

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI AÇILARLA SARILMIŞ CAM ELYAF TAKVİYELİ POLİMER
MATRİSLİ KOMPOZİTTEN ÜRETİLEN SİLİNDİRİK ÇARPIŞMA
KUTULARININ ENERJİ SÖNÜMLEYEBİLME KABİLİYETLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet TAY
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ertan KÖSEDAĞ

VAN – 2023

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI AÇILARLA SARILMIŞ CAM ELYAF TAKVİYELİ POLİMER
MATRİSLİ KOMPOZİTTEN ÜRETİLEN SİLİNDİRİK ÇARPIŞMA
KUTULARININ ENERJİ SÖNÜMLEYEBİLME KABİLİYETLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet TAY

Bu çalışma Van Yüzünü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Koordinasyon Birimi tarafından FYL-2023-10729 No'lu proje ile desteklenmiştir.

VAN – 2023

KABUL VE ONAY SAYFASI

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Dr. Öğr. Üyesi Ertan KÖSEDAĞ danışmanlığında, Mehmet TAY tarafından sunulan “Farklı Açılarla Sarılmış Cam Elyaf Takviyeli Polimer Matrisli Kompozitten Üretilen Silindirik Çarpışma Kutularının Enerji Sönümleyebilme Kabiliyetlerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili hükümleri gereğince /..... /..... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile başarılı bulunmuş ve yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan:

İmza:

Üye:

İmza:

Üye:

İmza:

Üye:

İmza:

Üye:

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun /.... /..... tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

İmza
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

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

Mehmet TAY



ÖZET

FARKLI AÇILARLA SARILMIŞ CAM ELYAF TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTTEN ÜRETİLEN SİLİNDİRİK ÇARPIŞMA KUTULARININ ENERJİ SÖNÜMLEYEBİLME KABİLİYETLERİNİN İNCELENMESİ

TAY, Mehmet

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ertan KÖSEDAĞ

Aralık 2023, 105 sayfa

Hızla gelişen otomotiv endüstrisinde araç sayısının artması ve araç kullanan kişi sayısının artmasıyla beraber trafikte ciddi derecede araç yoğunluğu oluşmaktadır. Bunun sonucunda önemli derecede maddi ve ölümcül sonuçlara neden olan trafik kazaları meydana gelmektedir. Trafik kazalarının sonucunda meydana gelen bu olumsuzlukları önlemek amacıyla yani, araçlardaki maddi hasarı ve araç içindekilerin minimum seviyelerde etkilenmelerini sağlamak için çarpışma kutuları imal edilmiştir. Çarpışma kutuları araçlardaki herhangi bir çarpışma sırasında çarpışmanın etkisiyle oluşan kuvvetten meydana gelen enerjiyi aracın sonraki bölümlerine ve araçtaki kişilerce az hissedilmesini sağlayan elemanlardır. Çarpışma kutularının enerji absorbe etme performansları hayati derecede önemli olabilmektedir. Çarpışma kutularının enerji absorbe etme kapasitelerini arttırmak için önemli derecede çalışmalar yapılmış ve hala yapılmaktadır. Günümüze kadar çarpışma kutuları düşük karbonlu çelik, yüksek karbonlu çelik, alüminyum ve alaşımlarından imal edilmiş ve otomotiv endüstrisinde aktif olarak kullanılmıştır. Fakat son yıllarda gelişen endüstri ile beraber sürdürülebilirlik, hafiflik ve yakıt tasarrufu gibi konuların ön plana çıkması ve önem kazanmasıyla beraber çarpışma kutularının bu amaç doğrultusunda imal edilip tasarlanması, yeni araştırma ve geliştirmelere neden olmuştur. Bu tez çalışmasında amaç bugüne dek metal veya alaşımlarından imal edilen çarpışma kutularının malzemesini değiştirerek polimer matrisli kompozitten çarpışma kutuları imal etmek ve kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin sağladığı avantajlar çerçevesinde enerji sönmüleme yeteneklerini belirlemek ve karşılaştırmaktır. Bilindiği üzere fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler anizotropik yapıya sahip malzemelerdir. Bu sebeple fiber yönelim açısının mekanik dayanım üzerindeki etkileri bu çalışma ile hedeflenmiştir. Bu çalışmada fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzeme imal edilirken takviye malzemesi (fiber) olarak cam elyaf, matris (ana) malzeme olarak ise termoset polimer grubundan olan epoksi reçine tercih edilmiştir. Kompozit çarpışma kutusu numuneleri takviye malzemesinin kalıp malzemeye farklı açılarla sarılıp, epoksi reçine ve sertleştirici ile bağlanarak, vakum infüzyon tekniği ile matris malzemenin numune boyunca homojen dağılmasının sonucunda imal edilmişlerdir. Elde edilen kompozit çarpışma kutusu numuneleri basma testine tabi tutulup enerji sönmüleyebilme kapasiteleri ve buna bağlı olan diğer parametreleri belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada imal edilen kompozit çarpışma kutusu numunelerinin test sonrasında elde ettiğimiz somut matematiksel verileri karşılaştırılıp yorumlanmıştır. Takviye malzemesi olarak kullanılan cam elyafın liflerinin tek bir doğrultu ve farklı açılarda sarılması sonucunda başta sönmülenen toplam enerji değerleri olmak üzere buna bağlı olan diğer bileşenlerinin de farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Lif yönelimlerinin

farklı açılarda olmasının neticesinde mekanik parametrelerindeki bu farkı tespit etmek bakımından bu tez çalışması hedefine ulaşmıştır. 9 adet kompozit çarpışma kutusu numunelerinin test verilerine bakıldığında en yüksek enerji sönümlene performansının 30° ile sarılmış çarpışma kutusu numunesinin gösterdiği görülmektedir. Bu numunenin dışında enerji sönümlene değerleri ele alındığında sırasıyla en yüksek değere sahip numuneler $(0, (+30, -30), (0, 90), 45, (+45, -45), 60, 90$ ve $(+60, -60)$) $^\circ$ ile sarılan numunelerdir. Kütle hepsinde eşit olduğu için özgül enerji sönümlene değerleri de enerji sönümlene değerlerine bağlı olarak bu sıralamayla aynıdır. En düşük enerji sönümlene kapasitesine sahip olan $(+60, -60)^\circ$ ile sarılmış numunenin en düşük özgül enerji sönümlemesine ve ortalama deformasyon kuvvetinin maksimum deformasyon kuvvetinden çok düşük olmasından kaynaklı en düşük ezilme kuvveti verimine sahip olduğu görülmektedir.

Anahtar kelimeler: Çarpışma kutusu, Enerji emilimi, Polimer matrisli kompozit malzeme



ABSTRACT

INVESTIGATION OF ENERGY ABSORPTION CAPABILITIES OF CYLINDRICAL CRASH BOXES MADE OF GLASS FIBER REINFORCED POLYMER MATRIX COMPOSITE WRAPPED AT DIFFERENT ANGLES

TAY, Mehmet

M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Ertan KÖSEDAĞ

December 2023, 105 pages

In the developing automotive industry, with the increase in the number of vehicles and the number of people using vehicles, there is a serious density of vehicles in traffic. As a result, traffic accidents occur that cause significant financial and fatal consequences. Crash boxes have been manufactured in order to prevent these negativities that occur as a result of traffic accidents, that is, to ensure that the material damage to the vehicles and the occupants are affected at minimum levels. Crash boxes are elements that ensure that the energy generated by the force generated by the impact of the crash during any collision in the vehicle is less felt by the next parts of the vehicle and by the people in the vehicle. The energy absorption performance of crash boxes can be vitally important. Significant work has been done and is still being done to increase the energy absorption capacity of crash boxes. To date, crash boxes have been manufactured from low-carbon steel, high-carbon steel, aluminum and their alloys and have been actively used in the automotive industry. However, with the developing industry in recent years, issues such as sustainability, lightness and fuel saving have come to the fore and gained importance, and the manufacturing and designing of crash boxes for this purpose has led to new research and development. The aim of this thesis study is to manufacture crash boxes from polymer matrix composite by changing the material of crash boxes, which have been manufactured from metal or alloys to date, and to determine and compare the energy absorption capabilities within the framework of the advantages provided by the mechanical properties of the composite material. As it is known, fiber-reinforced polymer matrix composites are materials with anisotropic structure. For this reason, the effects of fiber orientation angle on mechanical strength were targeted in this study. In this study, when manufacturing fiber-reinforced polymer matrix composite material, glass fiber was preferred as the reinforcement material (fiber) and epoxy resin from the thermosetting polymer group was preferred as the matrix (main) material. Composite crash box samples were manufactured by wrapping the reinforcement material on the mold material at different angles, bonding it with epoxy resin and hardener, and distributing the matrix material homogeneously throughout the sample by vacuum infusion technique. The obtained composite crash box samples were subjected to compression testing, and their energy dissipation capacity and other related parameters were determined and compared.

