenleri kompozitlerin özellikle hafif ve dayanımlarının yüksek olması sayılabilir. Başka bir deyişle kompozitler

yüksek performans gerektiren yapısal parçalarda öncelikli olarak tercih edilen malzemelerdir. Kompozit malzemeler özellikle elyaf takviyeli tabakalı kompozit malzemeler, yüksek teknoloji gerektiren uçak ve savunma sanayisinde ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler kullanımları sırasında darbe hasarına maruz kalabilirler. Örneğin; uçağın piste iniş ve kalkışı sırasında yerden seken bir taş, kompozitten yapılmış bir yapıya çarpabilir veya uçağın bakımı sırasında işçi elinden kompozit bir parçanın üzerine el aleti düşürebilir. Böyle bir darbe hasarı muayeneler sırasında malzeme içerisinde belirlenmesi güç, gözle görülemeyen hasarlar oluşturabilir. Genellikle tabakaların birbirinden ayrılması şeklinde karşımıza çıkan bu hasarlar malzemenin beklenen mukavemet değerinden çok daha küçük değerlerde arıza vermesine neden olabilir. Zaman içerisinde can ve mal kayıplarına neden olabilecek bu hasarların, laboratuvar ortamında hasara neden olan darbe yükünün simüle edilerek oluşturulması ve incelenmesi büyük önem arz eder. Elyaf takviye edilmiş kompozit malzemeler artan bir oranda havacılıkta kullanılmaktadır. Ayrıca karbon elyaf güçlendirilmiş polimerlerin (KFGP) ana 2 gövdede de kullanıma eğilimi görülmeye başlanmıştır. KFGP, yüksek dayanım/ağırlık ve katılık/ağırlık oranları tarafından nitelendirildiğinden genellikle daha hafif yapısal parçalarda geniş bir uygulama alanına sahiptir. Fakat darbe yüklerinin neden olduğu hasarlardan kolayca yararlanırlar. Kompozit malzemelerin daha geniş kullanım alanlarının kısıtlanmasının sebebi, düşük hız ve düşük enerji darbe hasarına dirençlerinin kısıtlı olmasıdır [4-6].

Genel olarak, darbeler düşük hızlı veya yüksek hızlı olarak sınıflandırılırlar, fakat bu kategoriler arasında açık bir geçiş yoktur. Yapılan araştırmalar bu geçişin belirlenmesinde henüz net bir sonucun elde edilemediğini göstermektedir. Bu konuda yapılmış çalışmalardan bir kısmı düşük hızlı darbeyi ki bunlar statikmiş gibi düşünülebilir, hedefin rijitliğine, malzeme özelliklerine ve çarpan cismin kütle ve rijitliğine bağlı olarak 1 ila 10 m/s arasında değişen hızlar olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadır [7-8].

Buna karşın darbeye karşı olan cevap da malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Şöyle ki, metal ve metal alaşımlarında darbe sonucunda oluşan hasar darbeye maruz kalan yüzeyde meydana gelir. Kompozit malzemelerde ise darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde de meydana gelebilir. İçyapıda delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde görülebilir. Metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma veya kırılma şeklinde olmasına rağmen,

kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmez. Tabakalı kompozitler birçok mühendislik alanında kullanılır ve yabancı cisimler tarafından darbeye maruz kalabilirler. Darbeden kaynaklanan hasar, üretim, bakım ve servis işlemleri sırasında ortaya çıkabilir. Kullanım sırasındaki darbeye örnek olarak uçağın kalkış ve iniş sırasında lastiklerin yüksek hız kazanmasından sonra pistten fırlayan taş ve küçük parçacıkların yaptığı darbe verilebilir. Üretim ve bakım sırasında kullanılan takımlar yapı üzerine düşürülebilir. Bu durumda darbe hızları küçük fakat etkisi büyüktür. Tabakalı kompozit yapılar benzer metalik yapılara nazaran darbe hasarına daha duyarlıdır. Kompozit yapılarda darbe gözle muayenede belirlenemeyen iç hasarlar oluşturur. Bu iç hasar mukavemette azalmaya sebep olur ve yük altında büyür. Bu nedenle kompozit yapılar üzerine yabancı cisim darbelerinin etkileri anlaşılmalıdır ve tasarım aşamasında uygun önlemler dikkate alınmalıdır. Darbelerin kompozit yapıların performansına etkileri kompozit malzemelerin kullanımında kısıtlayıcı bir etkidir. Bu nedenlerle kompozit malzemelerin düşük hızlardaki darbe problemi önemli pratik ve teorik uygulamaları temsil eder [9].

Kompozit malzemelerin darbe davranış etkileri için, farklı bilimsel yaklaşım ve farklı malzemeler kullanılarak çalışıldığı literatür de görülmektedir. Darbe etkisi, bağlantı koşulları ve malzeme parametreleri tabakalı kompozitlerin darbe etkisi için çalışılan parametrelerden bazılarıdır. Bu tür parametreler çalışmanın şekline ve amacına göre darbe hızı, vurucu uç geometrisi, vurucu uç ağırlığı, numune geometrisi ve darbe enerjisi gibi çoğaltılabilir [10].

Son yıllarda kompozit malzemelerin düşük hızdaki darbe testlerini karakterize etmek için sarkaç veya ağırlık düşürme darbe test cihazlarının bir araya getirilmesiyle oluşturulmuş darbe test cihazlarının kullanımı giderek artmaktadır. Ağırlık düşürme test yöntemi, kompozit malzemelerin darbe testleri için tercih edilen yöntem olmaya başlamıştır. Bunun en önemli sebebi daha geniş bir alanda test parametrelerinin belirlenmesi mümkündür ve sonuçlar çok daha kolay analiz edilebilmektedir. Bu cihazların bazıları yer değiştirmeyi veya ivmelenmeyi ölçmektedirler. Bu sayede yük, yer değiştirme ve ivmelenmenin çarpma anındaki değişimi kaydedilir. Bu sonuçlar, darbe yükü zaman ve darbe enerjisi-zaman değişimlerine dönüştürülebilir. Bunlar sayesinde, en uç noktadaki yük ve absorbe edilen enerji gibi özellikler malzemedeki meydana gelen kırılma işlemiyle ilişkilendirilebilirler [11].

Kompozit malzemelere darbe uygulanması ile ilgili literatürde yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların bazılarına aşağıda değinilmiştir:

Lal, 8 katlı yarı izotropik grafit/epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe yükü davranışı ile ilgili çalışma yapmıştır. Basit bir enerji yayma modeli, darbe sonrası numunenin kalıntı mukavemetini tespit etmek için geliştirilmiştir [12-13].

Whittingham ve diğerleri, ön gerilme altındaki karbon fiber/epoksi tabakaların düşük hızdaki darbe cevabını araştırmışlardır. Numuneler için, her ekseninde bağımsız olan, ya tek eksenli ya da iki eksenli çekme veya basma yükü sağlayan özel deney takımı tasarlanmıştır. Sonuçlar; nüfuziyet derinliği, darbe yükü ve absorbe edilen enerjinin esas olarak düşük darbe enerjisi seviyesinde ön gerilme değerinden bağımsız olduğunu (6 J) fakat daha yüksek darbe enerjisi seviyelerinde daha önemli hale geldiğini göstermektedir (10 J) [14].

Husseinzadeh ve diğerleri, bu çalışmada dört farklı fiber takviyeli kompozit plakalara farklı darbe enerji seviyelerinde ve momentlerinde standart bir ağırlık düşürme test cihazı ile darbe testi uygulamışlardır. Hasar bölgelerini tahribatsız muayene ile belirlemişlerdir. Karbon fiber tabakalı kompozit levhalar düşük hızlı darbe yükü altında en iyi yapısal özelliği gösterirken hibrid karbon/cam elyaf takviyeli kompozitler ise yüksek hızlı darbe yükü altında uygun davranış göstermiştir. Son olarak, test edilen tüm plakalar benzer şartlar altında ANSYS LS DYNA V6.1 yazılımı kullanılarak modellenmiş ve deneysel sonuçlarla uyumlu sonuçlar elde edilmiştir [15].

Sugun ve Rao, cam, karbon ve kevlar takviyeli kompozitlere düşük hızda tekrarlı darbe testleri uygulanmıştır. Cam ve kevlar kompozitler için darbe hasar ölçüsü nihai delaminasyon alan haritaları kullanılarak yorumlanmıştır. Sonuçlar; her üç kompozit için toplam enerji artarken darbe sayısındaki artış ile darbe yükünün giderek azaldığını göstermiştir. Nihai delaminasyon alan haritaları ile tekrarlı darbe testlerinin, polimer kompozitlerin hasar tolerans etkisini anlamada yardımcı olduğu sonucuna varılmıştır [16].

Mili ve Necip, farklı E-cam/epoksi tabakalı kompozit plakaların düşük hızlı darbe etkisi altında teorik ve deneysel olarak çalışma yapmışlardır. $[0_2/90_6/0_2]$, $[0_3/90_4/0_3]$ ve $[0_4/90_2/0_4]$ farklı şekilde istiflenmiş üç çapraz katlı tabakalı kompozit malzemelere düşük

hızlı darbe yükü uygulanmıştır. Merkeze etki eden darbe kuvvetinden dolayı vurucunun ivmelenmesi, yer değiştirme ve dairesel levhanın hedef sapması gibi darbe sürecinin zamana göre değişim verileri elde edilmiştir. Vurucu hızlarının ve tabaka diziliminin kompozit plakalar üzerindeki etkilerinin incelemişlerdir. Deneysel sonuçları doğrulamak amacıyla teorik model oluşturarak, Hertz temas yasasını kullanmışlardır [17].

Aslan ve arkadaşları ile Aslan ve Karakuzu, çalışmalarında düşük hızlı darbe etkisi altında fiber takviyeli kompozit malzemelerin boyutsal etkisini araştırmışlardır. (0/90/0/90)_s dizilimli çapraz katlı E-cam/epoksi kompozit malzeme üretilmiş ve tüm malzeme parametreleri deneysel olarak ölçülmüştür. Darbe testleri özel olarak geliştirilmiş düşey darbe test cihazı ile yapılmıştır. Darbe testi farklı ağırlıktaki darbe kütleleri ve 3 m/s'lik bir çarpma hızında gerçekleştirilmiştir. Deneyler karşılıklı iki kenarı sabitlenmiş, diğer iki ucu serbest ve her biri plakanın merkezinden uygulanan darbe yükü ile 150x150, 150x100 ve 100x50 boyutlarında 4,8 mm kalınlığındaki numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 3 DIMPACT programı kullanılarak analiz çalışması yapılmıştır. Nümerik olarak hesaplanan temas kuvveti-zaman değerleri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozitlerde darbe hızının, darbe kütlesinin, kompozit plakanın boyutlarının ve kalınlığının önemini belirlemişlerdir [18-19].

Belingardi ve Vadori, karbon fiber/epoksi tabakalı kompozitlerin düşük hızlı darbe etkisi altında deneysel kütle düşürme testi ile çalışma yapılmıştır. Farklı istifleme biçimlerine sahip, kalınlıkları farklı üç kompozit levhaya yarı-statik ve dinamik darbe yüklemesi yapılmıştır. Kuvvet-yer değiştirmeleri eğrileri çıkarılarak kompozitlerin farklı darbe hızlarındaki enerjiyi absorbe etme yeteneğini araştırmışlardır [20].

Mitreviski ve diğerleri, ince dokuma karbon fiber/epoksi tabakaların darbe cevabına vurucu şeklinin etkisini incelemişlerdir. Tümü 12 mm çapında yarı küresel, oval ve konik çelik vurucu uçlar kullanılarak 4 J ve 6 J'lük darbe enerjisi ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Konik vurucu tarafından etkilenen numuneler yerel nüfuziyet sonucunda en çok enerjiyi absorbe etmiştir. Beklendiği gibi yarı küresel vurucu en yüksek temas kuvveti ve en düşük temas süresini oluşturmuştur. Yalnızca küresel vurucu 4 J'lük bir başlangıç darbe enerjisi ile zar zor görünen darbe hasarını oluşturmuş diğer vurucu şekilleri ise kalıcı çentik ve nüfuziyet oluşturmuştur. Tahribatlı test teknikleri iç hasar mekanizmalarını belirlemek için

gerekli iken tahribatsız muayene teknikleri üç vurucu şekil içinde benzer hasar alanlarını belirlemeyi sağlamaktadır [21].

Lee ve diğerleri, kompozit sandviç plakanın rafine edilmiş formülasyonu, etkilenen sandviç plakanın dinamik tepkisini incelemek için kullanmıştır. Bu rafine edilmiş formülasyonda sandviç plakanın yüzleri iki ayrı MINDLIN plakaları olarak modellenmişse de çekirdeğin hem enine kesmeye hem de normal rijitliklere sahip olduğu kabul edilir. Bu model konsantre yük altında iki yüzün göreceli deformasyonlar içermesine izin vermektedir. Sonlu elemanlar yöntemi, bu rafine teorisine dayalı sandviç plakayı ayrıştırabilmek için kullanılır. Deneysel çalışmalarda sandviç plaka için; $[0_2/90_2/0_2/FOAM]_s$ grafit/epoksi ve FR10110 sert köpük kullanılmıştır. Teorik analiz ve strain-gage deneysel sonuçlarından elde edilmiş dinamik gerilme durumları karşılaştırılmıştır. Burada kullanılan teorik model düşük darbe etkisiyle kompozit sandviç plakaların dinamik davranışının açıklanır olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, darbe hızının ve çarpan kütlenin etkisi incelenmiştir [22].

Jih ve Sun, tabakalı kompozitlerin düşük hızlı darbe etkisi altındaki delaminasyonunun tespit edilmesi için çalışma yapmışlardır. Bu yöntem, ağır vurucular ile düşük hızlı darbe için uygundur. Statik delaminasyon da kırılma tokluğu, darbe koşullarında çatlak büyümesini tahmin etmek için kullanılmıştır. Kırılma gerilmeleri de dikkate alınmış ve $[90_5/0_5/90_5]$ gibi bazı plakaların kırılma tokluğunun değerlendirilmesinde önemli bir rol oynadığı bulunmuştur. Deneyler darbe kuvveti geçmişini elde etmek için gerçekleştirilmiş olsa da temas kuvvetinin delaminasyon çatlak uzunluğu boyutunu belirlemek içinde kullanılmıştır. Delaminasyon boyutunun tahmininde, statik kırılma tokluğu değerleri ve deneysel sonuçların uyumlu olduğunu ortaya koymuşlardır [23].

Wang ve Vu-Khanh, karbon fiber içeren PEEK çapraz katlı tabakaların düşük hızlı darbe testi ve analiz ile incelenmiştir. Bu çalışmada kontrol edilebilir hasar uzantısı, enine çatlaklar ve delaminasyon gibi malzeme özellikleri üzerinde durulmuştur. Kalıntı ısı gerilme ve çatlak kısıtlayıcı etkisi dikkate alınarak enine çatlak uzantısının malzeme mukavemeti yaklaşımı ile tahmin edilemez olduğu tespit edilmiştir. Darbe kaynaklı delaminasyon, kırılma mekaniğinin çatlak önleme kavramı ile karakterize edilebilmektedir. Delaminasyon kontrollü yer değiştirme koşulları altında meydana gelen Mod-II hakim

kararsız kırığın enerjisi önlenmiş gibiydi. Maksimum darbe yükü sırasında delaminasyonu önleme olduğu varsayımı ile delaminasyon önleme tokluğu $[0_5/90_5/0_5]$ laminantının test verilerinden öngörülebilmektedir. Delaminasyon tokluğunun aynı zamanda malzemenin Mod-II (kayma modu) yayılma tokluğuna yakın olduğu bulunmuştur [24].

Hosur ve diğerleri, bu çalışmada örgülü karbon fiber/epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe etkisi altındaki davranışı anlatılmaktadır. Üç tip örgülü kumaş kullanılmıştır. Bunlar ± 45 , $0/\pm 45$, $0/\pm 60$ 'dır. Dizilimi 7 tabakalı ± 45 , 4 tabakalı $0/\pm 45$ ve $0/\pm 60$ olan plakalar 2,25 mm ile 2,4 mm arasında ortalama bir kalınlık elde etmek için vakum destekli reçine infüzyon tekniği ile imal edilmiştir. 10x10 cm plakalar olarak kesilen numunelere farklı darbe enerjileri (10 J, 20 J, 30 J) uygulanmıştır. Emilen enerji ve darbe yükü gibi parametreler hesaplanmış ve kalınlık için normalize edilmiştir. Bütün numuneler, daha sonra zarar boyutunu belirlemek için ultrasonik c-scan testine tabi tutulmuştur. Sonuçlardan; 10 J herhangi bir zarar vermeden plakalara yükü sürdürdüğü, 20 J'de az hasar ve 30 J'de daha fazla hasar olduğu görülmüştür. Üç eksenli tabakalar, iki eksenli tabakalardan daha fazla yük taşımıştır. Ultrasonik tabakalara bakıldığında $0/\pm 45$ plakalarda yüksek hasar olduğu görülmüştür [25].

Luo ve diğerleri, entegre edilmiş modelleme ve test prosedürü karbon fiber/epoksi kompozit plakaların hasar oluşumu ve ilerlemesini değerlendirmek için geliştirilmiştir. Üç başarısızlık modu araştırılmış ve hasar simülasyonu için hayata geçirilmiştir. Üç boyutlu sonlu elemanlar metodu reel darbe olaylarını simüle etmek için kullanılmıştır. Simülasyon ve deney arasında ayrıntılı bir karşılaştırma 0,59 J darbe enerjisi için yapılmıştır. Hasar, simülasyondan gelen matris yetmezliği ile birleştiğinde tabakalar arası delaminasyon olarak tespit edilmiş olan deneyle doğrulanmıştır. Bu etki alanına bitişik olmayan küçük bir delaminasyon alanı olduğu hem simülasyonda hem de deneyde ortaya çıkmıştır. Matris çatlak uzunluğunun kesin olarak değerlendirilmesinde daha fazla çalışmaya ihtiyaç olabileceği belirtilmektedir [26].

Im ve diğerleri, bu çalışmada sıcaklık değişimlerinin (düşük ve yüksek sıcaklıklar) etkisini CFRP tabakaların darbe sonucu hasarı deneysel olarak incelenmiştir. Bu deneyde kullanılan kompozit tabakalar $[0_6/90_6]_s$ ve $[0_4/90_4]$ fiber CF/EPOXY ile elle yatırılmıştır. Hava tabancası tarafından atılan çelik bilye CFRP tabakalarda darbe hasarı oluşturmak için

kullanılmıştır. Deneyler $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarda yapılmıştır. Darbe hasarlı numuneler için tahribatsız değerlendirme (NDT), taramalı akustik mikroskobu (SAM) gibi farklı sıcaklıklardaki hasar büyümesini karakterize etmek için delaminasyon hasarlı örnekler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle bu çalışma düşük ve yüksek sıcaklıklarda yabancı madde hasarına maruz kalan CFRP tabakaların (CF/epoksi ve CF/PEEK) darbe enerjisi ve darbe hasarı arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla yapılmıştır [27].

Tai ve diğerleri, Düşük enerjili darbeye maruz bir $[0/45/90/-45]_{2S}$ karbon fiber/epoksi tabakalı kompozitin yorulma davranışı incelenmiştir. Tabakaların mukavemeti, kalıntı mukavemeti nüfuziyet tepkileri ölçülmüştür. Bu çalışmada etkilenen ve etkilenmeyen tabakaların yorulma davranışı karşılaştırılmıştır. Yorulma testleri 3 Hz'lik frekansı ile gerilim-gerilim (T-T) yükleri altında değişik stres seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Median renk metodu ve Weibull dağılımı darbe ve yorulma testleri altındaki numunenin hata olasılıklarını tahmin etmek için uygulanmaktadır. S/N eğrileri elde edilmiş ve darbe yükü olan ve olmayan her iki tabakanın S/N eğrileri karşılaştırılmıştır. Nispeten düşük enerjili darbe uygulandığı zaman çekme dayanımı biraz azalmaktadır, ancak daha yüksek enerji etkisi kullanıldığı zaman çekme dayanımında daha geniş bir veri dağılımı ile önemli bir azalma gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, yorulma ömür çevriminin düşük enerjili darbeden sonra azaldığı görülmektedir. C-scan, düşük enerjili darbeye maruz numunelerin hasar dilimini incelemek için kullanılır ve bu hasar diliminin darbe enerjisi ile arttığı görülmüştür. Darbe hasarı etkisi ile delaminasyon yayılımı yorulma testi sırasında ortaya çıkmaktadır ve izlenmektedir [28].

Rio ve diğerleri, bu çalışma, karbon fiber takviyeli epoksi matrisli tabakaların (CFRP) düşük darbe hızında ve düşük sıcaklık koşullarında tepkisini incelemektedir. Farklı istifleme dizilimlerinde tek yönlü, çapraz katlı, yarı-izotropik ve örgü tabakalı kare numuneler ağırlık düşürme test cihazı kullanılarak test edilmiştir. Test sıcaklığı $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ arasında değişmektedir. Darbe testlerinden sonra, hasar uzantısı c-scan ultrasonik muayene ile ölçülmüştür ve hasar mekanizmaları optik ve taramalı elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Sonuçlar sıcaklığın azalmasıyla darbe enerjisinin arttığını gösterirken, absorbe edilen enerji ve hasar alanının da arttığını göstermiştir [29].

Khalili ve diğerkleri, bu çalışmada, düzlem içinde tek eksenli takviyeli grafit/epoksi kompozit plakanın ön gerilmeli çekme ile enine darbe yüküne maruz kaldığındaki tepkisi anlatılmaktadır. Sveklo iletişim kuramı ortotropik malzemelerin plaka ve darbe arasındaki etkileşimini tanımlamak için kullanılmıştır. Hem tek eksenli hem de çift eksenli çekme’de ön gerilmeler dikkate alınmıştır ve temas gücü, temas süresi ve plakanın merkezi sapma üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Temas kuvveti üzerindeki etkisi marjinaldir, hâlbuki merkezi sapma ve temas süresi ön gerilmelerden önemli ölçüde etkilenmektedir [30].

Morais ve diğerkleri, cam, karbon ve aramid kumaş takviyeli kompozitlerin tekrarlı düşük enerjili darbe direnci üzerinde tabaka kalınlığının etkisi farklı iki darbe enerjisi seviyesi için değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, belirli bir enerji seviyesinin altında tabakanın kesit alanı, darbe dayanımını belirleyen en uygun değişken olduğunu göstermektedir. Bu koşullar altında test edilen tüm tabakaların deneysel noktaları, kullanılan takviye fibere bakılmaksızın tek bir eğri üzerine düşmektedir. Vurucunun enerji seviyesi arttırıldığında fiber karakteristikleri ile ilgili hale gelmiştir. Cam kumaş takviyeli kompozit artan tabaka kalınlığı ile darbe direnci üzerinde dik bir artış göstermiştir. Bu davranışı öncelikle kullanılan cam kumaşın daha büyük alan kapmasına bağlanmıştır. Aramid ve karbon fiberlerin anizotropik davranışıyla da alakalıdır. Bir ikinci dereceden denklem deneysel noktalara uyum sağlamak için gösterilmiştir ve ikinci dereceden terimin katsayısı tabaka kalınlığı ile darbe direncinin artışını yansıttığı gösterilmiştir [31].

Freitas ve diğerkleri, bu çalışmanın amacı, darbe yüküne maruz kaldığında etkilenen kompozit tabakaların hasar büyüme mekanizmalarını belirlemektir. Bu amaçla bir dizi darbe testleri karbon fiber takviyeli ve epoksi reçine matrsten yapılmış kompozit tabakalar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Hasar tespiti için darbe test cihazı c-scan ultrasonik cihazla birlikte kullanılmıştır. İki istifleme dizilimi, iki farklı epoksi reçineler ve karbon fiberler, dört farklı elastik davranışı temsilen ara yüzler farklı bir sayı ile kullanılmıştır. Numunelerden sadece statik analiz kullanılarak nümerik değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, delaminasyon alanının darbe yükü nedeniyle tabakalar arası ara yüz sayısına bağlı olduğunu göstermiştir. Darbenin etkisiyle iki hasar mekanizmalarının istifleme dizilimi ve plakaların kalınlığı ile etkilendiği tespit edilmiştir [32].

Taşkıran, bu çalışmada, düşük ve yüksek sıcaklıklarda (-40 °C, -25 °C, 25 °C, 40 °C, 60 °C) düşük enerjili darbeye (14,5 J, 10 J, 7 J) maruz kalan 8, 10 ve 16 tabakalı karbon

prepreg kompozit levhalarda darbe sonucu meydana gelen hasar ve burkulma yüklerinin değişimi incelenmiştir. Kullanılan kompozit levhalar tek yönlü takviyelendirilmiş tabakalardan oluşmakta olup darbe testleri yüksek sıcaklık için Instron Dynatup 9250 ağırlık düşürme test cihazında, düşük sıcaklıklar için ise özel olarak önceden imal edilmiş olan ağırlık düşürme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Darbe sonrası levhalarda meydana gelen hasar alanları C-scan, oluşan çentik derinlikleri komparatör, gerçekleşen hasar tipleri mikroskop aracılığı ile incelenmiştir. Sıcaklığın etkisi ile oluşturulan düşük enerjili darbelerin, tabakalı kompozit levhalarda olan etkisi, iki tarafı ankastre olacak şekilde bağlanmış basma test cihazından sağlanan kritik burkulma yüklerinin elde edilmesiyle incelenmiştir [33].

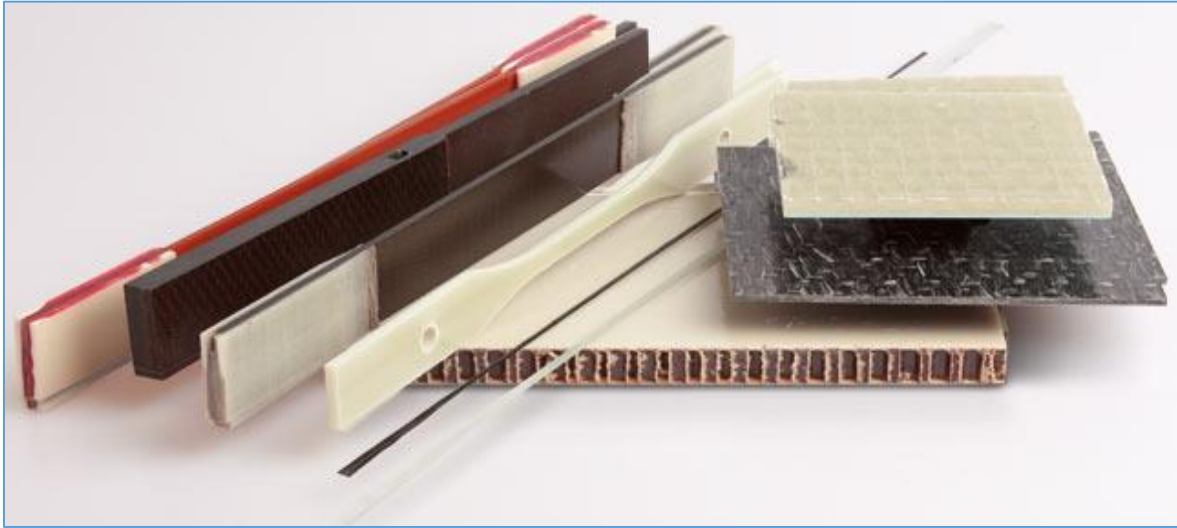
Karaca, bu çalışmada, farklı kalınlık ve oryantasyon yüzdesindeki tek yönlü karbon tabakalı kompozit levhaların düşük hızlı darbeye karşı cevabının incelenmesidir. Darbe davranışı için incelenen parametreler, darbe enerjisi, oryantasyon yüzdesi, tabaka kalınlığı ve vurucu kütle ağırlığından oluşmaktadır. Ağırlık düşürme test cihazı kullanılarak, her bir numuneye farklı enerji seviyelerinde darbeler uygulanmıştır. Ayrıca bir numune üzerinde delinme meydana gelene kadar yapılan darbe testleri ile geri sekme, nüfuziyet ve delip geçme darbe davranışları incelenmiştir. Darbe sonrası levhaların içyapılarında oluşan hasar türleri mikroskop ile gözlemlenmiş, hasar alanları tahribatsız muayene yöntemlerinden olan ultrasonik C-scan metodu ile incelenmiş ve çentik derinliğinin zamana bağlı değişimi ise komparatör ile ölçülmüştür. Hasarlı ve hasarsız test numunelerinin burkulma testleri gerçekleştirilmiş ve kalan kritik burkulma dayanımları bulunmuştur [34].

Bu çalışmada amaç; Elle yatırma metoduyla üretilmiş olan tabaka sayıları aynı, 6 farklı dizilime sahip, 55 °C’de 16 saat süre ile kürlenmiş olan numunelerde sıcaklığın mekanik özellikler üzerindeki etkisini deneysel olarak belirlemektir. Aynı darbe enerjisi seviyesinde numunelere düşük hızlı ağırlık düşürme test cihazı ile darbe uygulanmıştır. Bu cihazın seçilmesinin sebebi geniş bir alanda test parametrelerinin tespitinin mümkün olması ve sonuçların çok daha kolay analiz edilebilmesidir. Darbe sonrası Temas Kuvveti - Zaman, Gerinim - Zaman grafikleri elde edilmiştir. Numunelerin içyapısındaki hasarları tespit edebilmek için mikroskop kullanılmıştır, numunelerdeki çöküntü derinliği de mikroskop yardımı ile ölçülmüştür. Sonuç olarak; tabaka diziliminin ve sıcaklık değişiminin kompozit malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiş ve elde edilen grafikler yorumlanmıştır.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

2.1. Kompozit Malzemenin Tanımı

Kompozit malzemeler; belirli bir amaca yönelik olarak, en az iki farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle meydana gelen malzeme grubudur. Üç boyutlu nitelikteki bu bir araya getirmede amaç, bileşenlerin hiçbirinde tek başına mevcut olmayan bir özelliğin elde edilmesidir. Diğer bir deyişle, amaçlanan doğrultuda bileşenlerin daha üstün özelliklere sahip bir malzeme üretilmesi hedeflenmektedir [36].



Resim 2.1. Kompozit malzemelerden örnekler [38]

Kompozit malzemeler yeni bulunan bir malzeme grubu olmayıp, doğada var olan yapılardan hareketle, farklı özelliklere sahip malzemelerin birleştirilmesi sonucu elde edilmektedirler. Bu tanıma göre küçük parçacıklar halinde karbon içeren demir de kompozit malzeme sınıfına girecektir. Ancak, perlitik yapıdaki çelik, ferrit ve sementit tabakalarının düzenli dizilişine sahip olması nedeniyle, mikro kompozit olarak kabul edilebilir. Bu durumdan doğabilecek tartışmaları önlemek amacıyla kompozit malzemeler "iki veya daha fazla malzemenin makroskobik düzeyde bileşimi" şeklinde tanımlanabilir [35].

Kompozit malzemede genelde dört koşul aranmaktadır;

- İnsan yapısı olması dolayısıyla doğal bir malzeme olmaması,

- Kimyasal bileşimleri birbirinden farklı ve belirli ara yüzlerle ayrılmış en az iki malzemenin bir araya getirilmiş olması,
- Farklı malzemenin üç boyutlu olarak bir araya getirilmiş olması,
- Bileşenlerin hiç birinin tek başına sahip olmadığı özellikleri taşıması, dolayısıyla bu amaçla üretilmiş olması

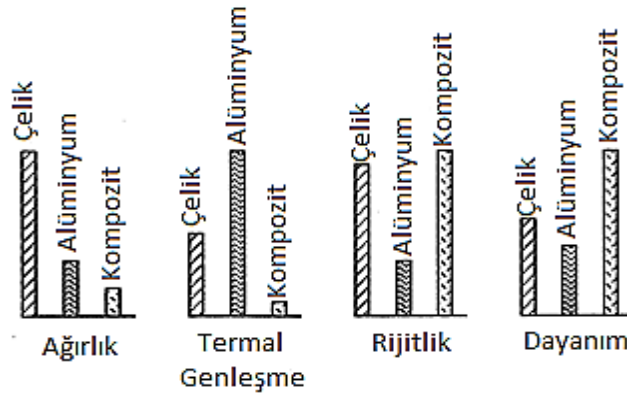
Buna koşullara göre malzeme, mikroskobik açıdan heterojen bir malzeme özelliği göstermekte, ancak makroskobik açıdan homojen bir malzeme gibi davranmaktadır [36]. Bir kompozit malzeme, genelde düşük modül ve dayanıma sahip reçine veya metalik matris ana fazı ile bunun içinde dağılmış daha az oranda kullanılan ikincil fazı olan takviye elemanından oluşmaktadır. Kompozit malzeme bünyesinde, çekirdek olarak adlandırılan takviye elemanı ve bunun etrafını çevreleyen matris malzemesinin bulunduğu bilinmektedir. Takviye elemanı olarak değişik morfolojiye sahip kısa ve uzun elyaflar, whiskerler (kılcal kristaller), kırılmış veya parçacıklı seramikler kullanılmaktadır. Bunların temel fonksiyonu, gelen yükü taşımak ve matrisin rijitlik ve dayanımını artırmaktır. Matrisin fonksiyonu ise elyaflara yük ve gerilim transferi sağlayabilmek için elyaf-matrisi bir arada tutmak yanında çoğu takviye elemanları çok gevrek ve kırılgan olduğundan onların yüzeylerini dış ve çevresel etkilere karşı korumaktır. Ayrıca plastiklik ve süneklik üstünlüğü ile elyaflar da kırılgan çatlakların yayılmasını önler. Plastik deformasyonlar ve çatlaklar varsa elyaflara paralel olarak yönlerini değiştirir [37].

2.2. Kompozitin Avantaj ve Dezavantajları

Kompozit malzemeler genellikle kendi başlarına elde edilemeyen bileşenlerinin, en iyi özelliklerinin bir malzemedeki toplanması önemli avantaj meydana getirir. Kompozit malzeme üretimi ile aşağıdaki bazı özellikler sağlanabilmektedir. Bunlar genel olarak şöyle sıralanabilir;

- Yüksek dayanım,
- Yüksek rijitlik,
- Yüksek yorulma dayanımı,
- Mükemmel aşınma direnci,
- Yüksek sıcaklık kapasitesi,
- İyi korozyon direnci,

- İyi termal ve ısı iletkenliği,
- Düşük ağırlık,
- Çekicilik ve estetik görünümü [37],
- Yüksek Dielektrik direnç,
- Renk çeşitliliđi,
- Tasarım esnekliđi,
- Tamir edilebilirlik,
- Sızdırmazlık (su izolasyonu) [1],
- Karmaşık parçaların yekpare şekilde üretilebilmesi nedeniyle birçok küçük/ara parça ve bu parçaların montajlanması işlemleri asgari düzeye indirilebilmekte ve üretim süresi kısalmaktadır [33].



Şekil 2.1. Kompozit malzemelerle diğerk malzemelerin özelliklerinin karşılaştırılması [39]

Bütün bu özellikler aynı zamanda oluşmaz ve herhangi bir uygulama için böyle bir gereksinime ihtiyaç da yoktur. Özellikleri bilinen bileşenlerden yararlanılarak bir kompozit malzemenin bazı özellikleri, örneğin, yoğunluk, elastik modülleri ve çekme dayanımları gibi hesaplanabilir. Belirtilen bu özellikler için gerekli şartlar; uygun matris ve takviye eleman çifti, üretim tekniği, optimizasyonu, bileşenlerin mukavemet özellikleri ve diğerk faktörler göz önüne alınarak üretim yapılırsa istenilen özelliği elde etmek mümkündür. Uygun matris/takviye elemanı seçiminin, sistemin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine etkisi büyüktür. Çünkü kompozit içerisinde matris tarafından yükün takviye elemanına iletilmesinde matris ile takviye elemanı arasındaki ara yüzey bağının da kuvvetli olması gerekmektedir. Uygun matris/takviye elemanı seçiminin, sistemin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine etkisi büyüktür. Çünkü kompozit içerisinde matris tarafından yükün takviye elemanına iletilmesinde matris ile takviye elemanı arasındaki ara-yüzey bağının

da kuvvetli olması gerekmektedir. Ara-yüzey bağının kuvvetli olması ise bileşenlerin uyumuna ve matrisin ıslatabilirlik özelliğine bağlıdır. Bunun yanında, üretim tekniği seçimi dışında takviye elemanlarının matris içerisinde homojen dağılımın da matris alaşımı ve takviye elemanı çiftlerinin uygun seçimine bağlıdır. Kompozitler, karma malzeme olduklarından bu şartları sağlamak ve elde etmek için en iyi matris ve elyaf çifti seçilmelidir.

Bu avantajlar yanında bazı dezavantajları da mevcut olup bunlarda;

- Üretimin güçlüğü,
- Pahalı olması,
- İşlenmesinin güç olması yanında maliyetin yüksek oluşu ve gerekli yüzey kalitesinin elde edilemeyişi,
- Nem tutabilme özelliği,
- Diğer malzemeler gibi geri dönüşümün olmayışı,
- Kırılma uzamasının az oluşu [37],
- Kompozit malzemelerin değişik doğrultularda farklı mekanik özellikler göstermesi,
- Kompozit malzemenin üretimi esnasında oluşma ihtimali olan hava zerreciklerinin yorulma ömrünü kötü yönde etkilemesi [40],
- Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerlerinin farklılıklar göstermesi [33],

2.3. Kompozit Malzemelerin Geleneksel Malzemelerle Karşılaştırılması

Çok kullanılan metaller ve önemli özellikleri Çizelge 2.1’de ve kompozit malzemelerin geleneksel malzemelerle mekanik özellikler bakımından karşılaştırılması Çizelge 2.2’de de gösterilmiştir. Bu çizelgeden görüleceği gibi yalnız dayanım ve modüle göre elyaf takviyeli kompozit malzemeler belirli bir avantaja sahip değil kırılma uzamaları metallerden daha düşüktür. Bu kompozitlerin avantajları, birim ağırlık modülü, özgül modül/yoğunluk oranı ve birim dayanımı içinde özgül dayanım/yoğunluk oranı, düşünüldüğünde ortaya çıkmaktadır. Kompozit malzemelerin daha yüksek dayanım ve modüle sahip olması, makine elemanının ağırlığının azalması demektir. Bu durum bütün hareket eden parçalarda özellikle taşıma araçlarında çok önemli bir faktördür çünkü ağırlıkta azalmalar enerji tasarrufuna ve verimliliğin artmasına yol açmaktadır. Çizelge

2.2’de “karbon/epoksi (%60)” kompozit malzemelerin hem elyaf doğrultusuna paralel hem de elyaf doğrultusuna dik yönde özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Metallerin Özellikleri [37]

Metal Cinsi	Çekme Dayanımı (MPa)	Sünekliği (%)	Ergime Sıcaklığı (°C)	Brinell Sertlik Değeri (BSD)
Çelik	275-2070	15-22	1425	110-500
Esmer Döküm	110-207	0-1	1370	100-150
Temper Döküm	276-345	1-20	1360	100-145
Beyaz Döküm	310	0-1	1370	450
Dövülebilir Dökme Demir	242-324	30-35	1540	90-110
Alüminyum	83-310	10-35	660	30-100
Bakır	345-689	5-50	1080	50-100
Magnezyum	83-345	9-15	650	30-60
Nikel	414-1103	15-40	1450	90-250
Titanyum	550-1034	---	1800	158-266
Çinko	48-90	2-10	785	80-100

Farklı doğrultulardaki özelliklerinde büyük farklar olduğundan bazı uygulamalarda ciddi sınırlamalar olabilir. Ancak özgül dayanım ve modülün gerçekten gerekli olduğu yerde kompozitin kullanılması önemli bir avantaj kaynağı olup tasarımda esneklik sağlarlar. Bir elyaf takviyeli kompozitin davranışları anizotropik ve elyaf ile matris arasında dayanım veya elyaf modülünde daha büyük fark kompozitte daha etkili olacaktır.

Çizelge 2.2. Kompozit ve klasik malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması [37]

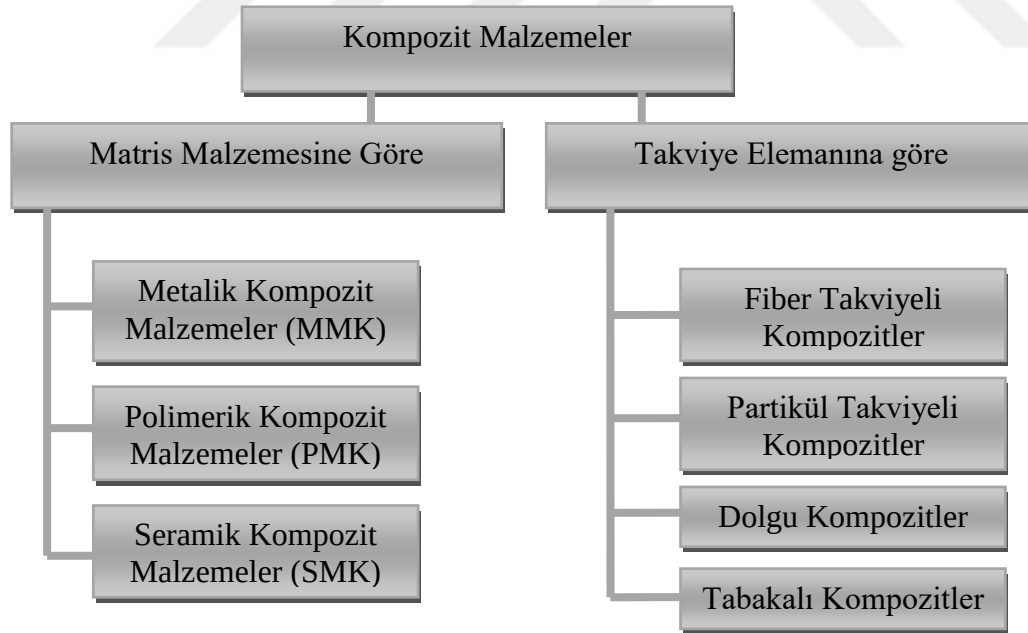
Malzeme Cinsi	Özgül Ağırlığı (gr/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastik Modülü (GPa)	Özg.Çek. dayanımı (G/ρ)	Özgül modülü (E/ρ)	Uzam. Mikt. (%)
Alüminyum	2,8	84	71	30	25	--
Al-2024	2,8	247	89	88	25	8-20
Al alaşımı	2,8	600	71	210	25	--
Titanyum	4,51	700	117	192	25,1	20
Ni alaşımı	8,18	450-1200	204	147	24,9	26-45
Ahşap(kayın)	0,7	110	13	157	19	--
Alaşımsız çelik	7,86	460	210	60	27	20
Düşük alaşımlı çelik	7,8	600	207	80-250	26,5	20-30
Dökme demir	--	275	138	--	--	0,6
Pirinç/%30Zn	8,5	550	100	60	12	--
Karbon/epoksi(%60)	1,62	1400	220	865	135	0,8
	1,6	40	7	--	--	0,6
Kevlar/epoksi	1,38	1310	83	950	60	--
Cam/epoksi(%60)	1,66	1510	165	910	99	--
Cam/polyester(%50)	1,90	750	38	390	19,8	1,8
Karbon/epoksi(Y:D)	1,50	1650	140	1100	93	--
Cam/polyester	1,55	110	9	72	5,7	2
Al/50%B	2,7	1130	207	420	77	--
Cu/50%T	14,13	1207	262	90	18	--

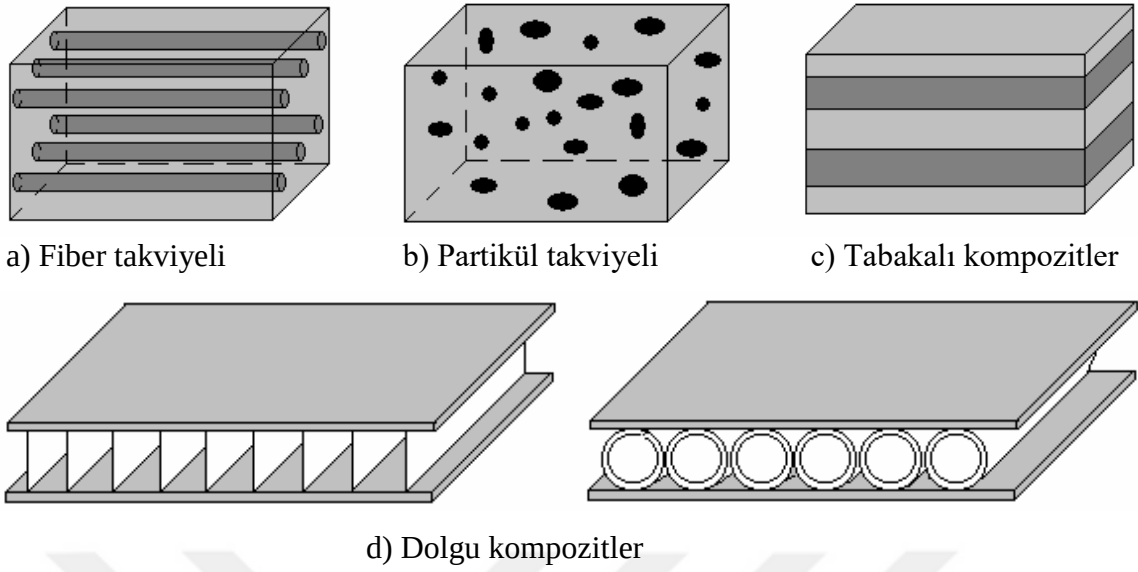
Kompozitlerin karakteristik görünimleri de şöyle özetlenebilir. Kabuk gibi et kalınlığı az olan uniform konik parçalar, keskin köşe olmayan ve enine kesitleri ani olarak değişmeyen parçalar yanında basit ve her iki tarafı kavisli, bombeli çok düzgün dış yüzeylere sahip elemanlar çok geneldir. Birleştirme işleri metallerde olduğu gibi civata, vida, kama gibi pek çok bağlama elemanı kullanılmadan daha çok yapışarak bağlama oluşturacağından dolayı metal parçaları sıkça pek çok parça ve montajı gerektirirken kompozit parçada yüksek derecede parçaların integrasyonu söz konusudur [37].