In this study, the concrete mathematical data we obtained after the test of the composite crash box samples manufactured were compared and interpreted. It has been determined that, as a result of winding the fibers of the glass fiber used as reinforcement material in a single direction and at different angles, the total energy values absorbed and other related components also differ. This thesis has achieved its goal in terms of detecting this difference in mechanical parameters as a result of the fiber orientations being at different angles. Looking at the test data of 9 composite crash box samples, it was seen

that the crash box sample wrapped at 30° shows the highest energy absorption performance. Apart from this sample, when energy absorption values are considered, the samples with the highest values are $(0, (+30, -30), (0, 90), 45, (+45, -45), 60, 90$ and $(+60, -60))^\circ$ These are samples wrapped with. Since the mass is equal in all, the specific energy absorption values are the same in this order depending on the energy absorption values. It is seen that the sample wrapped with $(+60, -60)^\circ$, which has the lowest energy absorption capacity, has the lowest specific energy absorption and the lowest crushing force efficiency due to the average deformation force being much lower than the maximum deformation force.

Keywords: Crash box, Energy absorption, Polymer matrix composite material



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında bilgi birikimi ile başta akademik olmak üzere her anlamda desteklerini esirgemeyen ve bu sÜreçte harcadığı yoğun mesai ve sabırlarından ötürü değerli danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Ertan KÖSEDAĞ'a sonsuz teŐekkürlerimi sunarım. Laboratuvar aşamasında sahip olduğu tecrübesiyle bize çok büyük katkılar sunan ve yol gösteren YYÜ Meslek Yüksekokulu makine ve metal teknolojileri bölümü Öğr. Gör. Baran Erkek hocama teşekkür ederim. Ayrıca yüksek lisans tez aşamasında bana maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen değerli aileme ve fikir ve tavsiyeleriyle her daim yanımda olan değerli eŐime sonsuz teşekkür ve minnetlerimi sunmak isterim.

2023

Mehmet TAY



İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Konusu ve Kapsamı	2
1.2 Tezin Amacı ve Hedefleri	3
2. LİTERATÜR BİLDİRİŞLERİ	5
2.1 Çarpışma Kutusu.....	5
2.2 Literatürde Çarpışma Kutuları İle İlgili Yapılan Çalışmalar	9
2.3 Çarpışma Kutularında Enerji Sönümleme Bileşenleri.....	13
3. KOMPOZİT MALZEMELER	17
3.1 Gemişten Günümüze Kompozit Malzemeler.....	19
3.2 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları	20
3.2.1 Kompozit Malzemelerin Avantajları.....	20
3.2.2 Kompozit Malzemelerin Dezavantajları.....	21
3.3 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	21
3.4 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	22
3.4.1 Takviye Elemanına Göre Kompozit Malzemeler	22
3.4.2 Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler	23
3.4.2.1 Metal Matrisli Kompozitler	23
3.4.2.2 Seramik Matrisli Kompozitler	24
3.4.2.3 Polimer Matrisli Kompozitler.....	26
3.5 Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Yapı Bileşenleri.....	27
3.5.1 Polimer Matrisli Kompozitleri Oluşturan Matris Malzemeleri ...	27
3.5.1.1 Termoset Polimerler	27
3.5.1.2 Termoplastik Polimerler	30

3.6	Polimer Matrisli Kompozitlerin Takviye Malzemeleri	32
3.6.1	Cam Elyaf.....	33
3.6.2	Karbon Elyaf.....	37
3.6.3	Aramid Elyaf (Kevlar).....	38
3.7	Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	40
3.7.1	El Yatırması Yöntemi.....	40
3.7.2	Püskürtme Yöntemi.....	41
3.7.3	Elyaf Sarma Yöntemi.....	42
3.7.4	Reçine Transfer Yöntemi.....	43
3.7.5	Otoklav Yöntemi.....	45
3.7.6	Enjeksiyon Yöntemi.....	46
3.7.7	Vakumla Kalıplama Yöntemi.....	47
3.7.8	Ekstrüzyon Yöntemi.....	47
3.7.9	Profil çekme (Pultrüzyon) Yöntemi.....	48
4.	MATERYAL VE YÖNTEM.....	49
4.1	Malzeme Seçimi.....	49
4.2	Numune Üretimi.....	51
5.	BULGULAR.....	67
6.	TARTIŞMA VE SONUÇ	95
	KAYNAKLAR	97
	ÖZ GEÇMİŞ	105

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1 Metal matrisli kompozit malzemelerin bazı mekanik özellikleri.....	24
Çizelge 3.2 Bazı termoset matrislerin mekanik özellikleri	30
Çizelge 3.3 Bazı termoplastik matrislerin mekanik özellikleri	32
Çizelge 3.4 Cam elyaf türlerinin mekanik özellikleri	35
Çizelge 5.1 Test sonrası verilere göre elde edilen analiz sonuçları.....	93



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Bir araca ait tampon ve çarpışma kutusu örneği	6
Şekil 2.2 Bir araç şasisine monte edilmiş çarpışma kutusu örneği	6
Şekil 2.3 Metalik çarpışma kutularında bölgesel plastik deformasyon örnekleri	8
Şekil 2.4 Karbon kompozit çarpışma kutularında malzeme davranışları	9
Şekil 2.5 Kuvvet – deplasman grafiği	14
Şekil 3.1 Kompozit bir yapıda matris ve takviye elemanının görünümü	18
Şekil 3.2 Matris malzeme ile takviye malzemesi arasında oluşan ara yüzey	19
Şekil 3.3 Takviye elemanına göre kompozitlerin sınıflandırılması	23
Şekil 3.4 Titanyum alaşımlı karbon fiber takviyeli kompozit malzeme	24
Şekil 3.5 Seramik matrisli kompozit panel.....	25
Şekil 3.6 Epoksi reçine	29
Şekil 3.7 Cam iplik.....	36
Şekil 3.8 Dokunmuş cam elyaf	36
Şekil 3.9 Karbon elyaf malzemesi	37
Şekil 3.10 Karbon elyaf ile taşıyıcı eleman güçlendirmesi	38
Şekil 3.11 Aramid elyaf lifleri.....	39
Şekil 3.12 Dokunmuş aramid elyafı (Kevlar)	39
Şekil 3.13 El yatırması yöntemi şematik gösterimi	41
Şekil 3.14 Püskürtme yöntemi şematik gösterimi	42
Şekil 3.15 Elyaf sarma yöntemi şematik gösterimi	43
Şekil 3.16 Vakum pompası yardımıyla reçine transfer yöntemi	45
Şekil 3.17 Otoklav yöntemi şematik gösterimi	46
Şekil 3.18 Plastik enjeksiyon yöntemi şematik gösterimi	46
Şekil 3.19 Vakumla kalıplama yöntemi şematik gösterimi.....	47
Şekil 3.20 Ekstrüzyon yöntemi şematik gösterimi	48
Şekil 3.21 Profil çekme yöntemi şematik gösterimi.....	48
Şekil 4.1 Kalıp malzeme olarak kullanılan 32 mm dış çapında karton çubuklar	49
Şekil 4.2 Takviye malzemesi olarak kullanılan cam elyaf malzemesi	50
Şekil 4.3 Epoksi reçine ve sertleştirici malzeme	50
Şekil 4.4 Cam ipliklerinin dokuma yönünü gösteren örnek görsel	52