2.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, üstün özellikler elde etmek amacıyla matris yapısı ile bu yapı içine katılan takviye malzemelerin ara yüzey bağı oluşturarak bir araya getirilmesi yoluyla oluşmaktadır. Kompozit malzemeleri değişik şekilde sınıflandırmak mümkündür. Çizelge 2.3’de görüldüğü gibi matris malzemesinin türüne göre 3 grupta inceleyebiliriz:

Çizelge 2.3. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması [41]





Şekil 2.2. En genel kullanımlı takviye elemanlı kompozitler [42]

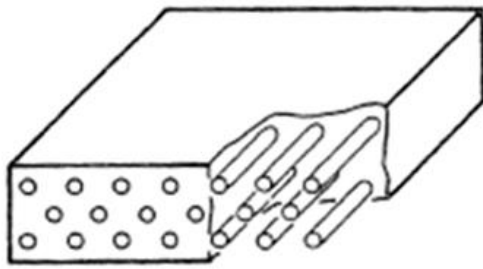
2.4.1. Takviye elemanına göre

Fiber (Elyaf) takviyeli kompozitler

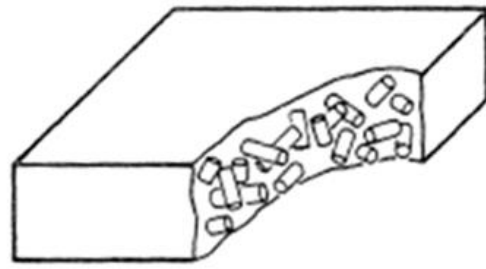
Elyaf takviyeli kompozitler; yumuşak ve sünek matris içine sert dayanıklı elastikliği yüksek elyaflar ilave edildiğinde çekme dayanımı, yorulma dayanımı, özgül modül ve özgül dayanım özellikleri iyileştirilir. Matris malzemesi kuvveti elyaflara transfer ederek yumuşaklık ve tokluk özelliği sağlarken, elyaf uygulanan yükün çoğunu taşımaktadır. Elyaflar, örme veya şerit fitil şeklinde olabilmekle beraber tabakalar halinde yönlü elyaflar da kullanılır. Sürekli elyaflar yönlendirilme özelliklerinden dolayı diğer takviye elemanlarına göre daha üstün özelliklere sahiptirler. Tek yönde çekme dayanımına maruz kalan bölgelerde yönlendirilmiş uzun elyaflar nedeniyle elyaf doğrultusunda maksimum performans gösterirken, elyaf eksenine dik doğrultuda düşük özellikler elde edilir. Bunu gidermek için hem elyaf eksenine dik hem de elyaf eksenine paralel kuvvet uygulandığında mekanik özellikleri iyileştirmek için ise değişik açılarda takviyelendirme yapılmak suretiyle bu doğrultularda daha yüksek özelliklerin elde edilmesi mümkün olabilmektedir [37].

Kısa elyaf takviyeli kompozitler

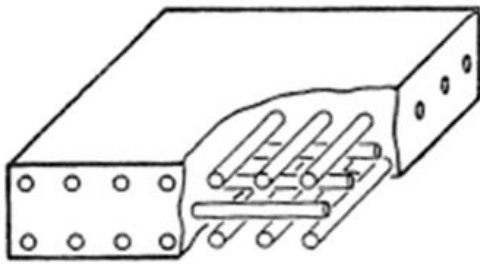
Kısa elyaflar yaklaşık 3-5 μm çapında ve 0,5-6 mm uzunluğunda üretilirler. Kısa elyaf takviyeli kompozitler, takviye elemanının ergiyik içinde malzeme ile birleştirilmesi ile oluşturulur. Üretim işleminin sürekli elyaflara göre hızlı ve maliyetinin düşük olması ve şekil verme yeteneğinin yüksek olmasından dolayı tercih edilirler [37].



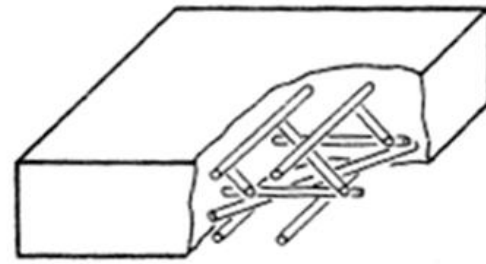
(a) Tek yönlü sürekli fiberler



(b) Rastgele dağıtılmış kesikli fiberler



(c) Ortogonal Fiberler



(d) Değişik yönlü süreksiz fiberler

Şekil 2.3. Şekillerine göre elyaf takviyeli kompozit malzeme çeşitleri [38]

Rastgele düzlemsel yönlendirilmiş kompozitler

Bu kompozitler de kısa elyaflardan oluşur fakat elyaflar matris içinde Şekil 2.3’de gösterildiği gibi rastgele iki boyutlu olarak yönlendirilmektedir. Elyafların kompozit içinde gelişigüzel yerleştirilmeleri ne kadar düzenli olursa elyaf hacim oranı o kadar artar ve tüm yönlerdeki mekanik özellikleri elyafların yerleştirilmesine bağlı olarak değişir. İşlem düzgün yapılırsa tüm yönlerde aynı mekanik özellikler elde edilebilir [37].

Parçacıklarla takviye edilmiş (partikül) kompozitler

Bu tip kompozitler de; tek veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin veya sıfır boyutlu

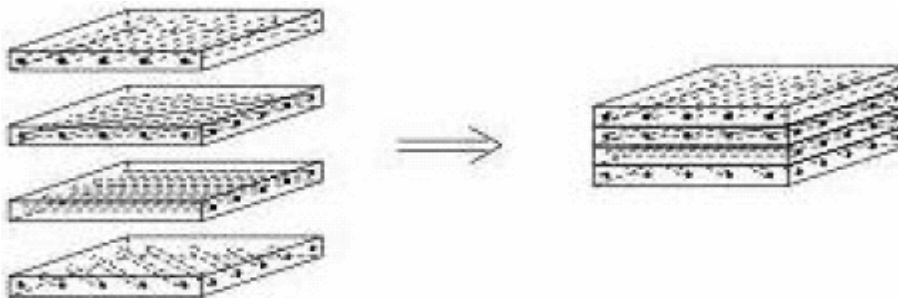
olarak kabul edilen mikroskobik partiküllerin matris ile oluşturdukları malzemeler olup ortalama gömülen parçacık boyutu 1 μm 'den büyük ve elyaf hacim oranı %25'den fazla kullanılmamaktadır. Burada yük, elyaf ve matris tarafından birlikte taşınır ve özellikler yine izotropiktir. Bu kompozitler; dayanımı iyileştirmekten ziyade beklenilmeyen alışılmışın dışında birleştirilmiş özellikler elde etmek için tasarlanmaktadır [37].

Dolgu kompozitler

Üç boyutlu sürekli bir matris malzemesinin yine üç boyutlu dolgu maddesi ile doldurulması veya emprenye edilmesi ile oluşan malzemelerdir. Düzgün petekler, hücreler veya süngere benzeyen gözenekli yapılar arasında metalik, organik veya seramik esaslı dolgu maddeleri yer alabilir. Optimum özelliklere sahip olabilmesi için birbiri içinde çözünmeyen, kimyasal reaksiyon vermeyen bileşenlerin seçilmesi gerekir. Bu tür kompozitler sandviç kompozitleri olarak da bilinir [41]

Tabakalı kompozitler

Tabakalı kompozit malzemeler en az iki tabakadan oluşurlar. Ancak, dayanım ve mekanik özelliklerin özellikle önem taşıdığı hallerde, malzemenin bu özelliklere sahip olabilmesi için en az üç veya daha fazla tabaka kullanılmaktadır. Bu tabakaları oluşturan malzemeler farklı olabileceği gibi, aynı tür malzemeden de yapılabilmektedir. Tabakalı kompozitlerin üretiminde, genel olarak tabaka niteliğindeki her türlü malzeme kullanılabilir. Burada ilke birbirlerinin özelliklerini olumlu yönde takviye edecek bir kompozisyonun oluşturulmasıdır. Tabakalı kompozitlerin üretiminde farklı türden veya tek bir türden malzeme kullanılabilir [9].



Şekil 2.4. Tabakalı kompozit levha [43]

2.4.2. Matris elemanına göre kompozit malzemeler

Polimerik kompozit malzemeler

Termoset ve termoplastikler olarak iki gruba ayrılan polimer matrisler genelde sürekli fiberlerle kullanılır. Bunlardan en önemli olanları sürekli fiberlerle takviye edilen polyester ve epoksi reçine matrislerdir. Epoksi reçine matrisli kompozitlerin en önemli uygulamalarından biri havacılık uygulamalarıdır. Polimer matrisli kompozit malzemelerin kullanıldığı ortamlarda göz önüne alınması gereken en önemli faktörler sıcaklık ve nemdir. Polimer matrisli kompozitlerin üretilmesinde en çok bilinen ve en fazla kullanılan metotlardan bazıları; elle sıvama, telle sarma, kese kalıplama işlemi, sıvı akış tekniği, takviyeli reaksiyon enjeksiyon kalıplama, ekstrüzyon ve ısıtılma oluşum metodudur. Polimerlerde kullanılan takviye malzemelerinden en önemli olanları; cam, bor ve karbon fiberlerdir [34].

Metalik kompozit malzemeler

Hafif metaller, kompozitler için matris malzemesi olarak çok cazip olmaktadır. Bunlar plastiklerden daha yüksek elastiklik modülü, dayanım ve tokluğa sahip olup yüksek sıcaklıklardaki özellikleri de daha iyidir. Ancak metal matrisli kompozit üretimi daha zordur. Bunlar her elyafı iyi ara yüzey bağı oluşturamazlar. Metallerle en kolay bağ oluşturan SiC ile kaplanmış boron elyafıdır. Fakat bunlar pahalıdır. MMK'ler de çok yaygın olarak kullanılan matris malzemesi; düşük yoğunluklu, iyi tokluk ve mekanik özelliklere sahip olan hafif metaller ve alaşımlarıdır. Bu hafif metal alaşımları, dayanım ve özgül ağırlık oranlarının iyi olması nedeniyle hafif yapı konstrüksiyonlarında tercih edilirler. Atmosfere karşı korozyon dayanımlarının yüksek olması da bir diğer karakteristik özellikleridir. Genellikle Al, Ti, Mg, Ni, Cu ve Zn matris malzemesi olarak kullanılır. Fakat Al alaşımları, Ti ve Mg yaygın olarak kullanılmaktadır [3].

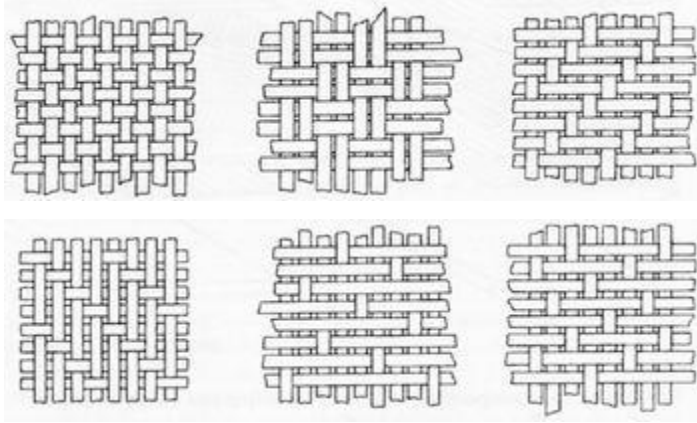
Seramik kompozit malzemeler

Seramikler, metal ve metal olmayan elemanlardan meydana gelen inorganik bileşikler olup, doğada kayaların dış etkilere karşı parçalanması sonucu oluşan kaolen kil v.b. gibi maddelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ile elde edilen malzemelerdir.

Bunlar farklı şekilde silikatlar, aluminatlar gibi metal oksitlerden oluşurlar. Genelde bunlar ya iyonik yada iyonik-kovalent bağ karışımına sahip oldukları için çok kararlıdır. Bu nedenle de çok sert gevrek ve yüksek sıcaklığa dayanıklıdır. Seramikler gevrek malzeme olduklarından mikro yapısal kusurlar, çentikler ve mikro çatlaklar bu malzemeler üzerinde gerilme yığılmalarına neden olurlar. Bu da seramik malzemenin çekme dayanımını düşürür. Basma dayanımları ise çok yüksektir. Ancak mikro yapısal kusurları azaltacak şekilde çok ince çaplı elyaflar üretilerek daha dayanıklı kompozit üretmek mümkün olmaktadır. Bu malzemelerde kayma direnci çok yüksek olduğundan plastik şekil verme olmaksızın gevrek tarzda kırılırlar. Bununla birlikte çok sert olmalarından dolayı Al_2O_3 , Si_3N_4 ve SiC gibi malzemeler aşındırıcı malzeme olarak kullanılırlar. Bu seramik malzemelerin yüksek sıcaklıklardaki özellikleri iyidir. Kompozit malzemelerde bu tür aşındırıcı malzemeler kırılma direnci azaltmak için takviye elemanı olarak kullanılırlar. Bu mühendislik seramikleri ile kompozit malzeme üretildiğinde, üretilen bu yeni malzeme yaklaşık olarak $1200\text{ }^{\circ}C$ 'ye kadar dayanabilmektedir. Karbon matris içine gömülen karbon elyaflardan oluşan kompozit malzemeler yaklaşık $3000\text{ }^{\circ}C$ 'de olağanüstü özellikler sergileyebilmektedirler. Bu da gayet tabidir ki seramiklerin birbirleri ile karşılaştırılmalarına olanak sağlamakta ve seçimleri konusunda uygulamada yardımcı olmaktadır [37].

2.5. Kompozitlerde Takviye Elemanları

Bir kompozit malzemede elyafın esas fonksiyonu; yükü taşıyarak matrisin rijitliği ve dayanımını artırmaktır. Elyaflar matris malzeme içinde malzemenin mukavemet elemanıdır. Elyaflar korozyona dirençli, yüksek elastisite modülüne sahip olup düşük yoğunlukları vardır. Elyafların boy/çapı değerinin artmasıyla matrislerden elyaflara üretilen yük miktarı da artış göstermektedir. Dolayısıyla elyafların ince çaplı üretilmeleri ile büyük kütleli yapılara oranla yapısal hata olasılıkları en aza indirilmiştir. Bu nedenle üstün mekanik özellikler gösterirler. Mühendislikte kullanılan takviye elemanlarının pek çoğu elyaf şeklinde üretildiklerinden dayanım ve rijitlikleri katı haldeki konumlarından yaklaşık 30-50 kat daha dayanıklı ve 3 kat daha rijit olduklarından kütle halinde gösterdikleri özelliklerinden daha üstün performans gösterirler [37].



Şekil 2.5. Elyaf dokuma türleri [33]

Takviye elemanı kompoziti oluşturan en önemli elemanlardan biri olup kompozit üzerine gelen yükün büyük bir kısmını taşımaktadır. Yükün elyaflara iletilebilmesi için fazlar arasındaki fiziksel ve kimyasal uyumun iyi olması, ara yüzey bağının güçlü olması gerekir. Takviye elemanı ile matrisin ısı genleşme katsayıları arasındaki uyum, kalıcı yapısal gerilmelerin oluşması yönünden önemlidir. Kompozit üretilirken takviye elemanı seçimi, üretim tekniği, üretim esnasında elyafların matris tarafından ıslatılabilmesi, yönlendirilmeleri ve elyaf içeriği kompoziti fiziksel ve mekanik özelliklerini belirler. Bu nedenle takviye elemanı seçimi ve özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir.

Elyafalarda aranan temel özellikler;

- a) Yüksek modül ve dayanım,
- b) Düşük yoğunluk,
- c) Kimyasal uyumluluk,
- d) Üretim kolaylığı,
- e) Isıl direnç gibi kriterlere göre incelenip seçilmelidir.

Son zamanlarda takviye elemanı olarak kullanılan seramiklerin başlıcaları; cam, karbon, boron, alümina ve silisyum karbürü ilaveten metalik camlar sayılabilir. Bu seramik elyafların tipik özellikleri Çizelge 2.4.'de gösterilmektedir [37].

Çizelge 2.4. Bazı seramik elyafların mekanik ve fiziksel özellikleri [37, 38]

Malzeme cinsi	Yoğunluk (kg/m ³)	Elyaf çapı (μm)	Elastik modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (GPa)
E-camı	2500	12	70	1,5-2,0
S-camı	2600	10	90	4,6
Karbon (PAN)	1800	7-10	400	2,0-2,8
Karbon (YD)	1700	7-10	200	3,0-3,5
Karbon (Mesa-faz)	1900	7-10	220	3,2
Bor	2600	140-160	400	3,4
Al ₂ O ₃ (FP)	3950	20	380	1,4-2,1
Al ₂ O ₃	3300	3,0	300	2,0
Al ₂ O ₃ /SiC	3100	10	206	1,7
Silisyum Karbür	3200	1-50	480	7,0
SiC (Nicalon)	2250	12	200	2,5
Kevlar	1440	12	124	4,5
Be	1830	-	303,36	1,27
Tungsten	19400	-	406,78	4

2.5.1. Cam elyaflar

Cam elyafların esasını silis-kum meydana getirmekle beraber belirli oranlarda sodyum, kalsiyum, alüminyum, bor ve demir gibi elementlerin oksitlerinden oluşur (Çizelge 2.5). Polimer esaslı kompozitler de yaygın olarak kullanılan (Resim 2.2) ve en ucuz olan takviye elemanıdır [37].

Cam elyafların bazı özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Yüksek çekme mukavemetine sahiptirler, birim ağırlık başına mukavemeti çelikten daha yüksektir.
- Isıl dirençleri düşüktür. Yanmazlar, ancak yüksek sıcaklıkta yumuşarlar. Bu özellikleri katkı malzemeleri kullanılarak iyileştirilebilir.
- Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler.
- Nem tutma özellikleri yoktur, ancak cam elyaflı kompozitler de matris ile cam elyaf arasında nemin etkisi ile bir çözülme olabilir. Özel elyaf kaplama işlemleri ile bu etki ortadan kaldırılabilir.
- Elektriği iletmezler. Bu özellik sayesinde elektriksel yalıtımın önem kazandığı durumlarda cam elyaflı kompozitlerin kullanılmasına imkân tanır [35, 49].

A (Alkali) camı; Yüksek oranda alkali içeren bir camdır. Bu nedenle elektriksel yalıtkanlık özelliği kötüdür. Kimyasal direnci yüksek olan A camı, en yaygın cam tipidir.

C (Korozyon) camı; Kimyasal çözeltilere direnci çok yüksektir.

E (Elektrik) camı; Düşük alkali oran nedeniyle elektriksel yalıtkanlığı diğer cam tiplerine göre çok iyidir. Mukavemeti oldukça yüksektir. Suya karşı direnci de oldukça iyidir. Nemli ortamlar için geliştirilen kompozitler de genellikle E camı kullanılır.

S (Mukavemet) camı; Yüksek mukavemetli bir camdır. Çekme mukavemeti “E” camına oranla %33 daha yüksektir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda oldukça iyi bir yorulma direncine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle havacılıkta ve uzay endüstrisinde tercih edilir [35].



Resim 2.2. Cam elyaf [1]

Çizelge 2.5. Cam türleri ve özellikleri [37]

Malzeme cinsi	Formülü	% Ağırlık		
		E-camı	S-camı	C-camı
Kum	SiO ₂	52,4	64,4	64,6
Al ve demir oksit	Al 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
Bor trioksit	B ₂ O ₃	10,6	--	4,7
Baryum oksit	BaO	--	--	0,9

2.5.2. Karbon elyaflar

Karbon, yoğunluğu 2,268 gr/cm³ olan kristal yapıda bir malzemedir. Karbon elyaflar cam elyaflardan daha sonra gelişen ve çok yaygın olarak kullanılan bir elyaf grubudur. Bu malzemeler hammadde olarak bilinirler. Karbon elyafların üretiminde üç adet hammadde mevcuttur. Bunlardan ilki rayondur (suni ipek). Bu hammadde inert bir atmosferde 1000 – 3000 °C civarına ısıtılır ve aynı zamanda çekme kuvveti uygulanır. Bu işlem mukavemet ve tokluk sağlar. Ancak yüksek maliyet nedeniyle rayon elyaflar uygun değildirler. Elyaf imalatında genellikle rayonun yerine poliakrilonitril (PAN) kullanılır. PAN bazlı elyaflar 2413 ila 3102 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler ve maliyetleri düşüktür. Petrolün rafinesi ile elde edilen zift bazlı elyaflar ise 2069 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler. Mekanik özellikleri PAN bazlı elyaflar kadar iyi değildir ancak maliyetleri düşüktür. Karbon ve grafit aynı hammaddeden elde edilirler, grafit daha yüksek sıcaklıkta elde edilir, bu da daha yüksek saflık sağlar [35].

Çizelge 2.6. Karbon ve grafit elyafların karşılaştırılması [44]

Özellik	Grafit	Karbon
Saflık (%)	99	93-95
İşlem Sıcaklığı (°C)	>1700	<1700
Elastik Modül (GPa)	>345	<345



Resim 2.3. Karbon elyaf [45]

Karbon elyafların en önemli özellikleri düşük yoğunluğun yanı sıra yüksek mukavemet ve tokluk değerleridir. Karbon elyaflar, nemden etkilenmezler ve sürünme mukavemetleri çok yüksektir. Aşınma ve yorulma mukavemetleri oldukça iyidir. Bu nedenle askeri ve sivil uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Karbon elyaflar çeşitli plastik matrislerle ve en yaygın olarak epoksi reçinelerle kullanılırlar. Ayrıca karbon elyaflar alüminyum, magnezyum gibi metal matrislerle de kullanılırlar [44].

2.5.3. Bor elyaflar

Bor elyaflar aslında kendi içlerinde kompozit yapıdadırlar. Çekirdek olarak adlandırılan ince bir flamanın üzerine bor kaplanarak imal edilirler. Çekirdek genellikle tungstendir. Karbon çekirdek de kullanılabilir ancak bu yeni bir uygulamadır [46].

Bor-Tungsten elyaflar, sıcak tungsten flamanın hidrojen ve bortriklorür (BCl_3) gazından geçirilmesi ile üretilirler. Böylece Tungsten flamanın dışında bor plaka oluşur. Bor elyaflar değişik çaplarda üretilirler (0.05 mm ile 0.2 mm). Tungsten çekirdek ise daima 0.01 mm çapında üretilir. Bor elyaflar yüksek çekme mukavemetine ve elastik modüle sahiptirler. Çekme mukavemetleri 2758 MPa ile 3447 MPa'dır. Elastisite modülü ise 400 GPa'dır (Çizelge 2.4). Bu değer S camının elastisite modülünden beş kat fazladır [44].

Üstün mekanik özelliklere sahip olan bor elyaflar, uçak yapılarında kullanılmak üzere geliştirilmişlerdir. Ancak, maliyetlerinin çok yüksek olması nedeniyle, son yıllarda

yerlerini karbon elyaflara bırakmışlardır. Bor elyafların Silisyum Karbür (SiC) veya Bor Karbür (B₄C) kaplanmasıyla yüksek sıcaklıklara dayanımı artar. Özellikle bor karbür kaplanması ile çekme mukavemeti önemli ölçüde artırılabilir. Bor elyafların erime sıcaklıkları 2040 °C civarındadır [47].



Resim 2.4. Bor elyaf [48]

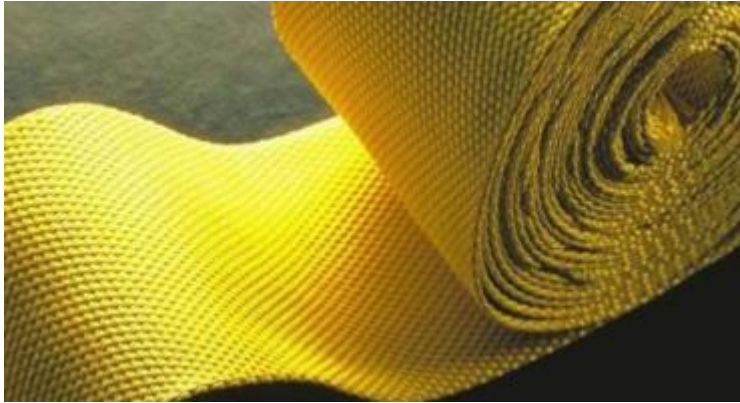
2.5.4. Silisyum karbür elyaflar

Bor gibi, Silisyum karbürün tungsten çekirdek üzerine kaplanması ile elde edilirler. 0,1 mm ile 0,14 mm çaplarında üretilirler. Yüksek sıcaklıklardaki özellikleri bor elyaflardan daha iyidir. Silisyum karbür elyaf 1370 °C’de mukavemetinin sadece %30’nu kaybeder. Bor elyaf için bu sıcaklık 640 °C’dır. Bu elyaflar genellikle titanyum matrisle kullanılırlar. Jet motor parçalarında titanyum, alüminyum ve vanadyum alaşımlı matris ile kullanılırlar. Ancak silisyum karbür elyaflar bor elyaflara göre daha yüksek yoğunluğa sahiptirler. Silisyum karbürün karbon çekirdek üzerine kaplanması ile üretilen elyafların yoğunluğu düşüktür [49].

2.5.5. Aramid elyaflar

Kevlar (Du Pont firması) ticaret adıyla bilinen aramid fiberleri karbon, hidrojen, oksijen ve azottan oluşan bir organik bileşiktir. Düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve yüksek elastik modülüne (karbon fiberler kadar yüksek değil) ve yüksek uzamaya sahiptir. Kevlar aromatik poliamid olarak bilinmektedir (altıgen şeklinde halka içerirse aromatik polimer). Düşük sıcaklıkta sülfürik asit çözeltisinde çözündürülen poliamid tozları, 80 °C’de küçük

deliklerin içinden çekilerek üretilir. Bu işlemle molekül zincirleri fiberin uzunluğu boyunca yönelir. Daha sonra 1 °C'deki su banyosunda soğutularak fiberlerin katılaşması ve asit çözeltisinin büyük bir kısmının yıkanması sağlanır. Fiberler ayrıca yıkanır, kurutulur ve makaralara sarılır. En son fiberler makaralara sarılır. Aramid fiberleri cam fiberlerler de olduğu gibi koruyucu kaplamaya gerek yoktur. Kevların iki versiyonu mevcuttur; “keklar 29” ve “keklar 49”. Kevlar 29 yüksek tokluğa, Kevlar 49 ise yüksek elastik modülüne sahiptir. Kevlar 29 yüksek tokluk özelliğinden dolayı asker kasklarda, kurşun geçirmez yeleklerde, otomobil lastiklerinde lastik ipi olarak kullanılır. Kevlar 49, hava ve uzay sanayinde, denizcilikte, otomobil ve diğer sanayi dallarında kullanılan kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak kullanılır. Aramid fiberler polimer malzemeler içinde yüksek sıcaklık özellikleri iyi olan bir malzemedir. Kolayca yanmaz ve naylon gibi erimez ve belirli süreler için (sınırlı) 300 °C de kullanılabilir. Ayrıca korozyon direnci iyidir. Ancak kesilme ve işlenmeleri zordur, özel takım malzemesi ve teknikler gerektirir. Diğer bir dezavantajı suyu (nemi) absorbe etmesi ve yüksek fiyatıdır [38].



Resim 2.5. Aramid elyaf [50]

2.5.6. Alümina elyaflar

Alümina, Alüminyum oksittir (Al_2O_3). Elyaf formundaki alümina, 0,02 mm çapındaki alümina flamanın Silisyum dioksit (SiO_2) kaplanması ile elde edilir. Alümina elyafların çekme mukavemetleri yeterince yüksek değildir, ancak basma mukavemetleri yüksektir. Örneğin, alümina epoksi kompozitlerin basma mukavemetleri 2275 ila 2413 MPa'dır. Ayrıca, yüksek sıcaklık dayanımları nedeniyle uçak motorlarında kullanılmaktadırlar [47].



Resim 2.6. Alümina elyaf [51]

Genel özelliklerini şu şekilde özetleyebiliriz;

- Metal matrisli kompozitler de ana hedef, düşük yoğunluklu ve yüksek dayanımlı malzemeler elde etmektir. Bu özellikler genelde yapı içine katılan seramik faz ile sağlanır.
- Alüminanın sahip olduğu yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek modül ve rijitlik, takviye elemanı olarak kullanılmasının en önemli nedenlerindendir.
- Alüminanın takviye elemanı olarak en yaygın kullanıldığı matris malzemesi alüminyum ve alaşımlarıdır.
- Al_2O_3 , SiC ile karşılaştırıldığında daha düşük modül ve dayanıma, daha yüksek yoğunluğa sahiptir.
- Fakat Al_2O_3 maliyet açısından, SiC'e göre daha avantajlıdır [38].

2.5.7. 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 önemli özellikleri seramik fiberlerden daha kararlı mukavemet değerlerine sahip olmalarıdır [52].

2.6. Kompozitlerde Matris Malzemeleri

Matris malzemesi, parçacıkları bir arada tutarken elyaf takviyeli kompozitlerde ise matrisin yerine getirmesi gereken başlıca fonksiyonları; düzenlenmiş elyafları bir arada tutarak kuvvetleri elyafa iletmek, elyafları çevresel etkilerden ve darbelerden korumak, çatlakları durdurmaktır. Bu özellikler, çekme ve kaymayla birlikte basma yüklemeleri için hayati önem taşır.

Kullanılan elyaflar genellikle yüksek dayanım ve elastik modüle sahip fakat çok gevrekler. Elyaflar ayrı ayrı birim içindeymiş gibi davranırken matris malzemesi kırılma oluncaya kadar bağımsız olarak yük taşıyıcı gibi davranırlar. Bu yüzden herhangi bir çatlak ani kırılmaya sebep olmaz. Örnek olarak, bir elyaf kırılırsa bitişik elyafa geçmeden önce matrise transfer olur. Bu nedenle, matrisin ve matris elyaf arasında ara yüzey bağının kompozitin tokluğu üzerine önemli etkisi bulunmaktadır.

2.6.1. Metal matrisler ve alaşımları

Hafif metal malzemeler kompozitler de matris elemanı olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Metaller plastiklerden daha yüksek elastik modül, dayanım ve tokluğa sahiptir. Yüksek sıcaklıklardaki özellikleri de daha iyidir. MMK üretimi zordur ve her elyafı iyi bir ara yüzey oluşturamaz. Silisyum karbür ve kaplanmış bor elyaf metallerle en kolay bağ oluşturulan takviye elemanlarıdır. Ancak pahalıdırlar. 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 matris elemanları Al, Ti, Mg, Ni, Cu ve Zn 'dır.

Alüminyum ve alaşımları

Demir içeren malzemelerin yanı sıra alüminyum ve alaşımları; Dayanım/ölgül ağırlık oranının yüksek olması, Elektrik iletkenliği/ölgül ağırlığının yüksek olması, Atmosfere ve diğer ortamlara karşı iyi korozyon direncine sahip olmalarından dolayı en yaygın kullanılan malzemelerdir. Bunun yanında alüminyum çok küçük gerilmelerde bile kırılabilir ve yüksek sıcaklıklarda kullanılamazlar [37]. Alüminyum alaşımları; Al-Mg, Al-Mn, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg [73].

Magnezyum alaşımları

Magnezyum metali alüminyum kadar mukavemetli olmamasına rağmen, düşük özgül ağırlığa sahiptir ve özgül dayanımı daha iyidir. Döküm ve talaşlı imalatta ise: Oksijene karşı duyarlı olması, Düşük elastisite modülü ve yorulma direncine sahip olması, Yüksek sıcaklıkta sünme ve aşınma özelliklerinin düşük olmasından dolayı daha az tercih edilir [37]. Magnezyum alaşımları; AZ10A, AZ80A, HM31A, AZ63A, AM60, ZK21A [73].

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. Çinko alaşımları; Z33520, Z35635, Z35840 [73].

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 [37]. Titanyum alaşımları; R50250, R56400, R56620 [73].

2.6.2. Plastik matrisler

Plastikler, monomer denilen kimyasal ünitelerden meydana gelen zincir şeklinde bir yapıya sahip sentetik malzemelerdir. Plastikler hafif olması ve kolay işlenebilmelerinden dolayı geniş bir uygulama alanına sahiptir. Karışık geometriye sahip şekiller bile kolaylıkla bir kalıba enjekte etmek suretiyle üretilebilmekte bu nedenle de “reçine” de denilmektedir.

Yaygın kullanılma sebepleri;

- Ekstra işleme gerek kalmadan karmaşık parça geometrilerinin kalıplanabilmesi,

- Metal ve seramiklere göre düşük yoğunluğa sahip olması ve dayanım/yoğunluk oranının iyi 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 olması bazı uygulamalarda camla bunları rekabet eder hale getirmesi,

Plastiklerin avantajları dışında dezavantajları da söz konusudur;

- Metaller ve seramiklerden daha düşük dayanıma sahip olmaları,
- Düşük elastik modüle sahip olmaları,
- Servis sıcaklığının düşük olması,
- Plastiklerin visko-elastik özellikler göstermesi ve dolayısı ile de sınırlı yükleme şartlarına sahip olmasıdır.

Termoplastikler

Termoplastikler oda sıcaklığında katı malzeme olarak adlandırılır. Isıtılırsa yumuşar, soğutulduğunda yeniden sertleşir. Kolay şekillendirilirler. Kimyasal etkilere karşı hassastırlar. Tutuşma direnci keza daha iyidir.

Özelliklerinden söz edecek olursak;

- Çok düşük rijitliğe sahip olması,
- Çok düşük çekme dayanımı ve düşük sertliğe sahip olduklarından aynı zorlama için daha büyük hacimler gerektirdiğinden dolayı her zaman tercih edilmemesi,
- Daha büyük süneklik, yaklaşık %1 ila 500 arasında değişiyor olması,
- Kuvvet etkisinde oda sıcaklığında bile sünme ve zamana bağlı şekil değiştirmelerin oluşması,

Fiziksel özellikleri;

- Metaller ve seramiklerden daha düşük yoğunluğa sahiptirler. Polimerlerin tipik 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,
- Düşük ergime sıcaklığına sahiptir,

- Özgül ısıları metallerin 2 katı yüksek olup seramiklerin 4 katıdır,
- Termal iletkenlikleri metallerden yaklaşık 3 kat daha yüksektir,
- 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;

Asetal (POM)

Formaldehitten hazırlanır. Ticari ismi polioksimetilen (POM)'dir. Yüksek rijitlik, dayanım, tokluk ve aşınma direncine sahiptir. Bunun yanında ergime noktası yüksek (180 °C) olup, nem alma kapasitesi düşüktür.

Akrilik (PMMA)

Polimetil metakrilat (PMMA) ile sembolize edilir. Lineer polimer olduğu için şekilsizdir. Bu önemli özelliği, saydam olarak optik uygulamalarda cam ile yarış halinde olmasını sağlar. Camla karşılaştırıldığında dezavantajı ise çok düşük çizme direncine sahip olmasıdır.

Akilonitril-Bütadien-Stiren (ABS)

Mükemmel mekanik özelliklere sahiptir. ABS iki fazlı olup 1 fazı sert kopolimeri (Streyn-acrylonitrile) iken diğer fazı ise Streyn-butadiene kopolimer olup kauçuktur.

Politetrafloretilen (PTFE)

Teflon olarak bilinir. Çevresel ve kimyasal etkilere karşı dirençlidir. Sudan etkilenmez. Elektrik ve ısıl direnci iyi ve çok düşük sürtünme katsayısına sahiptir. Yağlanamayan parçalar yapmak için uygundur.

Poliamids (PA)

En önemli PA ailesi naylon olup naylon 6 ve naylon 6.6 olarak iki kalitesi vardır. Bunlar Du Pont şirketi tarafından geliştirilmektedir. Naylon dayanıklı olup elastik modülü yüksek ve abrasiv aşınmaya karşı dirençlidir. Kendi kendini yağlama özelliğine sahiptir. 125 °C civarında mekanik özelliğini muhafaza eder. Önemli bir dezavantajı ise suyu emmesidir. İkinci grup poliamidler Aramidler'dir. Ticari ismi Kevlar olup elyaf takviyeli kompozitler için önem kazanmaktadır. Kevlar'a olan ilginin sebebi ise dayanımı çelik ile aynı olmasına rağmen ağırlıkça %20 daha düşük olmasındandır.

Polyesterler (PET)

Bunlar bağ durumuna göre termoplastik ve termoset'te olabilirler. Bu yapı ya şekilsiz ya da yaklaşık %30 kristalleşmiş olabilir. Hızlı soğutma ile şekilsiz yapı oldukça saydamdır.

Polietilen (PE)

Düşük nem emme kapasitesine sahiptir ve deformasyon direnci iyidir. Düşük maliyet, kimyasal kararlılık ve kolay işlem görmesi PE'i cazip yapar. Düşük ve yüksek yoğunluklu olmak üzere 2 türü vardır. Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) daha yüksek kristallik ve lineerliğe sahip olup 0,96 g/cm³ yoğunluğa sahiptir. Bu onları daha rijit ve dayanıklı yapar.

Çizelge 2.7. Termoplastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri [37, 74]

Malzeme Özellikleri	Akrilik	ABS	PTFE	PA	PET	PVC
Elastik modülü (MPa)	2800	2100	425	700	90	55
Çekme dayanımı (MPa)	55	50	20	70	3700	3100
Kopma uzaması (%)	5	10-30	100-300	300	15	20
Özgül ağırlığı (g/cm ³)	1,2	1,6	2,2	1,14	1,39	1,47
Ergime sıcaklığı (°C)	200	--	327	260	255	--

Çizelge 2.7. (Devam) Termoplastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri [37, 74]

Malzeme özellikleri	PE	Politetratken	PA 6.6	PP	POM
Elastik modülü (MPa)	1000	22	700	1400	2800
Çekme dayanımı (MPa)	30	14-34	70	35	630
Kopma uzaması (%)	10-1200	100-650	300	10-500	30
Özgül ağırlığı (g/cm ³)	0,95	0,92	1,14	0,90	1,40
Ergime sıcaklığı (°C)	--	--	260	175	168

Polipropilen (PP)

Enjeksiyon kalıplarında önemli en hafif plastiktir. Dayanım/ağırlık oranı yüksek olup YYPE ile karşılaştırılabilir. Yüksek ergime derecesine sahiptir.

Polivinil klorür (PVC)

Cam geçiş sıcaklığını azaltır. PVC ısı ve ışığa karşı kararsızdır.

Termosetler

Termosetler, polimerizasyonla iki kademedede elde edilir. Rijittirler ve tekrar ısıtılarak yumuşatılamazlar. Epoksi ve polyester; elyaf takviyeli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan matris malzemeleridir. Bunların fiziksel ve mekanik özellikleri, moleküllerin büyüklüğüne, yoğunluğa ve çapraz bağın uzunluğuna bağlıdır. Suyu emebilir fakat sürtünme direnci daha iyidir. Termosetlerin dayanımları termoplastiklere göre yüksektir (Çizelge 2.9). Termoplastiklerin özelliklerinde farklar, termal olarak kararlı oluşan yapı, çapraz bağ, moleküllerin içindeki yapının kovalent bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. Dezavantajları ise; yüksek sıcaklıklarda nispeten düşük dirence sahip olması, kısa ömür ve düşük mekanik özellikler göstermesi, düşük ısıl genleşme ve elektrik iletkenliğine sahip olmasıdır.

Epoksi

Isıl işlem görmemiş epoksiler, düşük polimerizasyon derecesine sahiptir. Epoksinin moleküler ağırlığını ve çapraz bağını artırmak için ısıtıl işlem uygulanmalıdır. Mümkün olan çevrim aracı ise poliamine ve asit anhidrittir. Isıl işlem görmüş epoksilerin dayanımı yüksek, ısıt ve kimyasal dirençleri iyidir.

Fenolik

Ticari ismi bakalit olup tahta unu, selüloz elyaflar ve kalıplama malzemesi olarak kullanılan mineraller gibi dolgu maddeleri ile her zaman birleştirilir. Bunlar gevrek fakat ısıt, kimyasal ve boyutsal kararlılığı iyidir. Renk verme ise sınırlıdır koyu renkleri vermek mümkündür.

Polyester

Başlama için polimeri glikol ile maleik anhidrit asidin reaksiyonu gerekir. Bununla oldukça düşük molekül ağırlığı olan doymamış polyester üretilir. Bu malzeme polyester ile çapraz bağlama ve polimerizasyon monomeri ile karıştırılır. Bu amaçla da %30-50 oranında streyn kullanılır. Bu karışım polyester reçine sistemini oluşturur. Polyesterler ısıtılır. Bu ısıtma işlemi ya; sıcaklık ile aktive edilen sistem ile ya da; polyester reçineye bir katalizör eklenerek ısıt işleme maruz bırakılır. Çevrim de üretim sırasında yapılır. Kalıplama veya doğru şekillendirme işlemleri sonunda da polyester çapraz bağlı olur.

Silikon

İnorganik ve yarı-inorganik polimer molekül yapılarıdaki tekrarlanan siloxane bağının varlığı ile farklılık gösterirler. Polisixan 3 şekilde üretilebilir. Bunlar; a)Yağlayıcı, b)Elastomerler ve c)Termosetting'dir. Yağlar, düşük moleküler ağırlıkta polimer olup yağlama, parlatma, mum yapımında kullanılır. Termoset silikon çapraz bağlıdır.

Amino reçineler

İki termoset polimerden üre formaldehit ve melamin formaldehitten oluşan amino grupları ile karakterize edilir. Belirli uygulamalarda, özelliklede çok katlı ve parçacık plaka yapıştırıcılarda kalıplama bileşeni olarak kullanılabilir. Ancak fenolikten biraz pahalıdır. Kalıplama malzemesi olarak kullanıldığı zaman fazla oranda dolgu maddesi ve selüloz içerirler.

Katkı maddeleri

Bir polimerin özellikleri bir dolgu maddesi kullanılarak değiştirilebilir veya basitçe maliyeti azaltmak içinde polimer içine değişik elyaf veya parçacıklar katılabilir. Dolayısı ile polimer kompozite dönüştürülebilir. Bir diğer sebepte ısı ve boyutsal kararlılığı iyileştirmektir. Katkı maddelerinin; pekiştirici, yağlayıcı, yanma geciktirici ve oksit giderici gibi amaçları vardır.

Çizelge 2.8. Bazı termoset plastik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri [37]

Malzeme cinsi	Epoksi	Polyester	Fenolik
Yoğunluk (g/cm ³)	1,11	1,04-1,06	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 iletkenlik	0,19	0,19	0,15
Isıl genleşme katsayısı (1/ °C)	45-65	55-100	68

Elastomerler

Elastomerler, termoset polimerler gibi çapraz bağlı olan uzun zincir moleküllerinden oluşur. Bunlar, çok düşük gerilmelere maruz kaldığı zaman büyük elastik deformasyon yapma yeteneği olan polimerlerdir. Bazı polimerler %500 ve daha fazla uzama yaparlar ve tekrar orijinal şekline dönerler. Çok meşhur olan polimerler ise elbette kauçuk'tur.

Kauçuk iki kategoriye ayrılabilir;

- a. *Doğal kauçuk*: Belli biyolojik bitkilerde çıkartılan kauçuktur.
- b. *Sentetik polimerler*: Termoset ve termoplastik polimerler için kullanılır ve benzer polimerizasyon işlemleri ile üretilir.

Daha fazla çapraz bağlanma sağlanması halinde elastomerler daha rijit olur ve elastik modülü daha lineerdir.

2.6.3. Seramik matrisler

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 yalıtkandır. 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 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar kullanılabilir. Karbon matris içine gömülen karbon elyaflardan oluşan kompozitler ise $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ gibi olağanüstü sıcaklıklarda da kullanılır. Seramiklerin birbirleriyle karşılaştırıldığı çizelge aşağıda sunulmuştur [37].

Çizelge 2.9. Seramik matrislerin mekanik ve fiziksel özellikleri [38]

Malzeme Özellikleri	Yoğunluk (g/cm^3)	Elastiklik Modülü (GPa)	Çekme Dayanımı (GPa)
Al_2O_3	3,95	379,21	2,07
B_4C	2,36	782,63	2,28
SiC	3	782,63	3,93
Si_3N_4	3,18	379,21	13,79

3. DARBE TESTLERİ

Mühendislik uygulamalarında, özellikle de mekanik uygulamalarda, dışarıdan gelecek herhangi bir darbeye karşı beklenmedik sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin gerekli en uygun cevabı veya davranışı verebilmesi istenir. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir. Buna karşın darbeye karşı olan cevap da malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Şöyle ki, metal ve metal alaşımları durumunda darbeye karşı malzemenin cevabı; elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelir ve darbe hasarı, çoğunlukla, çarpma yüzeyinde başladığı anda kolay bir şekilde tespit edilebilir.

Darbe hasarı, metal malzemelerde genellikle bir tehlike işareti olarak kabul edilmez, çünkü metaller plastik şekil değiştirebilme kabiliyetlerinden dolayı, büyük miktarda enerjiyi absorbe edebilirler. Metaller sabit bir gerilme durumunda yapı sertleşmeden önce çok büyük uzamalarda akabilirler, bu nedenle oluşacak kopmalar ani ve beklenmedik olmaz. Kompozit malzemelerde bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir, içyapıda oluşan delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde başlayabilir. Yukarıda da bahsedildiği gibi metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmez.

Genellikle gözle görülmeyen veya çok zayıf bir şekilde görülebilen hasarlar meydana gelir. Tabakalı kompozit malzemedede, eğer kalınlık boyunca bir takviye söz konusu değil ise, en büyük darbe hasarı enine doğrultuda oluşacaktır. Bunun en önemli nedenlerinden birisi, enine doğrultudaki malzeme elastik özelliğinin düşük olmasıdır. Bu nedenle bir kompozit malzemenin enine hasar direnci nispeten zayıftır. Darbe esnasında kompozit malzemeye aktarılacak enerjinin miktarı, malzemenin bu enerjiyi sönümleyebilmesi için oluşacak hasar modlarını belirleyecektir. Bu nedenle tabakalı bir kompozit malzemedede darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek için darbe hızının belirlenmesi çok büyük bir öneme sahiptir [11].