Şekil 4.5 Cam elyaf üzerinde liflerin dokuma yönüne göre açıların belirlenmesi	52
Şekil 4.6 15X33 cm uzunluğunda (0, +45, -45, +30, -30, 90, +60, -60)°'lik elyaflar..	53
Şekil 4.7 15X33 ve 15X66 cm ölçülerinde belirlenen açılarda kesilen numuneler	54
Şekil 4.8 Açılı kesimler sonucunda cam elyafın son görüntüsü.....	54
Şekil 4.9 Tek kant bantla sarılıp elyafa hazır hale gelen kalıp malzeme örneği	55
Şekil 4.10 Elyaf sarma işleminde elyafların arasına kullanılan çift taraflı bant.....	56
Şekil 4.11 Kalıp malzemeye elyaf sarılması (a), Elyaf sarımı bitmiş numuneler (b)....	56
Şekil 4.12 Ayırıcı kumaş (a), Ayırıcı kumaş sarma (b), Ayırıcı kumaş serilmiş hali (c)	57
Şekil 4.13 Grid kumaşı (a), Grid sarma işlemi (b), Grid sarma işlemi bitmiş hali (c) ...	58
Şekil 4.14 Vakum torbası hazırlama aşamaları sırasıyla (a), (b), (c), (d)	60
Şekil 4.15 Reçine geçişini sağlayan vakum pompası	61
Şekil 4.16 Hava basıncı testine tabi tutulan numune	61
Şekil 4.17 Epoksi reçine sertleştirici karışımı	62
Şekil 4.18 Vakum pompası yardımıyla reçine transferi	62
Şekil 4.19 Reçine transferi tamamlanmış kürlenmeye bırakılan numune	63
Şekil 4.20 Oda sıcaklığında 24 saat süre sonrasında kürleşen epoksi reçine	64
Şekil 4.21 Kesme işlemine tabi tutulan numuneler	64
Şekil 4.22 [(0, (0-90), 30, (+30, -30), 45, (+45,-45), 60, (+60, -60), 90)]°'lik numuneler.....	65
Şekil 4.23 Üretilen numunelerin üstten görünüşleri	65
Şekil 5.1 Üniversal basma test cihazı	67
Şekil 5.2 0°'lik açıyla sarılmış numunenin basma testi esnasındaki hasar görüntüleri..	68
Şekil 5.3 0° ile sarılmış numunenin gerilme deformasyon eğrisi.....	69
Şekil 5.4 0° ile sarılmış numunenin kuvvet deformasyon eğrisi	70
Şekil 5.5 90°'lik açıyla sarılmış numunenin basma testi esnasındaki hasar görüntüleri	71
Şekil 5.6 90° ile sarılmış numunenin gerilme deformasyon eğrisi.....	72
Şekil 5.7 90°'lik açıyla sarılmış numunenin kuvvet deformasyon eğrisi.....	72
Şekil 5.8 30°'lik açıyla sarılmış numunenin basma testi esnasındaki hasar görüntüleri	73
Şekil 5.9 30° ile sarılmış numunenin gerilme deformasyon eğrisi	74
Şekil 5.10 30 °'lik açıyla sarılmış numunenin kuvvet deformasyon eğrisi.....	75
Şekil 5.11 60°'lik açıyla sarılmış numunenin basma testi esnasındaki hasar görüntüleri.....	76

Şekil 5.12 60° ile sarılmış numunenin gerilme deformasyon eğrisi.....	77
Şekil 5.13 60° ile sarılmış numunenin kuvvet deformasyon eğrisi	77
Şekil 5.14 45°'lik açıyla sarılmış numunenin basma testi esnasındaki hasar görüntüleri..	78
Şekil 5.15 45° ile sarılmış numunenin gerilme deformasyon eğrisi.....	79
Şekil 5.16 45° ile sarılmış numunenin kuvvet deformasyon eğrisi	80
Şekil 5.17 (0-90)°'lik açıyla sarılmış numunenin basma esnasındaki hasar görüntüleri	81
Şekil 5.18 (0-90)° ile sarılmış numunenin gerilme deformasyon eğrisi.....	82
Şekil 5.19 (0-90)° ile sarılmış numunenin kuvvet deformasyon eğrisi	82
Şekil 5.20 (+30, -30)°'lik açıyla sarılmış numunenin basma esnasındaki hasar hasar görüntüleri.....	84
Şekil 5.21 (+30, -30)° ile sarılmış numunenin gerilme deformasyon eğrisi	85
Şekil 5.22 (+30, -30)° ile sarılmış numunenin kuvvet deformasyon eğrisi.....	85
Şekil 5.23 (+30, -30)° ile sarılmış numunenin kuvvet deformasyon eğrisi.....	86
Şekil 5.24 (+45, -45)° ile sarılmış numunenin gerilme deformasyon eğrisi	87
Şekil 5.25 (+45, -45)° ile sarılmış numunenin kuvvet deformasyon eğrisi.....	87
Şekil 5.26 (+60, -60)°'lik açıyla sarılmış numunenin basma esnasındaki hasar görüntüleri.....	89
Şekil 5.27 (+60, -60)° ile sarılmış numunenin gerilme deformasyon eğrisi	90
Şekil 5.28 (+60, -60)° ile sarılmış numunenin kuvvet deformasyon eğrisi.....	90
Şekil 5.29 Basma testi öncesi numuneler	91
Şekil 5.30 Basma testi sonrası numunelerin üstten görünümü.....	91
Şekil 5.31 Basma testi sonrası numunelerin önden görünümü.....	92
Şekil 5.32 Her bir numune için absorbe edilen toplam enerji değerleri	93
Şekil 5.33 Maksimum ve ortalama deformasyon kuvvetlerinin karşılaştırılması	93



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamalarıyla aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
σ	Gerilme
$^{\circ}$	Derece
$^{\circ}\text{C}$	Derece santigrat
E_m	Özgül enerji sönümleme
E_T	Sönümlenen toplam enerji
F	Kuvvet
F_{maks}	Maksimum deformasyon kuvveti
F_{ort}	Ortalama deformasyon kuvveti
g	Gram
J	Joule
kg	Kilogram
kj	Kilojoule
kN	Kilonewton
m	Metre
m^3	Metreküp
mm	Milimetre
mm^2	Milimetre kare
m^2	Metre kare
$mmHg$	Milimetre cıva
N	Newton
η_F	Ezilme kuvveti verimi
η_S	Deformasyon verimi
S	Çarpışma kutusundaki ezilme miktarı
$S_S - S_B$	İlk boy ile son boy aralığı
S_{maks}	Maksimum ezilme

Kısaltmalar**Açıklama****AR-GE**

Araştırma ve Geliştirme

EKV

Ezilme Kuvveti Verimi

MEK

Maksimum Ezilme Kuvveti

OEK

Ortalama Ezilme Kuvveti

ÖES

Özgül Enerji Sönümleme

PVC

Polivinil Klorür

TES

Toplam Enerji Sönümleme



1. GİRİŞ

Endüstri devriminin hızla gelişmesiyle birlikte, küçük ölçekte üretim yapan işletmelerin hızla fabrikalaşması ve bunun sonucunda insan gücüne duyulan ihtiyacın artmasıyla beraber köyden kentte göçlerin yaygın bir şekilde sürmesinin sonucunda kentlerde nüfus yoğunluğu oluşmuş ve giderek artmıştır. Endüstri devrimi ile hammaddelerin çıkarılıp işlenmesi gelişen nüfus himayesinde insanlığın her alanda ihtiyaçlarını karşılamış, sürekli büyüyen nüfus ve hızlı imalat hamlelerine paralel olarak insanlık, modern hayatta geçişte önemli ve tarihi adımlar atmıştır. Makine gücüyle beraber yaşanan tüm bu olumlu gelişmelerin sonucunda, bir zamanlar sadece ekonomik olarak üst sınıftaki insanların sahip olduğu, hayatı kolaylaştıran kimi araç ve gereçler artık temel ihtiyaçlar durumuna gelmiştir. Yaşamı her alanda oldukça kolaylaştıran, konforlu, insanlığa önemli hizmetler sunabilen, sanayi devriminin başlangıcıyla temelleri yıllar önce atılan ve zamanla hızla geliştirilen otomobilleri, bu sınıfa ilk sırada dâhil etmek mümkündür. Otomobiller icatlarıyla beraber insanlığa daha iyi hizmet sunabilmek için sürekli geliştirilmiş ve yatırımlarla beraber daha da geliştirilmektedir. Bahsettiğimiz tüm bu gelişmelerin sonucunda zamanla tüm dünyada nüfus hızla artmış ve dolayısıyla otomobillerin de artmasının sonucunda otomobil kullanan kişi sayısı hızla çoğalmıştır. Araç kullanan kişi sayısının artması, aktif yaşamda trafikte daha fazla aracın olmasına ve bazı olumsuz gelişmelerin yaşanmasına sebebiyet vermektedir. Bu olumsuz gelişmelerin başında trafik kazaları gelmektedir. Trafik kazalarının sonucunda araçlarda hasarların yanı sıra araç içindeki kişiler ciddi yaralanmalar ve ölüm tehlikesiyle karşı karşıya kalmaktadır. Otomobil üreticileri yaşanan bu maddi hasar, yaralanma ve can kayıplarını önlemek ve minimum seviyeye indirmek amacıyla farklı arayışlara yönelmiş, AR - GE çalışmalarına ciddi yatırımlar yapmışlardır. Yapılan tüm çalışmaların sonucunda çarpışma kutuları bulunmuştur. İşte tam bu noktada çarpışma kutularının bulunuş öyküleri karşımıza çıkmaktadır. Çarpışma kutuları araçlarda pasif güvenlik sistemleri yani, kaza anında oluşabilecek olumsuzlukları önlemek veya en aza indirmek amacıyla araçlarda bulundurulmuş sistemlerdir. Çarpışma kutularına bu açıdan bakıldığında araçlarda önden veya arkadan çarpışma esnasında kuvvete maruz kalan ve araçlarda bulunma amaçları göz önüne alındığında çok önemli ve hayati unsurlar olarak görülmektedir. İmalatlarında kullanılan malzemenin mekanik özellikleri, tasarımlarında