3.1. Darbe Testlerinin Sınıflandırılması

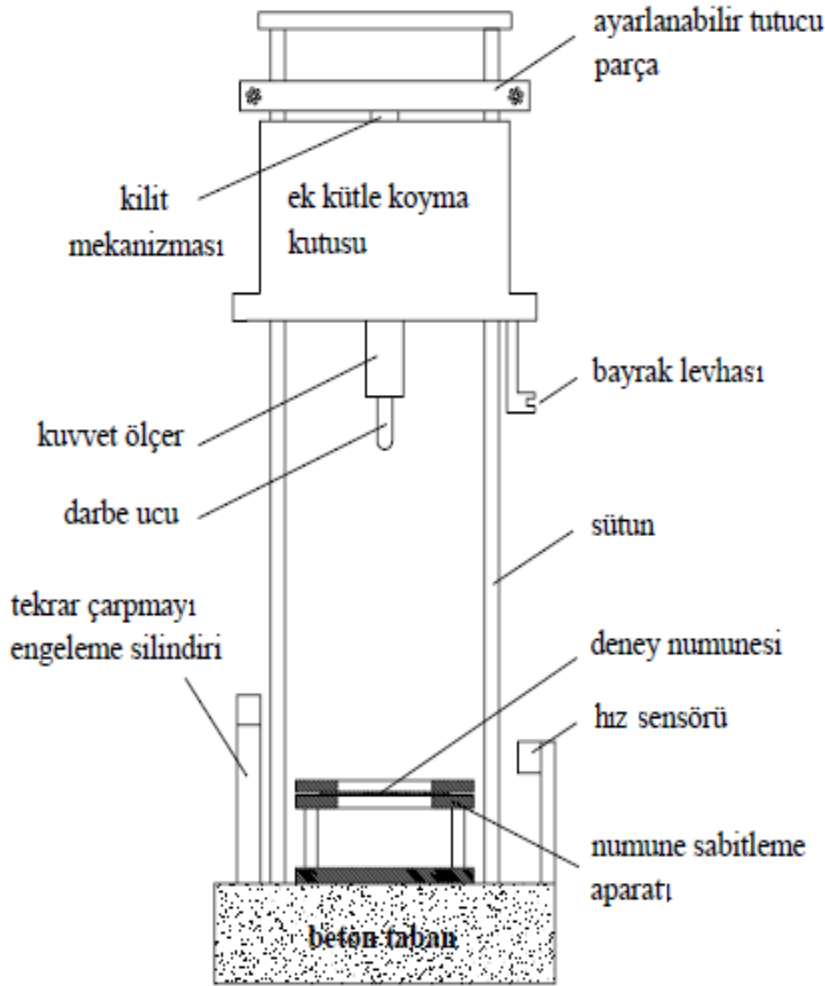
Darbe testleri, günlük hayatta karşılaşılabileceğimiz çekiçle dövmek, otomobil çarpışmaları, hareket halinde araca sıçrayan taş, kompozit yapılara çeşitli hallerde düşürülen aletlerin etkileri şeklinde benzeşim yapılarak oluşturulmaktadır. Darbe testleri malzemelerin hasar tiplerinin belirlenmesinde ve dinamik deformasyonlarının ölçülmesinde kullanılmaktadır. Darbe direnci ile malzeme ömrü ve malzeme güvenliğinin de belirlenmesi sağlanmaktadır [53].

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 matris kırılması, delaminasyon (tabakalar arası ayrılma) ve fiber kırılmalarının görüldüğü darbelerdir. Bu darbeler düşük enerjili olarak 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 [54].

3.1.1. Ağırlık düşürme darbe testleri

Bu yöntem özellikle kompozit malzemelerin darbe testleri için son zamanlarda kullanılan bir yöntem olmaya 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 [55].

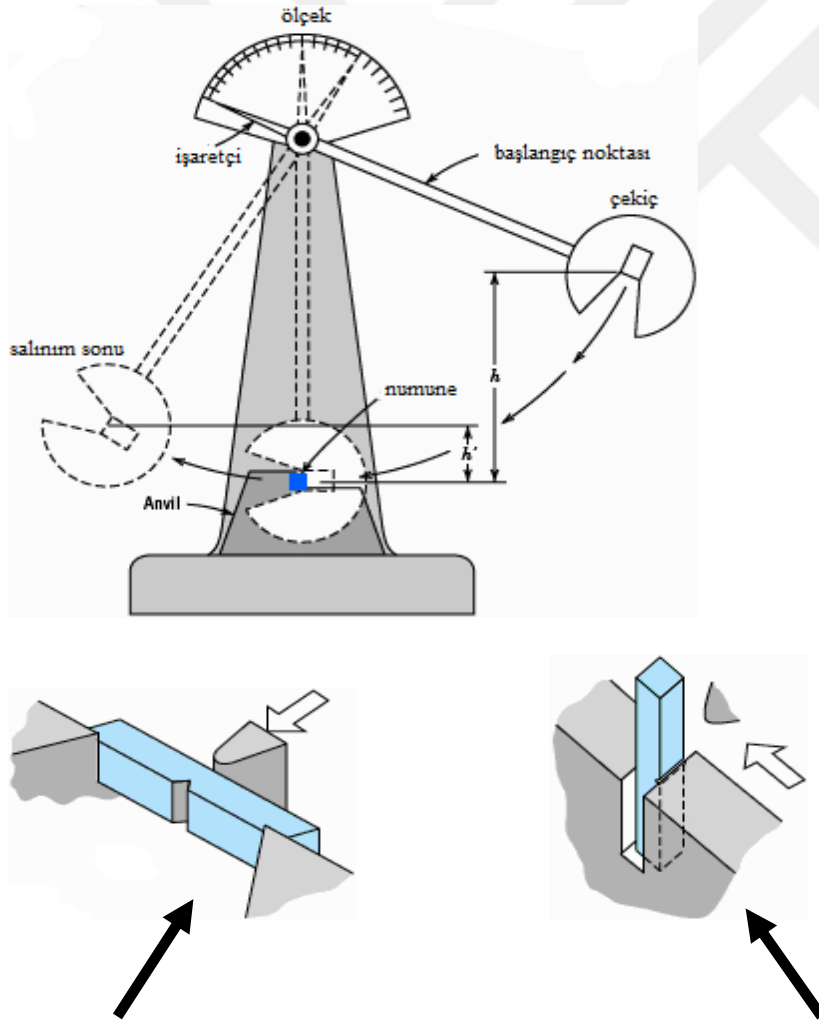


Şekil 3.1. Ağırlık düşürme test düzeneği [55]

3.1.2. Çentik darbe testleri

İzod ve charpy darbe testleri

Izod ve Charpy darbe test metotları basit sarkaç testleri olup, metal malzemelerin darbe performansının özellikle de gevrek/sünek geçiş sıcaklığının ve çentik hassasiyetinin değerlendirilmesinde uygulanan test metotlarıdır. Bu iki metot da numuneye uygulanacak olan darbenin limiti bellidir ve bu iki test metodunun birbirlerinden bazı farklılıkları vardır. Örneğin sarkaç tipleri, numunelerin desteklenme şekli ve numunelere açılan çentiğe göre darbe uygulanan yüzey farklıdır. Numunelerin ortasına gelecek şekilde açılan çentik, U veya V şeklindedir.



a) Charpy tipi darbe deneyi,

b) Izod tipi darbe deneyi

Şekil 3.2. Charpy ve Izod darbe test düzeneği [57]

Şekil 3.2.(a)'da görüldüğü üzere Charpy darbe testinde numune yatay konumda desteklenmiştir ve darbe çentik açılmamış olan yüzeyden uygulanmaktadır. Izod darbe testinde ise Şekil 3.2.(b)'de görüldüğü üzere numune dik konumda desteklenmiştir ve darbe çentik açılmış olan yüzeyin hemen üstünden uygulanmaktadır. Bu testlerde çentikli deney numunelerine, standart bir yükseklikten bırakılan bir sarkaç çarptırılır ve böylece numuneye darbe uygulanmış olur. Uygulanan bu darbeden sonra sarkacın çıkmış olduğu yükseklik tespit edilir ve sarkacın ilk ve son konumu arasındaki enerji farkı numune tarafından absorbe edilen enerji olarak belirlenir. Darbe uygulandıktan sonra sarkacın numuneyi kırıp çıkabildiği yükseklik ne kadar az ise numune tarafından absorbe edilen enerji dolayısıyla da malzemenin darbe direnci veya tokluğu o kadar fazla olmuş olur. Izod testi yaygın olarak polimerlerin testi için kullanılırken Charpy testi kompozitlerin testi için de kullanılmıştır. Ama kompozitlerin tabaka doğrultusundaki çentik hassasiyetinden dolayı Charpy testi kompozitler için çok uygun bir test metodu değildir [56].

3.1.3. Balistik testler

Balistik testler, yüksek hızlı darbe yükü gerektirdiğinden, numuneler silah vb. araçlar kullanılarak yüksek hızlı darbe deneyi gerçekleştirilmektedir (Şekil 3.3). Bu deney sistemlerinde darbe reaksiyon süreleri çok kısa olduklarından, yüksek özelliklere sahip kamera sistemleri ile desteklenmektedir. Bu çalışmalarda genellikle malzemenin hasar oluşumu ve ilerlemesi durumları incelenmektedir [58].



Şekil 3.3. Balistik test düzeneği [58]

3.2. Darbe Hasarını Etkileyen Parametreler

Kompozit yapılarda hasar genel itibariyle lokal gerilme yığılmaları nedeniyle meydana gelirler. Hasar, yapının rijitliğini ve mukavemetini dolayısıyla ömrünü azaltır. Eğer darbe esnasında darbe enerjisi malzemenin elastik sınırını aşmaz ise o yapıda hasar gözlenmez. Matris kırılması, fiber kırılması ve tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) gibi hasar tiplerini etkileyen parametreler aşağıda detaylandırılmıştır.

Plaka Özellikleri; kompozit plakanın sahip olduğu mekanik özellikler (E_1 , E_2 , ν_{12} ve G_{12}) yapının rijitliğini değiştireceğinden darbe esnasındaki temas kuvvetinin zamana göre değişimini de etkileyecektir. Lif yönündeki elastisite modülü (E_1) eğilme rijitliğini etkilerken fibere dik yöndeki elastisite modülü (E_2) temas kuvvetine daha çok etki eder. E_1 ve E_2 elastisite modülleri arasındaki farkın artışı, kompozit plakanın her bir tabakanın eğilme rijitliğini değiştirecek ve sonuçta delaminasyon miktarının artmasına neden olacaktır. Takviye elemanının elastisite modülü genel itibariyle bağlayıcı elemanın elastisite modülünden daha yüksektir. Bu nedenle, takviye elemanı matris kırılması ve delaminasyonun başlamasına neden olmaz. Bir kompozit plakanın rijitliği tabakanın kalınlığı ile orantılıdır. Kalınlık da darbe esnasında oluşan maksimum temas kuvvetini değiştirir. Düşük hızlarda, plaka genel itibariyle eğilmeye çalışır. Bu durumda, plakanın alt tabakasında en büyük çeki gerilmeleri ve dolayısıyla alt tabakadan başlamak üzere matris kırılmaları meydana gelir. Daha sonra en alt ara yüzeyde delaminasyon bu matris kırılması neticesi oluşur. Delaminasyon farklı lif yönlenme açılarına sahip tabakaların kalınlığının artması ile artar [6]. Tabakaların lif yönlenme açıları darbe hasarına tabaka kalınlığından daha fazla etki eder. Aynı yönde liflere sahip bir tabakalı kompozitte lif yönlenme açısı her bir tabakada değişmediğinden delaminasyon meydana gelmez. Eğer birbirine komşu iki tabakanın lif yönlenme açıları farklı olursa bu iki tabakanın ara yüzeyinde tabakaların eğilme rijitlikleri farkından dolayı delaminasyon meydana gelir [59].

Vurucu özellikleri: Vurucunun elastisite özelliğinin yüksek olması daha yüksek temas kuvvetinin ortaya çıkması ve vurucu ile hedef arasındaki temas alanının azalması demektir. Bunların neticesinde daha fazla hasar meydana gelir. Vurucu kütlesi değişimi enerji miktarını dolayısıyla darbe hasarı miktarını değiştirecektir. Daha yüksek kütleye sahip vurucunun neden olduğu temas kuvveti ve temas süresi daha fazla olacaktır. Kinetik

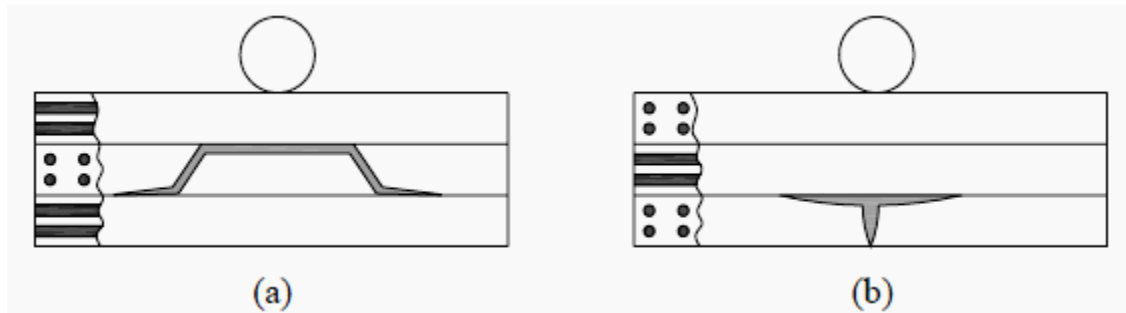
enerjileri aynı olmasına rağmen, küçük kütleli yüksek hızlı vurucu ile yüksek kütleli düşük hızlı vurucunun neden olacağı hasar aynı olmayacaktır [60].

3.3. Tabakalı Kompozitlerde Darbe Sonrası Hasar Modları

Tabakalı kompozit malzemeler, elyaf ve matris bileşenlerinden meydana gelmiştir. Bu durum malzemenin darbe davranışını karmaşık hale gerektirmektedir. Darbe sonucunda tabakalı kompozit malzemede farklı hasar oluşumları meydana gelmektedir. Bu hasar oluşumlarının meydana gelmesi, kompozit malzemenin sahip olduğu mekanik ve geometrik özelliklere bağlıdır. Bunun yanında vurucunun geometrisinin ve hızının da önemli bir yeri vardır. Bu hasar modları, matris çatlaması, fiber kopması, delaminasyon ve nüfuziyet şeklinde ele alınabilir [58].

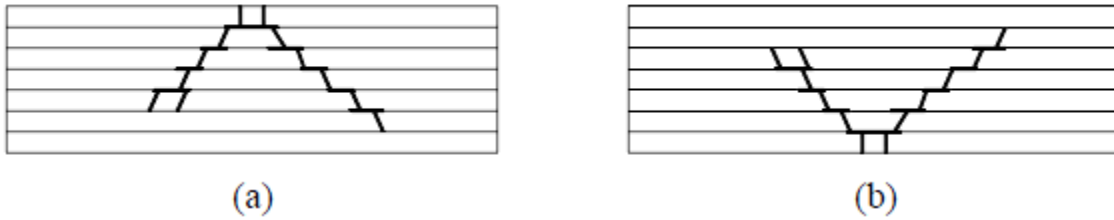
3.3.1. Matris kırılması

Matris hasarı, düşük hızlı enine darbenin oluşturduğu hasarın ilk tipidir ve genellikle matris çatlaması şeklinde meydana gelir. Matris hasarı ayrıca lif ve matris ara yüzeyi arasındaki bağın kopması şeklinde de oluşur. Matris çatlamaları, tek yönlü liflerden oluşmuş tabakalarda genellikle lif doğrultusuna paralel düzlemlerde oluşur. Darbeden sonra, tahmin edilmesi çok zor olan ve karmaşık bir düzende bulunan matris çatlakları vardır. Tabakalı kompozitin darbe sonrası özelliklerinde matris çatlaklarının çok büyük etkisi olmadığından bunların belirlenmesi çokta gerekli değildir. Ama hasar süreci matris çatlakları ile başlar ve arkasından bu çatlaklar tabaka ara yüzlerinde tabaka ayrılmasına neden olur. Matris çatlağı; çekme çatlakları ve kayma çatlakları olarak gözlenir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. (a) Kayma gerilmelerinin ve (b) çeki gerilmelerinin neden olduğu matris kırıkları [60]

Çekme çatlakları, düzlem için normal gerilmelerin tabakanın enine kayma mukavemetini aştığı zaman ortaya çıkar. Kayma çatlakları orta düzlemden belli bir açıda bulunurlar ki bu durum enine kayma gerilmelerin bu tür çatlakların oluşumunda önemli rolü oynadığını göstermektedir. Kalın tabakalı kompozitlerde yüksek yerel gerilmeler nedeniyle matris çatlakları vurucunun çarptığı ilk katmanda meydana gelir. Hasar, yukarıdan aşağıya doğru bir çam ağacı görüntüsü oluşturacak şekilde ilerler (Şekil 3.5-a). İnce tabakalı kompozitler için, kompozitin arka yüzündeki eğilme gerilmeleri en alt katmanda matris çatlağına neden olur. Bu da matris çatlakları ve delaminasyonları başlatarak ters çevrilmiş çam ağacı şeklinde bir hasar görüntüsü verir (Şekil 3.5-b) [6].



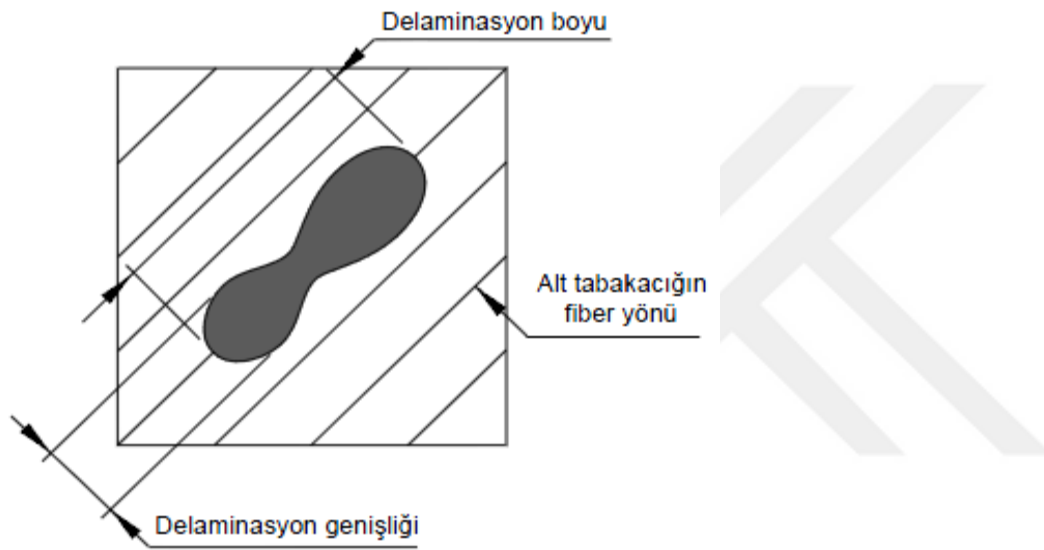
Şekil 3.5. (a) Kalın ve (b) ince plakalar için matris kırığı hasarının ilerlemesi [60]

3.3.2. Tabakalar arası ayrışma (Delaminasyon)

Delaminasyonlar, bitişik tabakalar arasında yapışmanın azalmasıyla meydana gelen ve tabakanın mukavemetini önemli derecede düşüren hasarlardır. Deneysel çalışmalar delaminasyonun sadece farklı fiber yönlendirme açılarındaki tabakalar arasında meydana geldiğini rapor etmektedir. Eğer iki bitişik tabaka aynı fiber yönlendirme açısına sahip ise bu iki tabaka ara yüzeyinde delaminasyon meydana gelmemektedir. Numune üst yüzeyinden darbeye maruz bir tabaka için, farklı fiber yönlendirme açılarındaki tabaka ara yüzeylerinde ve alt tabaka ara yüzeylerinde fiber açılarına göre meydana gelen delaminasyonlu alanlar dikdörtgen veya yarfıstığı şeklindedir.

Delaminasyon başlangıcına neden olan başlangıç kinetik enerjisinin sınır değerini tespit etmek çok zor olduğundan birkaç testin yapılmasına ihtiyaç vardır. Şunu da belirtmek gerekir ki, meydana gelebilecek delaminasyon şekilleri oldukça düzensizdir ve bunların yönlenmelerini tespit etmek oldukça zordur. Delaminasyonlu alan genelde vurucunun

başlangıç enerjisine karşı çizdirilir ve sonra küçük bir başlangıç değerine ulaşıldıktan sonra delaminasyonların boyutu darbe enerjisinin doğrusal bir şekilde artmasıyla artar. Delaminasyon boyutu genellikle C-scan ultrasonik tarama cihazından ölçülen hasarlı alan olarak belirlenir. Genel olarak, kompozit içinde hasar, birkaç ara yüzeyde ortaya çıkmaktadır ve C-scan cihazları bu hasarlı alanların tek bir düzleme yansımalarını sağlamaktadırlar. Tek bir düzleme yansıyan bu alan kompozitin tabaka sayısından etkilenmektedir. Bundan dolayı da her bir tabaka için alanın deneysel sonuçları, başlangıç kinetik enerjisine karşı farklı çizgiler üzerine düşmektedir [61].



Şekil 3.6. Tipik delaminasyon biçimi [11]

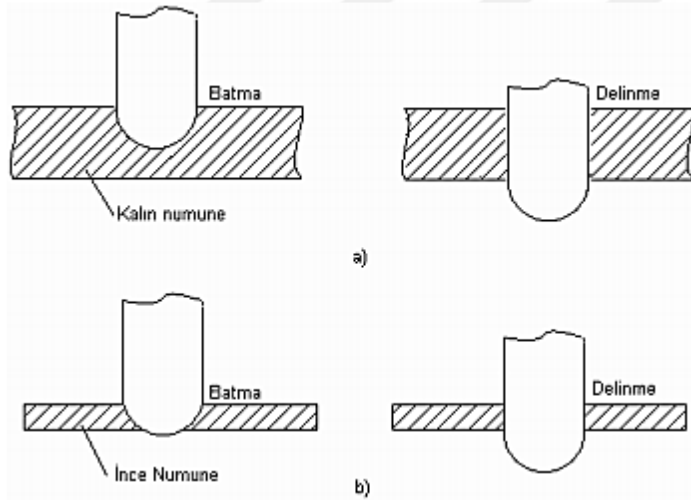
3.3.3. Fiber kırılması

Fiber kırılması kompozit tabakanın içerisinde bulunan lifin kırılmasıdır. Fiber kırılması plakanın eğilmesi neticesi en alt tabakanın yüzeyinde (yüksek çeki gerilmeleri nedeniyle) gözle görülebileceği gibi matris kırılmasını (lokal kayma gerilmeleri nedeniyle) takiben plakanın iç kısmında da görülebilir. Fiber kırılması fiber/matris ara yüzeyi yapışma özelliğinin azalması ile artar. Plakanın tamamen hasara uğraması ancak tüm fiberlerin kırılması ile mümkün olur. Keskin uçlu bir vurucu, kör uçlu bir vurucuya göre daha fazla fiber kırılması meydana getirecektir. Fiber kırılması başladığında plakanın yük taşıma kapasitesi tamamen bitmemiştir. Çünkü plakanın diğer tabakacıklarında yükü taşıyabilecek

fiberler hala vardır. Yük taşıma kapasitesinin tamamen bitmesi plakanın tüm fiberlerinin hasara uğraması ile olur [60].

3.3.4. Nüfuziyet (Batma)

Nüfuziyet, hasarın makroskobik bir modudur ve çarpan cismin malzemeye tamamıyla nüfuz etmesine müsaade eden, fiberin kritik bir uzamaya ulaştığı zaman meydana gelir. Nüfuziyetin meydana geldiği darbeler esas olarak balistik ve üzeri hız düzeylerindeki darbeleri oluşturmaktadır. Delme için gerekli olan darbe enerjisi eşiği karbon-fiber takviyeli plastik kompozit malzemeler (KFGP) için kalınlığın artmasıyla hızlı bir şekilde artmaktadır. Balistik hızda meydana gelen darbe olayında kompozit malzemede nüfuziyetin olduğu bölgeden (genellikle çarpan cismin büyüklüğünde bir bölgedir) bir parça kesilip dışarı çıkar. Malzemeden bu parçanın kopup dışarı çıkartılmasıyla soğurulan enerji, toplam olarak soğurulan enerjinin büyük bir kısmını oluşturur (tabaka kalınlığına bağlı olarak %50-60) [11].

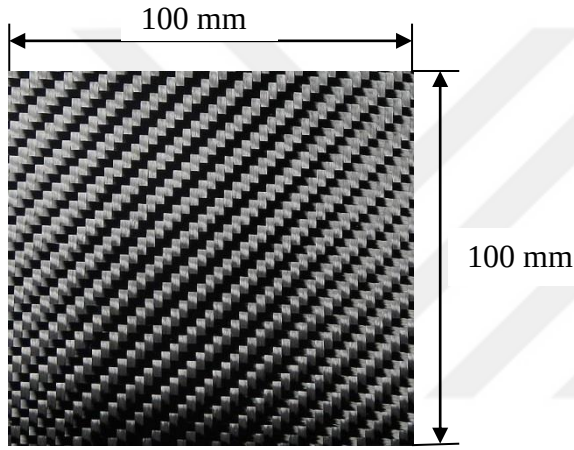


Şekil 3.7. Kalın ve ince numunelerde batma ve delinme olayı [62]

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE TEST CİHAZI

4.1. Test Numunesinin Özellikleri

Deneyde kullanılan kompozit plakalar DOWAKSA İleri Kompozit Malzemeler Sanayi Ltd. Şti. tarafından imal edilmiş tek yönlü CFU10T karbon fiber ve CR 80 epoksi reçine kullanılarak üretilmiştir. Kompozit plakalar aynı kalınlıkta olup, farklı oryantasyon açılarında üretilmiştir. Karbon fiber tabakalı kompozit plakalar %70 oranında elyaf içermektedir.



Resim 4.1. Numunenin boyutları [63]

Plakalar 'da kullanılan malzeme bilgileri aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Malzeme; Karbon fiber + Reçine
- Numunenin boyutları; 100 mm x 100 mm
- Fiber kalınlığı; 0,250 mm
- Fiber Türü; Tek yönlü CFU10T karbon fiber
- Reçine Türü; CR 80 epoksi + CH 80-6 sertleştirici
- Reçine Yüzdesi; %30
- Reçine Yoğunluğu; 1,13 g/ml

Genel olarak düzlem gerinmelerinden, tabakalardaki birleşik eğilmeler / gerilmelerden ve analizlerin karmaşıklığından dolayı, simetrik tabakalar kullanılır. Simetrik levhalar

oluşturabilmek için, orta eksenin aşağısında ve yukarısında tabakalar aynı olmalıdır (aynı kalınlık, aynı malzeme özelliği ve aynı açısız oryantasyon) [34].

Bu tez çalışması için tasarlanan 30 test numunesi simetriktir. Köşeli parantezin altına “s” simetrik anlamına gelen simge kullanılarak dizilimin tümü yazılmayabilir. Numunelerde eğilme, bükülme ya da çarpılma olmaması için serim aşamasında diziliminin düzgün ve simetrik olmasına dikkat edilmiştir. Üretimi kolaylaştırmak için farklı dizilim sayısı sınırlı tutulmuştur. Numunelerin dizilim özellikleri Çizelge 4.1.’de belirtildiği gibidir.

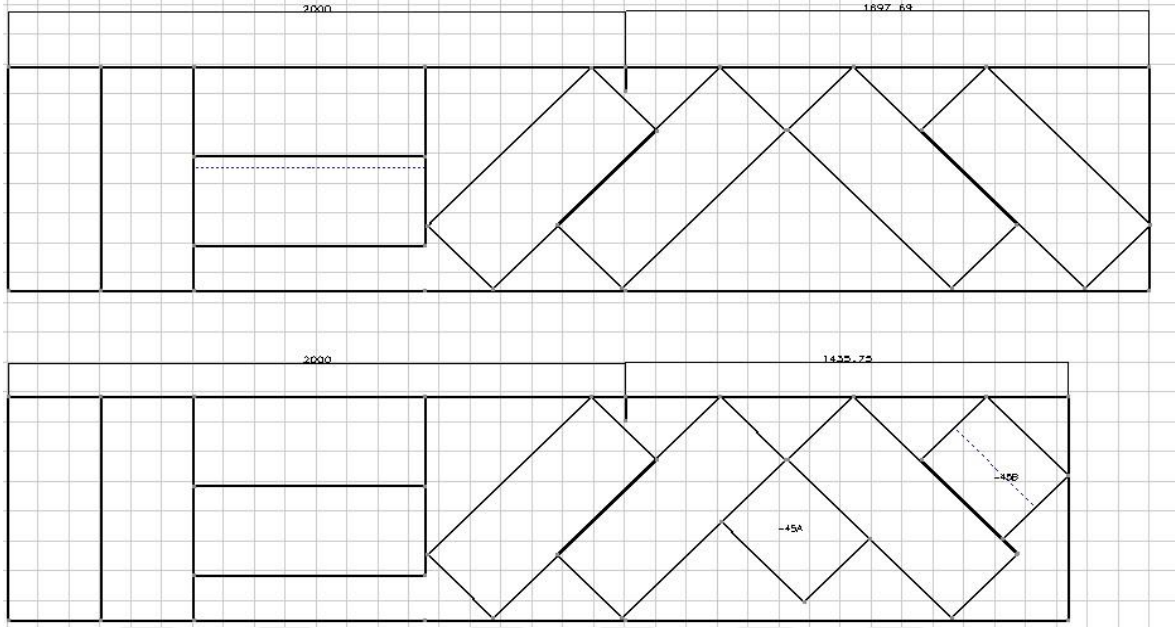
Çizelge 4.1. Numunelerin dizilimleri

Deney No	Dizilim Sırası	Tabaka Sayısı	Tabaka Kalınlığı (mm)
1	[0/+45/+45/90] _s	8	2
2	[90/+45/0/-45] _s	8	2
3	[+45/0/-45/90] _s	8	2
4	[0/+45/90/-45] _s	8	2
5	[0/-45/90/+45] _s	8	2
6	[+45/0/90/-45] _s	8	2

4.2. Test Numunesinin Hazırlanması

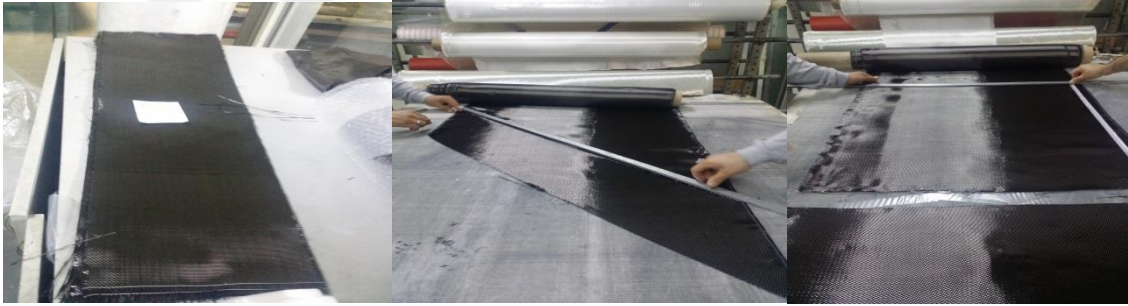
Deneyde kullanılan numuneler Epsilon Havacılık Uzay ve Savunma Sanayi Ticaret Ltd. Şti. firmasında üretilmiştir. Numuneler elle yatırma metodu ile üretilmiştir. Elle yatırma metodunda çalışanın el becerisi çok önemlidir. Reçinenin kumaşa homojen olarak emdirilememesi gibi durumlarla karşılaşılabilir. Bu durumu en aza indirmek için tecrübeli ve el becerisi yatkın olan görevliler ile üretimin yapılması faydalı olacaktır. Üretim yapılacak alanın temiz olması ve sadece bu iş için ayrılmış olması önemlidir. Üretim yapılırken iş güvenliği kuralları dikkate alınarak temiz ve uygun bir eldivenle çalışmak, reçinenin elle temasından kaçınmak önem teşkil etmektedir. Üretim detayları aşağıda anlatılmaktadır;

1. Dizilimde kullanılacak 0°, ±45° ve 90° açılı kumaşların toplam âdeti hesaplanmış, AUTOCAD programı ile kesme planı hazırlanmıştır (Resim 4.2).



Resim 4.2. Kesme planı

2. Toplam plaka sayısına ve oryantasyon açılarına göre 250 mm x 750 mm boyutlarında kumaşlar kesilmiştir (Resim 4.3).



Resim 4.3. Kumaşların kesilmesi

3. Plakaların açısız ve düz olması istendiği için kalıp kullanılmamış elle yatırma metodu kullanılmıştır (Resim 4.4).
4. Kompozit malzeme serme işleminden önce üreteceğimiz numunelerin boyutuna ve özelliklerine göre tezgah seçilir. Ayırıcı film kullanılarak malzeme serimine başlanır (Resim 4.4).

5. Farklı oryantasyon açılarında kesilen rulo halindeki karbon fiber kumaşa reçine fırça yardımıyla emdirilir (Resim 4.4).



Resim 4.4. Ayırıcı film serilmiş cam panelin üzerinde serim işlemine başlanması

6. Vakum işleminde hava girişini engellemek için serme işlemi yaptığımız cam panelin etrafı sızdırmazlık sağlanması için bant ile çevrelenmiştir (Resim 4.5).



Resim 4.5. Vakum port, Ayırıcı film, Airweave ve Vakum paketi yerleştirilmiş panelin kenarlarının bantla çevrilmesi

7. 8 kat serim tamamlandıktan sonra malzemenin üzerinde reçinenin dışarı taşmasını engelleyen, sadece havanın ve diğer uçucu maddelerin geçişine izin veren (Airweave-Breather) ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı olan ayırma filmi (Release film)

kullanılmıştır. Vakumlama esnasında eriyen fazla reçineyi emmesi için kumaş serilmiştir. Malzemenin kenarına vakum port yerleştirilmiştir (Resim 4.5 (a,b,c)).

8. Son olarak vakum paketi vakum kaçırmamasını sağlamak ve hava çıkışını engellemek için özel bir bantla kapatılmıştır (Resim 4.6).



Resim 4.6. Hava çıkışını engellemek için kullanılan bantın yerleştirilmesi

9. 23,7°C sıcaklık , %28 nem ve 650 mm Hg basınç altında yaklaşık 30 dk malzeme içindeki hava kabarcıklarını almak, reçine ve kumaşın düzgün bir şekilde birleşmesini sağlamak için vakumlanmıştır (Resim 4.7).



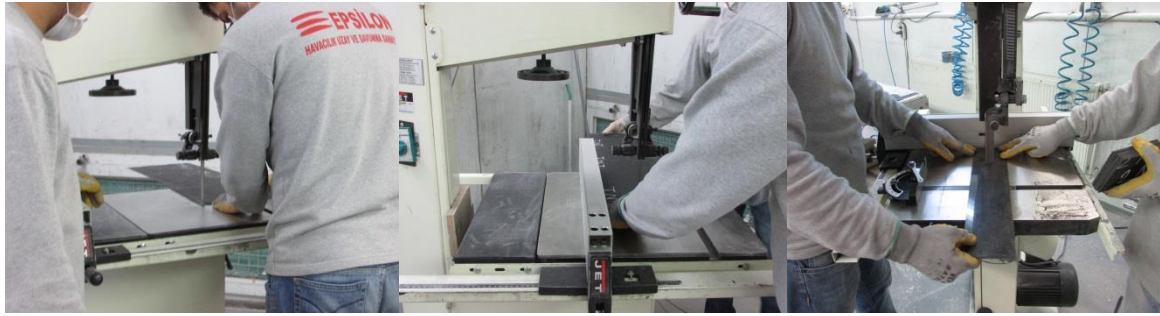
Resim 4.7. Vakumlama işlemi

Plakalar 250 mm x 750 mm boyutlarında üretilmiştir. Vakumlama işlemi biten plakalar daha sonra fırında 55°C’de yaklaşık 16 saat kürlenmiştir (Resim 4.8).



Resim 4.8. Kürlenme işlemi sonrası plakalar

Kürlenme işleminden sonra plakalarda eğilme ya da çarpılma olup olmadığı gözle kontrol edilmiştir. Plakalar şerit testere yardımıyla 100 mm x 100 mm boyutlarında kesilmiştir (Resim 4.9).



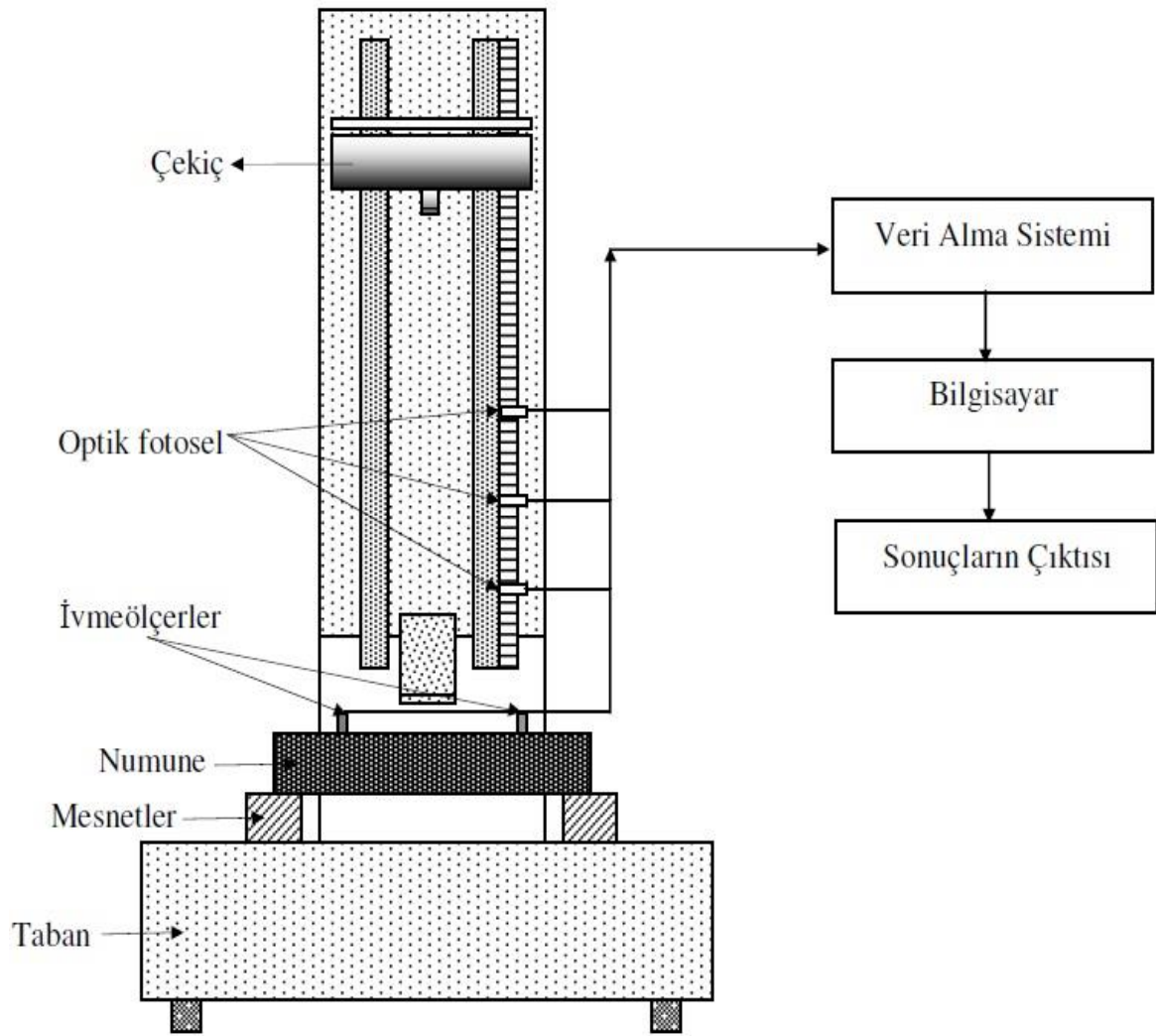
Resim 4.9. Plakaların kesilmesi

Düşük hızlı ağırlık düşürme test cihazı ile darbe deneyi gerçekleştirilmiştir. Plakaların içyapılarındaki değişiklikleri görmek için Gazi Üniversitesi Toz Metalürjisi Laboratuvarı’ndaki mikroskop kullanılmıştır.

4.3. Ağırlık Düşürme Testi

4.3.1. Ağırlık düşürücü deney düzeneği

Ağırlık düşürücü deney düzeneğinde, potansiyel enerjinin çarpma anında kinetik enerjiye dönüşmesi yaklaşımı uygulamada kullanılan temel yaklaşımdır. Buradaki enerji dönüşümü eleman üzerinde çok çok hızlı bir şekilde gerçekleşen gerilme yığılmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.1. Ağırlık düşürücü deney düzeneğinin tasarım şeması [64]

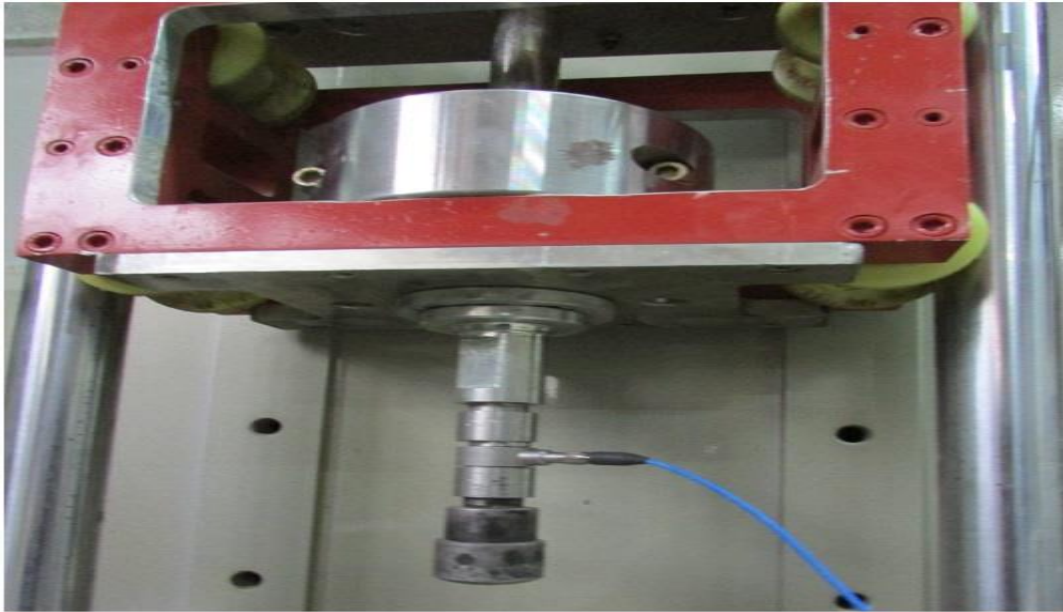
Numunenin yerleştirileceği taban kaidesi 1000 mm × 1000 mm × 70 mm ebatlarında kare şeklinde çelik levhadan yapılmış ve bir kaide üzerine yerleştirilmiştir. Çelik levhanın kalın seçilmesinin sebebi ise deney elemanına çekicinin çarpması anında ortaya çıkan hareketin

sönümlenmesi ve çarpma noktasının ekzantirisitesinin kaymamasıdır. Böylelikle deney düzeneğinin yaklaşık 500 kg ağırlığındaki tabanı sönümleyici görevi görmektedir [64].



Resim 4.10. Deney düzeneği [64]

Deney düzeneğinde bulunan çekiç olarak adlandırılan düşen kütle farklı deneyler yapabilmek için ağırlığı arttırılabilir şekilde tasarlanmıştır (Resim 4.10). Çekiç alüminyum malzemeden yapılmıştır. Çekicin kendi kütlesi 5,250 kg'dır. Çekiç kütlesini değiştirmek için iç kısmına ağırlık takılmasını sağlayan ve çarpma anında eklenen ağırlıkların hareket etmesini engelleyen vidalama sistemi yerleştirilmiştir. Çekicin sürtünmesini en aza indirebilmek için yatakların sürtünen yüzeyleri azaltılmış ve dört köşesinde bulunan iç yüzeyleri yuvarlatılmış kestamit malzemesinden yapılmış tekerleklerle yatağına oturtulmuştur. Çekicin ucu değiştirilebilir olarak yapılmıştır. Bunun nedeni düşme noktasında bölgesel çarpmanın boyutlarını ve etkilerini değiştirebilmektir. Çekicin düşürme mekanizması mekanik olarak imal edilmiştir. Böylelikle deney yapılacak yüksekliğe çekiç ve tutma mekanizması birlikte pratik ve hızlı bir şekilde çıkarılabilecek şekilde tasarlanmıştır [64].



Resim 4.11. Çekiç

Çekicin aynı ekseninde kalarak serbest düşme yapması için iki tarafında millerle kızaklanmıştır. Mil boyu 2500 mm olup deney yüksekliğini belirlemektedir. Çekicin oturduğu miller 30 mm çapında kromdan yapılmıştır. Sürtünmeyi en aza indirmek için yüzeyi pürüzsüz olacak şekilde özel olarak taşlanmıştır. Miller, deney düzeneğinin kulesine belirli noktalardan sabitlenmiştir. Ayrıca üst kısmı özel olarak dizayn edilmiş olup yüksekliği arttırmaya imkân vermektedir. Kızaklar arası mesafe 200 mm'dir.

Kızak bağlantı kulesi 300 mm × 300 mm kesitindedir. Çekiç düşme yüksekliğini ayarlayabilmek için üst tespit çenesi kayar şekilde tasarlanmıştır. Serbest düşme esnasında çekicinin kızaktan kurtularak tabana çarpmasını engellemek için bir sistem ve sisteme de yaylı/kauçuklu darbe sönümleyici yerleştirilmiştir. Kızak milleriyle paralel olarak yataklanmış bir profil kızak bağlantı kulesine monte edilmiştir. Bu profil üzerine optik fotoseller yerleştirilerek çekicinin harekete başladığı andan çarpma anına kadar geçen sürenin ölçülmesi sağlanmıştır. Ölçümlerin alındığı ve işlendiği elektronik aksam da bağlantı kulesi üzerine okumalar görülecek şekilde yerleştirilmiştir [64].