kullanılan geometrik yapıları, herhangi bir darbeye maruz kaldıklarında oluşan kuvvetten açığa çıkan enerjiyi sönümleme yeteneklerini belirleyen en önemli faktörlerdir. Çarpışma kutularının çarpışma esnasında açığa çıkan enerjiyi sönümleyebilme kabiliyetleri malzemeleri, geometrileri, takviye malzemesi kullanıp kullanılmamasına bağlı olarak gösterdikleri performanslarla ilgili literatürde yapılmış çalışmalar bulunmaktadır. Otomotiv endüstrisinde karbon emisyonunu azaltma girişimleri yeni mühendislik malzemeleri, yeni tasarımlarla beraber hafiflik, yakıt tasarrufu ve sürdürülebilirlik gibi konularda iyi sonuçlar almayı hedeflemektedir. Çelik ve diğer metallerin sahip olduğu bazı dezavantajlar (ağırlık, korozyon dayanımı) nedeniyle bu endüstride istenilen ve ihtiyaç duyulan özellikte yeni malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Kompozit malzemeler hafiflik, yüksek mukavemet ve tokluk, korozyona karşı direnç, yüksek enerji sönümleme, ısı dayanım ve yüksek sertlik gibi malzeme avantajları sayesinde otomotiv sektöründe oldukça önemli bir yere sahip olmakla birlikte kullanılmaktadır. Kompozitler özellikle karmaşık yapıların üretiminde kolaylık sağladıkları için tercih edilmektedir. Sahip olduğu bazı dezavantajlar kompozit malzemelerin kullanım alanlarını kısıtlamada önemli yer tutmaktadır. Yüksek üretim maliyetleri, seri üretime uygun olmamaları, kullanılan matris malzemeye göre sıcaklık dayanımının düşüklüğü, geri dönüştürülemez olmaları, nem etkisi ve iç çatlak oluşumuna sebebiyet vermeleri, talaşlı imalata uygun olmamaları gibi olumsuzluklar tercih edilmelerini kısıtlamaktadır. İmal edilecek parçanın tüm aşamalarından önce, üretimde kullanılacak malzemenin doğru seçilmesi en önemli faktörlerdendir. Kompozit malzemelerin üretim maliyet ve zorlukları göz önüne alındığında, otomotiv sektöründe çarpışma kutuları gibi malzeme ve tasarımının etkisiyle hayati öneme sahip parçaların sönümleme performanslarını arttırmak için imalatlarında kullanılması oldukça makuldür.

1.1 Tezin Konusu ve Kapsamı

Bu yüksek lisans tezinin konusu; “Farklı açılarla sarılmış cam elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitten üretilen silindirik çarpışma kutularının enerji sönümleyebilme kabiliyetlerinin incelenmesi”dir. Burada takviye malzemesi olan cam elyafın, kalıp malzemeye birbirinden farklı açılarla sarılmasının sonucunda elde edilen numunelerin basma testine tabi tutularak enerji sönümlenmeleri ve buna paralel olarak

diğer bileşenlerindeki farklılıkları bu kapsamda belirlemek ve karşılaştırmaktır. Bilindiği üzere kompozit malzemelerin üretiminde matris malzemeler takviye malzemesini bir arada tutan bağlayıcı yapılardır. Takviye malzemeleri ise mukavemeti sağlayan asıl unsurlardır. Bu tezde takviye malzemesi olarak cam elyaf seçilmiştir. Cam elyaflar, elyafın yönelim açılara göre belirli bir kuvvet etkisi altında matris malzemesi ile bir araya gelerek oluşturduğu kompozit yapıda farklı sonuçlar verebilmektedir. Bu kapsamda bu tez deneysel olarak elde edilen sonuçların derlenerek aktarıldığı bir çalışmadır.

1.2 Tezin Amacı ve Hedefleri

Bilindiği üzere çarpışma kutuları araçların ön kısmına yerleştirilen, çarpmanın etkisiyle açığa çıkan enerjiyi emerek aracın ve araçtaki yolcuların can güvenliğini sağlamak için tasarlanmış bir yapıdır. Bu yapı birçok malzemeden imal edilebilir. İmalatlarında en çok kullanılan malzemeler çelik, alüminyum ve benzeridir. Bu yapılar araç yapısına göre daha yumuşak bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla çarpışma esnasında oluşan enerjiyi daha fazla sönmüleyebilirler. Tasarımları bu amaçtan ötürü yolcu güvenliğini sağlamak amacıyla oldukça önemlidir. Bu yapıların tasarımı enerji sönmüleyebilme kapasitelerini arttırmak ve çarpışmanın etkisini azaltmak için birçok farklı özellik içerir. Bu yüksek lisans tezinde amaç, alüminyum, çelik gibi malzemelerden imal edilmiş olan çarpışma kutularının malzemesini değiştirerek yani, cam elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeden imal ederek değişen fiber açısının aynı çarpışma kutusu üzerindeki enerji sönmüleme kapasitelerini belirlemek ve karşılaştırmaktır. Fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerin anizotropik yapıya sahip olmalarından takviye malzemesinin farklı açılarla sarılmasının sonucunda değişen açıdaki enerji sönmüleme kapasitelerini ortaya çıkarmak bu yüksek lisans tezinde hedeflenmektedir. Ana malzemenin alüminyum ve çelikten ziyade polimer kompozit malzeme olarak seçilmesindeki amaç, kompozit yapıların sahip olduğu mekanik özellikler sayesinde önemli bir konu olan ağırlığın azaltılmasını sağlamak ve enerji sönmüleyebilme kapasitelerini arttırmaktır.



2. LİTERATÜR BİLDİRİŞLERİ

2.1 Çarpışma Kutusu

Hızlı bir gelişim içerisinde bulunan otomotiv endüstrisinde araç sayılarının artmasıyla beraber ve buna paralel olarak araç kullanan kişi sayısının artmasıyla istenmeyen olumsuzlukların başında olan trafik kazaları yaşanmaktadır. Trafik kazaları araçlarda ciddi maddi hasarlar ve araçta bulunanların olumsuz yönde etkilenmelerine sebebiyet veren istenmeyen durumlardır. Otoyollarda trafik kazalarının olmasına sebebiyet veren çarpışmaların çoğu önden veya arkadan olanlardır. Bu nedenle kaza sonrasında en fazla hasarın meydana geldiği noktalar aracın ön ve arka tampon kısımlarıdır. Gelişen bu endüstride bu olumsuzlukları azaltmak veya minimum seviyeye indirmek temel araştırmaların konusu haline gelmiştir. İş te tam bu noktada çarpışma kutuları bulunmuştur. Çarpışma kutusu araçlarda ön veya arka tamponda araç şasisine bağlantılı olabilen, çarpışmanın etkisiyle açığa çıkan enerjiyi emerek aracın sonraki bölümlerine (motor ve vb.) aktarılmasını engelleyen ve araçlarda bulunan yolcuların oluşan bu kuvvetin etkisinden en az seviyede etkilenmelerini sağlayan güvenlik sistemleridir. Çarpışma kutuları literatürde darbe sönümleyiciler, ezilme kutuları, enerji yutucular vb. gibi isimlerle belirtilmektedir. Çarpışma kutusu ve çarpışma kutusunun bağlı olduğu tampon çarpışma traversini oluşturmaktadır. Tampon araçların en dış katmanında bulunan plastiğin içerisinde yer alan sac metaldir. Kaza anında kuvvete ilk maruz kalan ve fiziksel olarak etkilenen yapıdır. Çarpışma kutuları ise tampona bağlı olan ve çarpmanın etkisiyle meydana gelen kuvvetten ilk etkilenen bir diğer yapılar olarak karşımıza çıkmaktadır. Çarpmanın etkisiyle açığa çıkan enerjinin bir çarpışma kutusu ve tampon tarafından tamamının geri dönüşümsüz sönümlenmesi istenir ve tasarımında bu husus göz önünde bulundurulur. Böylece etkilenme araçta bulunan kişilerce daha az olacaktır (Durgun ve Doruk, 2014). Çarpışma kutuları darbeyi karşılayan ve darbenin yarattığı enerjiyi kendi yapısal tasarımında sönümleme sorumluluğunu üstlendiği için aracın diğer kısımlarına göre daha yumuşak yapılardır. Çarpışma kutuları kazanın olmasına sebep olan kuvvet esnasında geometrik yapıları ve malzemelerinin sağladığı özellikler sonucunda şekil değiştirerek enerjiyi kendi bünyesinde sönümlerler ve böylelikle enerjinin yarattığı tahribattan aracın diğer kısımlarının ve araçtakilerin ilk

andan daha az etkilenmelerini sağlayan yapılardır. Şekil 2.1 ve Şekil 2.2’de çarpışma kutusu örnekleri yer almaktadır.