4.3.2. Kuvvet algılayıcısı

Genel bilgi

Kuvarz kuvvet algılayıcıları, sıkışma, çekme gerilmeleri, darbe, tepki ve etki kuvvetlerini ölçen sağlam, uzun ömürlü, dinamik hissedici elemanlardır. Kullanım alanlarının başında, darbe kuvvetlerinin izlenmesi, çarpma testleri, baskı kuvvetlerinin izlenmesi, kuvvet kontrollü zorlanmış titreşimlerin izlenmesi, mekanik empedans, talaşlı imalat, düşürme testleri, titreşim uyarıcıları, nüfuz etme (penetrasyon) testleri, mukavemet testleri, kopma noktası testleri, tüm soğuk ve sıcak plastik şekil verme işlemleri, kaynak işlemleri ve test işlemleri gelmektedir. Kuvvet algılayıcılarını seçerken test edilen ortamın özellikleri mutlaka göz önünde tutulmalıdır.

Kuvarz kuvvet algılayıcılarının bazı özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Çelik ile kıyaslanabilecek kadar yüksek rijitlik,
- Yüksek voltaj-düşük empedanslı çıkış (ICP tip algılayıcılar için)
- Hızlı yüksek frekans cevabı
- Küçük boyutlarda büyük kuvvet sinyallerini algılama özelliği
- Büyük statik yükler üzerindeki küçük kuvvet dalgalanmalarını ölçme yeteneği
- Rijid yapısı sayesinde dayanıklı ve uzun ömürlüdür
- Çok iyi doğrusallık, sabitlik ve tekrarlanabilirlik
- Statik etkilere gösterdiği etki sayesinde statik kalibrasyon yapılabilir ve sabit ısı şartları altında statik ölçümler yapılabilir.

Halka kuvvet algılayıcıları

Halka kuvvet algılayıcıları dinamik basınç ölçümleri için tasarlanmışlardır. Bu tip kuvvet algılayıcıları, soğuk şekil verme, talaşlı imalat işlemleri sırasında ortaya çıkan dinamik basma, çekme gerilme ölçmeleri için uygundur. Çeliğe yakın rijitliğe sahiptirler. Hava sızdırmazlık sağlayan kaynak sayesinde elverişsiz ortamlarda güvenle kullanılabilirler. Statik kalibrasyon ve kısa süreli statik ölçme özellikleri vardır. Yüksek doğrusallık ve tekrar edilebilirlik özellikleri oldukça iyidir. Presleme izlenmesinde, kuvvet kontrollü zorlanmış titreşimlerin olduğu yerlerde, mekanik empedans testlerinde de kullanılmaktadırlar.

Deneylerde kullanılan halka kuvvet algılayıcı: 201B03 Model ICP

Deneylerimizde PCB Group firmasının üretimi olan kuvars halka kuvvet algılayıcılarından 201B03 Model ICP türü kullanıldı (Resim 4.12).



Resim 4.12. 201B03 Model ICP kuvars halka kuvvet algılayıcısı [64]

Bu tip algılayıcıların kullanımında en önemli adım algılayıcının montajıdır. Montaj yapılırken yapılan hatalar ölçümleri tamamen yanlış alınmasına sebep olur. Halka kuvvet algılayıcıların montajı Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi algılayıcı, iki yapı arasına özel bir vida ile monte edilmiştir. Bu vida berilyum-bakır karışımı özel bir malzemeden yapılmış olup ön yükleme yapılmasına imkân vermekte, kalibrasyonu düzgün bir şekilde sağlanmakta ve algılayıcıdan okunan ölçme değerleri lineer olmaktadır. Algılayıcıyı merkezlemek için vida ile halka arasına plastik bir parça yerleştirilir. Kuvvetin geldiği taraf ile algılayıcı arasına sürtünmeyi engelleyici pul konmuştur.

Kullandığımız halka kuvvet algılayıcının teknik özellikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. 201B03 Model ICP halka kuvvet algılayıcısı teknik özellikleri [64]

Özellik	Değer
Hassasiyet($\pm 15\%$)	2248 mV/kN
Ölçüm Aralığı(Basınç Kuvveti)	2,224 kN
Maksimum Statik Kuvvet(Basınç)	13,34 kN
Genişbant Çözünürlüğü(1-10 000 Hz)	0,04448 N-rms
Düşük Frekansa Yanıtı(-5%)	0,0003 Hz
En Üst Frekans Sınırı	90 kHz
Düzensizlik	$\leq 1\%$ FS
Çalışma Sıcaklığı	-54 ile +121°C
Sıcaklık Hassasiyet Katsayısı	$\leq 0,054^\circ\text{C}$
Boşaltma Zaman Sabiti(Oda Sıcaklığı)	≥ 2000 saniye
Uyarma Voltajı	20 ile 30 VDC
Uyarma Akım Sabiti	2 ile 20 mA
Çıkış Empedansı	≤ 100 ohms
Çıkış Öngerilim Voltajı	8 ile 14 VDC
Önyükleme	0,89 kN
Dış Gövde	Paslanmaz Çelik
Elektrik Bağlantısı	10-32 Koaksial Jak

4.3.3. Veri toplayıcı

Genel bilgi

Veri toplayıcıları, deneylerde kullanılan ölçüm aygıtlarından elde edilen ölçümleri toplayıp bilgisayar ortamında değerlendirilmesi için bilgisayar datalarına çeviren aygıtlardır. Veri toplayıcıları, çok çeşitlidir. Yapılacak çalışmalara göre özel olarak dizayn edilenlerinden standart olarak üretilenlere kadar birçok çeşidi vardır.

Deneylerde kullanılan veri toplayıcı: NI 9233-USB-9162

Deneylerde kullanılacak olan veri toplayıcı seçilirken kuvvetin etki şekline ve kullanılan ölçme aygıtlarının türü dikkate alınmıştır. Bu şartlar dikkate alınarak National Instruments firmasının ürettiği NI 9233-USB-9162 modeli kullanılmıştır (Resim 4.13). Bu veri toplayıcı, dört kanallı dinamik sinyal yakalayıcısı olup, yüksek doğrulukta ölçüm alabilen IEPE algılayıcılarından yapılmıştır.



Resim 4.13. NI 9233-USB-9162 Veri toplayıcı

Kullanılan veri toplayıcı aygıt iki modülden oluşmaktadır. Birinci modül veri toplayıcısıdır. Bu modüle ölçüm aygıtları bağlanmaktadır. İkinci bölüm ise sinyal taşıyıcı modülüdür. Bu modül de birinci modülden gelen sinyalleri bilgisayara aktarmaktadır. Her iki modül birbirinden bağımsızdır. Veri toplayıcıdan bilgisayar ortamına aktarılan veriler veri toplayıcı için yazılmış olan bilgisayar programı yardımıyla almak istediğimiz veri türüne çevrilerek kaydedilir. Ayrıca bu program yardımıyla deney düzeneğine bağladığımız ölçüm aygıtlarının kalibrasyon ayarları yapılmaktadır. Çizelge 4.3.'de veri toplayıcısının teknik özellikleri verilmiştir [64].

Çizelge 4.3. NI 9233-USB-9162 veri toplayıcı teknik özellikleri [64]

Özellik	Değer
Kanal Sayısı	4 Adet Analog Giriş
Çözünürlük	24-bit
Dinamik Aralık	102 dB
Minimum Data Oranı	2 kS/s
Maksimum Data Oranı	50 kS/s
Frekans	12,8 MHz
Hassasiyet	± 100 ppm max.
Giriş Akımı	AC
Minimum AC Voltajı	5 V
Maksimum AC Voltajı	5,8 V
IEPE Minimum Uyarma Akımı	2.0 mA
Giriş Voltajı Aralığı	± 5 V
Bilgisayar Bağlantısı	HI-Speed USB 2.0

4.3.4. Ölçüm aygıtları bağlantı kabloları

Ölçüm aygıtlarından alınan ölçme değerlerinin değer kaybına uğramadan deney alanından veri toplayıcısına iletilmesi için özel kablolar tasarlanmış ve imal edilmiştir. Deneylerimizde PCB Group firmasının imal ettiği 003A20 Model numaralı kablo kullanılmıştır (Resim 4.14). Bu kablo düşük gürültülü koaksiyal kablodur.



Resim 4.14. 003A20 Model düşük gürültülü koaksiyal kablo [64]

Bu tip kablolar yüksek sıcaklıklarda kullanılan algılayıcılarda, yüksek empedanslı sinyallerde, ICP algılayıcılarda ve düşük empedanslı voltaj sinyallerinin iletilmesinde kullanılmaktadır. Kablo çapı 2 mm olup çalışma sıcaklık aralığı -90 ile 260 °C'dir. Kablo empedansı 50 ohm' dur. Kablo uzunluğu 6 m' dir [64].

4.3.5. Optik fotosel

Fotoseller, dokunmasız bir şekilde hareketleri algılama olanağı sağlar. Optik fotoseller yüksek performansları ve gittikçe küçülen tasarımları ile kullanım alanları yaygınlaşmaktadır. Büyük indüktif ve kapasitif fotosellerde, fotosel ile hedef cisim arasındaki en uzun mesafe 60-100 mm dolaylarındadır. Fakat optik fotosellerin en küçük boyutlarda olanları dahi birkaç metrelik alanı kontrol edebilmektedir.

Bu fotoseller üç farklı algılama ilkesine göre sınıflandırılabilir;

- Karşılıklı fotoseller,
- Yansıtıcı fotoseller,
- Cisimden yansımali fotoseller

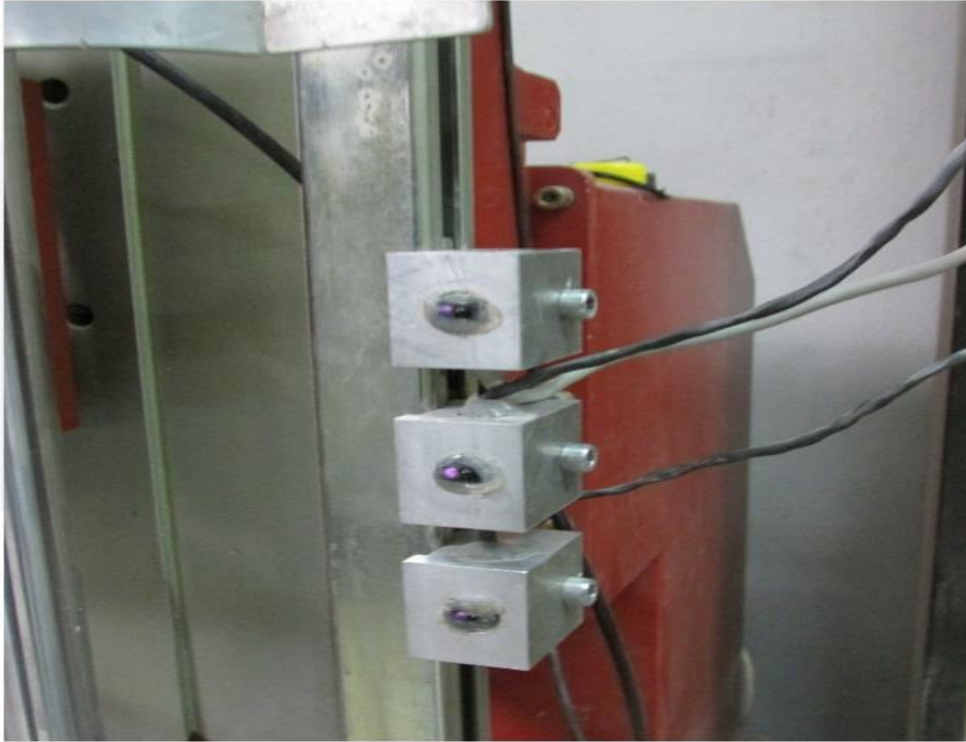
Deney düzeneğinde kullandığımız fotoseller cisimden yansımali fotosellerdir.

Cisimden yansımali fotosellerin önemli avantajları şunlardır;

- Monte edilecek sadece bir fotosel vardır.

- Yanlış ayarlama ve yansıtıcı kirlenmesi yoktur.
- Şeffaf cisimler karşılıklı ve yansıtıcılı fotosellerden daha iyi algılanabilir.

Kullandığımız fotoseller, deneylerde düşen ağırlığın harekete başladığı andan deney elemanına çarptığı ana kadar geçen süreyi ölçebilmek için kullanılmaktadır. Çekiç üzerine monte edilen bir parça yardımıyla çekiç fotoselin önünden geçtiği anda fotoseli harekete geçirir ve elektronik bir devreye bağlı olan fotosel ölçüm alınmasını sağlar. Üç adet optik fotosel deney düzeneği üzerine yerleştirilen özel bir kızak üzerine monte edilmiş ve istenilen yüksekliklere ayarlanarak kullanım imkanı sağlanmıştır (Resim 4.15).



Resim 4.15. Optik fotoseller ve yerleşimi

Üç adet fotoselden en üstte bulunan fotosel çekicin harekete geçtiği anda zaman ölçüm devresini açmaktadır. Ortada bulunan fotosel önünden çekiç geçtiği anda ilk zaman ölçümünü alır. En altta bulunan fotosel ise çekicin harekete başladığı andan deney elemanına çarptığı ana kadar geçen toplam zamanı ölçer. Böylelikle çekicin zamana bağlı hız değişimi belirlenmiş olmaktadır [64].

4.4. Darbe Testinin Aşamaları

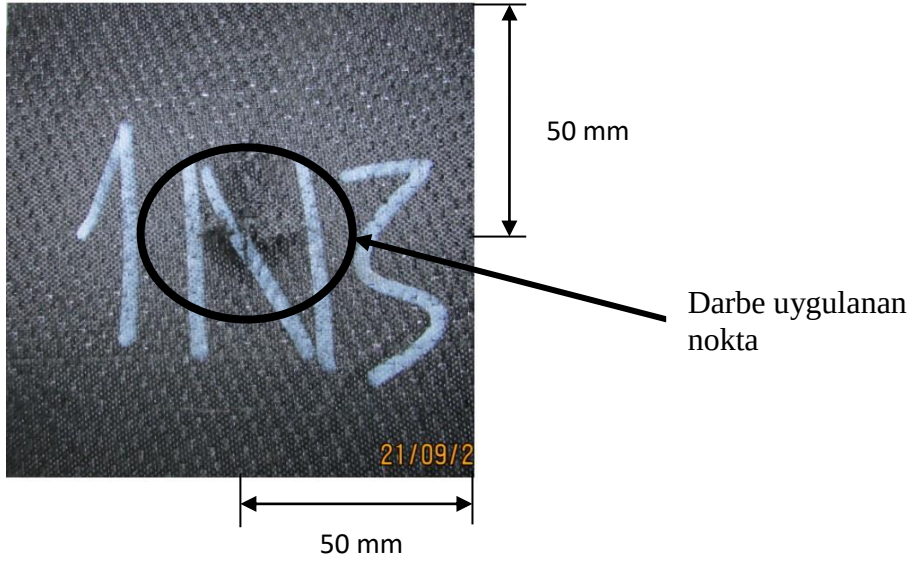
Darbe deneyleri Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan doktora tezi çalışmasında tasarlanan serbest ağırlık düşürücü deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Aynı kalınlıkta 6 farklı dizilime sahip farklı sıcaklıklardaki 30 plaka için aynı enerji seviyesinde darbe testi gerçekleştirilmiştir. Enerji seviyesi kararlaştırılırken örnek numunelerde deneme yapılmıştır. İlk belirlenen darbe enerjisi uygulanmış plakada fazla değişiklik olmadığı belirlenmiş ve darbe enerjisi arttırılarak tekrarlanmıştır. Darbe enerjisi gözle görülebilecek hasarlar oluşturabilecek şekilde belirlenmiştir. Darbe testinde geri sekmeye izin verilmiş olup, delinme ve nüfuziyete izin verilmemiştir.

4.4.1. Testin yapılması

Darbe testinde kullanılan vurucu uç 9 kg ağırlığında olup küresel uçlu geometriye sahiptir. Vurucu uç 30 cm yükseklikten bırakılmıştır. Deneye başlamadan önce plakalara aynı noktadan darbe uygulamak için özel kalıp yaptırılmıştır (Resim 4.16). Plakaların köşeleri kalemle birleştirilerek tam orta noktası belirlenerek darbe plakanın tam orta noktasına uygulanmıştır, yani kalıba oturtulan yerden 50 mm uzunluğunda 50 mm genişliğinde uzaklıktadır (Resim 4.17).

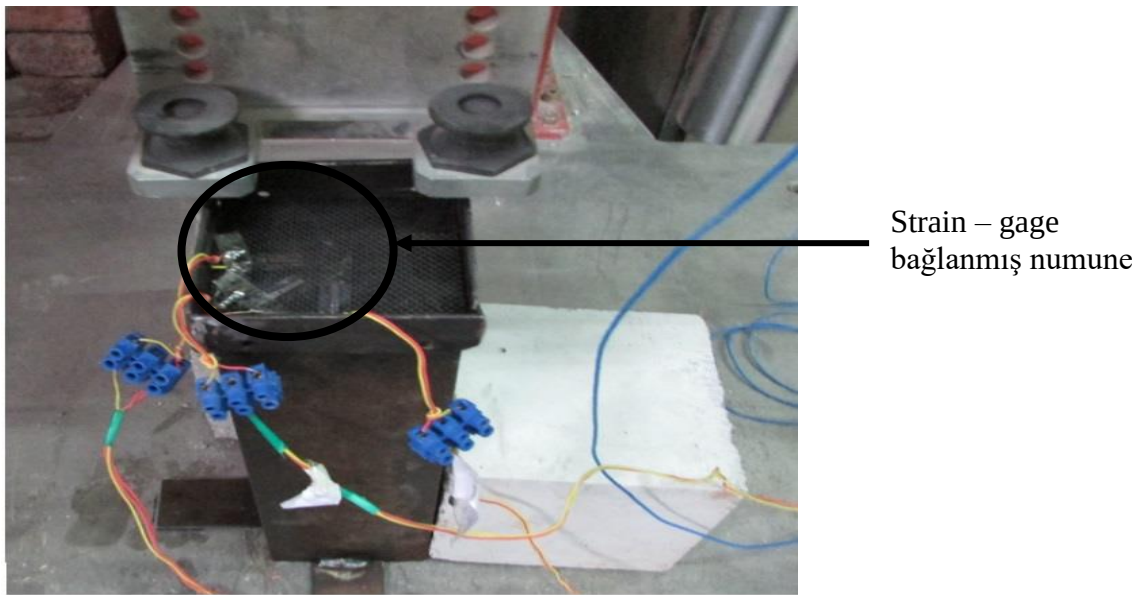


Resim 4.16. Kalıp



Resim 4.17. Darbe uygulanan nokta

Darbe testine bilgisayardan yazılımın açılmasıyla başlanmıştır. İlk olarak strain-gage bağladığımız (Resim 4.18) 6 plakaya oda sıcaklığında aynı darbe enerji seviyesinde darbe uygulanmıştır. Teste başlamadan hız panelinin hız ayarı yapılmıştır. Ardından sırasıyla $+22,5^{\circ}\text{C}$, -30°C , -60°C ve 0°C sıcaklığındaki plakalara darbe uygulanmıştır. Darbe sonunda tüm datalar yazılım sayesinde grafiksel ve nümeriksel açıdan kaydedilmiştir. Testi yaptığımız Laboratuvarında sıcaklık $+22,5^{\circ}\text{C}$ ölçülmüş ve oda sıcaklığı $+22,5^{\circ}\text{C}$ kabul edilmiştir.



Resim 4.18. Strain-gage bağlanmış numune

Plakaları -30°C , -60°C ve 0°C sıcaklığına getirmek için Azot (N_2) gazı kullanılmıştır (Resim 4.19). Demir kap içerisine koyduğumuz azot gazının içine plakalar sırasıyla yerleştirilmiştir. Sıcaklık hızlı bir şekilde düştüğü için istediğimiz sıcaklığa gelinceye kadar plakalar bekletilmiş termocouple ile sıcaklık ölçümünden sonra plakalar kalıba yerleştirilip deney gerçekleştirilmiştir (Resim 4.20).



Resim 4.19. Azot gazı

Ağırlık düşürme test cihazında potansiyel enerjinin kinetik enerjiye dönüşmesi prensibi ile darbe testi gerçekleştirilmektedir. Darbe enerjisini hesaplarken aşağıdaki formüller kullanılmaktadır.

$$\text{Darbe enerjisi} = \text{Düşürülen ağırlık} \times \text{Yerçekimi ivmesi} \times \text{Yükseklik} \quad (4.1)$$

Düşürülen ağırlık için vurucu ucun ağırlığı kullanılmıştır. Yükseklik ise istenilen darbe enerjisine bağlı olarak artırılıp azaltılabilir.

4.4.2. Darbe parametreleri

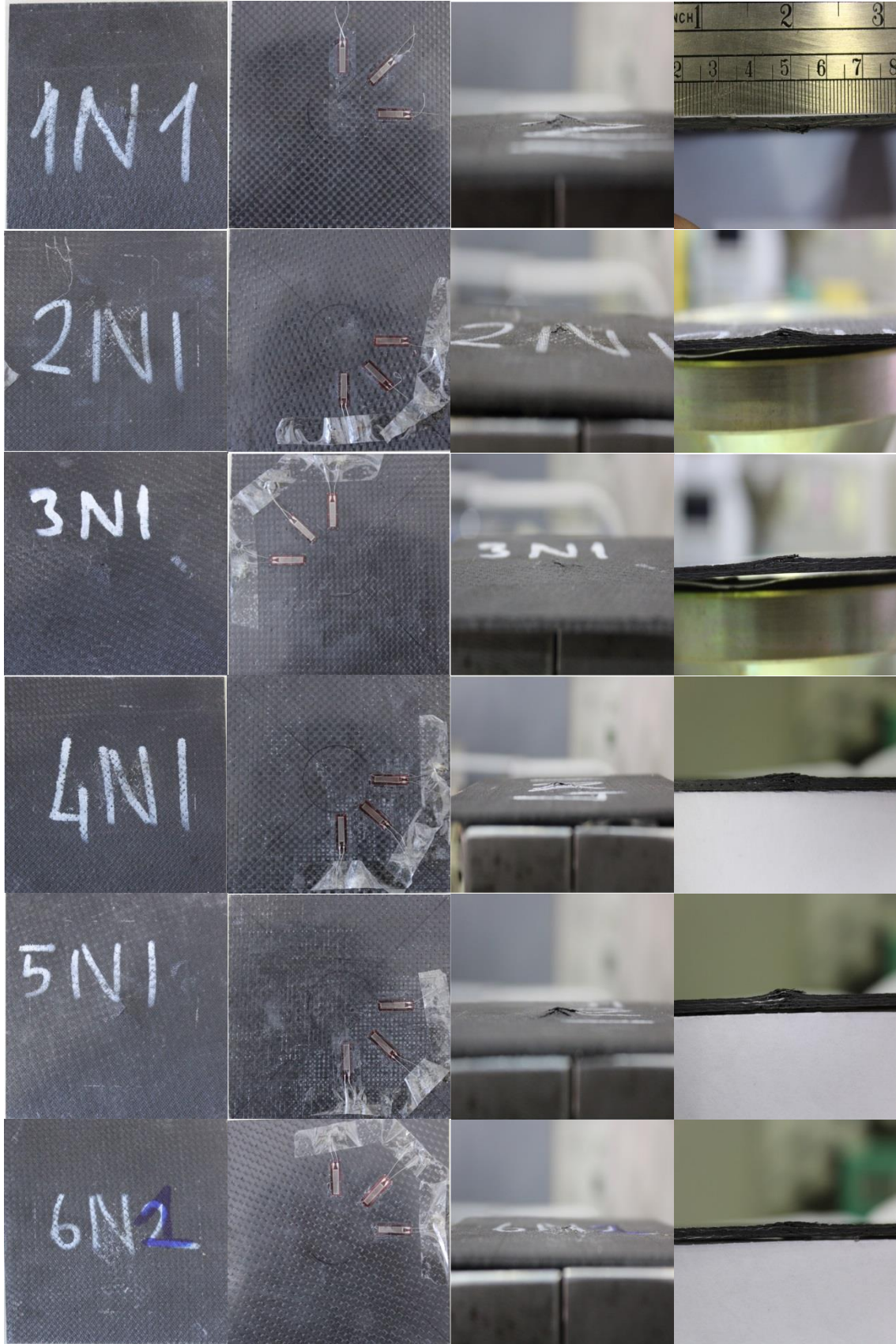
Tabakalı kompozit plakaların darbe davranışı incelendikten sonra sıcaklığın etkisi ve oryantasyon diziliminin etkisi incelenmiş ve yorumlanmıştır.

Çizelge 4.4. Darbe parametreleri

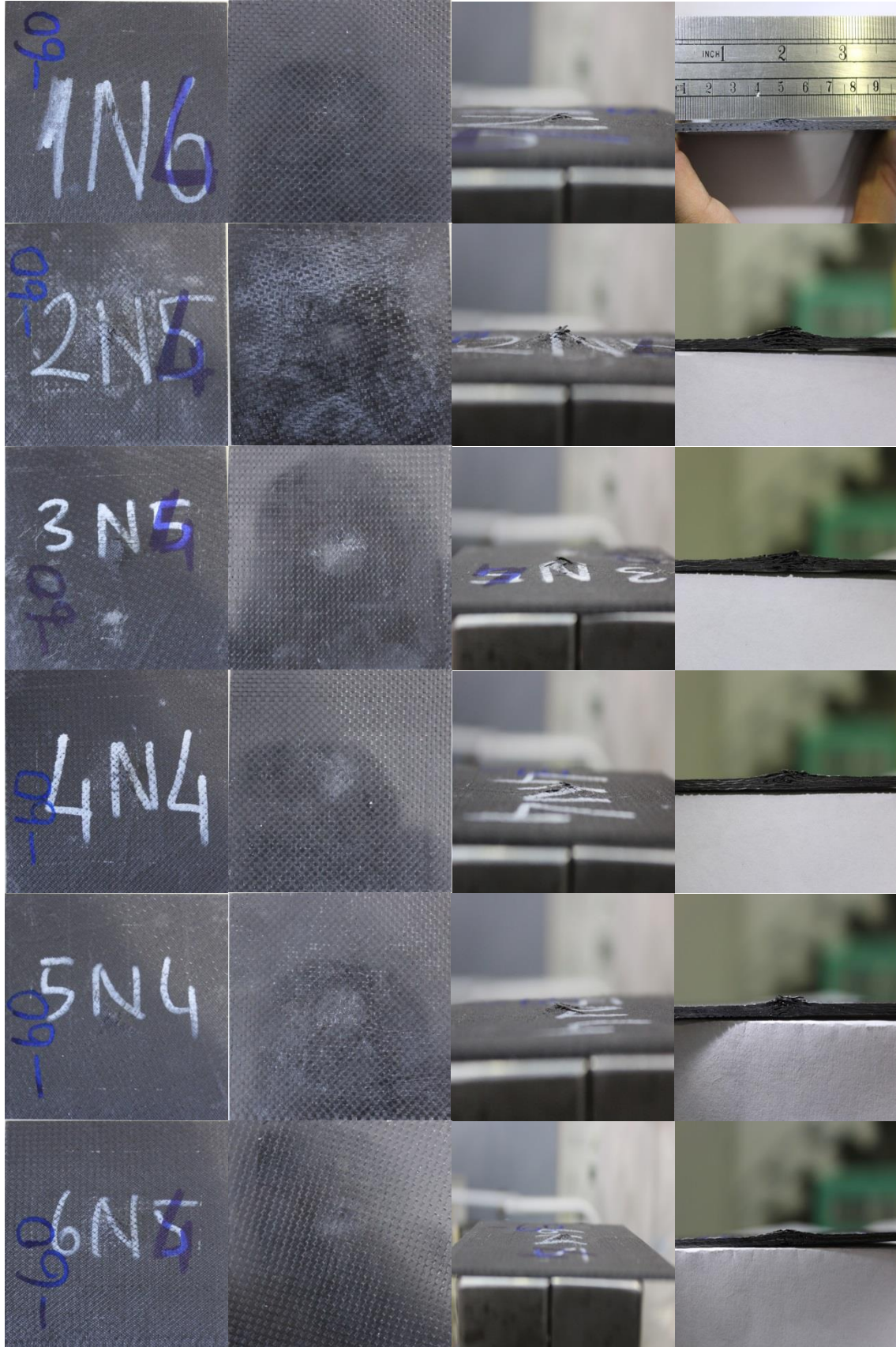
Deney No	Malzeme Cinsi	Dizilim Sırası	Sıcaklık (°C)	Vurucu uç yüksekliği	Vurucu uç ağırlığı	Darbe Enerjisi
1N1	KFGP	[0/+45/-45/90]s	+22,5°C	300 mm	9 kg	26,5 J
1N2	KFGP	[0/+45/-45/90]s	+22,5°C	300 mm	9 kg	26,5 J
1N3	KFGP	[0/+45/-45/90]s	-30°C	300 mm	9 kg	26,5 J
1N4	KFGP	[0/+45/-45/90]s	-60°C	300 mm	9 kg	26,5 J
1N5	KFGP	[0/+45/-45/90]s	0°C	300 mm	9 kg	26,5 J
2N1	KFGP	[90/+45/0/-45]s	+22,5°C	300 mm	9 kg	26,5 J
2N2	KFGP	[90/+45/0/-45]s	+22,5°C	300 mm	9 kg	26,5 J
2N3	KFGP	[90/+45/0/-45]s	-30°C	300 mm	9 kg	26,5 J
2N4	KFGP	[90/+45/0/-45]s	-60°C	300 mm	9 kg	26,5 J
2N5	KFGP	[90/+45/0/-45]s	0°C	300 mm	9 kg	26,5 J
3N1	KFGP	[+45/0/-45/90]s	+22,5°C	300 mm	9 kg	26,5 J
3N2	KFGP	[+45/0/-45/90]s	+22,5°C	300 mm	9 kg	26,5 J
3N3	KFGP	[+45/0/-45/90]s	-30°C	300 mm	9 kg	26,5 J
3N4	KFGP	[+45/0/-45/90]s	-60°C	300 mm	9 kg	26,5 J
3N5	KFGP	[+45/0/-45/90]s	0°C	300 mm	9 kg	26,5 J
4N1	KFGP	[0/+45/90/-45]s	+22,5°C	300 mm	9 kg	26,5 J
4N2	KFGP	[0/+45/90/-45]s	+22,5°C	300 mm	9 kg	26,5 J
4N3	KFGP	[0/+45/90/-45]s	-30°C	300 mm	9 kg	26,5 J
4N4	KFGP	[0/+45/90/-45]s	-60°C	300 mm	9 kg	26,5 J
4N5	KFGP	[0/+45/90/-45]s	0°C	300 mm	9 kg	26,5 J

Çizelge 4.4. (Devam) Darbe parametreleri

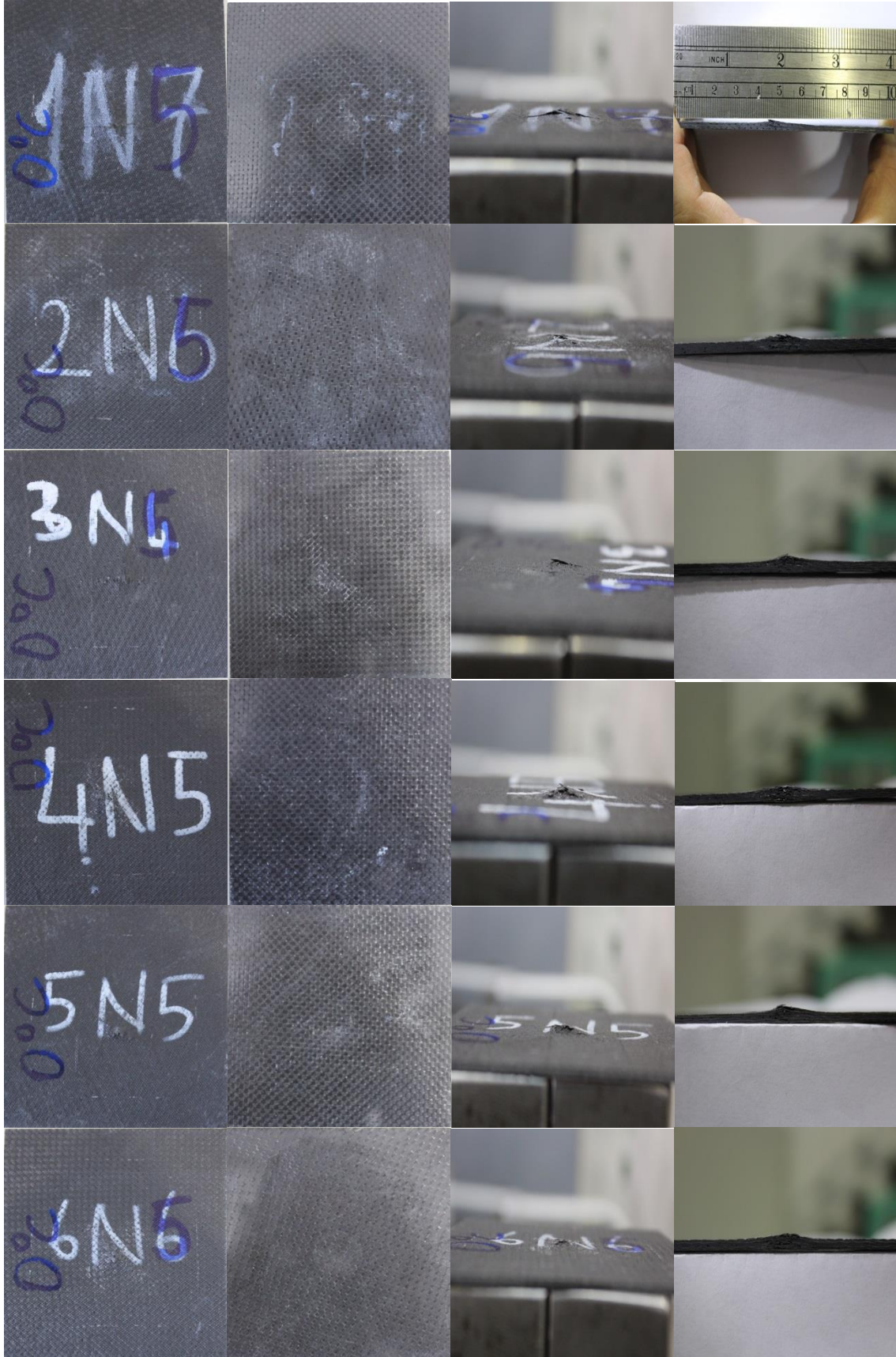
Deney No	Malzeme Cinsi	Dizilim Sırası	Sıcaklık (°C)	Vurucu uç yüksekliği	Vurucu uç ağırlığı	Darbe Enerjisi
5N1	KFGP	[0/-45/90/+45]s	+22,5°C	300 mm	9 kg	26,5 J
5N2	KFGP	[0/-45/90/+45]s	+22,5°C	300 mm	9 kg	26,5 J
5N3	KFGP	[0/-45/90/+45]s	-30°C	300 mm	9 kg	26,5 J
5N4	KFGP	[0/-45/90/+45]s	-60°C	300 mm	9 kg	26,5 J
5N5	KFGP	[0/-45/90/+45]s	0°C	300 mm	9 kg	26,5 J
6N1	KFGP	[+45/0/90/-45]s	+22,5°C	300 mm	9 kg	26,5 J
6N2	KFGP	[+45/0/90/-45]s	+22,5°C	300 mm	9 kg	26,5 J
6N3	KFGP	[+45/0/90/-45]s	-30°C	300 mm	9 kg	26,5 J
6N4	KFGP	[+45/0/90/-45]s	-60°C	300 mm	9 kg	26,5 J
6N5	KFGP	[+45/0/90/-45]s	0°C	300 mm	9 kg	26,5 J



Resim 4.20. Strain-gage bağı +22,5°C’de darbe uygulanmış numunelerin arka, ön, sol yan ve kesit alınmış yan görünüşü



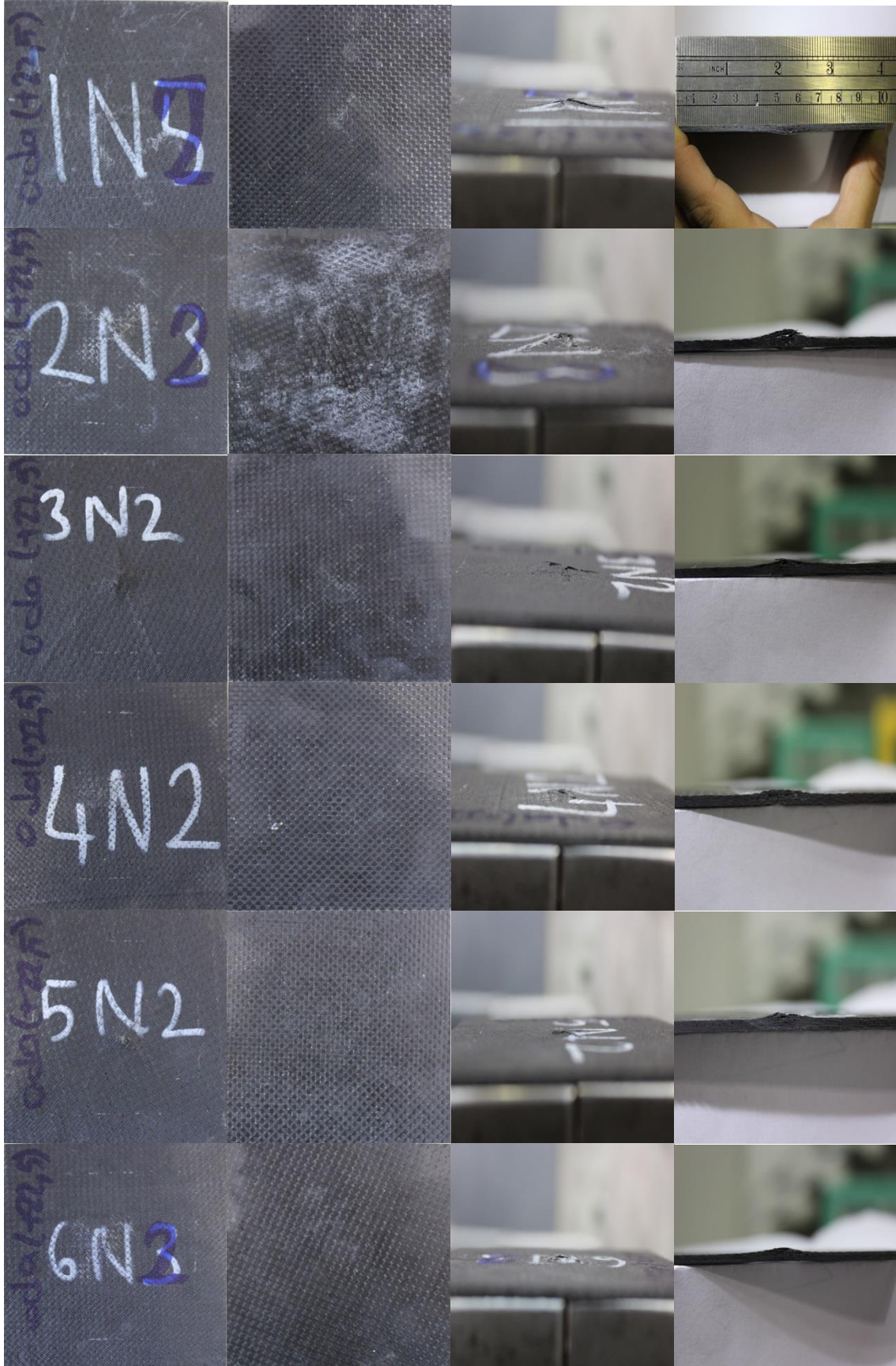
Resim 4.21. -60°C’de darbe uygulanmış numunelerin arka, ön, sol yan ve kesit alınmış yan görünüşü



Resim 4.22. 0°C’de darbe uygulanmış numunelerin arka, ön, sol yan ve kesit alınmış yan görünüşü



Resim 4.23. -30°C’de darbe uygulanmış numunelerin arka, ön, sol yan ve kesit alınmış yan görünüşü



Resim 4.24. +22,5°C’de darbe uygulanmış numunelerin arka,ön,sol yan ve kesit alınmış yan görünüşü



Resim 4.25. +22,5°C , +22,5°C (strain-gage), -30°C, -60°C ve 0°C darbe uygulanmış numuneler

4.4.3. Numunelerin çentik derinliklerinin ölçülmesi

Test sonrası oluşan çökme derinliği mikroskop yardımı ile ölçülmüştür. Düz yüzeyden maksimum çökmenin olduğu nokta arasındaki mesafe mikroskopta ölçülmüştür. Çökme derinliğini ölçmek için plakalar silisyum karbür uçlu kesme diski kullanılarak kesilmiştir (Resim 4.26). Soğuk kesim yapıldığı için kesme esnasında ısı gerilmeler ve çapak oluşmamıştır. Ayrıca yüzey kalitesi bozulmamış, çökmenin olduğu kısımlara zarar vermemiştir.

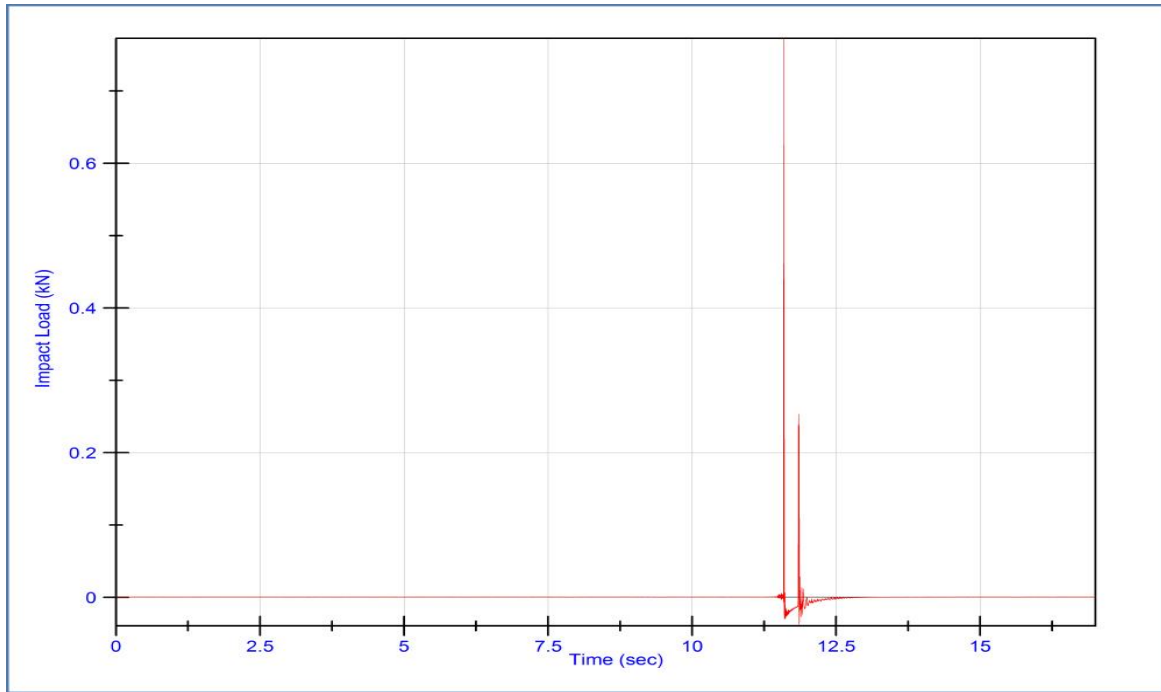


Resim 4.26. Plakaların kesilmesi

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

5.1. Darbe Test Sonuçları

Bu bölümde Çizelge 4.3.'deki gibi üretilen numunelere darbe testi uygulanması sonrası elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Deney numunelerinin düşük hızlı darbe cevabını araştırmak için tasarlanan cihazın elektronik aksamında kullanılan NI Signal Express yazılımından alınan örnek bir sinyal Şekil 5.1.'de görülmektedir.

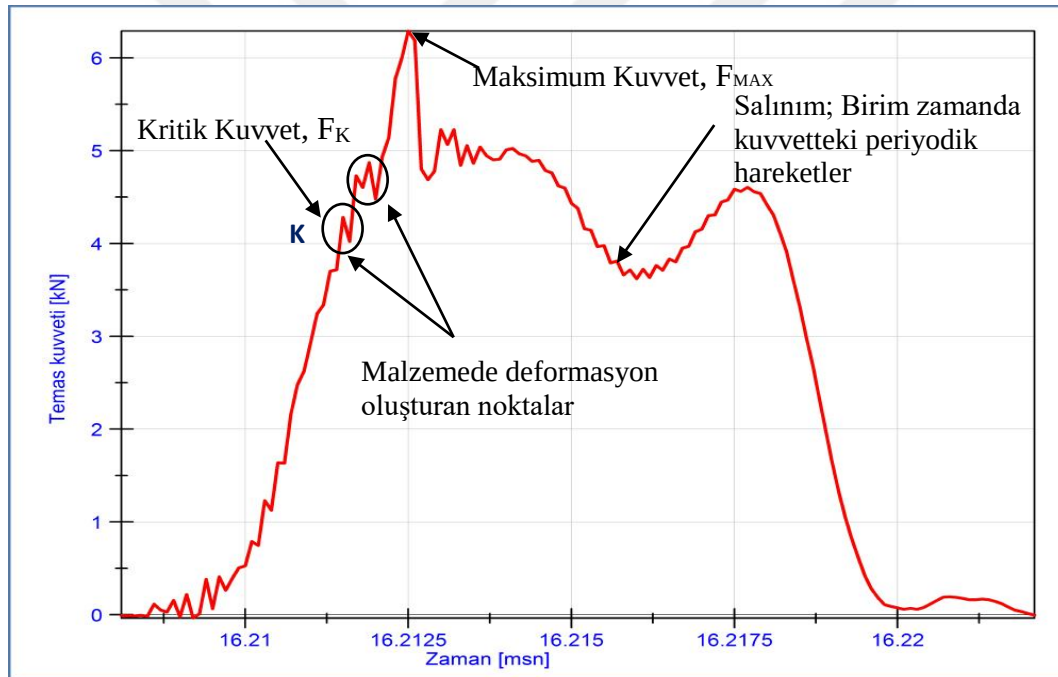


Şekil 5.1. Tekrarlı darbeye maruz deney numunesinden alınan kuvvet sinyalleri

Vurucu ucun serbest düşmeye bırakıldığı yükseklikten deney numunesine temas edinceye kadar geçen sürede sinyal değeri sıfırdır. Bunun sebebi yazılım programını çalıştırdıktan sonra cihazdaki vurucu ucun serbest düşmeye bırakılması arasındaki geçen süreden kaynaklanmaktadır. Vurucu ucun numuneye temas ettiği andan itibaren kuvvet değeri maksimum değere ulaştıktan sonra belirli bir süre sonunda sıfırlanmıştır, Sonra vurucu ucun geriye doğru sıçraması ile belirli bir değere ulaştıktan sonra yerçekiminin etkisiyle tekrar numune üzerine serbest olarak düşmüştür. Böylelikle deney numunesine ikinci kez

darbe yapmıştır. İlk darbede enerjinin bir kısmı numune tarafından absorbe edildiği için ikinci darbede daha az enerji absorbe edileceğinden temas kuvveti de buna bağlı olarak daha düşük değerde oluşmuştur. Vurucu uç tamamen duruncaya kadar darbe tekrarlanmıştır. Her darbede absorbe edilen enerji miktarı azaldığından darbe bittiğinde temas kuvveti değeri de sıfırlanmıştır. Bu çalışmada darbenin ilk etkileri araştırılmıştır. Darbe sonrası Temas Kuvveti – Zaman ve Gerinim – Zaman grafikleri elde edilmiştir.

8 tabakadan oluşan kompozit levhalar 2 mm kalınlıkta olup +22,5°C (Strain-gage), +22,5°C, 0°C, -30°C ve -60°C sıcaklıklarına tabi tutularak 26,5 j enerji seviyesinde darbe testi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin darbeye karşı verdiği cevaplar grafiklerde belirtildiği gibidir.



Şekil 5.2. Tek darbeye maruz kalan [0/+45/-45/90]_s dizilimli strain-gage takılmış numunenin oda sıcaklığındaki Kuvvet-Zaman grafiği

Çizelge 5.1. [0/+45/-45/90]_s levhanın oda sıcaklığındaki ağırlık düşürme testinden elde edilen değerler

F_{max} (kN)	F_K (kN)	t_{Fmax} (msn)	t_{total} (msn)
6,288	4,28	0,0019	0,014

Çizelge 5.1.'de yer alan bilgiler;

- $F_{\max}$: Darbe sonucu ölçülen en büyük kuvvet (yük) değeri,
- F_K : Kritik kuvvet,
- $t_{F\max}$: Maksimum kuvvete ulaşmak için geçen süre,
- t_{total} : Toplam darbe süresini ifade eder.

Şekil 5.2.'deki kuvvet – zaman grafiğinde K noktasında kuvvetin eğiminde ani bir düşme görülmektedir. Darbe olayında, darbe ucu ile kompozit test numunesi arasındaki temas yüzeyinde kontak (temas) kuvvetleri oluşmaktadır. Temas kuvvetlerinin etkisi altında kompozit malzemenin darbe tarafında üst yüzünde matris yapıda ezilme ve küçük delaminasyonlar görülmektedir. Kritik kuvvetlerin etkisi altında oluşan bu hasar yapısı Kritik kuvvet hasarı olarak adlandırılmaktadır. Kritik Kuvvet Hasarı, Kuvvet - Zaman grafiğindeki ilk ani düşme ile karakterize edilebilmektedir [65]. Kuvvetin yükselirken eğiminin sürekli aynı kalmadığı belli bir hasar eşiğinden sonra (Kritik hasar kuvveti) eğimin değiştiği görülmektedir. Düşük enerjili darbe yüklemesinin önemli karakteristik özelliklerinden birisi olarak tespit edilen bu durum malzemede meydana gelen ilk hasar olduğunu da açıkça göstermektedir [67]. 8 katlı 2 mm kalınlığındaki [0/+45/-45/90]_s dizilimli strain-gage takılmış numunede Kritik kuvveti $F_K=4,28 \text{ kN}$ 'dur.

Darbeye tabi tutulan numunede gözle görülen bir hasar oluşabilmesi için eşik kuvvetin (Kritik kuvvetin) aşılması gerekmektedir [67]. Eşik değere ulaşabilmesi için yeterli yükseklikte (darbe enerjisi) değilse gözle görülmeyen hasarlar oluşmaktadır.

Kritik temas kuvveti delaminasyonun başlaması için gerekli kuvvettir. Enerjinin bir kısmını absorbe eden numune vurucu uçta depolanan artakalan potansiyel enerji ile birlikte maksimum temas kuvvetine ulaşmaktadır. Gerçekleştirilen tüm testlerde maksimum kuvvetin hemen hemen aynı olduğunu görmek mümkündür. Yani düşük hızlı darbe durumunda malzemeye uygulanan (kompozit malzeme tarafından taşınabilen) maksimum kuvvet değişmemektedir ve malzemenin üretim parametreleri ile kalınlığına bağlı bir özellik olarak ortaya konabilir [67].

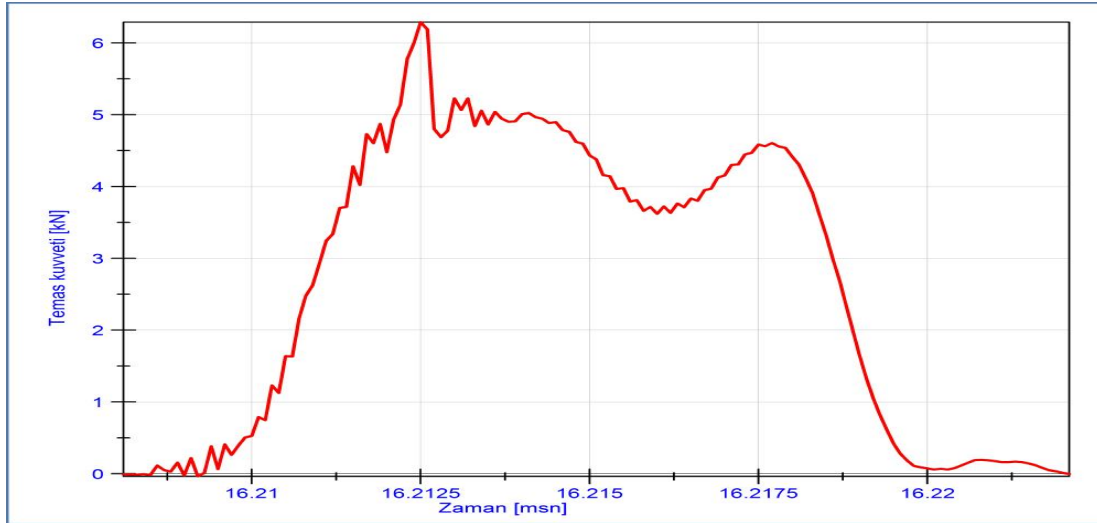
Elde edilen kuvvet - zaman değişimlerinin çan eğrisi şeklinde olduğu görülmektedir. Bütün

şekillerde kuvvet hızla artarak bir azami kuvvet değerine ulaşmaktadır ve daha sonra sıfıra düşmektedir. Her bir grafikte darbenin başlangıcında bir salınım meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca darbe başlangıcında numunede meydana gelen titreşim sonucunda kuvvet algılayıcı üzerinde bir normal kuvvet oluşturduğu ve bunun sonucu olarak darbe başlangıcında salınım meydana geldiği düşünülmektedir [14].

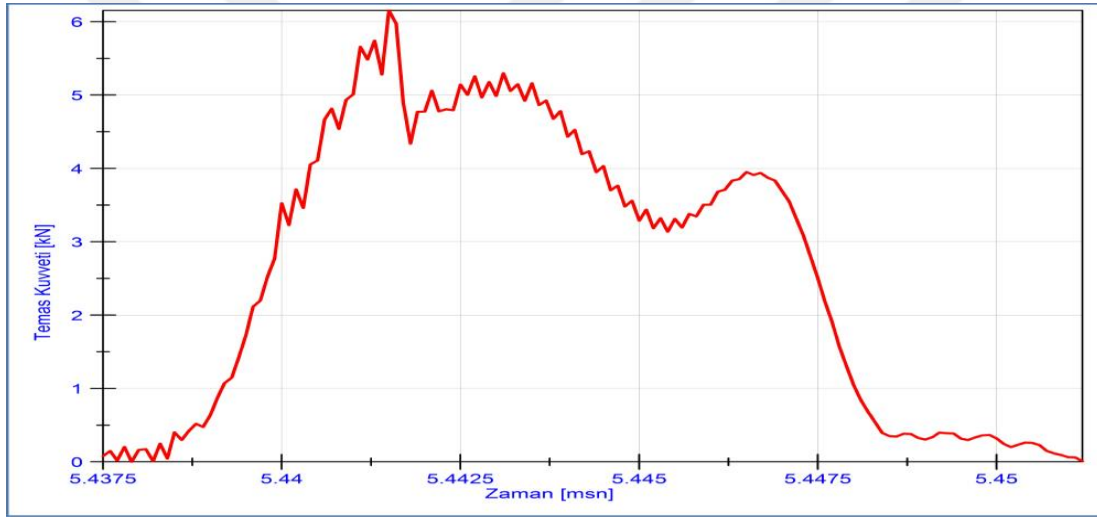
Şekil 5.2. deki kuvvet - zaman eğrisi incelenecek olursa, en büyük temas kuvvetine ulaşana kadar geçen süre ile en büyük temas kuvvetinden vurucu ile numunenin ayrılmasına kadar geçen süreler birbirine eşit değildir. Bu durum tüm numunelerde benzer şekilde olmaktadır. Normalde sadece elastik şekil değiştiren yay gibi davranan bir numune olsaydı bu sürelerin eşit olması beklenirdi. Ancak eğrilerin böyle bir karakteristik göstermesi numunelerin plastik deformasyona uğraması ve viskoelastisite ile açıklanabilir [68].

Kuvvet en yüksek değerine ulaşınca kadar hasar oluşumunun hızla devam ettiği düşünülmektedir. Salınım miktarı arttıkça oluşan hasar miktarı da artmaktadır. Şekil 5.2.'de kuvvette ani bir artış görülmekte ve daha sonra basamak şeklinde yine bir artış gözlemlenmektedir. Vurucu ucun kompozit malzemeyle temas ettiği K noktası meydana gelen ilk kuvvetin arttığı nokta olup kritik kontak kuvveti noktasıdır. Bu temas işleminden sonra kompozit malzemeye yük aktarımı olduğu için malzeme içerisinde bir kısım hasarlar meydana gelmekte ve dolayısıyla numune tarafından taşınabilecek kuvvet azalacağı için ani bir düşüş gözlenmektedir. Bu düşüş, kompozit malzeme tarafından absorbe edilen enerjiden dolayı meydana gelen tabakalar arasında ayrılmalar şeklinde olan matris kırılması ve delaminasyondan kaynaklanmaktadır [33]. Bu kompozit plakanın kritik temas kuvveti 4,28 kN'dur, Maksimum temas kuvveti ise 6,288 kN'dur. Darbe olayında belli bir anda temas kuvvetinin yaptığı iş her iki cismin süratinin sıfır olmasını sağlar ve neticede sıkışma sırasında biriktirilen enerji iki cismi birbirinden ayırmaya zorlar, sonunda bu cisimler birbirlerinden belli bir izafi hızla ayrılırlar. Katı cisimlerin arasındaki darbeye çarpışma süresince etki eden temas kuvveti, iki cisim yüzeylerinin bir temas alanı oluşturması için gerekli yerel deformasyonların bir neticesidir [33].

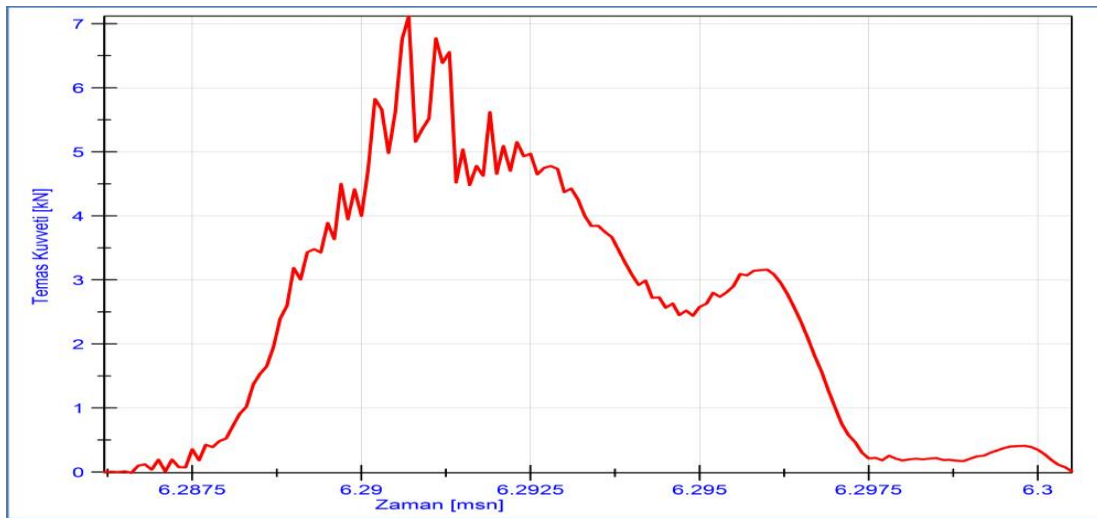
Düşük hızlı darbe yapılan bütün deney numunelerinde darbeye maruz ön yüzeydeki hasarın arka yüzeyden daha az olduğu görülmektedir. O yüzeyde darbe sonucu basmadan kaynaklanan hasarlar oluşurken, arka yüzeyde çekmeden kaynaklanan hasarlar oluşmaktadır. Çekmeden kaynaklanan hasarlar daha fazladır [69].



(a)

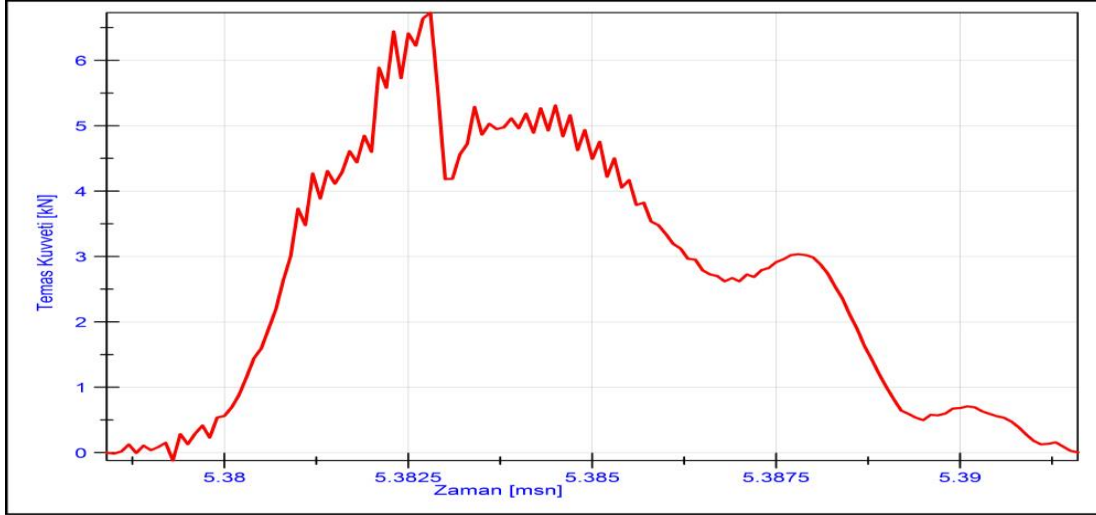


(b)

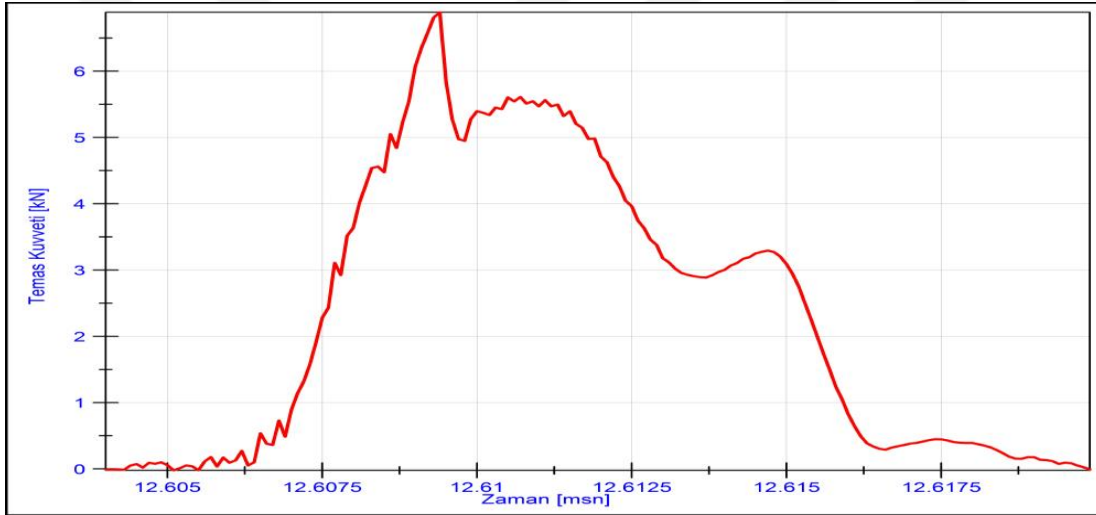


(c)

Şekil 5.3. [0/+45/-45/90]_s dizilimine ait Kuvvet-Zaman grafiği, a) 1N1_+22,5°C, b) 1N2_+22,5 °C, c) 1N3_-60 °C, d) 1N4_-30 °C, e) 1N5_0 °C



(d)



(e)

Şekil 5.3. (Devam) [0/+45/-45/90]_s dizilimine ait Kuvvet-Zaman grafiği, a) 1N1_+22,5°C, b) 1N2_+22,5 °C, c) 1N3_-60 °C, d) 1N4_-30 °C, e) 1N5_0 °C

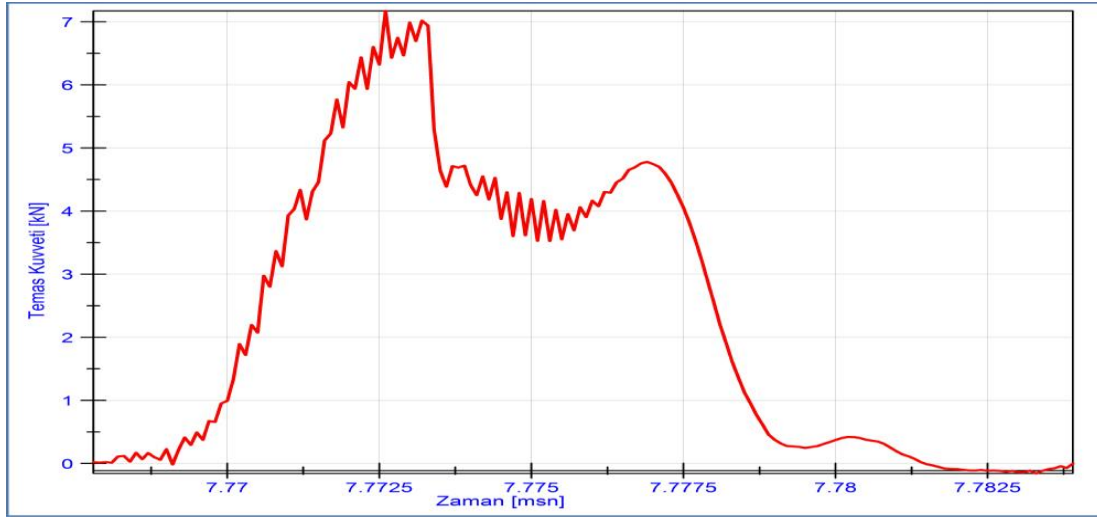
Şekil 5.3.'deki grafikte belirtilmiş dizilim için vurucu ucun numuneye çarptıktan sonra geri sıçrama hareketi yaptığı görülmektedir. [0/+45/-45/90]_s diziliminde sıcaklık arttıkça temas kuvveti azalmıştır. Bu dizilimde tüm numuneler çok kısa sürede maksimum kuvvete ulaşırken, kuvvetin sıfırlanması daha uzun sürede meydana gelmiştir. Kuvvetin aniden değil salınımlar yaparak sıfırlandığı görülmektedir. Salınım miktarı arttıkça hasar miktarı da artmaktadır. En çok salınım oda sıcaklığındaki ve -30 °C'deki numunede, en az salınım 0 °C'de görülmektedir. En uzun temas süresi 0 °C'de görülürken en kısa temas süresi -60 °C'deki grafikte görülmektedir. 1N1 ve 1N2 nolu numunelere ait grafiklerde sıcaklıkların aynı olmasından dolayı benzerlik bulunmaktadır (Şekil 5.3 (a,b)).

Malzemede hasar miktarının artmasıyla darbe kuvvetine verilen tepki kuvveti de artmaktadır. Ancak hasar boyutu, elyafların büyük kısmının koptuğu bir seviyede gerçekleşirse darbe esnasında temas kuvvetinde ani düşmeler meydana gelmekte, bunun sonucu olarak da impuls kuvvetlerinin düştüğü görülmektedir [3].

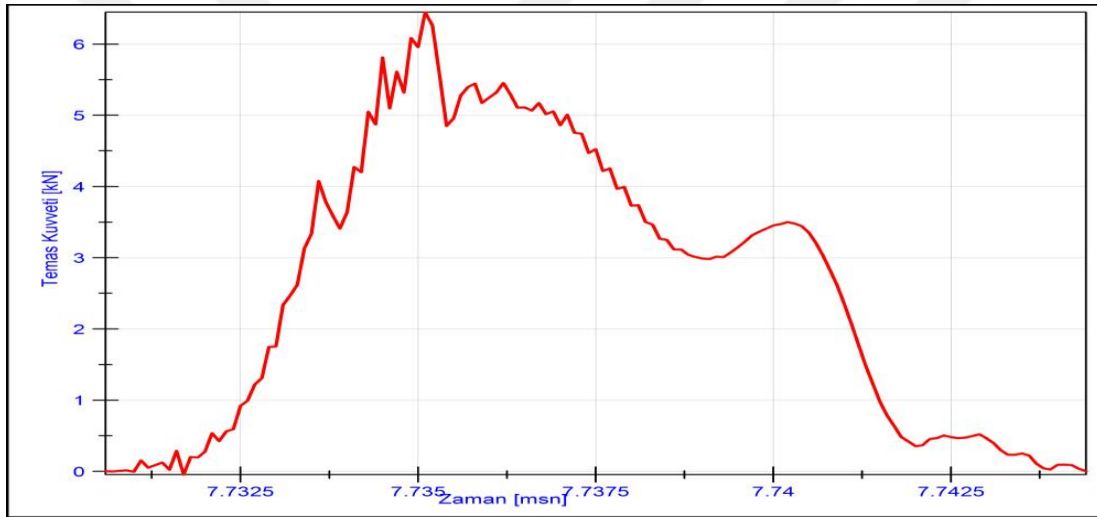
Rijit malzemeyi kuvvet ya da yükün etkisinde şekil değiştirmeyen formunu koruyan malzeme olarak tanımlayabiliriz. Temas kuvveti değerlerinin sıcaklık arttıkça azalması, tabakaların rijitlik (sertlik) özelliğinin azalmasından kaynaklanmaktadır ve sünek davranışta darbe yüküne karşı direncinin az olduğu söylenebilir. Sıfırlama süresinin fazla olması numunenin esneklik özelliğinin fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Numune üzerine uygulanan yükün boşalması esnasında yükleme durumuna göre büyük farklılıklar görülmektedir. Bunun nedeni numuneler üzerinde meydana gelen farklı hasar mekanizmalarından kaynaklanmaktadır. Yukarıdaki grafiklerin inişli çıkışlı olmasının sebebi önemli fiber kırılmalarının meydana gelmesidir [33].

Sıcaklık azaldıkça kritik temas kuvvetinin de azaldığı görülmektedir. Aynı dizilime sahip numunelerin farklı kuvvet değerlerine ulaşması sıcaklığın numuneler üzerindeki etkisiyle oluşmaktadır ve farklı hasar tiplerinin oluşmasına neden olmaktadır.

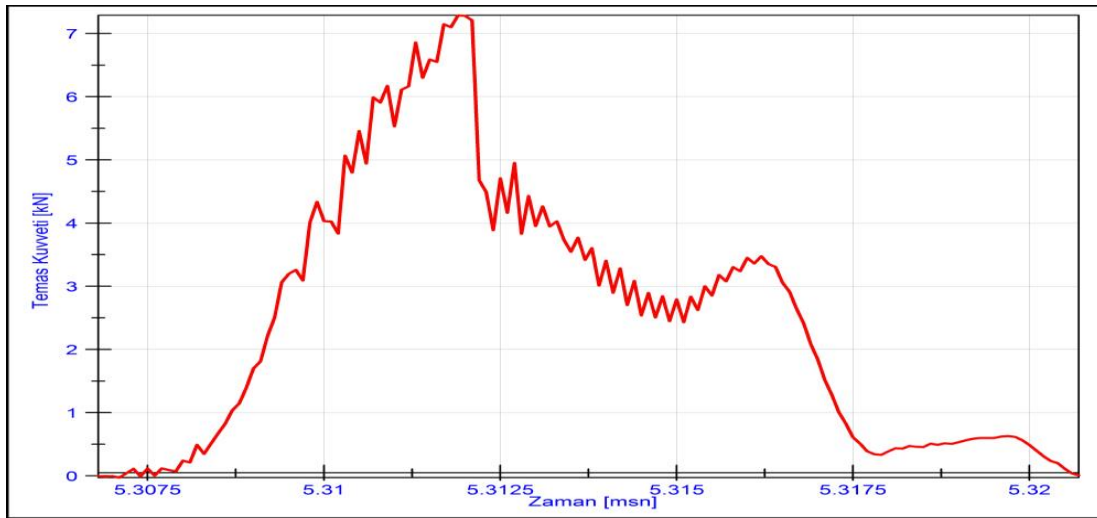
Maksimum temas kuvvetinin ve kritik temas kuvvetinin darbe enerjisine bağlı olmadığı gibi numune boyutları ve sınır koşullarına da bağlı olmadığı bu değerlerin malzemeye ait birer özellik olduğu görülmüştür [33,34].



(a)

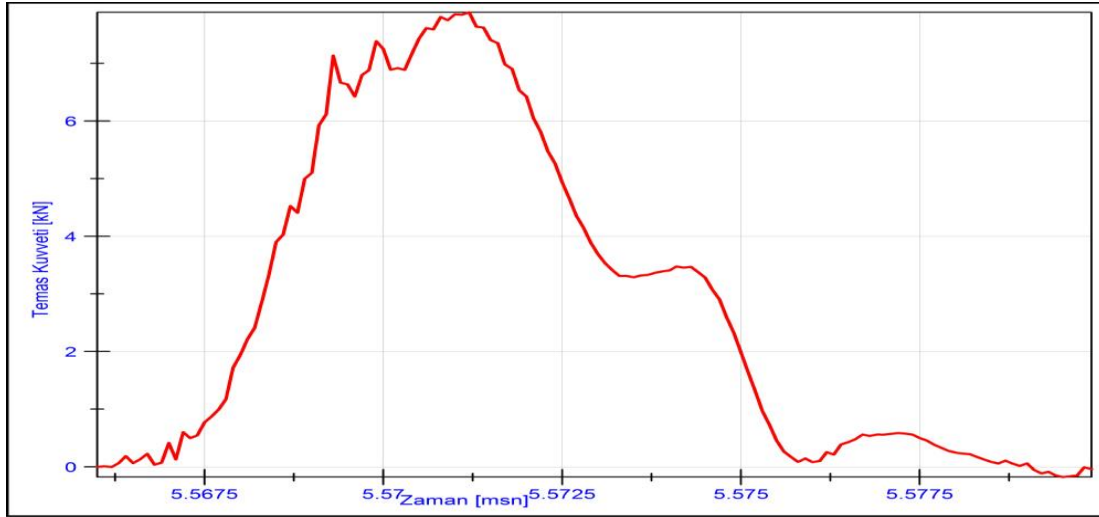


(b)

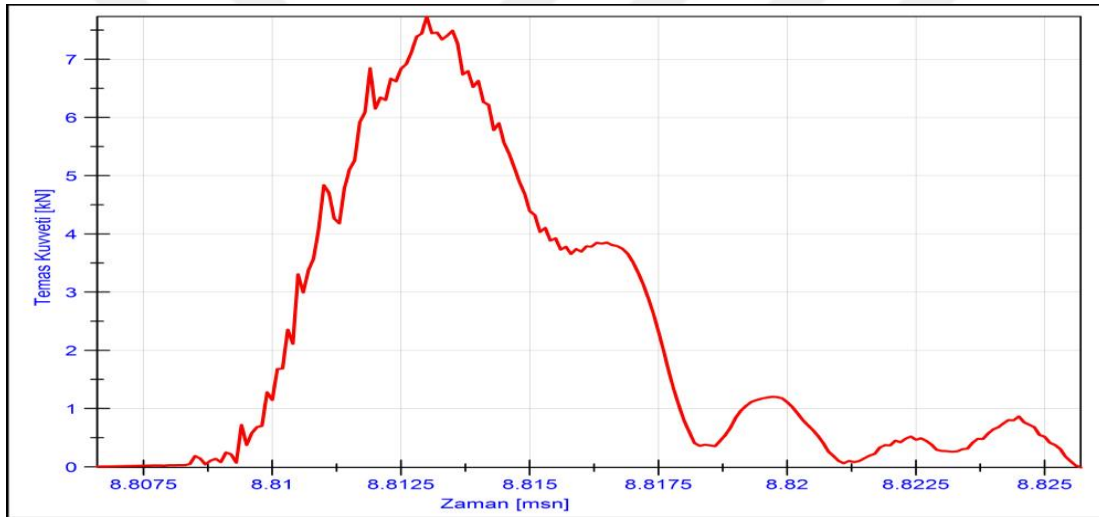


(c)

Şekil 5.4. $[90/+45/0/-45]_s$ dizilimine ait Kuvvet-Zaman grafiği, a) 2N1_+22,5°C, b) 2N2_+22,5 °C, c) 2N3_-60 °C, d) 2N4_-30 °C, e) 2N5_0 °C



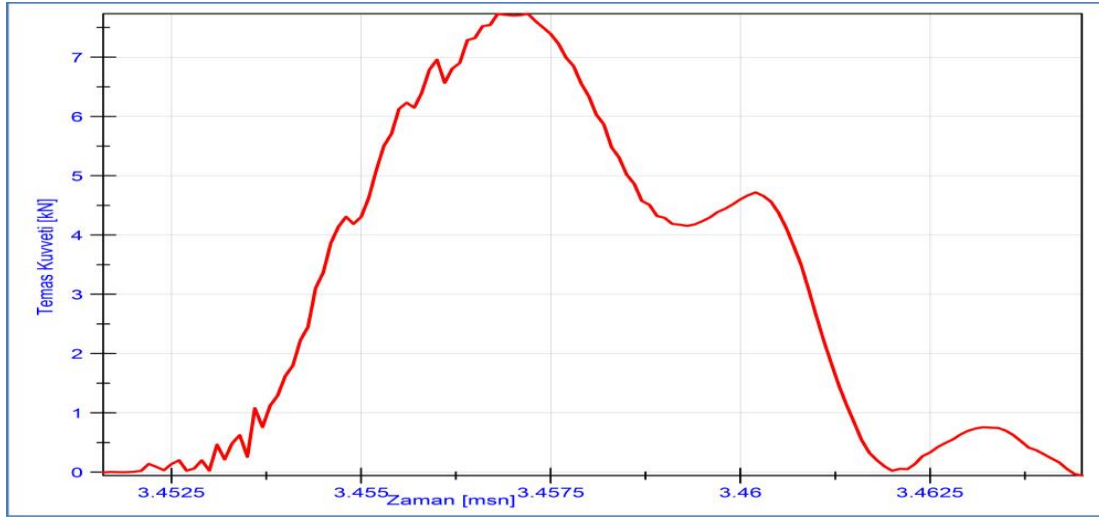
(d)



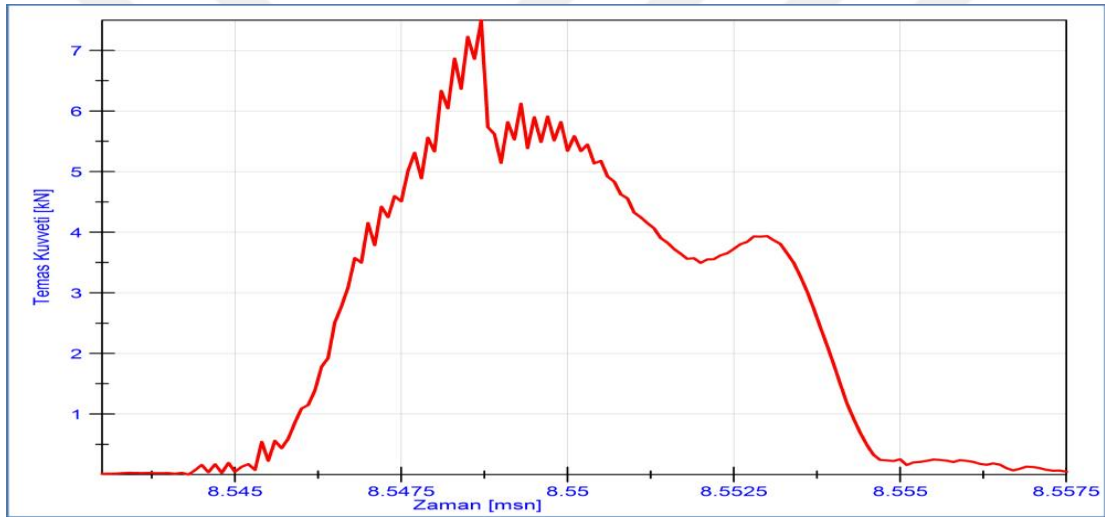
(e)

Şekil 5.4. (Devam) [90/+45/0/-45]_s dizilimine ait Kuvvet-Zaman grafiği, a) 2N1_+22,5°C, b) 2N2_+22,5 °C, c) 2N3_-60 °C, d) 2N4_-30 °C, e) 2N5_0 °C

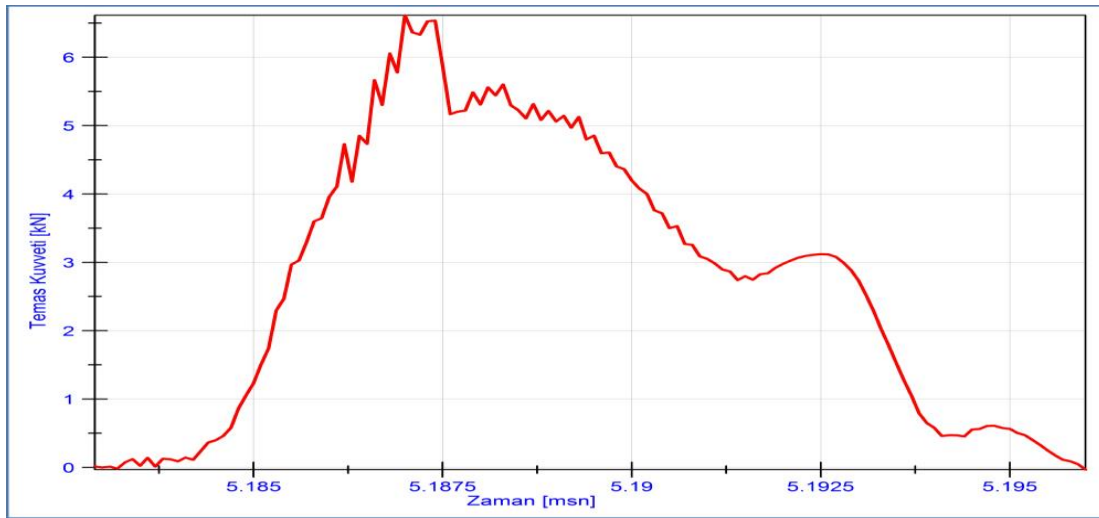
Şekil 5.4.'deki grafikte belirtilmiş dizilim için vurucu ucun numuneye çarptıktan sonra geri sıçrama hareketi yaptığı görülmektedir. [90/+45/0/-45]_s diziliminde sıcaklık arttıkça temas kuvveti azalmıştır. Bu dizilimde de tüm numuneler çok kısa sürede maksimum kuvvete ulaşırken, kuvvetin sıfırlanması daha uzun sürede meydana gelmiştir. Kuvvetin aniden değil salınımlar yaparak sıfırlandığı görülmektedir. Salınım miktarı arttıkça hasar miktarı da artmaktadır. En çok salınım oda sıcaklığındaki ve -60 °C'deki numunede, en az salınım -30 °C'de görülmektedir. En uzun temas süresi 0 °C'de görülürken en kısa temas süresi +22,5 °C'deki grafikte görülmektedir.



(a)

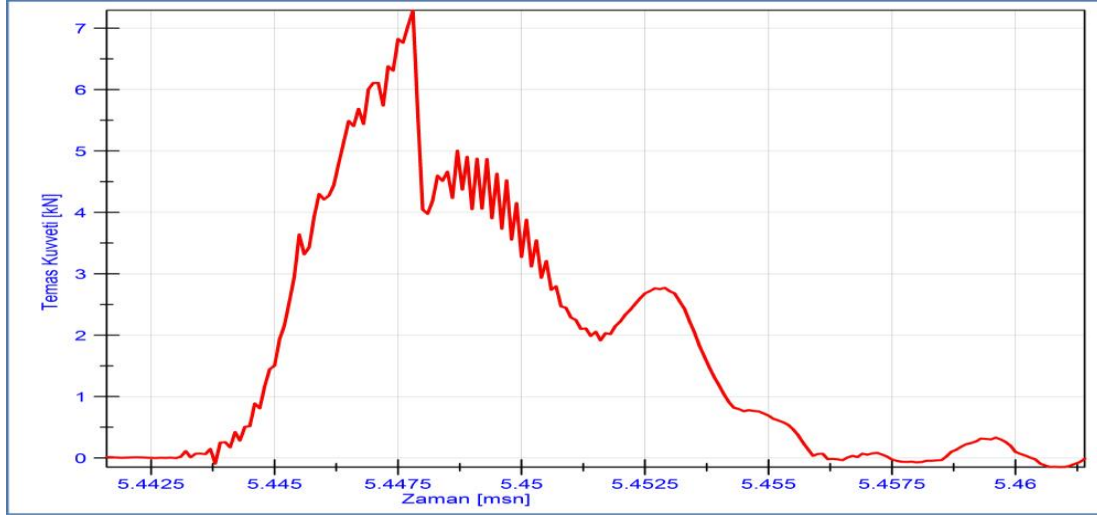


(b)

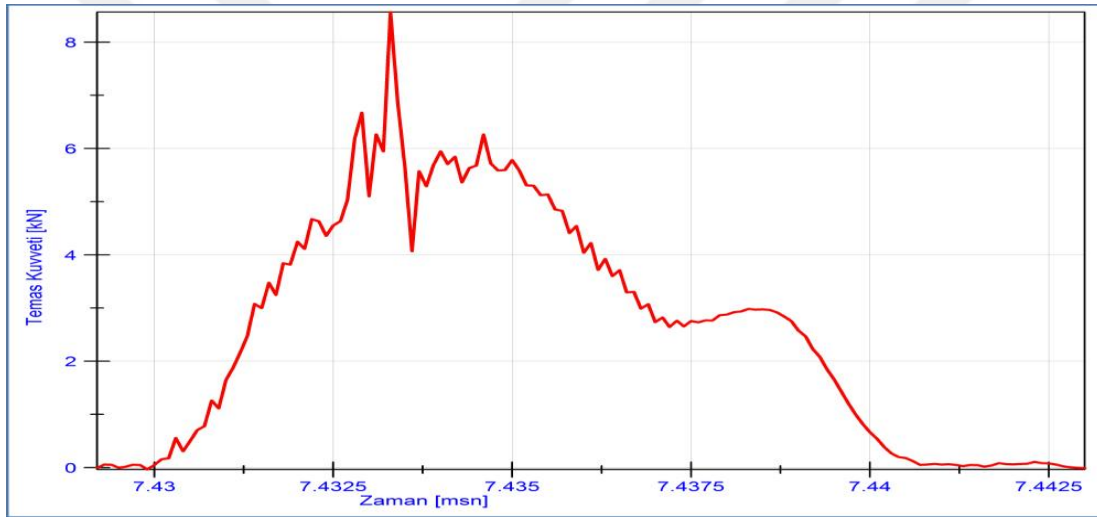


(c)

Şekil 5.5. [+45/0/-45/90]_s dizilimine ait Kuvvet-Zaman grafiği, a) 3N1_+22,5°C, b) 3N2_+22,5 °C, c) 3N3_-60 °C, d) 3N4_-30 °C, e) 3N5_0 °C



(d)

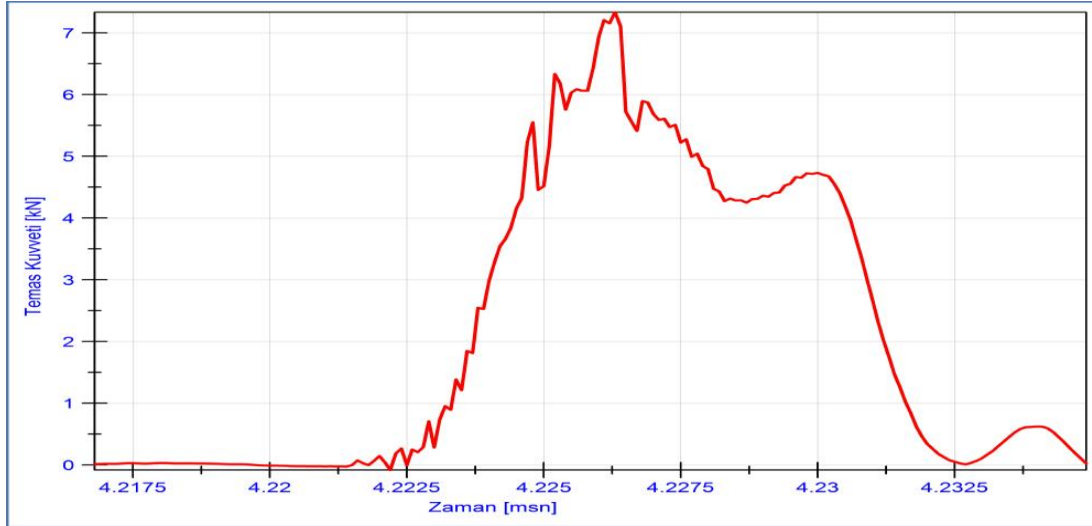


(e)

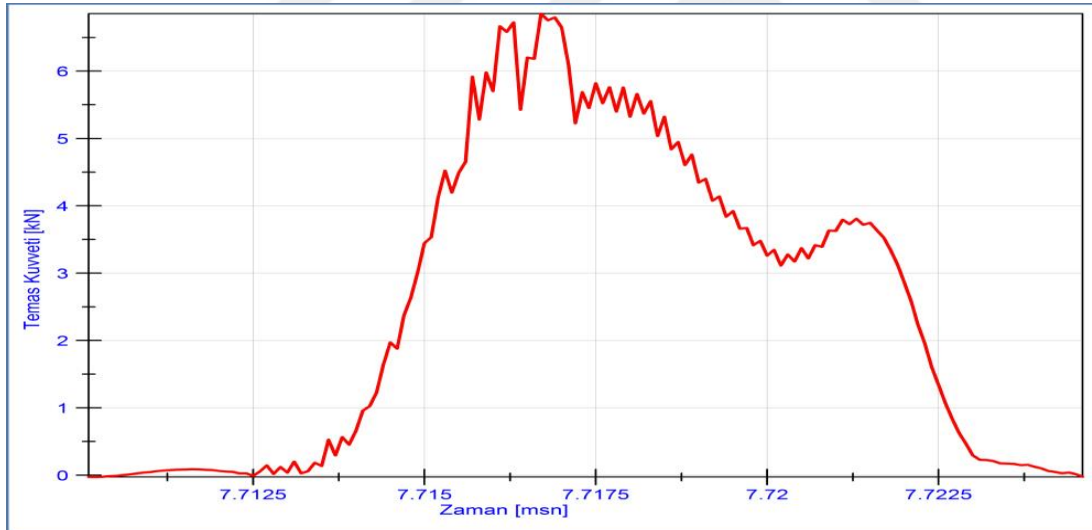
Şekil 5.5. (Devam) [+45/0/-45/90]_s dizilimine ait Kuvvet-Zaman grafiği, a) 3N1_+22,5°C, b) 3N2_+22,5 °C, c) 3N3_-60 °C, d) 3N4_-30 °C, e) 3N5_0 °C

Şekil 5.5.'deki grafikte belirtilmiş dizilim için vurucu ucun numuneye çarptıktan sonra geri sıçrama hareketi yaptığı görülmektedir. [+45/0/-45/90]_s diziliminde sıcaklık arttıkça temas kuvveti azalmıştır diye genel bir kural söylemek zordur. Temas kuvveti 0 °C'deki numunede en büyük, -30 °C'deki numunede en küçük değerdedir. Bu durum plakalar azot gazı ile soğutulurken sıcaklığın plakanın iç yapısında homojen olarak dağılmamasından kaynaklı olabilir. Bu dizilimde de tüm numuneler çok kısa sürede maksimum kuvvete ulaşırken, kuvvetin sıfırlanması daha uzun sürede meydana gelmiştir. Kuvvetin aniden değil salınımlar yaparak sıfırlandığı görülmektedir. Salınım miktarı arttıkça hasar miktarı da artmaktadır.