Şekil 2.1 Bir araca ait tampon ve çarpışma kutusu örneği (Durgun vd., 2016)



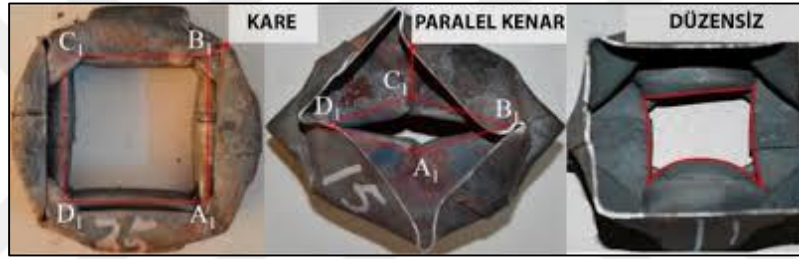
Şekil 2.2 Bir araç şasisine monte edilmiş çarpışma kutusu örneği (Kayar, 2019)

Bir çarpışma kutusunun enerjiyi kendi bünyesinde sönümleyebilme kabiliyetini belirleyen faktörler arasında çarpışma kutusunun malzemesi, çarpışma kutusunun geometrik tasarımı, çarpışma kutusunun et kalınlığı ve dolgu malzemesi kullanılıp kullanılmaması

belirgin düzeyde etkilidir. Çarpışma kutusunun istenilen malzeme ile imal edilmesinin dışında enerji emme performansını arttırmak için en önemli bir diğer parametre ise tasarımıdır. Bir çarpışma kutusu tasarlanırken farklı geometriler kullanılabilir. Dairesel, kare, dikdörtgen şeklinde tasarlandığı gibi koniklik açlarına sahip ince cidarlı borular olarak tasarlanabilir (Aktaş vd., 2021). Çarpışma kutularının imalatında kullanılan malzeme olarak 2000'li yılların başına kadar düşük karbonlu çelikler kullanılırken, ilerleyen yıllarda ise alüminyum ve alaşımları, magnezyum ve alaşımları, yüksek mukavemetli çelikler ve polimer kompozit malzemelerin kullanılabileceği tartışılmaktaydı (Boreanaz, 2018). Günümüzde ise çarpışma kutuları düşük karbonlu çelikler ve alüminyum alaşımlarından imal edilip otomotiv sektöründe aktif olarak kullanılmaktadır (Rajak vd., 2017). Zamanla ihtiyaç duyulan bu malzeme değişikliğinin temel nedenlerini şöyle açıklamak mümkündür. Teknolojideki bu hızlı gelişim ile seri üretimlerin artmasına bağlı olarak otomobil sayılarının hızla çoğalmasının ve kullanılmasının sonucunda fosil yakıtların tüketilmesiyle çevre kirliliği oluşmuş ve bu durum otomotiv endüstrisinde çözülmesi gereken bir problem olarak ele alınmıştır. Fosil yakıtlarının kullanılmasını azaltacak en belirgin yöntem yakıt tasarrufunu azaltmaktır. Yakıt tasarrufu yapmak için ise araçların ağırlığını önemli ölçüde azaltmak en belirgin çözümdür. Bilindiği üzere kütlesi düşük olan bir aracı hareketlendirmek için daha az yakıt (Abdullah vd., 2020), kütlesi büyük olan bir aracı hareketlendirmek için ise daha fazla yakıt gereklidir. Dünya genelinde değişen iklim koşullarının etkisiyle hafiflik, yakıt tasarrufu, sürdürülebilirlik gibi konuların ön plana çıkmasıyla beraber, bu şartları en makul ölçüde sağlayabilecek yeni malzeme ihtiyaçları doğmuştur. Bir çarpışma kutusundan beklentiler yüksek enerji sönümlene kapasitesine sahip olması, düşük ağırlığa sahip olması, geri dönüştürülebilmesi ve kısa sürede üretilmesidir. Bu amaç doğrultusunda alüminyum alaşımları, magnezyum alaşımları ve kompozitler oldukça önem kazanmaktadır. Yüksek enerji sönümlene ve mekanik özelliklerinin sağladığı hafiflik nedeniyle polimer matrisli kompozit malzemeler bu iki parametrede ele alındığında en uygun malzemedir. Fakat kompozitlerin tamamının geri dönüştürülemez olması, üretimdeki zorluk ve üretim sürelerinin uzunluğu ve son olarak kompozitlerin üretiminde kullanılan bazı kimyasalların yarattığı dezavantajlar sayesinde tercih edilmelerini kısıtlamaktadır (Isaac, 2020). Bir darbe esnasında çarpışma kutusundan deforme olması istenmektedir. Bu duruma uygun yumuşak yapı ve makul tasarımda

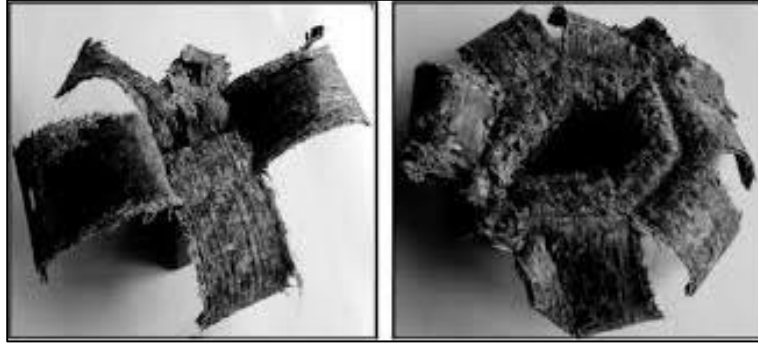
olmaları enerji sönümlenme performanslarında artışa sebep olacaktır. Çarpışma kutusu deforme olurken yani, çarpışma anında etkiyen kuvvete karşı gösterdiği direnç sırasında şeklini bozarak kuvvetten doğan enerjiyi kendi bünyesinde kısmen veya tamamen soğurmaya çalışmaktadır.

Metal malzeme ve alaşımlarında etkiyen kuvvet sonucunda çarpışma kutuları bölgesel şekil değişimi ve katlanmalar sonucunda plastik deformasyon geçirerek enerji sönümleyebilme eğilimindedirler (Ateş vd., 2022). Kuvvete karşı direnç esnasında kutunun bir kısmı şekil değişimine maruz kalırken bir kısmı ise şeklini korumaktadır. Dolayısıyla plastik deformasyon, malzemelerin mekanik özelliklerinden kaynaklı olarak dar aralıkta gerçekleşir ve enerji sönümlenmesi belirlenir. Ezilmiş metalik çarpışma kutularına ait bazı görseller Şekil 2.3'te yer almaktadır.



Şekil 2.3 Metalik çarpışma kutularında plastik deformasyon örnekleri (Zhou vd., 2016)

Kompozit malzemelerde ise bu durum farklı yönelimdedir. Kompozitlerde etkiyen kuvvet sonucunda takviye malzemesi numune hattı boyunca kırılma ve kırılma ile ana bağlayıcı malzemeden ayrılır. Bu durum delaminasyon olarak adlandırılmaktadır (Günaydın vd., 2022). Dolayısıyla takviye malzemesinin belirgin bir hat boyunca ana malzemeden zorlanarak ayrılmasından kaynaklı enerji sönümlenme geniş bir aralıkta gerçekleşmektedir. Kompozitlerin enerji sönümlenme yeteneklerinin metal ve alaşımlarına göre daha yüksek olmasının sebebi budur. Polimer matrisli çarpışma kutularının hasar görüntülerine örnekler Şekil 2.4'te sunulmuştur.