En çok salınım oda sıcaklığındaki ve $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki numunede, en az salınım strain-gage takılı oda sıcaklığındaki numunede görülmektedir. En uzun temas süresi $+22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de görülürken en kısa temas süresi strain-gage takılı $+22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'deki grafikte görülmektedir.



(a)

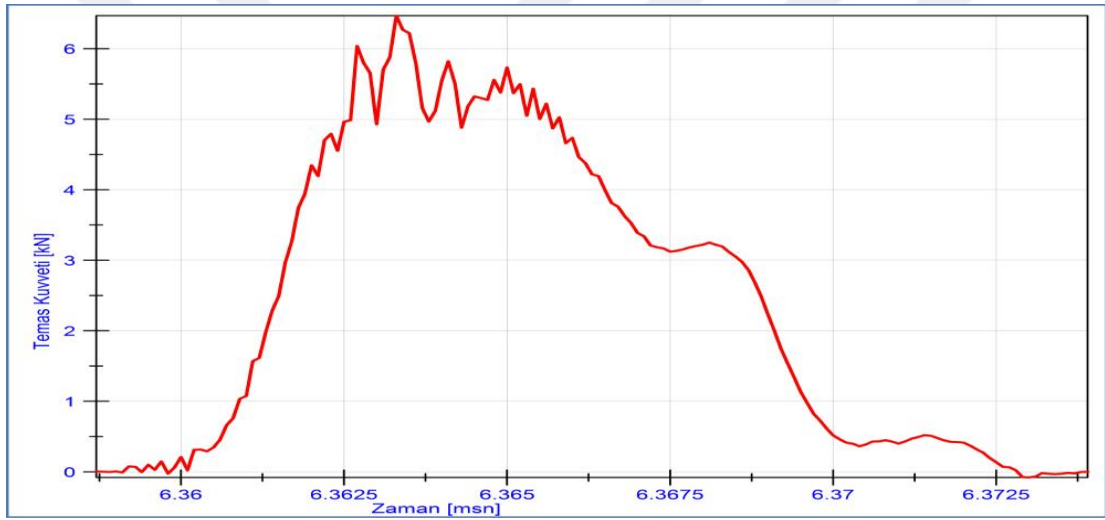


(b)

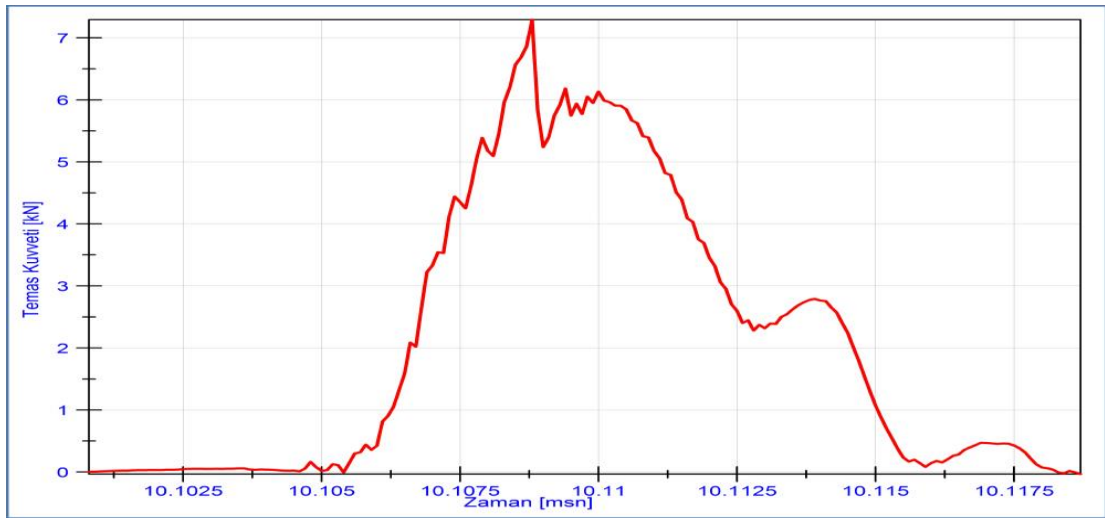
Şekil 5.6. $[0/+45/90/-45]_s$ dizilimine ait Kuvvet-Zaman grafiği, a) 4N1_+22,5°C, b) 4N2_+22,5 °C, c) 4N3_-60 °C, d) 4N4_-30 °C, e) 4N5_0 °C



(c)



(d)



(e)

Şekil 5.6. (Devam) [0/+45/90/-45]_s dizilimine ait Kuvvet-Zaman grafiği, a) 4N1_+22,5°C, b) 4N2_+22,5 °C, c) 4N3_-60 °C, d) 4N4_-30 °C, e) 4N5_0 °C

Şekil 5.6.’deki grafikte belirtilmiş dizilim için vurucu ucun numuneye çarptıktan sonra geri sıçrama hareketi yaptığı görülmektedir. [0/+45/90/-45]_s diziliminde de sıcaklık arttıkça temas kuvveti azalmıştır diye genel bir kural söylemek zordur.

Temas kuvveti strain-gage takılı +22,5 °C’deki numunede en büyük, -60 °C’deki numunede en küçük değerdedir. Bu durum plakalar azot gazı ile soğutulurken sıcaklığın plakanın içyapısında homojen olarak dağılmamasından kaynaklı olabilir. Bu dizilimde -60 °C’de ve -30 °C ‘deki numuneler çok kısa sürede maksimum kuvvete ulaşırken kuvvetin sıfırlanması daha uzun sürede meydana gelmiştir. Diğer sıcaklıklarda maksimum kuvvete daha uzun sürede ulaşılmış ve yaklaşık aynı sürede sıfırlanmıştır.

Kuvvetin aniden değil salınımlar yaparak sıfırlandığı görülmektedir. Salınım miktarı arttıkça hasar miktarı da artmaktadır. En çok salınım oda sıcaklığındaki ve -30 °C’deki numunede, en az salınım -60 °C’deki numunede görülmektedir. En uzun temas süresi strain-gage takılı +22,5 °C’de görülürken en kısa temas süresi +22,5 °C’deki grafikte görülmektedir.

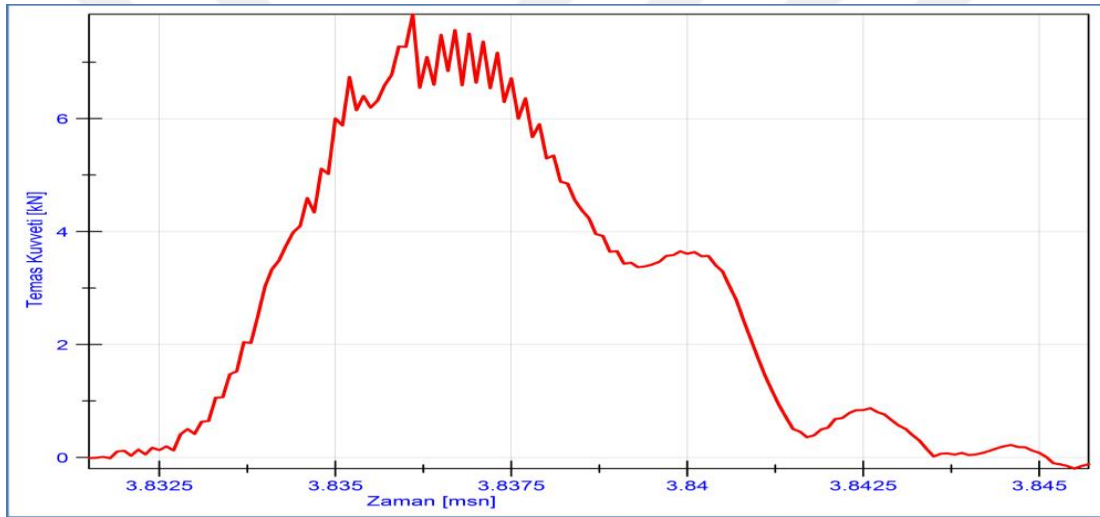


(a)

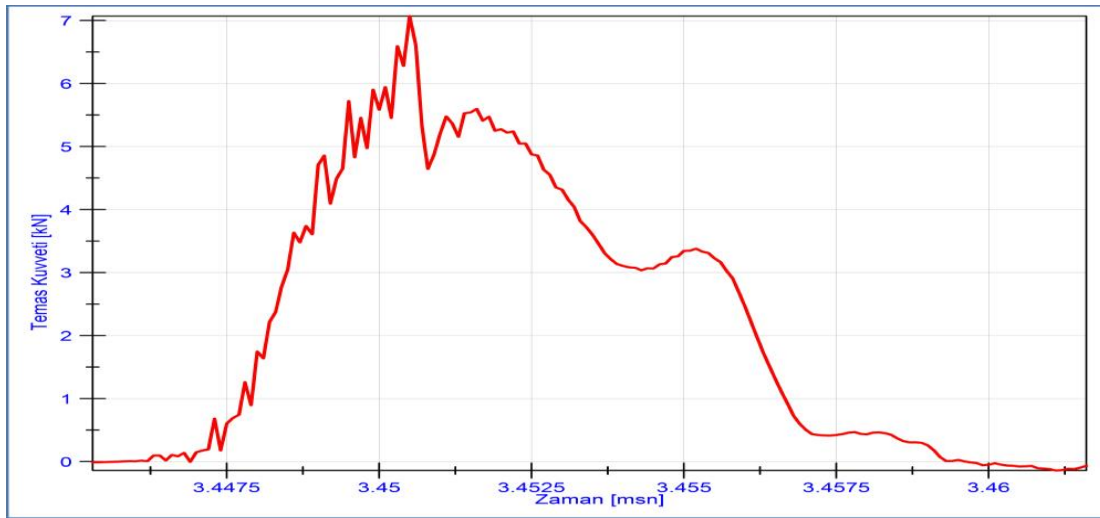
Şekil 5.7. [0/-45/90/+45]_s dizilimine ait Kuvvet-Zaman grafiği, a) 5N1_+22,5°C, b) 5N2_+22,5 °C, c) 5N3_-60 °C, d) 5N4_-30 °C, e) 5N5_0 °C



(b)

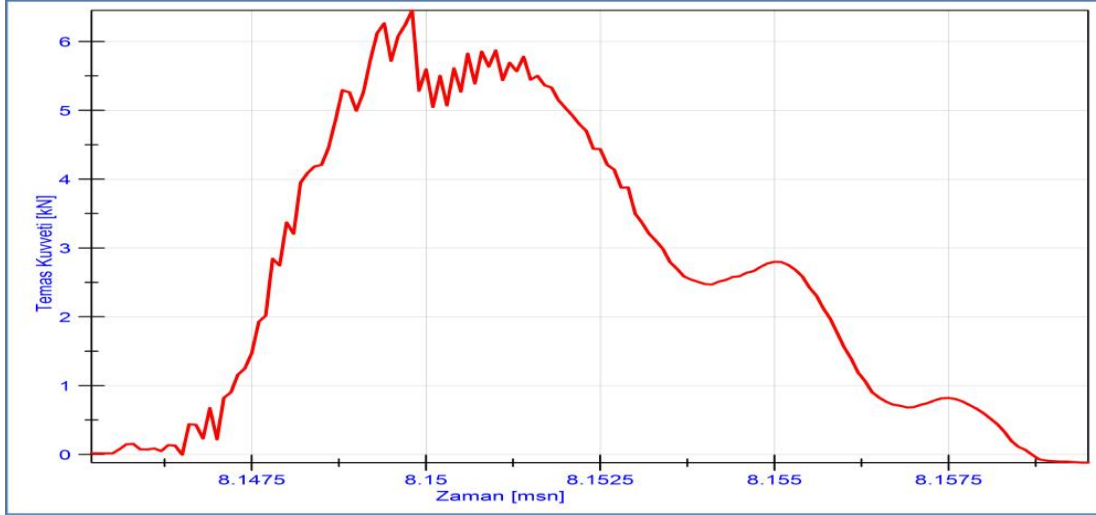


(c)



(d)

Şekil 5.7. (Devam) [0/-45/90/+45]s dizilimine ait Kuvvet-Zaman grafiği, a) 5N1_+22,5°C, b) 5N2_+22,5 °C, c) 5N3_-60 °C, d) 5N4_-30 °C, e) 5N5_0 °C



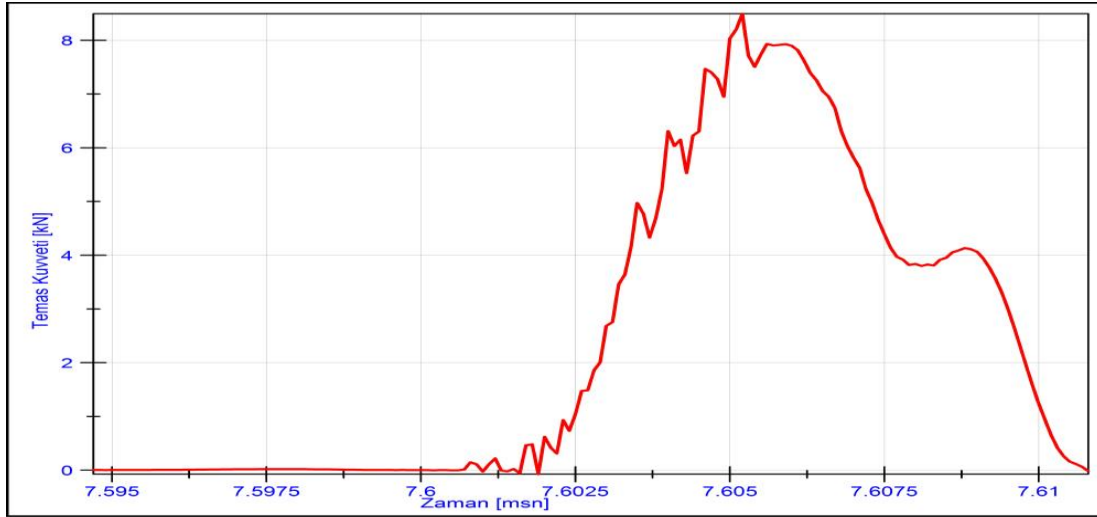
(e)

Şekil 5.7. (Devam) [0/-45/90/+45]_s dizilimine ait Kuvvet-Zaman grafiği, a) 5N1_+22,5°C, b) 5N2_+22,5 °C, c) 5N3_-60 °C, d) 5N4_-30 °C, e) 5N5_0 °C

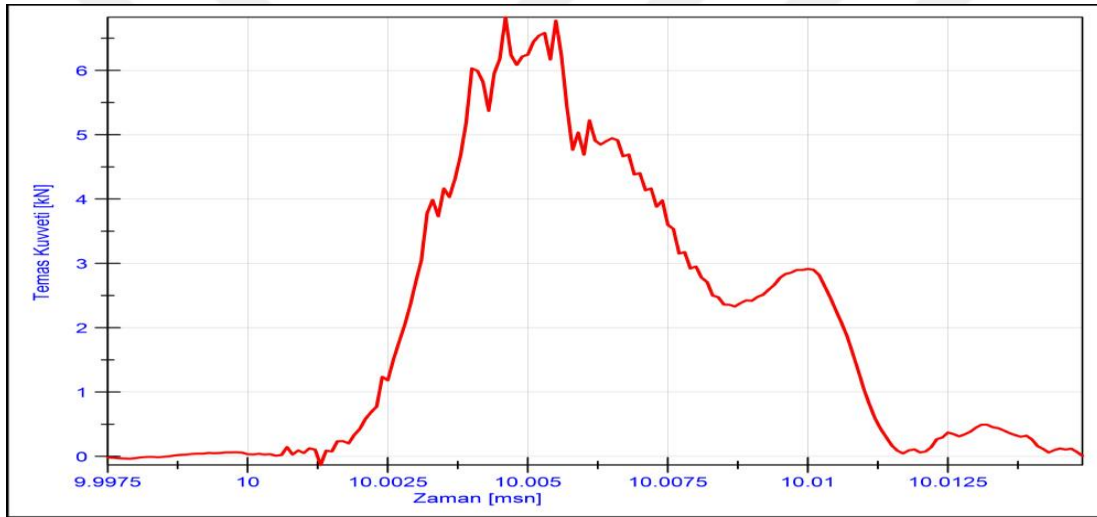
Şekil 5.7.'deki grafikte belirtilmiş dizilim için vurucu ucun numuneye çarptıktan sonra geri sıçrama hareketi yaptığı görülmektedir. [0/-45/90/+45]_s diziliminde de sıcaklık arttıkça temas kuvveti azalmıştır diye genel bir kural söylemek zordur.

Temas kuvveti strain-gage takılı +22,5 °C'deki numunede en büyük, 0 °C'deki numunede en küçük değerdedir. Bu durum plakalar azot gazı ile soğutulurken sıcaklığın plakanın içyapısında homojen olarak dağılmamasından kaynaklı olabilir. Bu dizilimde de tüm numuneler çok kısa sürede maksimum kuvvete ulaşırken, kuvvetin sıfırlanması daha uzun sürede meydana gelmiştir.

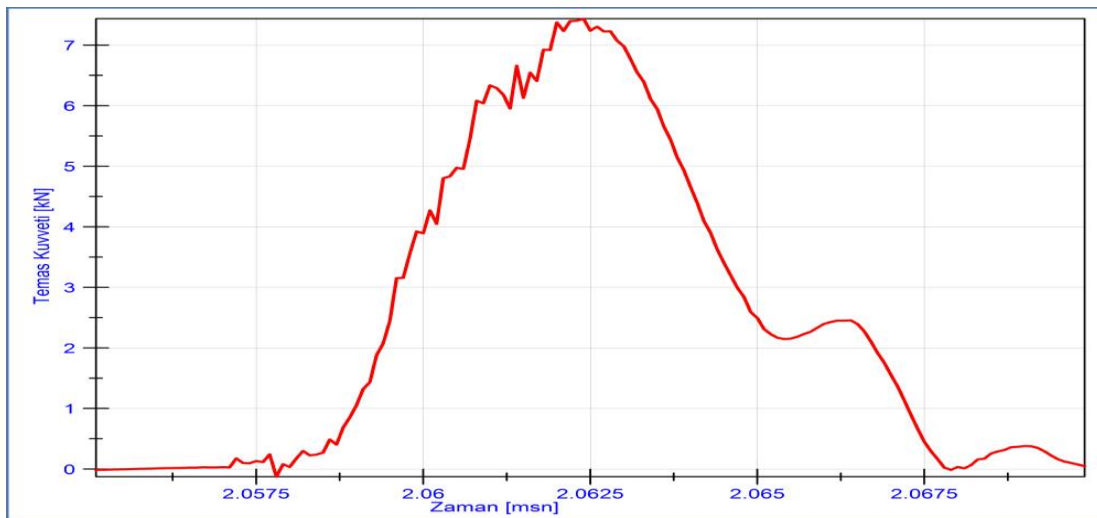
Kuvvetin aniden değil salınımlar yaparak sıfırlandığı görülmektedir. Salınım miktarı arttıkça hasar miktarı da artmaktadır. En çok salınım strain-gage takılı oda sıcaklığındaki ve -60 °C'deki numunede, en az salınım +22,5 °C'deki numunede görülmektedir. En uzun temas süresi -60 °C'de görülürken en kısa temas süresi strain-gage takılı +22,5 °C'de grafikte görülmektedir.



(a)



(b)

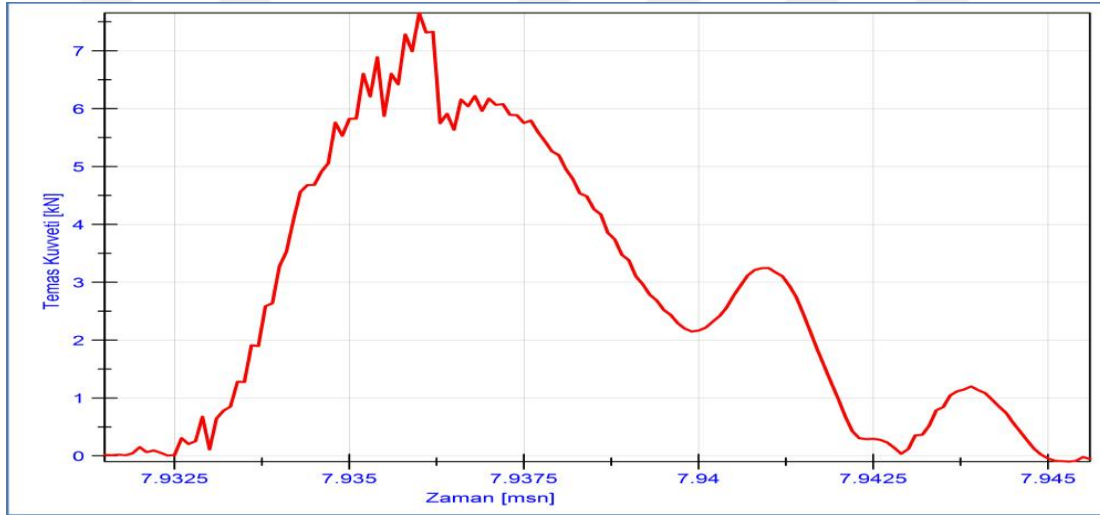


(c)

Şekil 5.8. [+45/0/90/-45]_s dizilimine ait Kuvvet-Zaman grafiği, a) 6N1_+22,5°C, b) 6N2_+22,5 °C, c) 6N3_-60 °C, d) 6N4_-30 °C, e) 6N5_0 °C



(d)



(e)

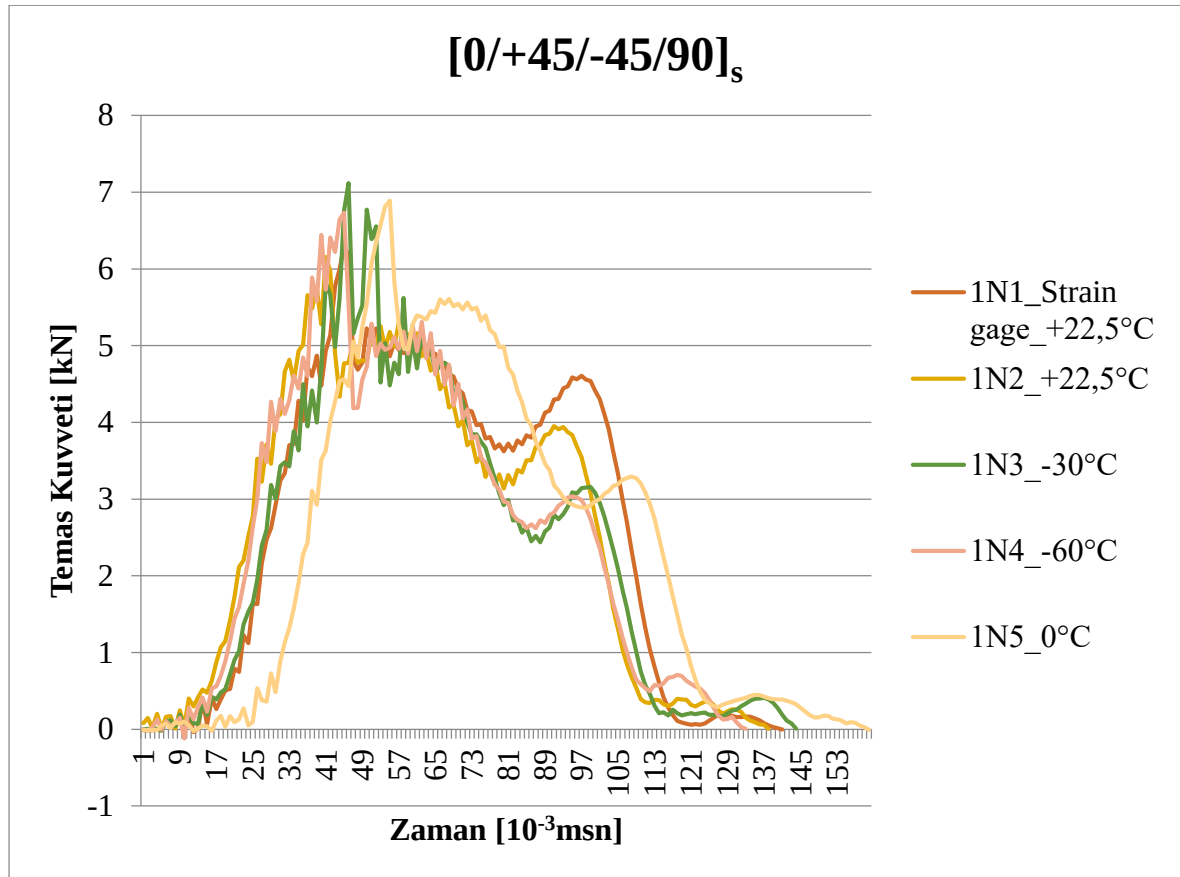
Şekil 5.8. (Devam) [+45/0/90/-45]s dizilimine ait Kuvvet-Zaman grafiği, a) 6N1_+22,5°C, b) 6N2_+22,5 °C, c) 6N3_-60 °C, d) 6N4_-30 °C, e) 6N5_0 °C

Şekil 5.8.'deki grafikte belirtilmiş dizilim için vurucu ucun numuneye çarptıktan sonra geri sıçrama hareketi yaptığı görülmektedir[+45/0/90/-45]s diziliminde de sıcaklık arttıkça temas kuvveti azalmıştır diye genel bir kural söylemek zordur. Temas kuvveti strain-gage takılı +22,5 °C'deki numunede en büyük, +22,5 °C'deki numunede en küçük değerdedir. Bu durum plakalar azot gazı ile soğutulurken sıcaklığın plakanın içyapısında homojen olarak dağılmamasından kaynaklı olabilir. Bu dizilimde -30 °C'deki ve 0 °C 'deki numuneler çok kısa sürede maksimum kuvvete ulaşırken, kuvvetin sıfırlanması daha uzun sürede meydana gelmiştir. Diğer sıcaklıklarda maksimum kuvvete ulaşma süresi sıfırlanma süresinden daha uzundur. Kuvvetin aniden değil salınımlar yaparak sıfırlandığı

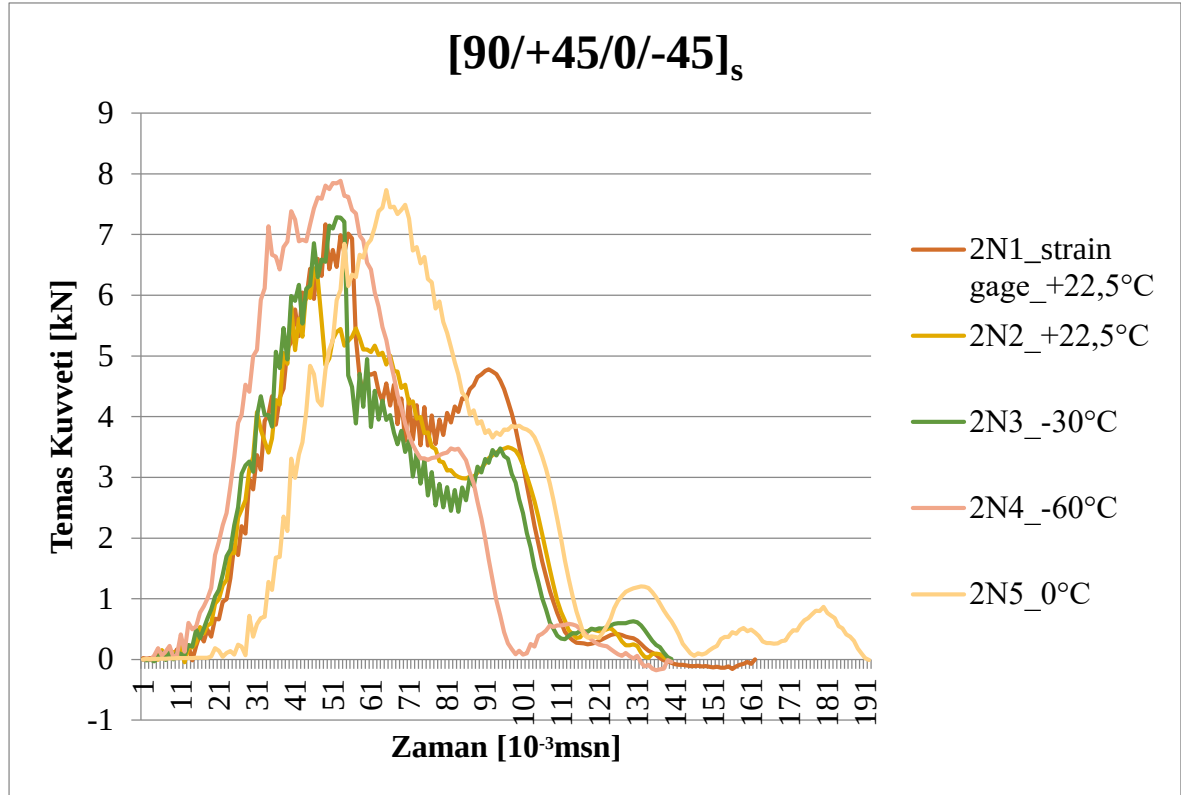
görülmektedir. Salınım miktarı arttıkça hasar miktarı da artmaktadır. En çok salınım -30 °C'deki numunede, en az salınım -60 °C'deki numunede görülmektedir. En uzun temas süresi -60 °C'de görülürken en kısa temas süresi 0 °C'de grafikte görülmektedir.

Literatür 'de olduğu gibi kompozit malzemelerin darbenin uygulandığı andan itibaren kendi kendilerini iyileştirdiği söylenebilir [33].

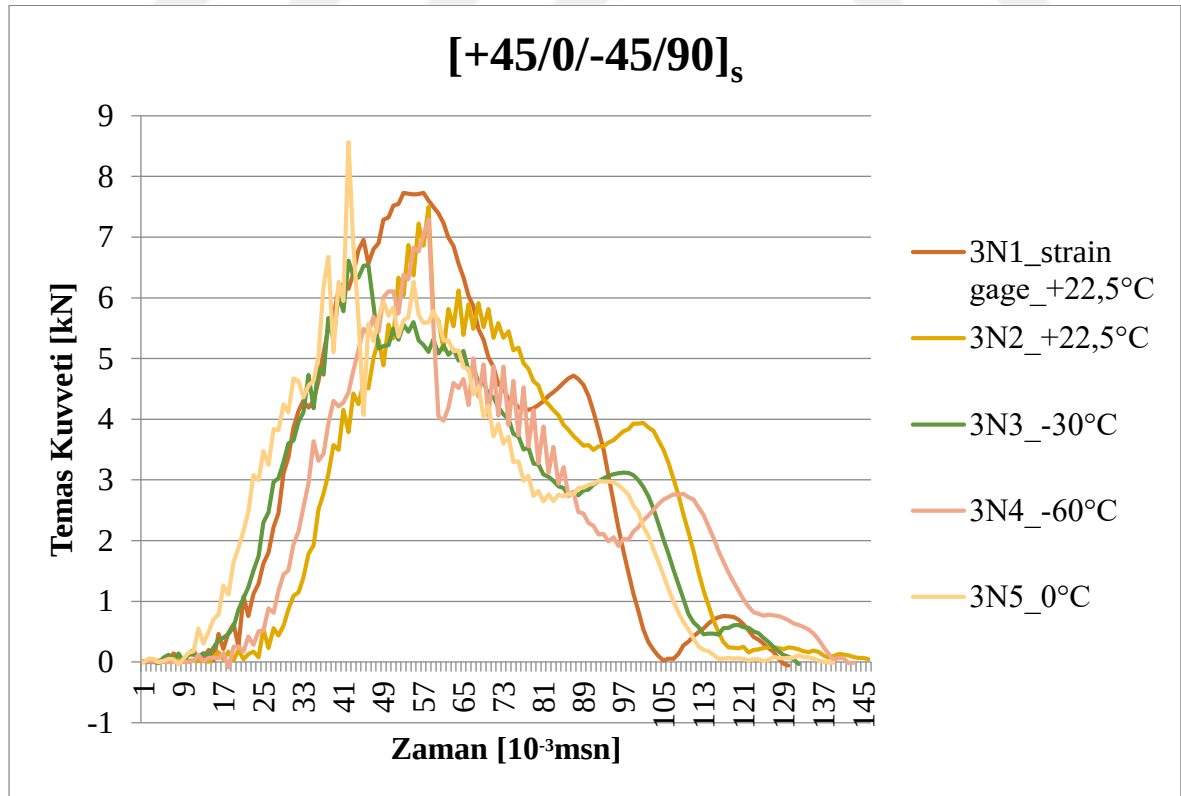
Literatür 'de olduğu gibi bu çalışmada da Kompozit numunelerin çoğu tabakalarında görülen delaminasyonun alt tabakalarda görülen fiberlerin kırılması ve fiberlerin kırıldığı tabakaların çökmesi sonucu oluştuğu görülmüştür [60].



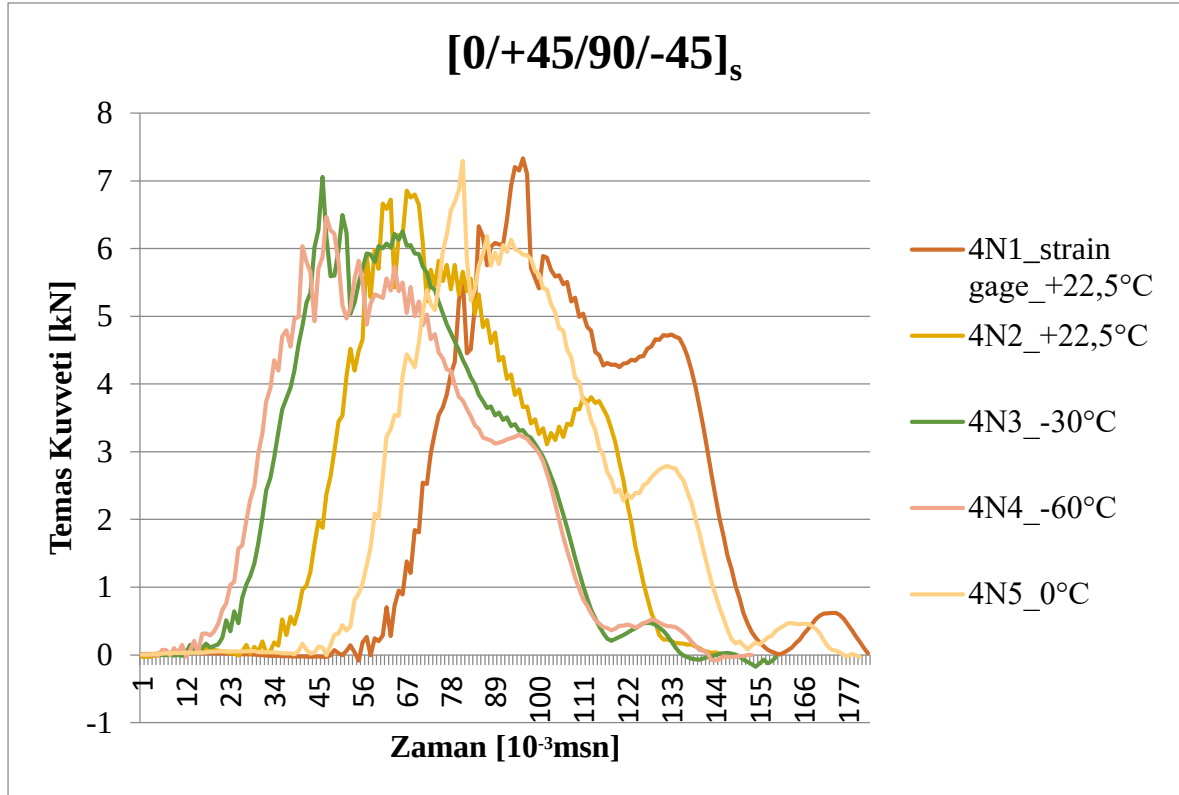
Şekil 5.9. “1” nolu numunelerin 5 farklı sıcaklığa ait Kuvvet - Zaman grafiği



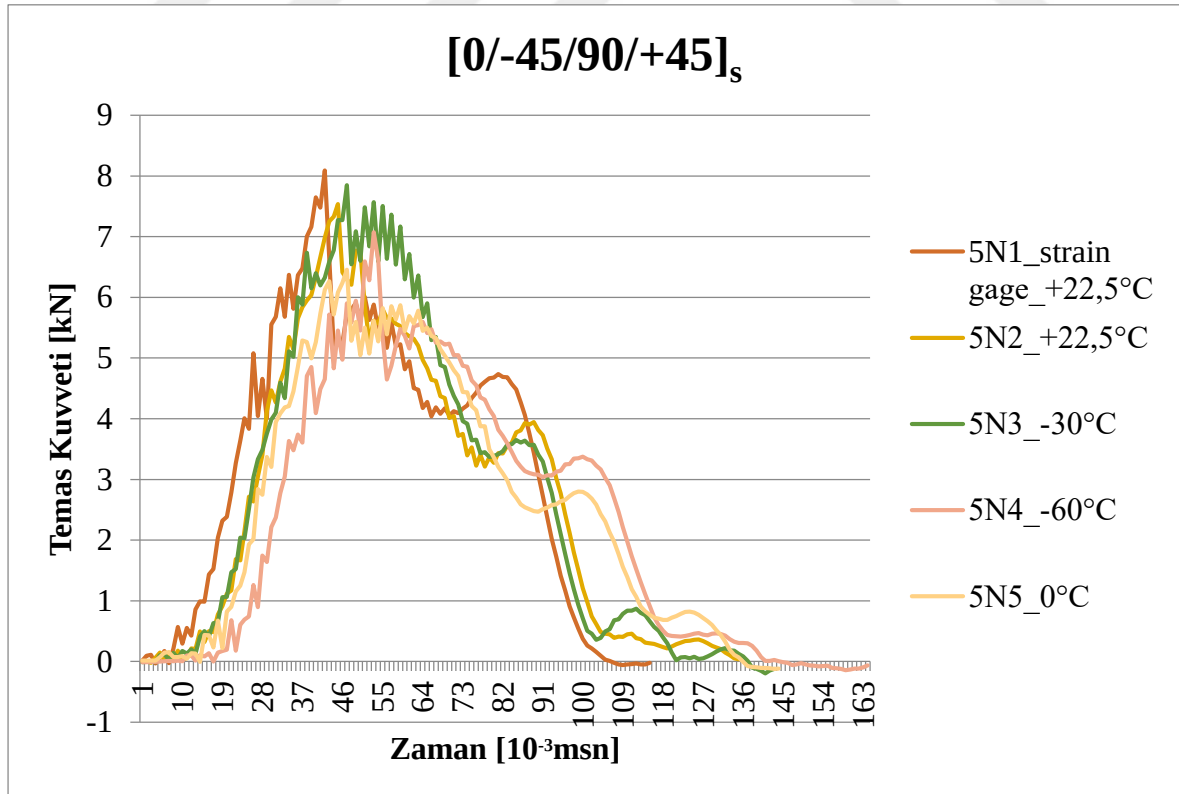
Şekil 5.10. “2” nolu numunelerin 5 farklı sıcaklığa ait Kuvvet - Zaman grafiği



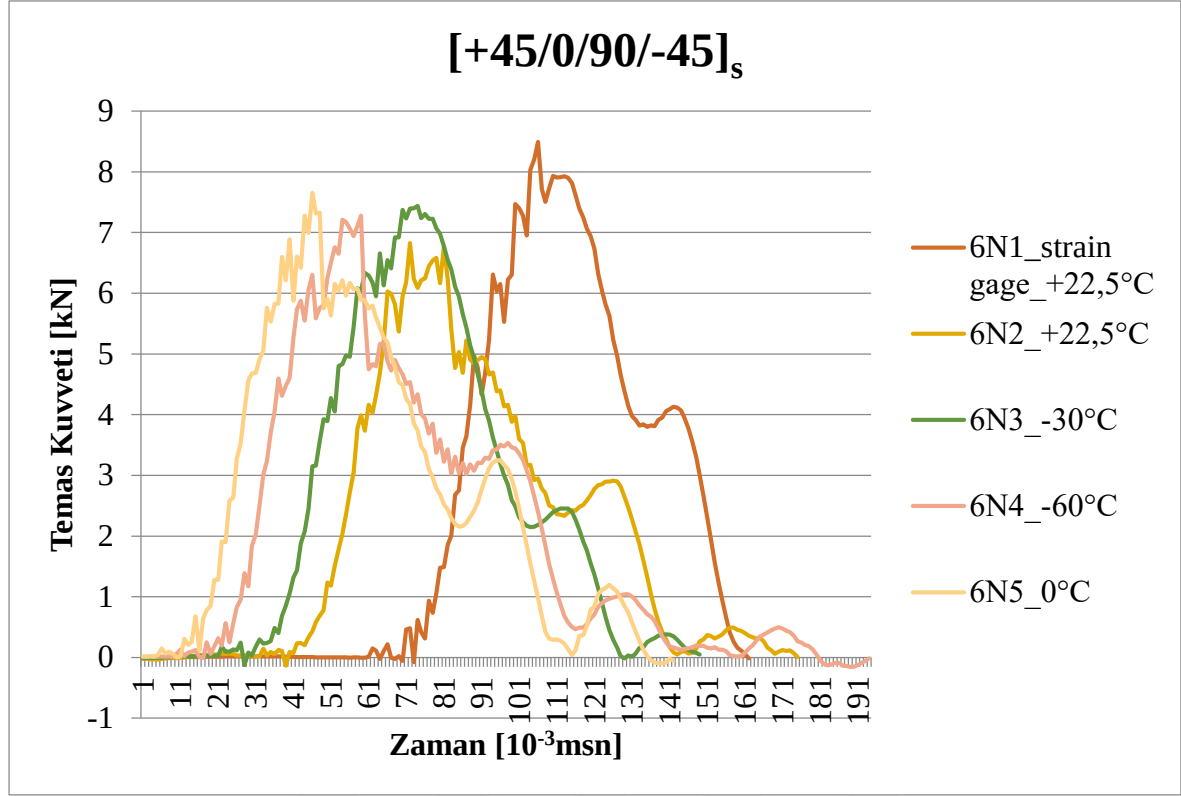
Şekil 5.11. “3” nolu numunelerin 5 farklı sıcaklığa ait Kuvvet - Zaman grafiği



Şekil 5.12. “4” nolu numunelerin 5 farklı sıcaklığa ait Kuvvet - Zaman grafiği



Şekil 5.13. “5” nolu numunelerin 5 farklı sıcaklığa ait Kuvvet - Zaman grafiği



Şekil 5.14. “6” nolu numunelerin 5 farklı sıcaklığa ait Kuvvet - Zaman grafiği

Tüm numunelerde kuvvet salınım yaparak sıfırlanmıştır. Salınım miktarı arttıkça hasar miktarı da artmaktadır.

Birinci dizilimdeki 1N1 nolu numunede, Üçüncü dizilimdeki 3N3 nolu numunede ve Altıncı dizilimdeki 6N3 nolu numunede diğer numunelere göre daha az hasar oluştuğu görülmüştür.

Birinci ve üçüncü dizilimde en çok çöküntü -60°C’de en az -30°C’de oluşmuştur. Dördüncü ve altıncı dizilimde en çok çöküntü -30°C’de en az +22,5°C’de oluşmuştur. Beşinci dizilimde en çok çöküntü 0°C’de en az +22,5°C’de, İkinci dizilimde ise en çok çöküntü -60°C’de en az +22,5°C’de oluşmuştur.

Çizelge 5.2. Tüm numunelerin darbe süreleri

Deney No	t _{başlangıç} (msn)	t _{maksimum kuvvet} (msn)	t _{toplam} (msn)
1N1	0	4,4	14
1N2	0	4	13,7
1N3	0	4,5	14,3
1N4	0	4,4	13,2
1N5	0	5,4	15,9
2N1	0	5,4	16,1
2N2	0	4,5	13,8
2N3	0	4,5	13,9
2N4	0	5,2	13,9
2N5	0	6,9	19,1
3N1	0	5,6	12,9
3N2	0	5,7	14,5
3N3	0	4,1	13,1
3N4	0	5,7	14,2
3N5	0	4,1	13,8
4N1	0	9,5	18,1
4N2	0	6,6	14,5
4N3	0	4,5	15,8
4N4	0	4,6	15,2
4N5	0	8	17,9
5N1	0	4,1	11,4
5N2	0	4,4	13,4
5N3	0	4,6	14,2
5N4	0	5,2	16,3
5N5	0	4,6	14,3
6N1	0	10,5	16,1
6N2	0	7,1	17,4
6N3	0	7,3	14,8
6N4	0	5,8	19,3
6N5	0	4,5	14,1

Sıcaklığın artması ile plakalarda delaminasyonun tüm katmanlarda olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum delaminasyon hasarından dolayı tabakalardaki katılığın azaldığını göstermektedir. Yani malzemenin yüksek sıcaklıklarda darbe direnci azalmaktadır, hasar miktarı artmaktadır. 1., 2., 4. ve 5. dizilime sahip yani 0 ° ve 90 ° oryantasyon açısıyla başlayan numunelerde delaminasyonun neredeyse tüm katmanlarda olduğu gözlemlenmiştir. 3. ve 6. dizilime sahip yani +45 ° oryantasyon açısıyla başlayan numunelerde oluşan delaminasyon çoğunlukla alt katmanlarda olduğu görülmüştür. +45 ° oryantasyon açısıyla başlayan numunelerin diğer dizilime sahip numunelere göre darbe direnci daha yüksektir. Sıfırlama süresi 6N4 nolu numunede yani -60 °C’de fazladır yani bu numunenin esneklik özelliği daha fazladır.