Şekil 2.4 Karbon kompozit çarpışma kutularında malzeme davranışları (Zarei vd., 2008)

2.2 Literatürde Çarpışma Kutuları ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Ulaşımında meydana gelen trafik kazalarının % 11, 71'i arkadan çarpma, % 7,38'i karşılıklı çarpışmalar ve % 1,99'u ise duran araca çarpma olarak görülmektedir (Yaprak ve Akbulut, 2019). Verilen istatistiğe bakıldığında çarpışma kutularının araçlarda bulunduğu bölgeden yani, arkadan ve karşılıklı çarpmadan kaynaklanan kazaların oranının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum bu bölgelerde önlemlerin alınmasına ve gerekli çalışmaların yapılmasına olanak sağlamıştır. Otomotiv endüstrisinin önlem amacıyla geliştirdiği aktif ve pasif güvenlik sistemleri mevcuttur (Altın, 2019) Geçmiş yıllardan günümüze çarpışma kutularının enerji sönmlemelerine yönelik yapılan birçok çalışma mevcuttur. Yapılan bir tanıtımda çarpışma kutularının araçlarda yüksek enerji sönmleme performansları ve hafiflik gibi avantajlarından dolayı darbe emiciler olarak buldukları ifade edilmiştir (Hoang vd., 2011). Yapılan çalışmaların bazıları çarpışma kutularının geometrileri üzerinedir. Bu çalışmalarda genel olarak ezilme kutusu geometrileri silindirik, kare ve dikdörtgen olarak seçilmiştir. Yapılan bir çalışmada dairesel kesitteki çarpışma kutusunun içerisi bal petek yapı ile doldurularak etki eden yükler karşısında enerji sönmleme davranışları ele alınmıştır (Aktay vd., 2011) Bir diğer çalışmada ise silindirik çarpışma kutularının eksenel ve farklı açılardan etki eden yükler karşısında enerji sönmleme davranışları ele alınmıştır (Isaac ve Oluwole, 2016). Çarpışma kutularının enerji sönmleme performanslarını incelemek amacıyla teorik olarak (Tran vd., 2014), deneysel olarak (Vinayagar ve Kumar, 2017) sonlu elemanlar analizleri ile bilgisayar ortamında çalışmalar yapmışlardır (Abbasi vd., 2015). Ezilme kutularının enerji emme performansları kutuların imalatında kullanılan malzemelerin mikro yapısına, etki eden darbenin uygulama koşullarına ve tasarımda

seçilen geometrik formlarına bağlıdır. Bu yüzden ezilme kutularının darbe sonucunda gösterdiği hasar tipleri ve mekanik davranışları tasarım aşamasında belirlenmeli diye belirtmiştir (Abdollahpoor ve Marzbanrad, 2010). Bir çarpışma esnasında kuvvete maruz kalan tampon ezilmeye başlayarak bir kısım enerjii sönümler. Tamponun deforme olmasıyla hemen arkasında bulunan çarpışma kutuları aynı reaksiyonu göstererek deforme olur ve enerjii sönümler. Bu esnada eksenel kuvvet maksimum değerine ulaşır ve tepki kuvvetleri ise ortalama bir değerde salınır. Bu zamanlamaya paralel olarak çarpışma kutuları iç içe geçerek katlanır ve kısalır (Öztürk ve Kaya, 2008). Bir çalışmada farklı sıcaklıklarda temperlenerek ekstrüze edilmiş farklı et kalınlığındaki çarpışma kutularının dinamik ve statik yükler altında davranışlarını incelenmiştir (Langseth ve Hopperstad, 1996). Dikdörtgen kesitteki çarpışma kutularının koniklik açısını ve et kalınlıklarını değiştirerek farklı hızlara sahip dinamik yükler karşısında gösterdikleri davranışları incelemiştir (Nagel ve Thambiratnam, 2005). Yaptıkları bir çalışmada farklı geometrilere sahip çarpışma kutularının önden bir çarpma esnasında enerji sönümleyebilme kapasitelerini belirlemek amacıyla SEM metodunu kullanmıştır. Çalışmalarında malzeme olarak çelik seçilmiş ve 15. 6 m/s'lik hızda 0.08 tonluk kütleyle sahip bir duvara çarptırılarak LS-DYNA yazılımı ile analizi yapılmıştır. Sonuç olarak tasarlanan modelin mevcut modele göre enerji sönümlemesinin % 0.6 arttığını ve optimum deformasyon kuvvetinin düştüğünü belirtmişlerdir (Demirci, 2014). Yaptıkları bir çalışmada araçlarda mevcut bir alüminyum tamponu incelenmiş, alüminyum ekstrüzyon ile imal edilen şekillerin etkisi göz önünde bulundurularak yeni bir malzeme önerilmiştir. Yaptıkları çalışmada silindirik geometriye sahip çarpışma kutusunun üzerine oyuk açarak çarpışma kutusunun etkiyen darbe sonucunda enerji sönümleme performansının artırıldığını belirtmişlerdir (Salehghaffari vd., 2010). Yaptıkları bir diğer çalışmada alüminyum alaşımından imal ettikleri kare kesitteki metalik çarpışma kutusunun enerji sönümleme davranışlarını eksenel yüklemeler altında incelemiştir. Eksenel kuvvetin baskısı altındaki çarpışma kutusunun şeklinde meydana gelen katlanmalar simetrik ise enerji sönümlemesinin daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir (Langseth ve Hopperstad, 1996). Farklı hücre yapısına sahip farklı et kalınlığı ve genişliği sahip çarpışma kutuları modelleyerek en yüksek özgül enerji sönümleme ve ezilme kuvveti verimi kapasitesini elde etmek için çalışmalar yapmışlardır (Hou vd., 2008). Yaptıkları bir çalışmada çarpışma kutusunun içerisine 95.5 kg/m³ yoğunluğunda köpük

malzeme yerleştirip sonlu elemanlar yöntemi ile analizini yapmışlardır. Analiz sonucunda köpüğün yerleştirilmesi sonucunda özgül enerji emiliminin çarpışma kutusunda 8 kJ/kg civarında arttığını saptamışlardır (Mirfendereski vd., 2008) İçi metal köpük dolu ve içi boş çarpışma kutularının açılı ve eksenel yükler altında enerji sönümleyebilme kapasitelerini arttırmak için çeşitli optimizasyon çalışmaları yapmışlardır (Djamaluddin vd., 2015). Yapılan bir çalışmada kare ve daire geometrilerde on adet çarpışma kutusu numunesi tasarlanmıştır. Tasarlanan bu numuneler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak 0°, 15° ve 30°'lik açılarda yüklemelere maruz kalarak ezilmiş ve enerji sönümleme performansları incelenmiştir. Bu çalışmanın sonucunda farklı açılardan uygulanan yüklemelerin çarpışma kutusunun enerji sönümleme performansını etkilediğini tespit etmiştir. Farklı deformasyon açılarında özgül enerji sönümleme, ezilme kuvveti verimi ve sönümlenen toplam enerji değerlerinin farklı çıktığını belirtmiştir (Altın, 2019). Çarpışma kutularının üzerine oyuk açmak enerji sönümleme performanslarını etkilemektedir. Çarpışma kutularında maruz kalınan ilk darbe sonucunda katlanmanın olabilmesi için gereken ilk deformasyon kuvvetinin üzerlerine açılan oyuklar tarafından azaltıldığını ve buna bağılı olarak ezilme kuvveti veriminin artırıldığını belirtmiştir (Agrawal vd., 2016; Rawat vd., 2017). Yapılan bir çalışma kapsamında aynı et kalınlığı, aynı çap ve aynı uzunluğa sahip ve malzeme olarak standart çelikten imal edilmiş çarpışma kutularının üzerine bir, iki ve üç adet oyuk açılmıştır. Açılan her bir oyukun genişliği sırasıyla 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5 mm olarak tasarlanmıştır. Bu çarpışma kutularına 17.7 m/s'lik bir hızda 500 kg'lık bir yük çarptırılmıştır. Çalışmada çarpışma kutularının üzerine açılan oyukların ezilme kuvveti verimini arttırdığı doğrulanmış ve oyuk sayısı ve genişliğinin ezilme kuvveti verimi ve özgül enerji sönümleme üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda tüm oyuk genişliklerine sahip çarpışma kutularında oyuk sayısının artırılmasının toplam enerji sönümleyebilme performansını arttırdığını ve buna bağılı olarak özgül enerji sönümlemesinin de arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca oyuk sayısı maksimum deformasyon kuvvetini belirli bir oranda azaltmış, buna bağılı olarak kütlede bir miktar artışın görülmesine rağmen ezilme kuvveti veriminin artırıldığı belirlenmiştir. Bir diğere tespit ise oyuk genişliğinin az olması sonucunda sönümlenen enerji miktarının da arttığı görülmüştür. Bu durum sonuç olarak maksimum deformasyon kuvvetinin artışına sebep olmuştur (Altın, 2019). Enerji sönümleyebilme kapasitesinin yüksek değerlerde olduğu bir çarpışma kutusu tasarımı yapmak amacıyla