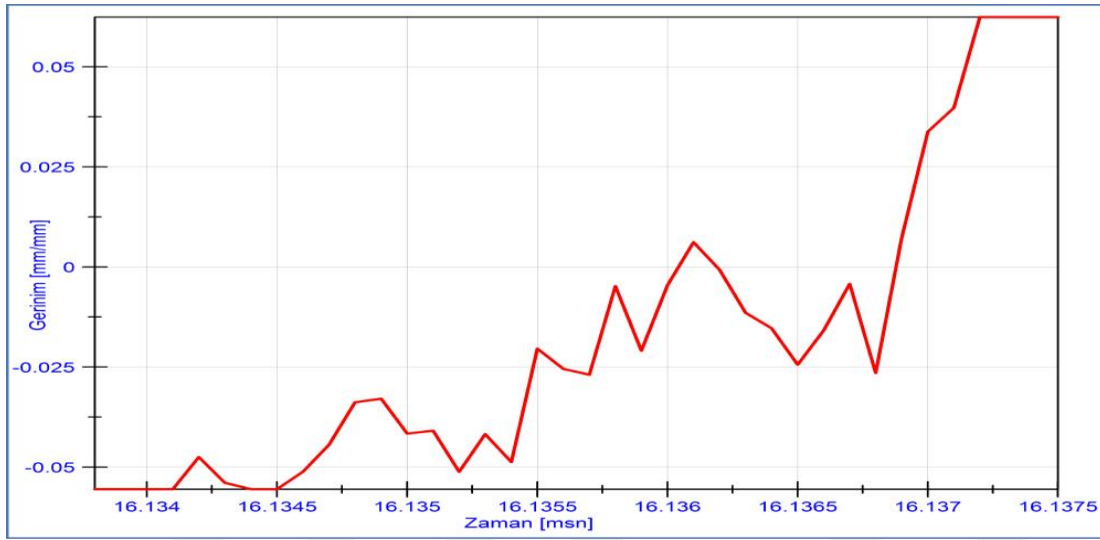
Numune sıcaklığı azaldığında hasar alanlarının arttığı bulunmuştur. Sıcaklık azaldıkça reçinenin kırılabilirliği de artmakta böylece matris kırıkları ve delaminasyon alanları da artmaktadır. Düşük sıcaklık hasar alanlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Sıcaklık azaldıkça enine çatlak sıklığı azalmakta, sıcaklık artışı ile birlikte enine çatlak sıklığı da artmaktadır [70].

+22,5 °C’de darbe uygulanmış 2N1, 4N2, 5N2 ve 6N2 nolu numunelerde enine çatlak sıklığı daha yoğun görülmektedir (Resim 5.2 (a), Resim 5.4 (b), Resim 5.5 (b), Resim 5.6 (b)).

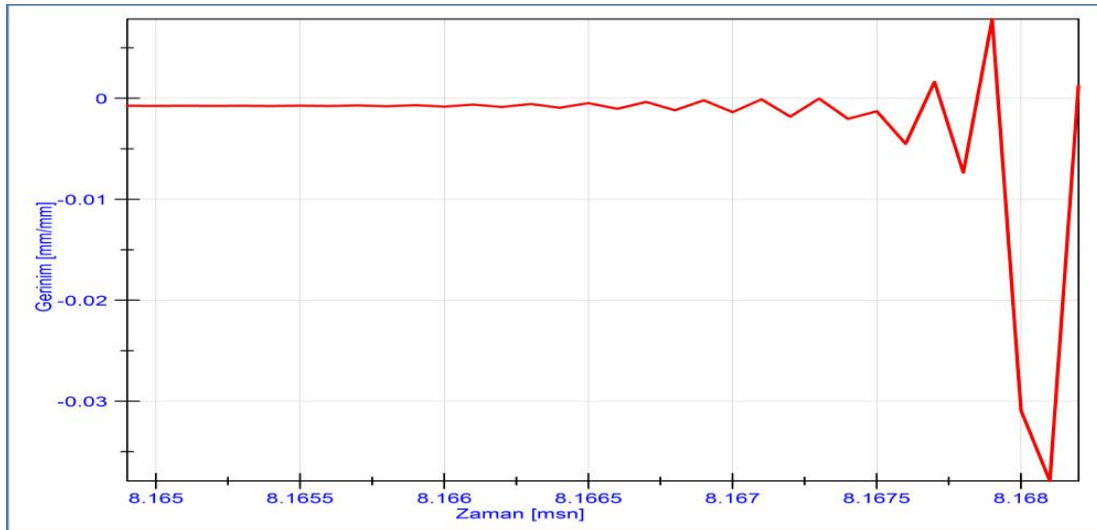
Bu tip tabakalarda her katmanın ısı genleşme katsayısı arasındaki farklılıklar nedeniyle düşük sıcaklıklarda termal stresi belirlemek önemlidir. Düşük sıcaklıklarda tabakalar arası termal stresin yüksek olması nedeniyle tabakaların darbe davranışını olumsuz olarak etkilemektedir [71].

Tabakalar kür sıcaklığından oda sıcaklığına soğutulduğunda her katman fiber yönünden daha fazla enine yöne eğilimli olmaktadır. Öte yandan bu enine yönelim bitişik katmanlar tarafından engellenmektedir ve bu tabakanın iç katmanlarında strese sebep olmaktadır. Termal olarak strese sebep olan bu durum soğutma boyunca matris içinde nano boyutta kırılmalar ve kompozit içinde fiber ayrılmalarına neden olacak yeterli büyüklükte olabilir. Bu stres darbe yükü altında tabakaların davranışını etkileyebilir. Darbe sonrası matris kırılmaları, yoğun delaminasyon, darbe uygulanmış yüzeyde iz, fiber-matris ayrılmaları ve alt yüzeyde fiber kırılmaları oluşmuştur. Matristeki kırılma, düşük sıcaklıklarda

tabakalarda oluşan tabakalararası termal stres ile birlikte darbe yüküne maruz kalınca hasar üretimini ve yayılımını kolaylaştırmaktadır. Sıcaklık ve yükleme durumları altındaki CFRP kompozitlerin davranışlarında fiber takviye yapısı ve istif dizisi önemli rol oynamaktadır. Düşük sıcaklıklarda oluşan tabakalararası kalıntı termal stres kompozit malzemede delaminasyonla birlikte düşük hızlı darbe boyunca matris kırılmasını hızlandırmak için yeterince yüksektir [72].

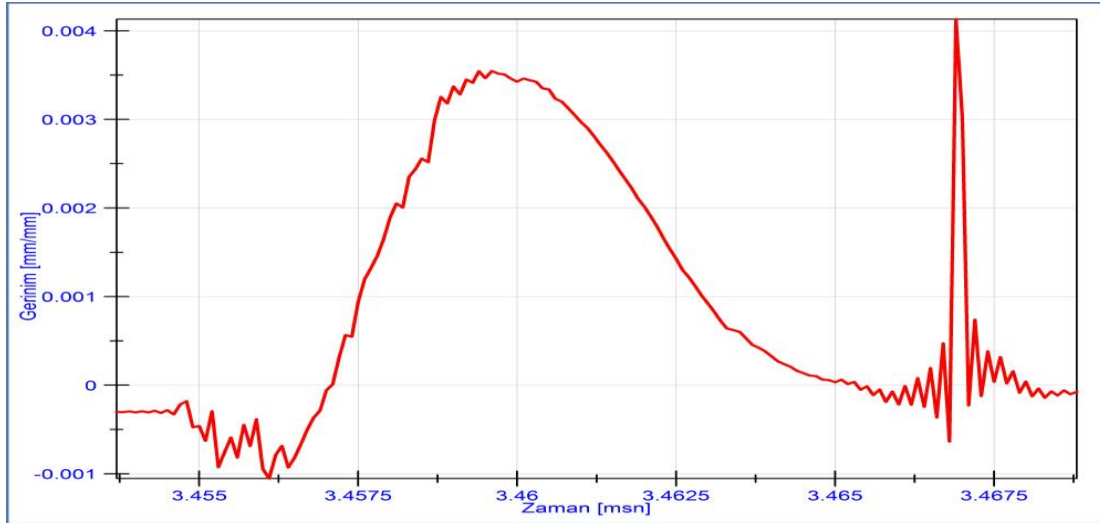


(a)



(b)

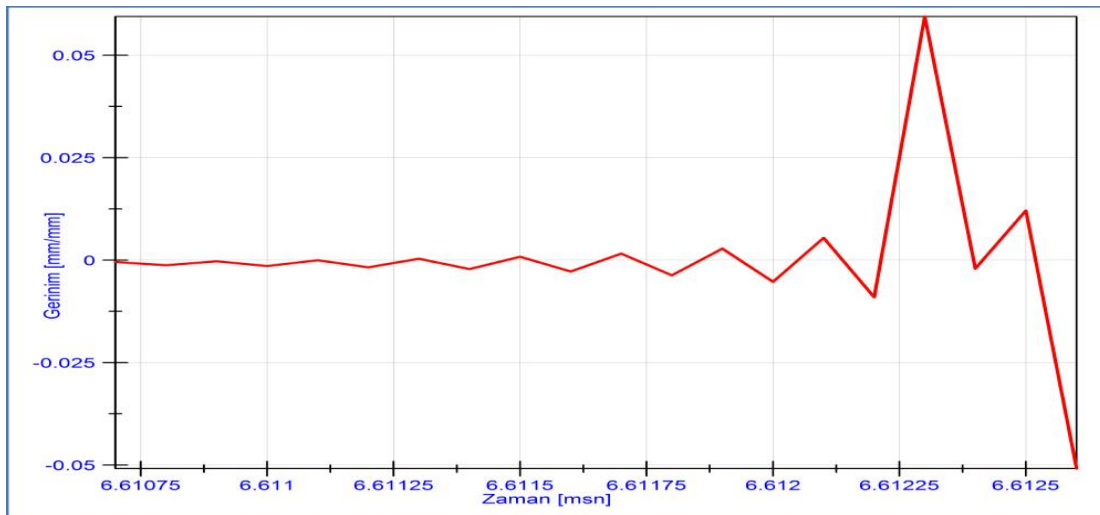
Şekil 5.15. Farklı dizilişlere ait Gerinim-Zaman grafiği, a) 1N1, b) 2N1, c) 3N1, d) 4N1, e) 5N1, f) 6N1



(c)

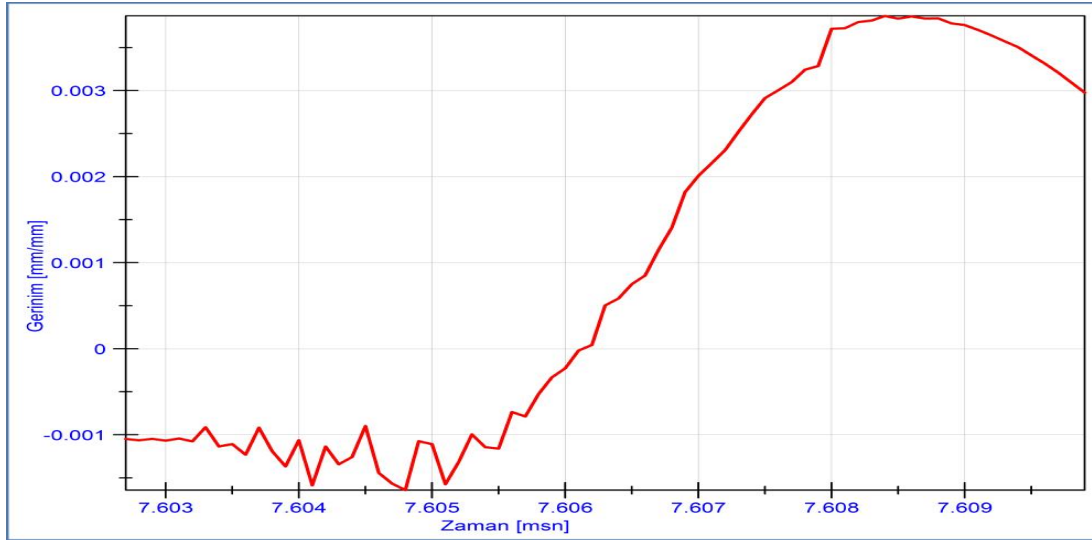


(d)



(e)

Şekil 5.15. (Devam) Farklı dizilişlere ait Gerinim-Zaman grafiği, a) 1N1, b) 2N1, c) 3N1, d) 4N1, e) 5N1, f) 6N1



(f)

Şekil 5.15. (Devam) Farklı dizilimlere ait Gerinim-Zaman grafiği, a) 1N1, b) 2N1, c) 3N1, d) 4N1, e) 5N1, f) 6N1

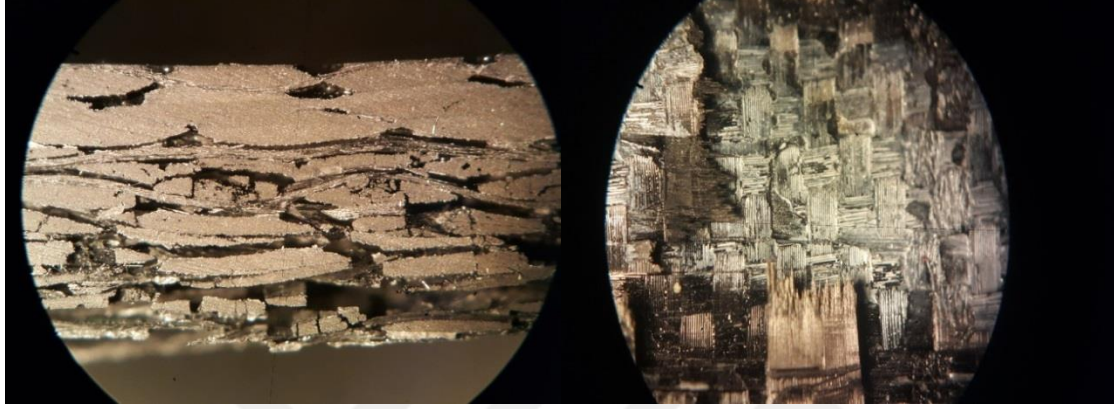
Strain kelimesinin anlamı gerinim, zorlanma, gerginlik olarak tanımlanmaktadır. Strain 'in kullanım amacı yüzeyin uzama miktarını ölçmektir ya da malzemedeki şekil değişikliklerini belirlemektir. Bu çalışmada plakaların gerinim değerleri strain-gage kullanılarak ölçülmüştür. Strain-gage'lerin hassas ve ince yapısı düşünüldüğünde malzemenin yüzeyine montajlanması çok dikkatli ve iyi bir şekilde yapılmalıdır. Dikkatlice hizalanmaması ölçüm sonuçlarını da etkilemektedir.

[0/+45/-45/90]_s oryantasyon dizilimine sahip numunede hasar oluşumunun az olması nedeniyle gerinim miktarı büyüktür. [+45/0/90/-45]_s oryantasyon dizilimine sahip numunede hasar oluşumunun fazla olması nedeniyle gerinim miktarı daha düşüktür. [0/+45/90/-45]_s ve [0/-45/90/+45]_s oryantasyon dizilimine sahip numunelerin dizilimi birbirine çok benzediğinden gerinim değerleri de benzer çıkmıştır. Hasarın erken oluştuğu malzemenin tokluğu azdır ve kırılgandır (Şekil 5.15 (e)). Hasarın geç oluştuğu malzemenin tokluğu 'da fazladır (Resim 5.15 (c)). Grafiklerde strain değerlerinin negatif değerlerden başlaması basma sebebiyle malzemedeki büzüşmeden kaynaklı olabilir.

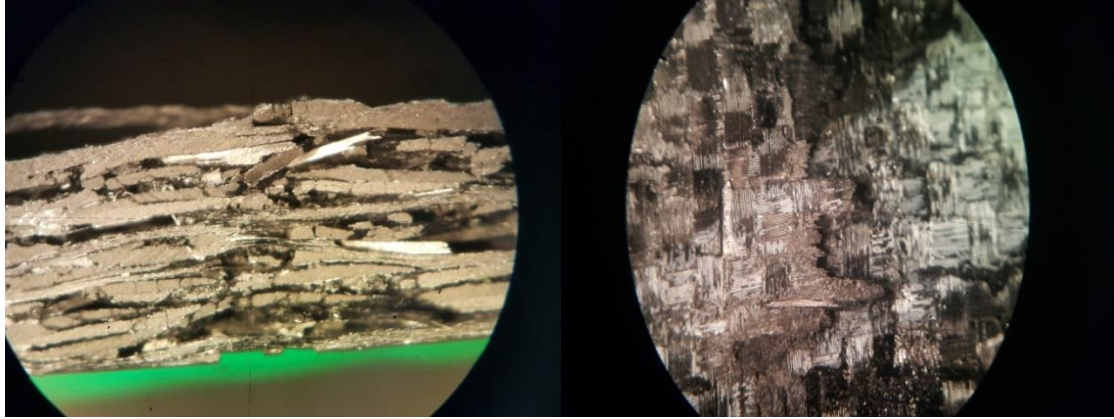
Takviye açısının değişimiyle birlikte, en üst tabakadan alt tabakalara doğru darbe yükü aktarılırken, alt tabakalarda meydana gelen von-misses gerilmeleri de azalmaktadır [58].

5.2. Hasarların Mikroskop ile İncelenmesi

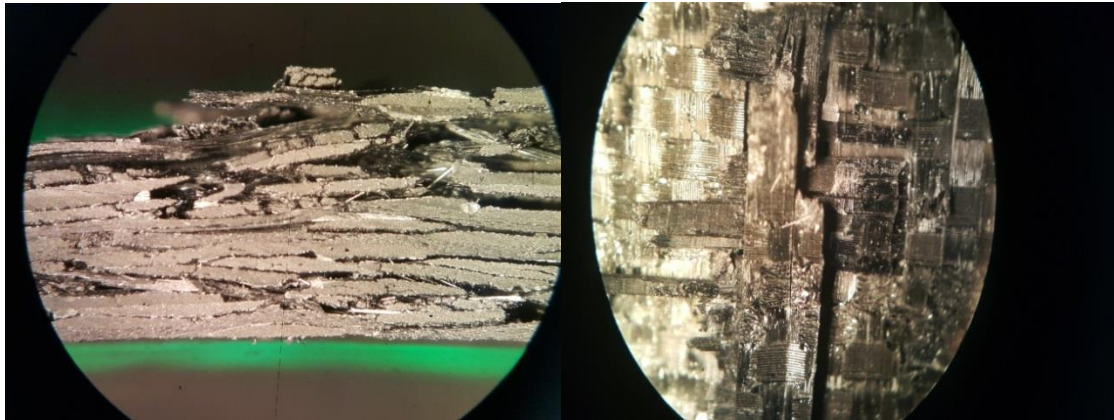
Numunelerin darbeye maruz kaldıktan sonra içyapılarında meydana gelen değişiklikleri görmek için mikroskop kullanılmıştır. Tüm numuneler mikroskopta incelendikten sonra çöküntülü bölgelerden kesilmiş ve tekrar mikroskopta incelenmiştir.



(a)

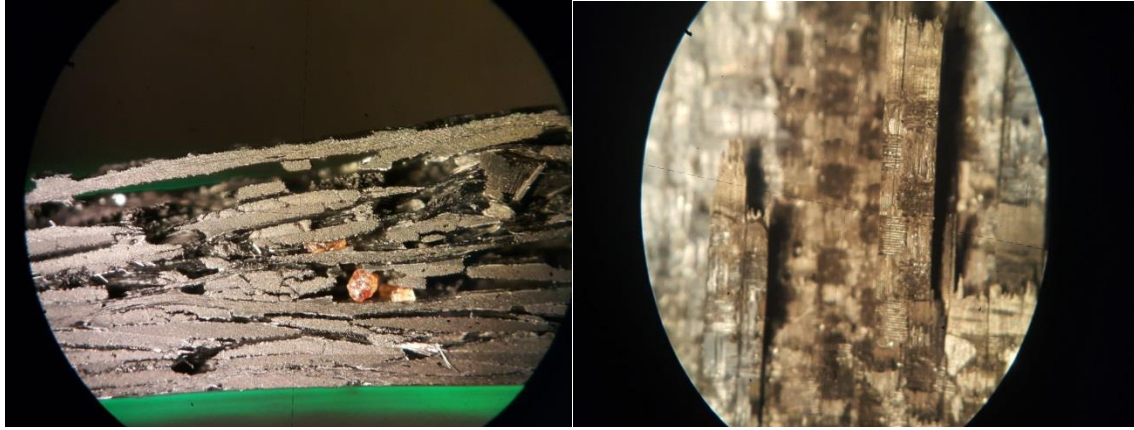


(b)

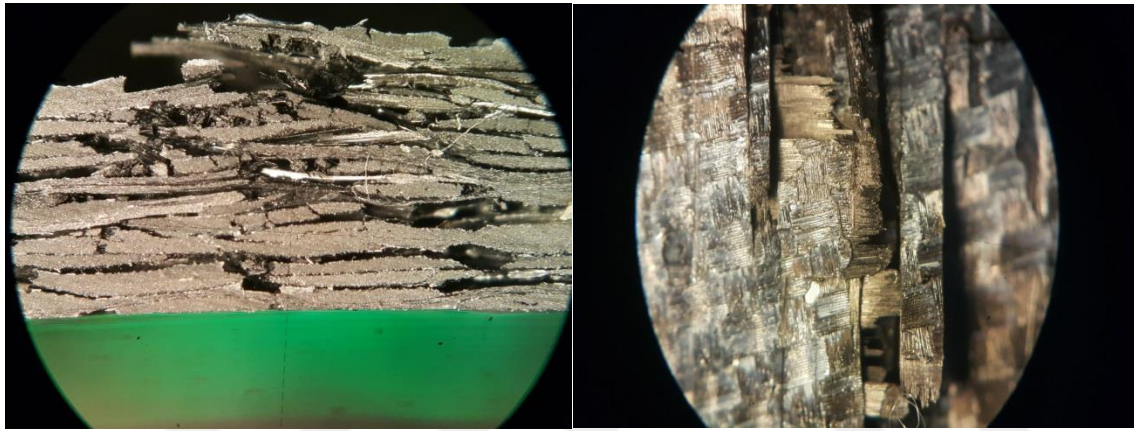


(c)

Resim 5.1. Numunelerin kesit alınmış ve arka yüzey görünüşü, a) 1N1, b) 1N2, c) 1N3, d) 1N4, e) 1N5



(d)

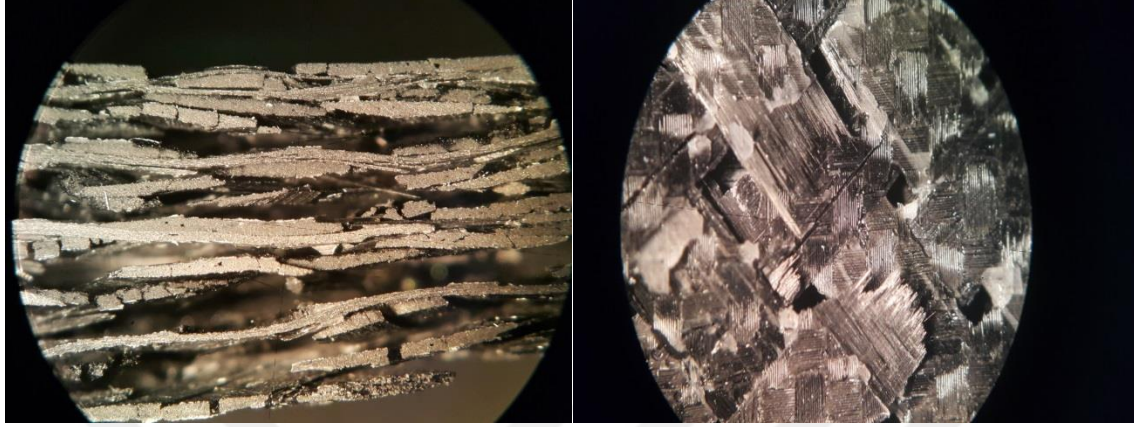


(e)

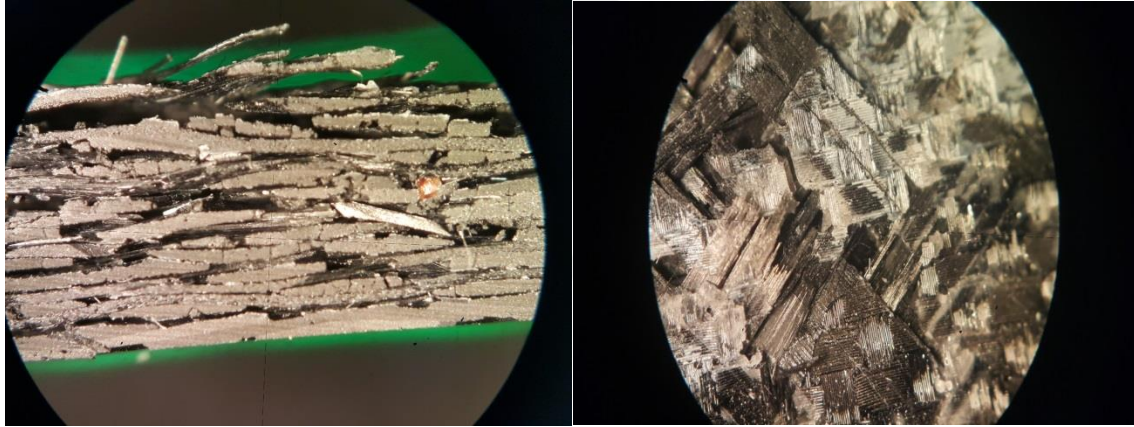
Resim 5.1. (Devam) Numunelerin kesit alınmış ve arka yüzey görünüşü, a) 1N1, b) 1N2, c) 1N3, d) 1N4, e) 1N5

[0/+45/-45/90]_s oryantasyon dizilimine sahip 1N1 numunesinde delaminasyonun alt katmanlarda yoğun olduğu, ilk 3 katta matris kırılmalarının olduğu, fiber kırılmasının ise son 2 katta yoğun olarak meydana geldiği görülmüştür. 1N2 nolu numunede tabakaların çoğunda delaminasyonun ve matris kırılmalarının olduğu ve yine son 2 katta fiber kırılmalarının meydana geldiği söylenebilir. 1N3 nolu numunede son 4 katta delaminasyon oluşmuş, son 2 katta fiber kırılmaları ve ara katlarda yoğun matris kırılmaları mevcuttur. 1N4 nolu numunede ‘de son 4 katta delaminasyon ve 2.kattan sonra matris kırılmaları mevcuttur, son 2 katta fiber kırılmaları görülmektedir. 1N5 nolu numunede ilk 3 katta yoğun matris kırılmaları, son 2 katta fiber kırılmaları ve 2.kattan itibaren delaminasyonlar oluşmuştur. Bu dizilime sahip numunelerde fiber kırıklarının -45 ° ve 90 ° açılı dizilime sahip katmanlarda olduğu, matris kırılmalarının ve delaminasyon oluşumunun 0 ° ve 45 ° açılı dizilime sahip katmanlarda meydana geldiği söylenebilir. Bu

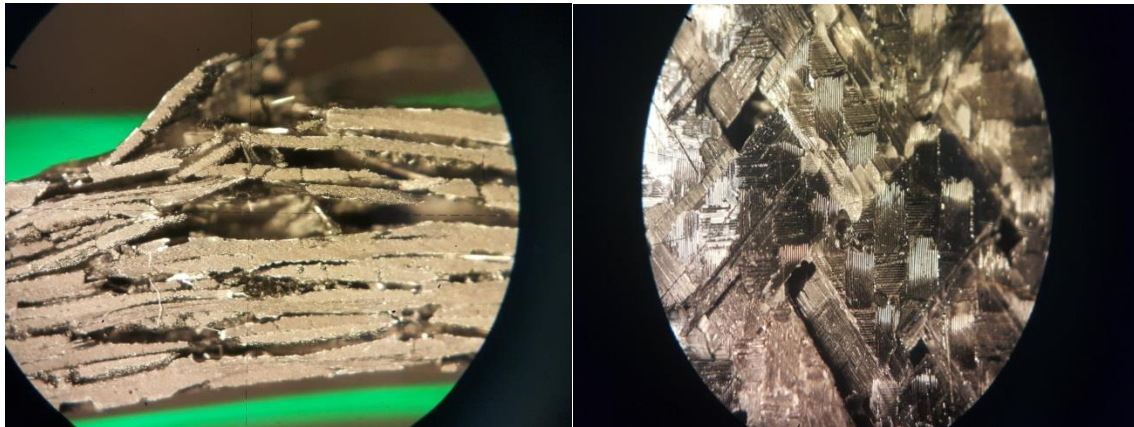
dizilimde en çok çökme miktarı 1N4 nolu numunede görülürken, en az çökme miktarı 1N3 nolu numunede görülmüştür yani en çok çöküntü -60 °C’de en az -30 °C’de oluşmuştur.



(a)

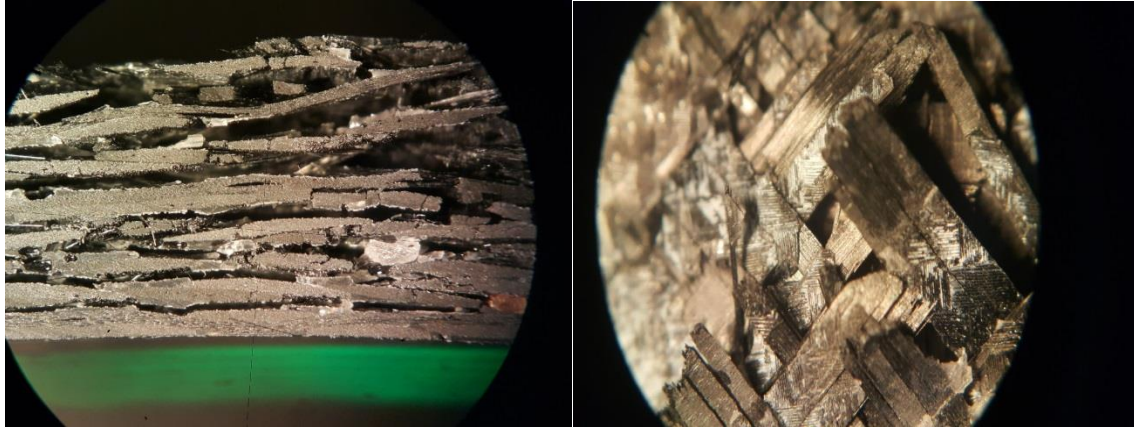


(b)

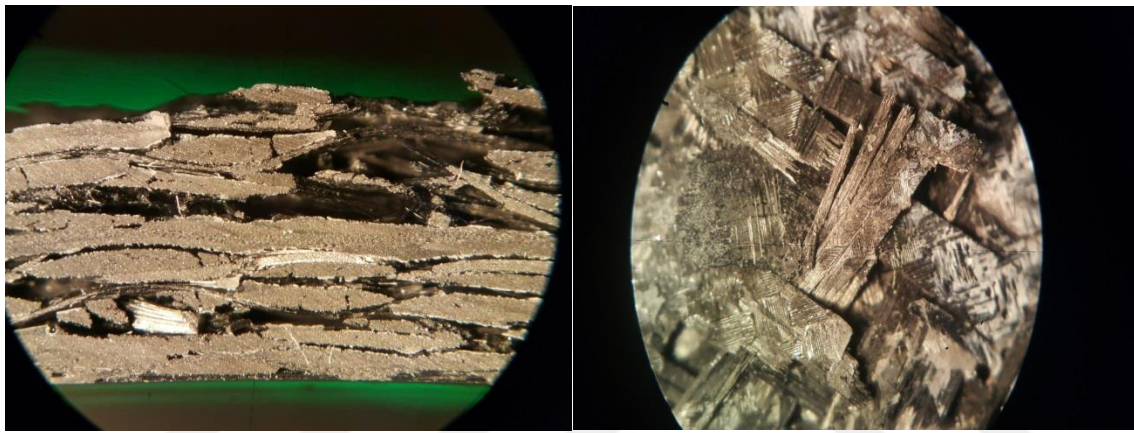


(c)

Resim 5.2. Numunelerin kesit alınmış ve arka yüzey görünüşü, a) 2N1, b) 2N2, c) 2N3, d) 2N4, e) 2N5



(d)

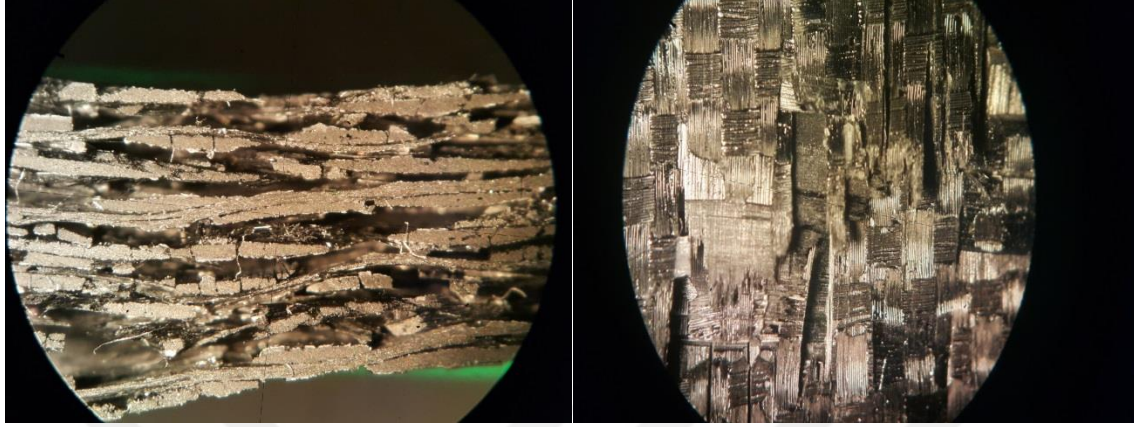


(e)

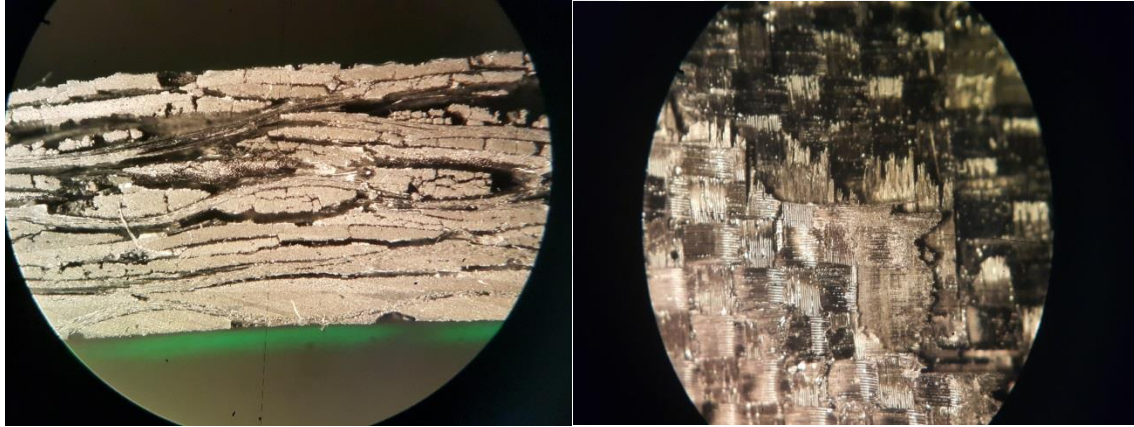
Resim 5.2. (Devam) Numunelerin kesit alınmış ve arka yüzey görünüşü, a) 2N1, b) 2N2, c) 2N3, d) 2N4, e) 2N5

[90/+45/0/-45]_s oryantasyon dizilimine sahip 2N1 nolu numunede tüm tabakalarda matris kırılmalarıyla beraber delaminasyonun olduğu, alt katmanda yoğun fiber kırılmaları görülmektedir. 2N2 nolu numunede matris kırılmaları, delaminasyon ve alt katmanda yoğun fiber kırılmaları görülmektedir. 2N3 nolu numunede alt katmanlarda daha çok delaminasyon ve fiber kırılmaları, üst katmanlarda matris kırılması ve yer yer delaminasyon görülmektedir. 2N4 nolu numunede tüm tabakalarda delaminasyon ve matris kırılmaları ve alt katmanlarda fiber kırılmaları görülmektedir. 2N5 nolu numunede matris kırılması ve bazı katmanlar arası delaminasyon olduğu, son 3 katmanda fiber kırılması görülmektedir. Bu dizilime sahip numunelerde fiber kırılmalarının -45 ° açılı dizilime sahip katmanlarda olduğu, matris kırılmalarının 90 ° açılı dizilime sahip katmanlarda olduğu, delaminasyon oluşumunun 0 ° ve 45 ° açılı dizilime sahip katmanlarda meydana geldiği söylenebilir. Bu dizilimde en çok çökme miktarı 2N4 nolu

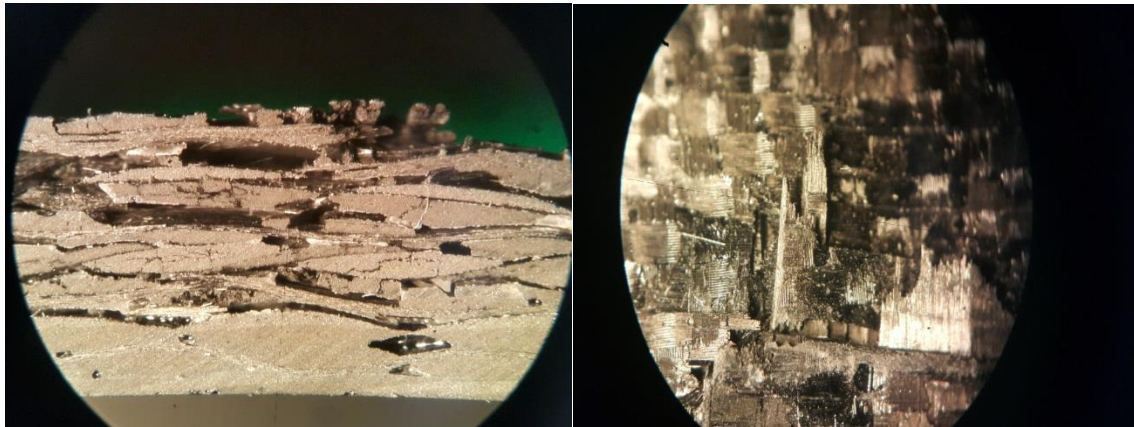
numunede görülürken, en az çökme miktarı 2N1 nolu numunede görülmüştür yani en çok çöküntü -60 °C’de en az +22,5 °C’de oluşmuştur.



(a)

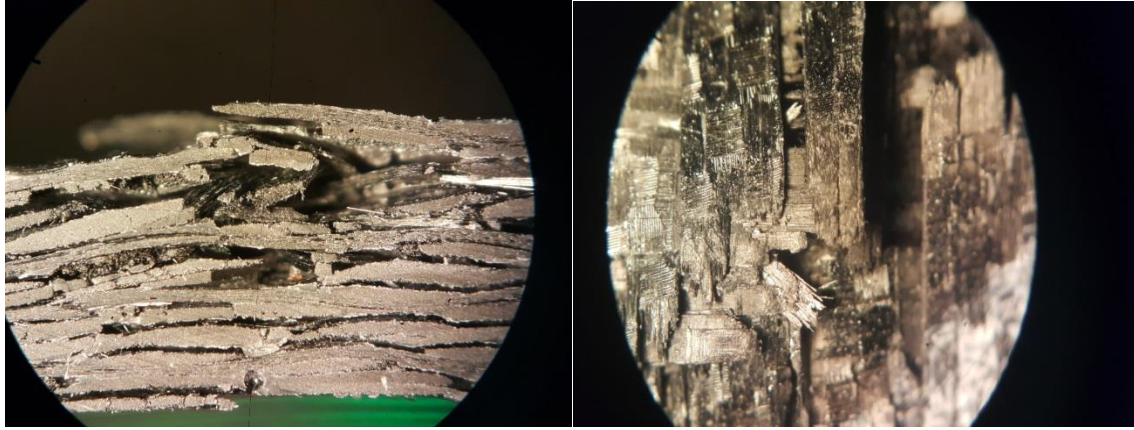


(b)

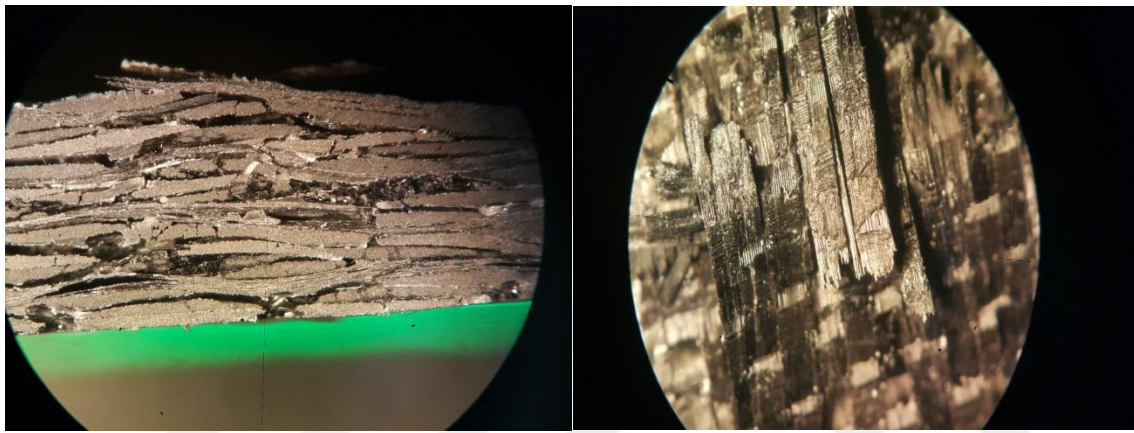


(c)

Resim 5.3. Numunelerin kesit alınmış ve arka yüzey görünüşü, a) 3N1, b) 3N2, c) 3N3, d) 3N4, e) 3N5



(d)

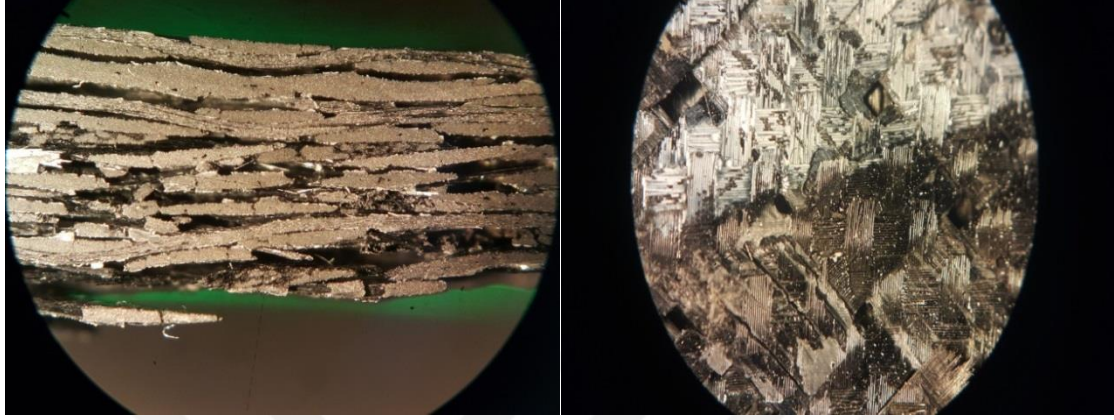


(e)

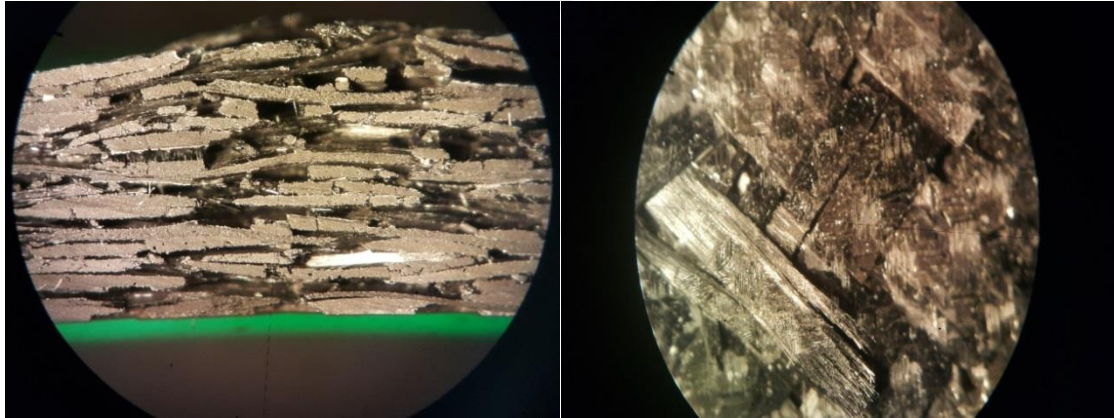
Resim 5.3. (Devam) Numunelerin kesit alınmış ve arka yüzey görünüşü, a) 3N1, b) 3N2, c) 3N3, d) 3N4, e) 3N5

[+45/0/-45/90]_s oryantasyon dizilimine sahip 3N1 nolu numunede tüm tabakalarda yoğun olarak delaminasyon ve matris kırılmalarının olduğu, son 2 katmanda ise fiber kırılmalarının olduğu görülmektedir. 3N2 nolu numunede 2.tabakadan sonra delaminasyonun ve matris kırılmalarının olduğu, son 2 katmanda ise fiber kırılmalarının olduğu görülmektedir. 3N3 nolu numunede 3.tabakadan sonra delaminasyonun ve matris kırılmalarının olduğu, son 2 katmanda fiber kırılmalarının olduğu görülmektedir. 3N4 nolu numunede hemen hemen tüm tabakalarda delaminasyon ve matris kırılmalarının olduğu, ilk katmanda ve son 2 katmanda fiber kırılmalarının olduğu görülmektedir. 3N5 nolu numunede' delaminasyon ve matris kırılmalarının olduğu, son 2 katmanda fiber kırılmalarının olduğu görülmektedir. Bu dizilime sahip numunelerde fiber kırılmalarının -45 ° ve 90 ° açılı dizilime sahip katmanlarda olduğu, matris kırılmalarının ve delaminasyon oluşumunun 0 ° ve -45 ° açılı dizilime sahip katmanlarda daha yoğun olduğu söylenebilir. Bu dizilimde sadece 3N4 nolu numunenin

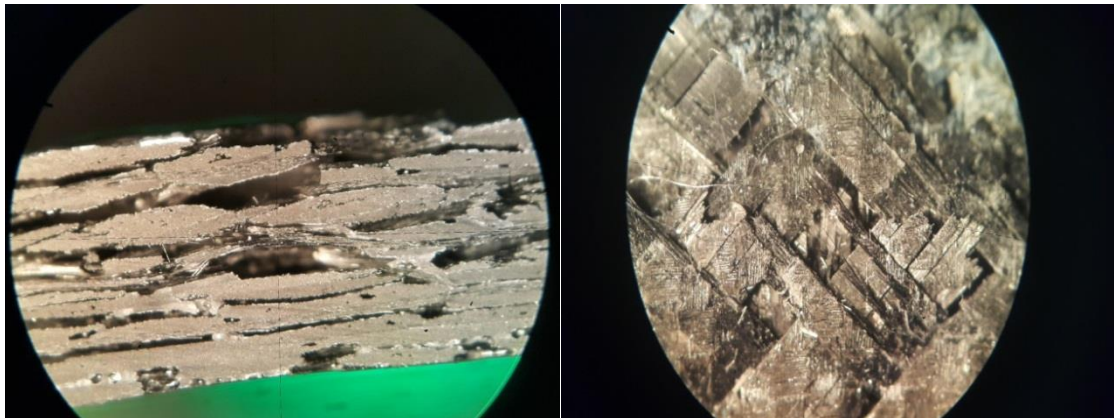
ilk katmanında yani $+45^\circ$ dizilime sahip katmanda fiber kırılması görülmektedir. Bu dizilimde en çok çökme miktarı 3N4 nolu numunede görülürken, en az çökme miktarı 3N3 nolu numunede görülmüştür yani en çok çöküntü -60°C 'de en az -30°C 'de oluşmuştur.



(a)

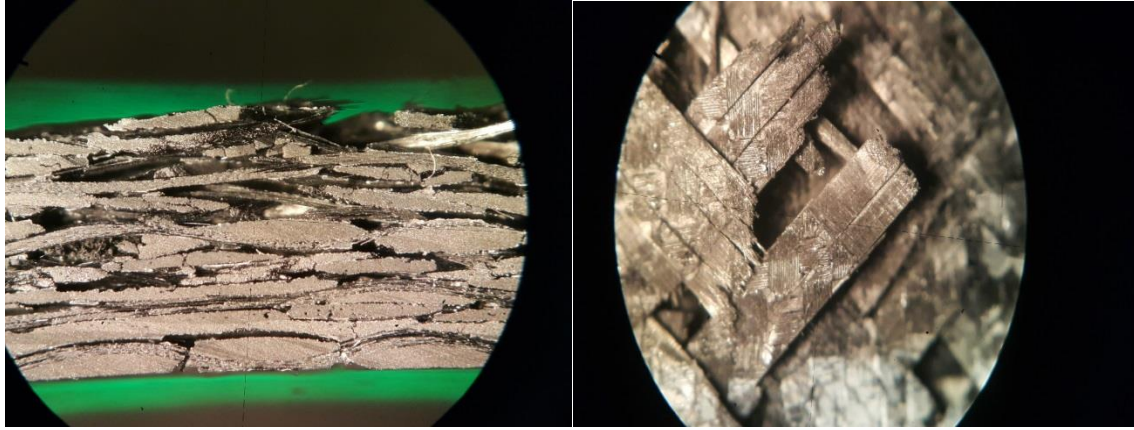


(b)

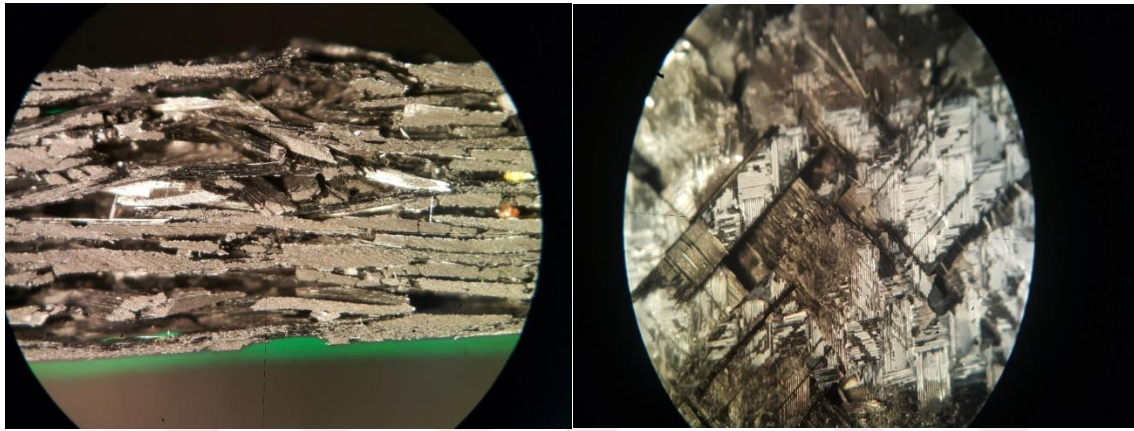


(c)

Resim 5.4. Numunelerin kesit alınmış ve arka yüzey görünüşü, a) 4N1, b) 4N2, c) 4N3, d) 4N4, e) 4N5



(d)

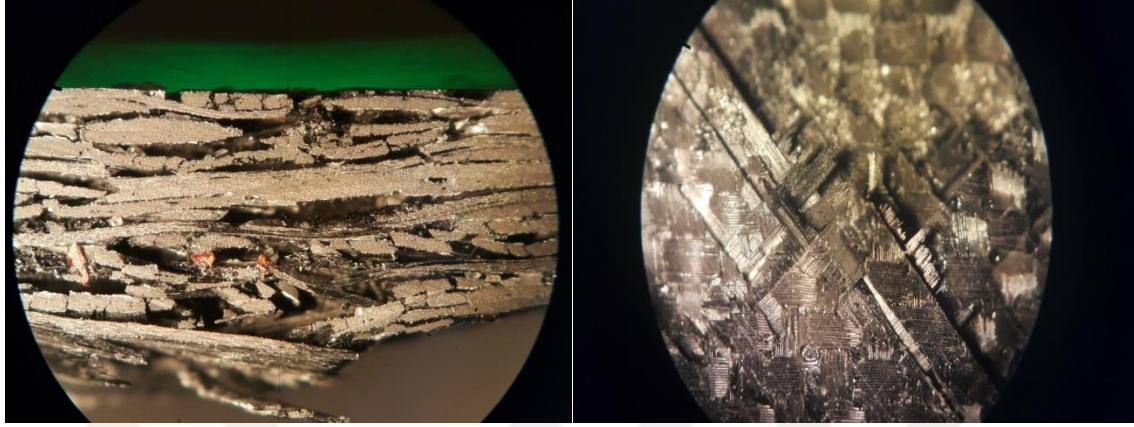


(e)

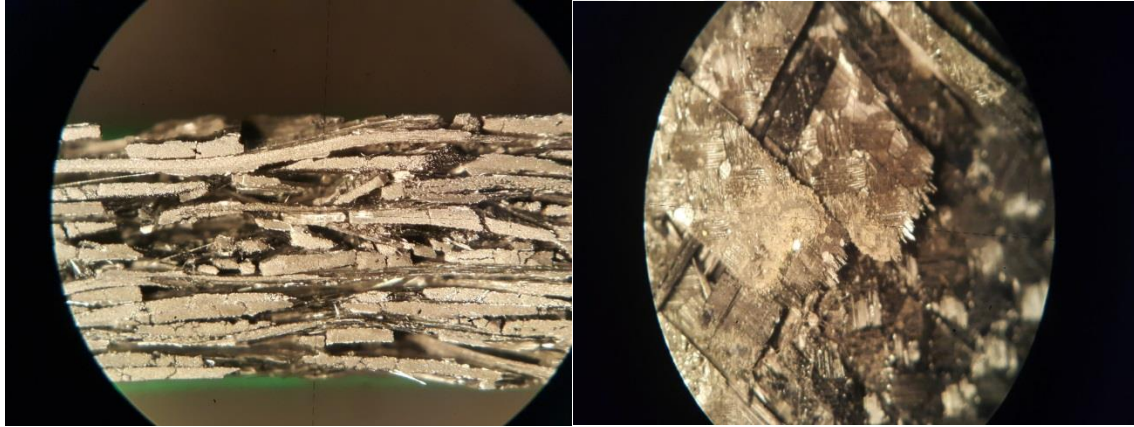
Resim 5.4. (Devam)Numunelerin kesit alınmış ve arka yüzey görünüşü, a) 4N1, b) 4N2, c) 4N3, d) 4N4, e) 4N5

[0/+45/90/-45]_s oryantasyon dizilimine sahip 4N1 nolu numunede tüm tabakalarda delaminasyon ve matris kırılmalarının olduğu, son 2 katmanda fiber kırılmalarının olduğu görülmektedir. 4N2 nolu numunede tüm tabakalarda yoğun matris kırılmaları ve delaminasyonun olduğu, son 2 katmanda fiber kırılmalarının olduğu görülmektedir. 4N3 nolu numunede 2.tabakadan itibaren matris kırıkları ve delaminasyon olduğu, son 2 katmanda fiber kırıklarının olduğu görülmektedir. 4N4 nolu numunede hemen hemen tüm tabakalarda delaminasyon ve matris kırıklarının olduğu, son 2 katmanda fiber kırıklarının olduğu görülmektedir. 4N5 nolu numunede ilk 2 katmanda ve son 4 katmanda yoğun fiber kırıklarının olduğu, tüm tabakalarda yoğun delaminasyon ve matris kırıklarının olduğu görülmektedir. Bu dizilime sahip numunelerde fiber kırılmalarının 0 ° , -45 ° ve 90 ° açılı dizilime sahip katmanlarda olduğu, matris kırılmalarının ve delaminasyon oluşumunun 0 ° , +45 ° ve 90° açılı dizilime sahip katmanlarda meydana geldiği söylenebilir. Bu dizilimde en çok çökme miktarı 4N3 nolu

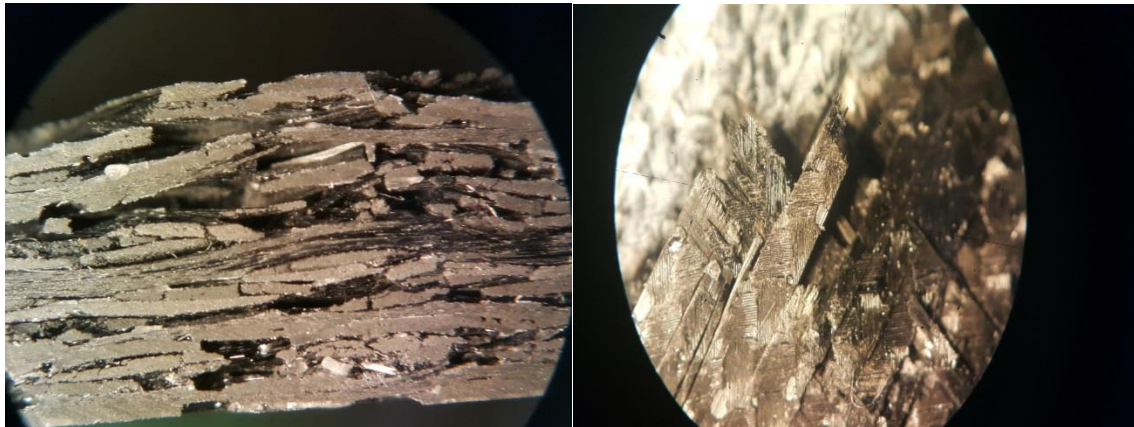
numunede görülürken, en az çökme miktarı 4N2 nolu numunede görülmüştür yani en çok çöküntü -30 °C’de en az +22,5 °C’de oluşmuştur.



(a)

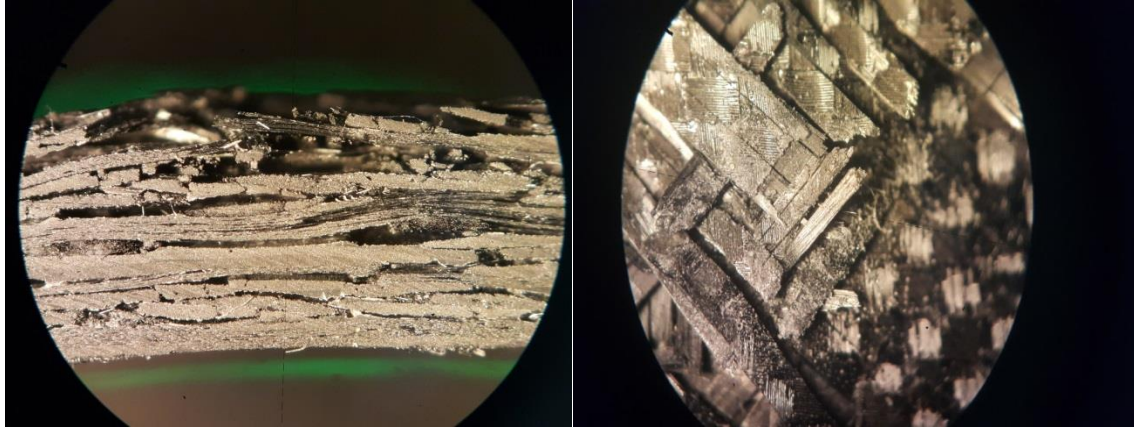


(b)

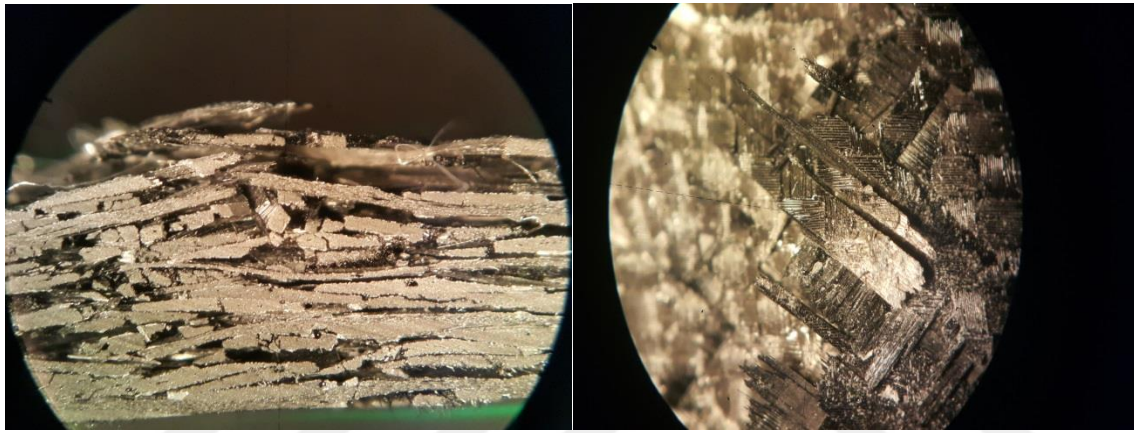


(c)

Resim 5.5. Numunelerin kesit alınmış ve arka yüzey görünüşü, a) 5N1, b) 5N2, c) 5N3, d) 5N4, e) 5N5



(d)

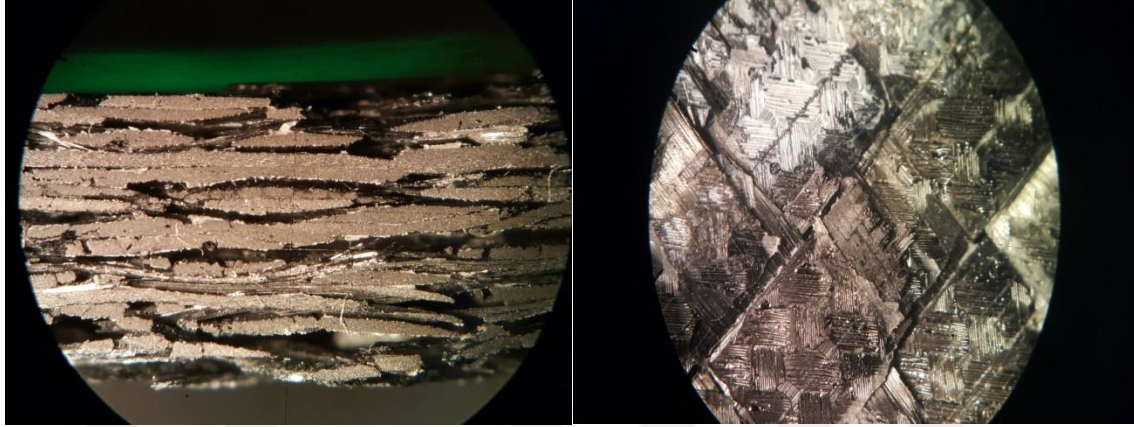


(e)

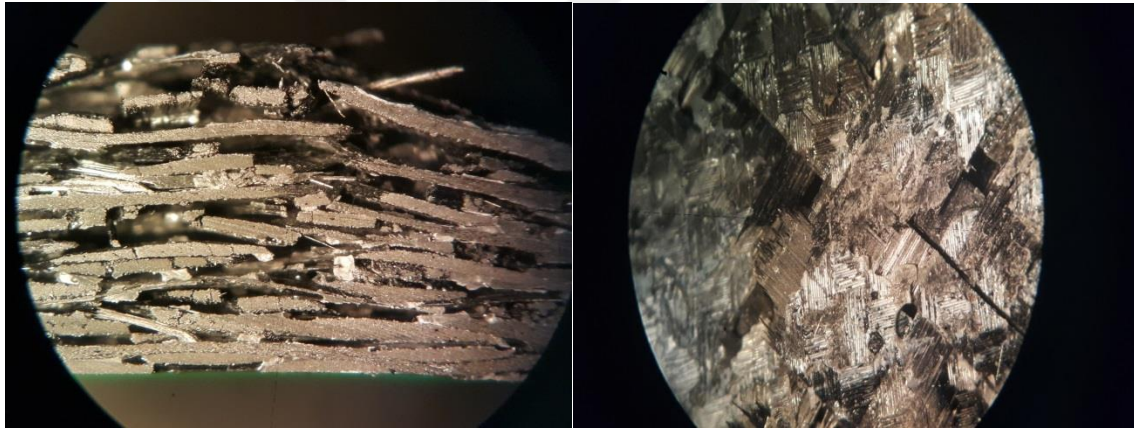
Resim 5.5. (Devam) Numunelerin kesit alınmış ve arka yüzey görünüşü, a) 5N1, b) 5N2, c) 5N3, d) 5N4, e) 5N5

[0/-45/90/+45]_s oryantasyon dizilimine sahip 5N1 nolu numunede tüm tabakalarda yoğun matris kırıkları ve delaminasyonun, son 3 katmanda ise fiber kırıklarının olduğu görülmektedir. 5N2 nolu numunede tüm katmanlarda yoğun matris kırılmaları ve delaminasyon olduğu, son 3 katmanda fiber kırıklarının olduğu görülmektedir. 5N3 nolu numunede tüm katmanlarda yoğun matris kırılmaları ve delaminasyon olduğu, son 3 katmanda fiber kırıklarının olduğu görülmektedir. 5N4 nolu numunede 2.katmandan itibaren delaminasyon ve matris kırılmalarının olduğu, son 3 katmanda fiber kırıklarının olduğu görülmektedir. 5N5 nolu numunede tüm katmanlarda matris kırılmaları ve delaminasyon olduğu, son 3 katmanda fiber kırıklarının olduğu görülmektedir. Bu dizilime sahip numunelerde fiber kırılmaları $\pm 45^\circ$ ve 90° açılı dizilime sahip katmanlarda, 0° , $\pm 45^\circ$ ve 90° açılı dizilime sahip katmanlarda yoğun matris kırılmaları ve delaminasyonun meydana geldiği söylenebilir. Bu dizilimde en çok çökme miktarı 5N5

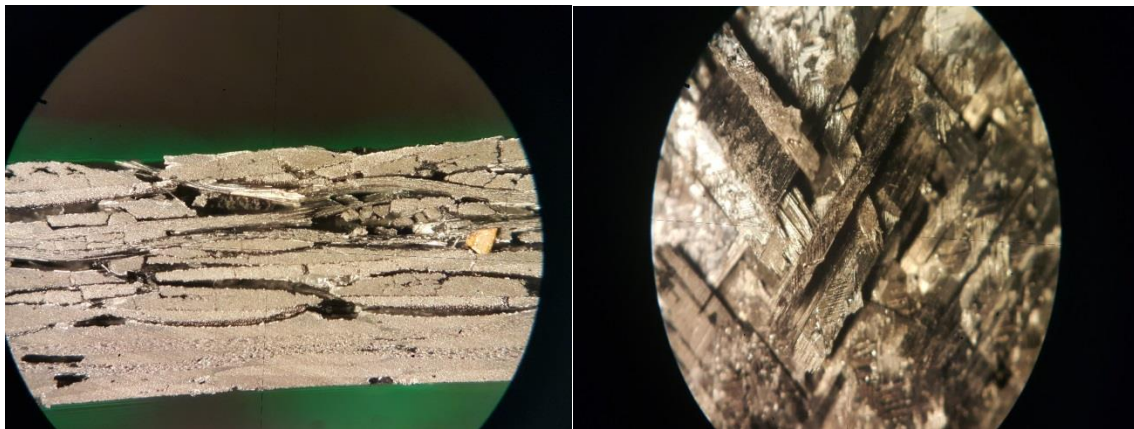
nolu numunede görülürken, en az çökme miktarı 5N2 nolu numunede görülmüştür yani en çok çöküntü 0 °C’de en az +22,5 °C’de oluşmuştur.



(a)

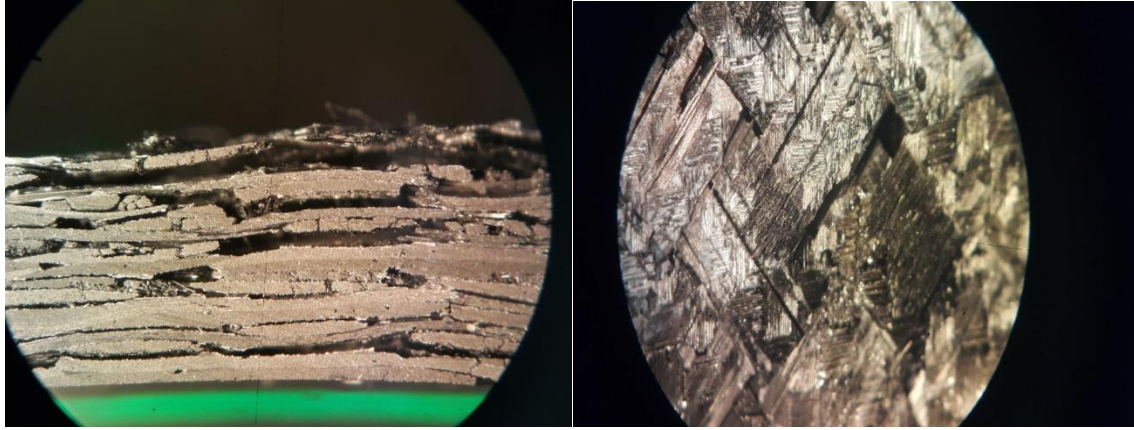


(b)

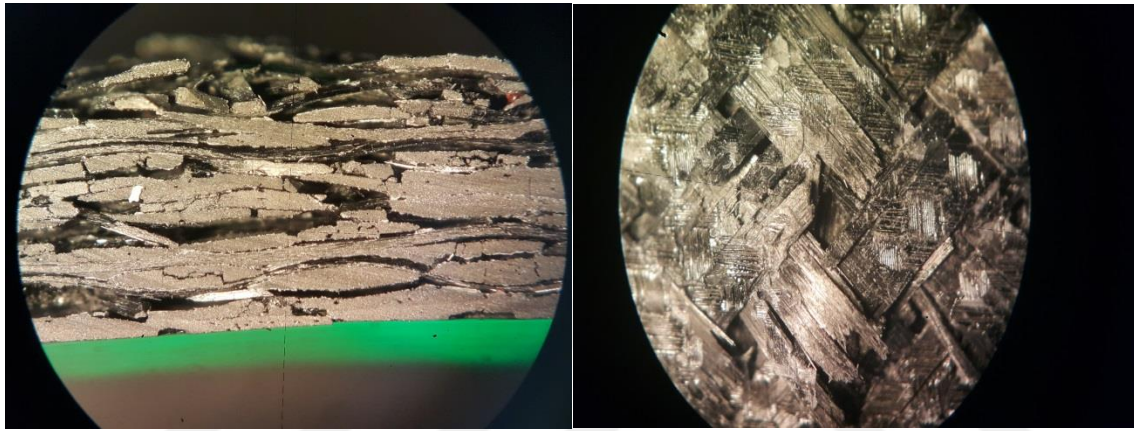


(c)

Resim 5.6. Numunelerin kesit alınmış ve arka yüzey görünüşü, a) 6N1, b) 6N2, c) 6N3, d) 6N4, e) 6N5



(d)



(e)

Resim 5.6. (Devam) Numunelerin kesit alınmış ve arka yüzey görünüşü, a) 6N1, b) 6N2, c) 6N3, d) 6N4, e) 6N5

[+45/0/90/-45]_s oryantasyon dizilimine sahip 6N1 nolu numunede tüm katmanlarda matris kırılmalarının ve delaminasyonun olduğu, son 2 katmanda fiber kırılmalarının olduğu görülmüştür. 6N2 nolu numunede tüm katmanlarda matris kırılmalarının ve delaminasyonun olduğu son 2 katmanda fiber kırılmalarının olduğu görülmüştür. 6N3 nolu numunede 3.tabakadan itibaren matris kırılmalarının ve delaminasyonun olduğu, son 2 katmanda ise fiber kırılmalarının olduğu görülmüştür. 6N4 nolu numunede tüm tabakalarda matris kırılmalarının ve delaminasyonun olduğu, son 2 katmanda fiber kırılmalarının olduğu görülmektedir. 6N5 nolu numunede tüm tabakalarda matris kırılmalarının ve delaminasyonun olduğu, son 2 katmanda ise fiber kırılmalarının olduğu görülmüştür. Bu dizilime sahip numunelerde fiber kırılmalarının -45 ° ve 90 ° açılı dizilime sahip katmanlarda olduğu, matris kırılmalarının ve delaminasyon oluşumunun 0 ° ,+45 ° ve 90° açılı dizilime sahip katmanlarda meydana geldiği söylenebilir. Bu

dizilimde en çok çökme miktarı 6N3 nolu numunede görülürken, en az çökme miktarı 6N1 nolu numunede görülmüştür yani en çok çöküntü -30 °C’de en az +22,5 °C’de oluşmuştur.

Çizelge 5.3. Tüm numunelerin Temas Kuvveti - Gerinim değerleri ve çökme miktarları

Deney No	Sıcaklık	Temas Kuvveti (kN)	Gerinim(mm/mm)	Çökme miktarı
1N1	+22,5°C	6,288	0,0624	2,35
2N1	+22,5°C	7,171	0,00784	2,23
3N1	+22,5°C	7,732	0,00413	3,50
4N1	+22,5°C	7,33116	0,0594	3,385
5N1	+22,5°C	8,091	0,0594	3,79
6N1	+22,5°C	8,4945	0,00386	2,025
1N2	+22,5°C	6,1531		2,425
2N2	+22,5°C	6,446		3,49
3N2	+22,5°C	7,499		3,75
4N2	+22,5°C	6,853		2,15
5N2	+22,5°C	7,533		2,39
6N2	+22,5°C	6,826		2,89
1N3	-30°C	7,117		2,29
2N3	-30°C	7,2874		3,55
3N3	-30°C	6,6133		2,255
4N3	-30°C	7,056		3,765
5N3	-30°C	7,845		3,50
6N3	-30°C	7,4358		3,93
1N4	-60°C	6,729		3,615
2N4	-60°C	7,885		4,925
3N4	-60°C	7,289		3,95
4N4	-60°C	6,467		3,70
5N4	-60°C	7,070		3,80
6N4	-60°C	7,281		3,91

Çizelge 5.3. (Devam) Tüm numunelerin Temas Kuvveti - Gerinim değerleri ve çökme miktarları

Deney No	Sıcaklık	Temas Kuvveti (kN)	Gerinim (mm/mm)	Çökme miktarı
1N5	0°C	6,8878		3,53
2N5	0°C	7,732		3,525
3N5	0°C	8,563		3,485
4N5	0°C	7,293		3,73
5N5	0°C	6,452		3,855
6N5	0°C	7,652		3,58



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada karbon fiber tabakalı kompozit levhaların darbe davranışına; oryantasyon dizilimi ve sıcaklığın etkileri incelenmiştir. 6 farklı dizilime sahip 8 katlı karbon fiber / epoksi tabakalı kompozit numuneler aynı darbe enerjisi seviyesinde ağırlık düşürme darbe test cihazı ile darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak;

- Bütün deney numunelerinde darbeye maruz ön yüzeydeki hasarın arka yüzeyden daha az olduğu görülmektedir. Yani basmadan kaynaklanan hasarlar çekmeden kaynaklanan hasarlara göre çok daha azdır.
- 100 mm × 100 mm boyutlarındaki deney boyutlarındaki deney numunelerinin arka yüzeyinde farklı hasar bölgeleri oluşmuştur. Bu hasar bölgeleri tabakaların tamamında ya da çoğunda delaminasyonların olduğu, en az iki veya daha fazla tabakanın delaminasyona uğradığı ya da matris kırılmaları ve fiber kırılmalarının olduğu bölgedir.
- Birinci ve ikinci dizilim için sıcaklık arttıkça temas kuvveti azalmaktadır. Diğer dizilimlerde farklı davranışlar gözlemlenmiştir.
- Numunelerin dizilim sırasındaki ilk oryantasyon açısı ne ise oluşan hasar tipleri ve tabakalar arasındaki gerilmeler açığa göre paralel olarak şekillenmektedir.
- Farklı sıcaklıklarda darbe uygulanmış numunelerde sıcaklık azaldıkça tüm tabakalar arasında ayrışma artmaktadır. Dolayısıyla hasar alanları da sıcaklıkla birlikte artmaktadır.
- Maksimum temas kuvvetinin hertz temas kuvvetini geçtiğinde numunede daha fazla hasar oluşturan fiber kırılmalarının olduğu görülmüştür.
- En büyük maksimum temas kuvveti $[+45/0/-45/90]_s$ dizilimine sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- En küçük maksimum temas kuvveti ve en büyük gerinim değeri $[0/+45/-45/90]_s$ dizilimine sahip numunede olduğu gözlemlenmiştir.
- En küçük gerinim değeri ise $[+45/0/90/-45]_s$ dizilimine sahip numunede olduğu gözlemlenmiştir.

- Tüm plakaların en az 2 katmanında fiber kırılmaları görülmüştür. Birinci dizilime sahip numunelerin -45° ve 90° yönelimli alt katmanlarında, İkinci dizilime sahip numunelerin -45° ve $+45^\circ$ yönelimli alt katmanlarında, Üçüncü dizilime sahip numunelerin -45° ve 90° yönelimli alt katmanlarında, Dördüncü dizilime sahip numunelerin 0° , -45° ve 90° yönelimli alt katmanlarında, Beşinci dizilime sahip numunelerin $+45^\circ$, -45° ve 90° yönelimli alt katmanlarında, Altıncı dizilime sahip numunelerin -45° ve 90° yönelimli alt katmanlarında fiber kırılmaları görülmüştür.
- Birinci dizilimdeki 1N1 nolu numunede, Üçüncü dizilimdeki 3N3 nolu numunede ve Altıncı dizilimdeki 6N3 nolu numunede diğer numunelere göre daha az hasar oluştuğu görülmüştür.
- Birinci ve üçüncü dizilimde en çok çöküntü -60°C 'de en az -30°C 'de oluşmuştur. Dördüncü ve altıncı dizilimde en çok çöküntü -30°C 'de en az $+22,5^\circ\text{C}$ 'de oluşmuştur. Beşinci dizilimde en çok çöküntü 0°C 'de en az $+22,5^\circ\text{C}$ 'de, İkinci dizilimde ise en çok çöküntü -60°C 'de en az $+22,5^\circ$ 'de oluşmuştur.

Gelecek çalışmalar için aşağıdaki konular araştırılarak daha fazla bilgi elde edinilebilir;

- Bu çalışmada tek bir vurucu uç ve tek bir enerji seviyesinde (26,5J) darbe davranışı incelenmiştir. Farklı enerji seviyelerinde ve farklı vurucu uçların etkisi incelenebilir.
- Bu çalışmada tüm numunelere aynı noktadan darbe uygulanmıştır. Sıcaklıklara göre farklı noktalar seçilip, o noktadan darbe uygulanarak numunedeki hasar oluşumu incelenebilir.
- Bu çalışmada tüm numuneler aynı kalınlıkta ve aynı boyutlarda üretilmiştir. Kalınlığın ve numune boyutunun hasar türlerine etkisi incelenebilir.
- Tüm numunelere düşük hızlı darbe uygulanmış ve sadece geri sekme davranışı görülmüştür. Darbe enerjisi arttırılarak ya da çoklu darbe uygulanarak penetrasyon ve delip geçme seviyeleri belirlenebilir.

KAYNAKLAR

1. Zor, M. (2014). *Kompozit malzemeler*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Ders Notları, 38-56.
2. Agarwall, B. D. and Broutman, L. J. (1980). Analysis and performance of fiber composites. *John Wiley and Sons*, 355.
3. Yüce, İ. (2007). *Dairesel Kompozit Tabakalarda Düşük Hızlı Darbe Hasarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 1-79.
4. Abrate, S. (1991). Impact on laminated composite materials. *Applied Mechanical Reviews*, 44 (4), 155-190.
5. Abrate, S. (1994). Impact on laminated composite materials: recent advances. *Applied Mechanical Reviews*, 47 (11), 517-544.
6. Abrate, S. (1998). *Impact on composite structures*. Cambridge: Cambridge University Pres, 135.
7. Sjoblem, P. O., Hartness, J. T., and Cordell, T. M. (1988). On low-velocity impact testing of composite materials. *Journal of Composite Materials*, 22, 30-52.
8. Shivakumar, K. N., Elber, W., and IUG, W. (1988). Prediction of low-velocity impact damage in thin circular laminates. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 23(3), 442-449.
9. Kara, M. (2006). *Düşük Hızlı Darbeye Maruz Tabakalı Kompozitlerin Dinamik Cevabı*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 1-13.
10. Akın, C. (2008). *Epoxy Cam Elyaf Kompozit Levhanın Darbe Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2.
11. Ceyhun, V., Turan, M. (2003). Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı. *Mühendis ve Makine*, 516, 19-25.
12. Lal, K.M. (1982). Prediction of residual tensile strength of transversely impacted composite laminates. *Structure Solid Mechanics*, NASA CP-2245, 97-111.
13. Lal, K.M. (1983). Low velocity transverse impact behavior of 8-ply graphite- epoxy laminates. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2, 216-225.
14. Whittingham, B., Marshall, I. H., Mitrevski, T., and Jones, R. (2004). The response of composite structures with pre-stress subject to low velocity impact damage. *Composite Structures*, 66, 685-698.

15. Husseinzadeh, R., Shokrieh, M. M., and Lessard, L. (2006). Damage behaviour of fiber reinforced composite plates subjected to drop weight impact. *Composite Science and Technology*, 66, 61-68.
16. Sugun, B. S., Rao, R. M. V. G. K., (2004). Low velocity impact of glass, carbon and kevlar composites using repeated drop test. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 23(15), 1583-1599.
17. Mili, F., Necip, B., (2001). Impact behavior of cross-ply laminated composite plates under low velocities. *Composite Structures*, 51, 237-224.
18. Aslan, Z., Karakuzu, R., and Okutan, B. (2003). The response of laminated composite plates under low-velocity impact loading. *Composite Structures*, 59, 119-127.
19. Aslan, Z., Karakuzu, R., (2002). Transient dynamic analysis of laminated composite plate subjected to low-velocity impact. *Mathematical & Computational Applications*, 7(1), 73-82.
20. Belingardi, G., Vadori R., (2003). Influence of the laminate thickness in low velocity impact behaviour of composite material plate. *Composite Structures*, 61, 27-38.
21. Mitrevski, T., Marshall, I. H., Thomson, R., Jones, R., and Whittingham, B. (2005). The effect of impactor shape on the impact response of composite laminates. *Composite Structures*, 67, 139-148.
22. Lee, L. J., Huang, K. Y., Fann, Y. J., (1993). Dynamic responses of composite sandwich plate impacted by rigid ball. *Journal of Composite Materials*, 27, 1238-1256.
23. Jih, C. J., Sun, C. T., (1993). Prediction of delamination in composite laminates subjected to low velocity impact. *Journal of Composite Materials*, 27, 684-701.
24. Wang, H., Vukhanh, T., (1994). Damage extension in carbon fiber/PEEK cross ply laminates under low-velocity impact. *Journal of Composite Materials*, 28,684-704.
25. Hosur, V. M., Islam, M. M., and Jeelani, S. (2008). Low-velocity impact response of braided carbon/epoxy composites. *International Conference on Communication and Electronics Systems*, 6(1),81-89.
26. Luo, R. K., Gren, E. R., and Morrison, C. J. (1999). Impact damage analysis of composite plates. *International Journal of Impact Engineering*, 22, 435-447.
27. Im, K. H., Cha, C. S., Kim, S. K., and Yang, I. Y. (2001). Effects of temperature on impact damages in CFRP composite laminates. *Composites: Part B*, (32), 669-682.
28. Tai, N. H., Yip, M. C., and Lin, J. L. (1998). Effects of low-energy impact on the fatigue behaviour of carbon/epoxy composites. *Composites Science and Technology*, (58), 1-8.
29. Rio, T. G., Zaera, R., Barbero, E., and Navarro, C. (2005). Damage in CFRP due to low velocity impact at low temperature. *Composites: Part B*,(36), 41-50.

30. Khalili, S. M. R., Mittal, R. K., and Panah, N. M. (2007). Analysis of fiber reinforced composite plates subjected to transverse impact in the presence of initial stresses. *Composite Structures*, (77), 263-268.
31. Morais, de W. A., Monteiro, S. N., and d'Almeida J. R. M. (2005). Effect of the laminate thickness on the composite strength to repeated low energy impacts. *Composite Structures*, (70), 223-228.
32. Freitas, M., Silva, A., and Reis, L. (2000). Numerical evaluation of failure mechanisms on composite specimens subjected to impact loading. *Composites: Part B*, (31), 199-207.
33. Taşkıran, C. (2010). *Tabakalı Kompozit Levhaların Sıcaklığa Bağlı Düşük Enerjili Darbe Davranışının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 12-129.
34. Karaca, D. (2010). *Farklı Kalınlık ve Oryantasyon Yüzdelerindeki Tabakalı Kompozit Levhaların Düşük Hızlı Darbe Enerjileri Altında Davranışlarının Deneysel İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 19-69.
35. Kayrak, M. A. (1999). *Havacılık Kompozitleri ve Mukavemet-Maliyet Analizleri*, Eskişehir: Sivil Havacılık Yüksek Okulu Yayınları, No 09, 1-15.
36. Ersoy, H. Y. (2001). *Kompozit Malzeme* (Birinci Baskı). İstanbul: Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama, Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi, 11-15.
37. Şahin, Y. (2006). *Kompozit Malzemelere Giriş* (İkinci Baskı). Ankara: Seçkin Yayıncılık, 27-107.
38. Salıncı, E. (2013). *Kompozit Malzemeler*, Ankara: Gazi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü Ders Notları, 3-23.
39. Türkmen, İ. (2012). *Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerde Tabaka Sayısına Bağlı Mekanik Özelliklerin ve Darbe Dayanımının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 7.
40. Evcimen, A. (2005). *Pim Bağlantılı Kompozitlerde Tabaka Sayısı ve Oryantasyon Açısının Gerilmeye Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 6.
41. Eren, Y. (2007). *Kompozit Yapıların Darbe Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 8-20.
42. Sorucu, A. (2007). *Orthotropic Malzemelerde Çatlak İlerlemesi ve Kırılma Tokluğu Tayini*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 9-10.
43. Kollar, L. P., Springer, G. S., (2003). *Mechanics of Composite Structures*. Cambridge: Cambridge University Press, 1-2.

44. Rouchan, J. (1987). *Matériaux composites pour d'aeronefs. Ecole Nationale Supérieure d'Ingenieurs de Constructions Aeronautiques*, 95.
45. İnternet: Karbon Fiber URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.techel.com.tr%2Fen%2F254-Carbon-Fabrics++&date=2015-03-20>, Son Erişim Tarihi: 20.01.2015.
46. Schwartz, M. M. (1984). *Composite Materials Handbook* (First edition). New York: McGraw-Hill Inc., 8-26.
47. Chawla, K. K. (1987). *Composite Materials Science and Engineering* (First edition). New York: Springer Verlag Inc., 140-283.
48. İnternet: Bor Fiber Özellikleri URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.specmaterials.com%2Fhyborprepregtapeproperties.htm+&date=2015-03-20>, Son Erişim Tarihi: 20.01.2015.
49. A.S.M. International. (1984). *Composite Materials I the basics*. Ohio: *Materials Engineering Institute*, 10-15.
50. İnternet: Aramid Fiber Elyaf URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.veziryapi.com%2Faramid-fiber-elyaf%2F&date=2015-03-20>, Son Erişim Tarihi: 20.01.2015.
51. İnternet: Alumina Fiber URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.directindustry.com%2Fprod%2Fmeschupp-industriekeramik-gmbh-co-kg%2Falumina-fiber-mats-72464-1043813.html+&date=2015-03-20>, Son Erişim Tarihi: 20.01.2015.
52. Kutlay, Y. (2012). *Değişik Uç Geometrilerine Sahip Fiberlerle Güçlendirilmiş Polyester Kalsit Kompozit Malzemenin Darbe Davranışının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 19.
53. Şenel, M., Kırılı, A. (2009, 13-15 Mayıs). *Düşük Hızlı Darbe Deney Düzeneği İçin Geri Sekme (Rebound) Frenleme ve Kontrol Sistemi*. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük.
54. Şenel, M., Karakoç, F. (2008). Özgün Bir Tasarım: Öngerilmeli Düşük Hızlı Darbe Test Düzeneği. *Dumlupınar Üniversitesi, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 41-50.
55. İçten M. B., Karakuzu R. (2006). Tabakalı Kompozit Malzemelerin Üretilmesi ve Darbe Deneyi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Makine Tek*, (4), 166-168.
56. Reid, S. R., Zhou, G. (2000). *Impact behaviour of fibre-reinforced composite materials and structures* (First edition). Cambridge: CRC Press, Woodhead Publishing, 303.

57. Minak, G., Abrate, S., Ghelli, D., Panciroli, R., and Zucchelli, A. (2010). Low-velocity impact on carbon/epoxy tubes subjected to torque-Experimental results, analytical models and FEM analysis. *Composite Structures*, (92), 623-632.
58. Karadayı, S. (2012). *Düşük Hızlı Darbe Yükü Altında Tabakalı Kompozitlerin Mekanik Davranışı*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 69-153.
59. LIU, D., Raju B.B., and Dang X. (1998). Size effects on impact response of composite laminates. *International Journal of Impact Engineering*, 21 (10), 837-52.
60. Karakuzu, R., İçten, B.M., Aktaş, M., Toparlı, M., Ataş, C., ve Arman, Y. (2007). *Kompozit Plaklarda Sıcaklığın Darbe Davranışına Etkisi*. TÜBİTAK, Proje No;104M426, İzmir, 5-62.
61. Sayer, M. (2009). *Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi*, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 29-31.
62. Ataş C., Sayman O., (2008). An overall view on impact response of woven fabric composite plates. *Composite Structures*, (82), 336-345.
63. İnternet: Dost Kimya, Karbon fiber ürünler. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.kompozit.net%2F%3Furun-324-karbon-fiber-kumas-245-gr-m2-3k-twill-10m2&date=2017-01-10>, Son Erişim Tarihi: 10.02.2017.
64. Kantar, E. (2009). *Cfrp ile Güçlendirilmiş Beton Kirişlerinin Çarpma Davranışlarının Deneyisel Olarak İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 30-48.
65. Shyr, T.W., Pan, Y.H., (2003). Impact resistance and damage characteristics of composite laminates, *Composite Structure*, (62), 193-203.
66. Belingardi, G., Vadori, R., (2002). Low velocity impact tests of laminate glassfiber-epoxy matrix composite material plates, *International of Impact Engineering*,(27), 213-229.
67. Evci, C.(2009). *Seramik Kompozit Zırh Sistemlerinin Darbe ve Balistik Özelliklerinin Belirlenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 120-124.
68. Erdem, Y.(2010). *Çelik talaşı / silikon Kompozit Malzeme Üretimi ve Düşük Hızlı Darbe Özelliklerinden Deneyisel İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 74.
69. Kara, M., Uyaner M., (2007). *Tabakalı Kompozitlerin Darbe Cevabına Vurucu Şeklinin Etkisi*. Selçuk Üniversitesi, 8. Uluslararası kırılma konferansı bildiriler, 415-421.

70. Kwang-Hee, I., Cheon-Seok, C., Sun-Kyu, K., and In-Young, Y. (2001). Effects of temperature on impact damages in CFRP composite laminates. *Composites*, (32), 669-682.
71. Lopez-Puente, J., Zaera, R., and Navarro, C. (2002). The effect of low temperatures on the intermediate and high velocity impact response of CFRPs. *Composites*, (33), 559-566.
72. Gómez-del Río, T., Zaera, R., Barbero, E., and Navarro, C. (2005). Damage in CFRP due to low velocity impact at low temperature. *Composite Engineering*, (36), 41-50.
73. Yılmaz, H.(2007). *Alüminyum esaslı SiC partikül takviyeli metal matrisli kompozit malzemeler*, Yüksek Lisans Tezi, Bitirme ödevi, Erciyes Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu, Kayseri, 14-19.
74. İnternet: Teknik değerler tablosu. URL:
http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.polikim.com.tr%2Fpoli%2Fdatasheet_tr.pdf&date=2017-05-15, Son Erişim Tarihi; 15.05.2017.
75. İnternet: Teknik değerler tablosu. URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.kahveciogluplastik.com%2Fdocviewer%2F%3Ff%3DYXNzZXRzL3hscy81NDEzNjU4NDgtdGVrbmlrLWRLZ2VybgVYLnhs3g%253D&date=2017-05-15>, Son Erişim Tarihi; 15.05.2017.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YILMAZ, Dilara
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 04.10.1989, Ankara
Medeni hali : Bekâr
e-mail : ylmzdlr@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Makine Mühendisliği	2017
Lisans	Kırıkkale Üniversitesi/Makine Mühendisliği	2010
Lise	Etlik Anadolu Lisesi	2006

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

-

Hobiler

Edebiyat, Masa tenisi, Müzik, Mizah



GAZİ GELECEKTİR..