bir çalışmada, 90x90x150 mm boyutlarında ve 1.2 mm et kalınlığında malzemesinin DP 600 çeliğinden olduğu 6 adet çarpışma kutusu numunesi sonlu elemanlar analizi yöntemi ile tasarlanmıştır. Çarpışma kutusu numunelerinin üzerine farklı konum ve sayılarda iç bükey ve dış bükey olarak yatay, dikey ve 30° açılarla oluklar (tetikleyici) yerleştirilmiştir. Her çarpışma kutusu 15 m/s'lik bir hızla 400 kg kütleyle sahip olan bir duvara çarpıtılmıştır. Yapılan simülasyon sonucunda sönümlenen enerjinin arttıkça maksimum deformasyon kuvvetinin arttığı tüm numunelerde tespit edilmiştir. Ayrıca düz yatay ve düz dikey oluk tasarımında iç bükeyliğin dış bükeyliğe göre daha fazla enerji sönümlendiği görülmüştür. Dış bükeyliğin iç bükeyliğe göre daha fazla enerji sönümlendiği 30°'lik açıda görülmüştür. Karşılaştırılmaların sonucunda hem açı olarak hem bükeylik olarak hem de konum olarak ele alındığında en verimli çarpışma kutusu numunesinin düz yatay oluklu iç bükey olduğu belirlenmiştir. Son olarak dış bükeyliğin enerji sönümlemeyi azalttığı ve bunun yanında maksimum reaksiyon kuvvetini de düşürdüğü gözlemlenmiştir (Durgun ve Doruk, 2014). Çarpışma kutusu performansını incelemek amacıyla farklı karakteristik yapıda tasarlanıp sonlu elemanlar metodu ile çarpışma analizlerini yapılmasının yanında deneysel olarak ta test edilip incelenmiştir (Demirci, 2014). Silindirik kesitteki kompozit çarpışma kutusunda malzemenin çapında ve geometrisinde değişiklikler yaparak ve polimerik köpük ekleyerek eksenel yükler altında çarpışma kutusunun gösterdiği davranışları incelemişlerdir. Sonuç olarak tetikleyici bulunduran çarpışma kutularının daha yüksek enerji sönümleme performansı gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca çarpışma kutusunda hem tetikleyicinin hem de polimerik köpüğün olması enerji sönümlemede önemli bir rol oynayacağını belirtmişlerdir. Farklı oranlarda alüminyum köpük takviyesi yapılmış çarpışma kutularının çarpışma performansı ile içi boş çarpışma kutularının çarpışma performansı incelenmiştir. Bu çalışmada 100x50x100 mm boyutlarında 2 mm et kalınlığında sonlu elemanlar analizi yöntemi ile tasarlanan 5 adet çarpışma kutusunun içerisine %100, %80, %50, %30 oranında alüminyum köpük dâhil edilirken, kalan son çarpışma kutusu boş kalacak şekilde tüm çarpışma kutularının 570 kg'lık bir yüklemenin altında gösterdikleri performanslar incelenmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada köpük oranının artmasıyla sönümlenen enerji miktarının da arttığı tespit edilmiştir. Çarpışma kutularında artan köpük oranına bağılı olarak enerji sönümlemesinin arttığı ve kütle artışının etkisiyle özgül enerji emiliminin bir miktar düştüğü belirtilmiştir. Son olarak boş çarpışma kutusunun en yüksek kısıalma değerine sahip olduğu ve bu

değerin köpük artışına bağlı olarak düşeceği belirtilmiştir (Çakan vd., 2019). Çarpışma kutularının enerji sönümlenme yeteneklerini araştırmak amacıyla dört farklı geometri iki farklı malzeme (AL6063, A34) alüminyum ve çelikten tasarlanarak kesit alanları sabit kalmak şartıyla sonlu elemanlar analizi yöntemi ile çarpışma testlerine tabi tutulmuştur. Çarpışma kutusu geometrileri kare, silindir, altıgen ve üçgen olarak seçilmiştir. Çalışma sonucunda enerji sönümlenmeleri, kuvvet-zaman eğrileri ve hasar modelleri tespit edilmiştir. Enerji sönümlenme performansları yüksekten düşüğe sıralandığında altıgen, daire, kare ve üçgen şeklinde tespit edilmiştir (Kösedağ ve İşler, 2023). Farklı geometrilerdeki içi boş ve içi alüminyum köpük dolu çarpışma kutularının enerji sönümleyebilme kabiliyetlerini inceleyen bu çalışmada, silindirik ve kare kesitte tasarlanan ve sonlu elemanlar analizi yapılan çarpışma kutularında etki eden kuvvet sonucunda, geometrilerindeki farklılığın enerji sönümlenme kabiliyetlerini etkilediği belirtilmiştir. Çarpışma kutularının içerisine alüminyum köpük dâhil edildiğinde enerji sönümlenme davranışlarının 4 kat daha arttığı tespit edilmiştir. Çarpışma kutusuna köpüğün dâhil edilmesinin ezilme kuvveti verimini artırdığı belirtilmiştir (Altın ve Yücesu, 2019). Bir diğer çalışmada karbon kompozit çarpışma kutularına metal örgü tel takviyesinin enerji sönümlenme performanslarına olan etkileri incelenmiştir.

2.3 Çarpışma Kutularında Enerji Sönümlenme Bileşenleri

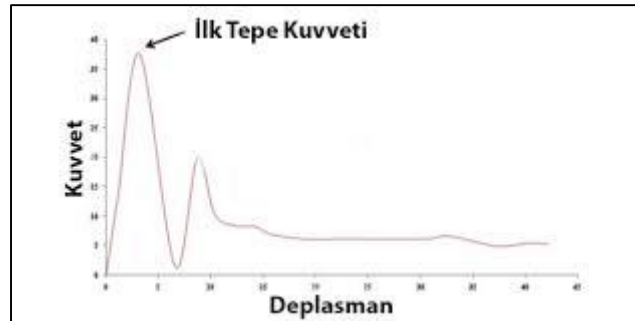
Çarpışma kutularının çarpışma performansları incelenirken enerji sönümlenmelerinin yanında açıklığa kavuşturulması gerek bazı kavramlar mevcuttur. Bu kavramlar tümüyle bir çarpışma kutusunun herhangi bir darbe sırasında oluşan kuvvetten açığa çıkan enerjiyi kendi bünyesinde nasıl sönümleyebildiğine dair tüm verileri elde etmemize ve bununla birlikte anlayıp tanımlamaya yardımcı olacaktır. Bu kavramlar; toplam enerji sönümlenme, ezilme kuvveti verimi, özgül enerji sönümlenme, ortalama ezilme kuvveti ve maksimum ezilme kuvveti ve deformasyon verimidir. Çarpışma kutusundan darbe etkisiyle meydana gelen enerjiyi karşılama sonrasında yüksek enerji sönümlenmesinin yanında ezilme kuvveti verimi değerlerinin de yüksek seviyede olması beklenmektedir. Ayrıca çarpışma kutusunun imalat aşamasından ve takviye malzemesinin kullanılma durumuna göre belirlenen kütlelerin etkilediği özgül enerji emilimi değerlerinin de yüksek olması beklenmektedir. Çarpışma kutuları ciddi

kuvvetleri sönümlenme amacıyla tasarlanan yapılardır. Çarpışma kutusunu ezilmeye maruz bırakan, ilk etki eden kuvvetin değerinin yüksek olması istenmeyen bir durumdur. Bu kuvvetin büyüklüğü araçlarda çarpışma kutusu ve sonrası kısımlar dâhil yolcuların da yüksek seviyede etkilenmelerini sağlayan bir faktör olduğundan değerinin yüksek olması istenmemektedir. Çarpışma kutusu tarafından maruz kalınan ilk kuvvet ile sonraki ortalama kuvvetlerin değerlerinin birbirine yakın olması beklenen ve istenilen bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır.

Toplam Enerji Sönümlenme (TES)

Toplam enerji sönümlenme, bir çarpışma kutusunun çarpışma esnasında sönümlendiği enerji değerini belirleyen bir kavramdır. Diğer bir tanımla çarpışma kutusunun oluşan kuvvetler esnasında yaptığı iş olarak belirtilebilir. Denklem (2.1) ile hesaplanır. Burada, E_T (kJ) sönümlenen toplam enerji değerini, F (kN) ezilme kuvvetini, S (mm) ise çarpışma kutusundaki ezilme miktarını yani yer değiştirmeyi ifade etmektedir. $S_S - S_B$ (mm) çarpışma kutusunun maruz kaldığı ilk kuvvet ile sonraki kuvvetler aralığındaki yer değiştirmeyi ifade etmektedir. Çarpışma kutusuna etki eden kuvvet sonucunda meydana gelen deformasyonların gösterildiği kuvvet - deplasman grafiğinin altında kalan alan bize toplam enerji sönümlenme değerini veren bir diğer yöntemdir. Örnek bir kuvvet deplasman eğrisi Şekil 2.5'te verilmiştir.

$$E_T = \int_{S_B}^{S_S} F dS \quad (2.1)$$



Şekil 2.5 Kuvvet-Deplasman grafiği (Ateş vd., 2022)

Ezilme Kuvveti Verimi (EKV)

Ezilme kuvveti verimi, ortalama ezilme kuvvetinin maksimum ezilme kuvvetine oranlanmasıyla elde edilen bir değerdir. Denklem (2.2). Burada η_F ezilme kuvveti verimini, F_{ort} ortalama deformasyon kuvvetini, F_{maks} ise maksimum deformasyon kuvvetini belirtmektedir. Ezilme kuvveti veriminin istenilen değerde çıkması maksimum kuvvetin düşüklüğüne bağlıdır.

$$\eta_F = \frac{F_{ort}}{F_{maks}} \quad (2.2)$$

Özgöl Enerji Sönümlleme (ÖES)

Bir arpışma kutusunun sönümllediği toplam enerjinin, çarpışma kutusunun kuvvet etkisiyle deforme olmadan sahip olduğu kütesine oranlanması sonucunda birim kütle başına sönümlenen enerji değerini ifade eder. Denklem (2.3).

$$E_m = \frac{E_T}{m} \quad (2.3)$$

Denklem (2.3)' te E_m özgöl enerji sönümllemeyi, E_T sönümlenen toplam enerjii ve m ise çarpışma kutusunun ezilmeden önceki kütesini ifade etmektedir. Çarpışma kutularının tasarımında kütle oldukça önemli bir faktördür. Tasarlanan arpışma kutusunun kütesinin hafif sönümllediği enerji miktarının ise yüksek olması istenmektedir. Sonuç olarak çarpışma sonrası elde edilen özgöl enerji emilimi değerinin yüksek olması istenmektedir.

Ortalama Ezilme Kuvveti (OEK)

Ortalama ezilme kuvveti çarpışma kutusunun deforme olmasını sağlayan kuvvetlerin ortalamasını belirleyen bir kuvettir. Bu kuvvet sönümlenen toplam enerjinin meydana gelen deformasyon miktarına oranlanmasıyla elde edilmektedir. Denklem (2.4).

$$F_{ort} = \frac{E_T}{S_s - S_b} \quad (2.4)$$

Maksimum Ezilme Kuvveti (MEK)

Çarpışma kutuları çarpışma esnasında belirli yükler altında ezilmeye başlamaktadır. Ezilmenin başlamasına sebep olan veya ilk alanda karşılaşılan kuvvet maksimum ezilme kuvveti (pik) olarak tanımlanmaktadır. Bu kuvvetin yüksek değerde çıkması istenmeyen bir durumdur. Bu kuvvetin yüksek değerde çıkmasının sonucunda aracın diğer bölümleri ve araçtakiler kuvvetten oldukça fazla etkilenmeleri anlamına gelmektedir. Dolayısıyla karşılaşılan ilk kuvvet ile mevcut diğer kuvvetlerin birbirine yakın olması istenmektedir.

Deformasyon Verimi

Bir çarpışma kutusunun etkiyen kuvvet sonucunda toplam uzunluğunda meydana gelen ezilmeyi belirlemek amacıyla yararlanılan bir kavramdır. Etkiyen kuvvet sonrasında çarpışma kutusunda ezilmenin oldukça fazla olması istenen bir durumdur. Deformasyon verimi, maksimum ezilmenin çarpışma kutusunun uzunluğuna oranlanması sonucu elde edilmektedir. Denklem (2.5).

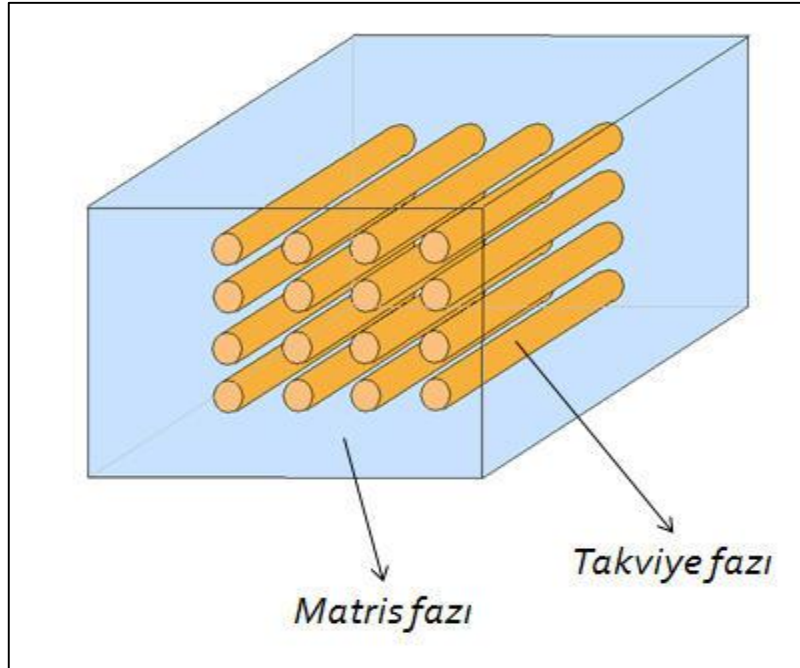
$$\eta_S = \frac{S_{maks}}{l} \quad (2.5)$$

Denklem (2.5)'te η_S deformasyon verimini, S_{maks} maksimum ezilmeyi, l (mm) ise çarpışma kutusunun uzunluğunu belirtmektedir. Çarpışma kutularının maruz kalınan kuvvet sonrasında deformasyon verimi değerinin yüksek çıkması çarpışma kutusunun enerji sönmlemede iyi performans gösterdiğine işarettir.

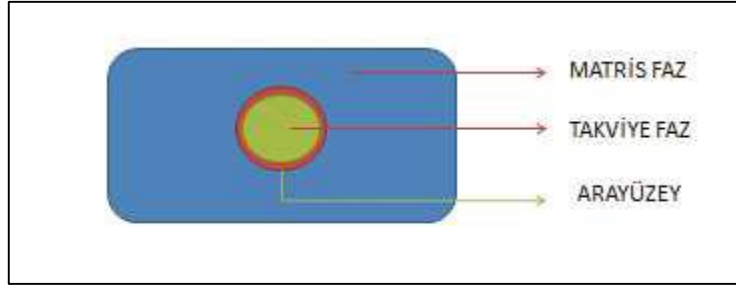
3. KOMPOZİT MALZEMELER

Başta otomotiv endüstrisi olmak üzere diğer endüstri alanlarında çeşitli bazı sorunları kalıcı bir şekilde gidermek amacıyla yeni malzeme arayışlarının hız kazanmasının sonucunda son yıllarda kompozit malzemeler bu sektörde metal ve alaşımlarına bir alternatif malzeme olarak oldukça önem kazanmaktadır. Kompozit malzemeler sağladıkları bazı mekanik avantajlar sayesinde otomotiv endüstrisi dâhil birçok sektörde kullanılmasının uygunluğu neticesinde önemli bir mühendislik malzemesi haline gelmiş ve geliştirildikçe daha da değer kazanmaktadır. Kompozitler, ihtiyaca bağlı olarak istenilen özelliklerde malzemeyi elde etmek amacıyla birden fazla malzemenin bir arada bulunmasının sonucunda yeni ve üstün özelliklere sahip üretilen mühendislik malzemeleridir. Genel anlamıyla kompozit malzemeler, farklı malzeme kompozisyonuna ve şekline sahip en az iki malzemenin bir araya gelmesinin sonucunda elde edilen bileşenlerdir. Kompozit malzemeler alaşım değildir. Bu birleşimde malzemeler birbiri içinde çözünmezler ve heterojen olarak kombinasyon oluştururlar. Kompozitleri oluşturan malzemeler orijinal hallerini korurlar ve fiziksel olarak birleştikleri malzemelerle aralarında bir ara yüz oluştururlar. Kompozit malzemelerin üretiminde kimyasal olarak birleşme mevcut değildir. Tamamen malzemelerin fiziksel olarak bir araya gelmesinin sonucunda elde edilirler. Kompozitlerdeki bu birleşimin temel amacı, tek başına istenilen seviyede özellikleri karşılamayan malzemelerin bir araya getirilmesinin sonucunda malzeme özelliklerini elde etmektir. Bu sayede kompozit malzemelerin sahip olduğu en önemli özellikler arasında mikro düzeyde homojen yapıya sahip olmalarıdır. Kompozit malzemeler, ana malzeme (matris) ve takviye malzemesi denilen iki bileşenden meydana gelmektedir. Matris ve takviye fazlarının birleşiminde bir ara yüz oluşmaktadır. Kompozit malzemeyi oluşturan matris (ana faz) malzemenin kompozit malzemeyi korumak ve rijitliği sağlamak, yükün elyaflara aktarılmasını sağlamak ve elyafları bir arada tutmak, elyafları bazı mekanik ve kimyasal zararlara karşı korumak, kompozitlerin kırılmasını engellemek veya yavaşlatmak, yüzey kalitesini sağlamak gibi temel fonksiyonları bulunmaktadır. Kompozit malzemeyi oluşturan takviye (ikincil faz) malzemesinin kompozitlere gelen yükü taşımak, mukavemeti sağlamak, sertlik ve iletkenlik gibi özellikleri sağlamak, matris fazı ile bağlanarak bir ara yüz oluşturmak gibi temel fonksiyonları bulunmaktadır. Kompozit malzemelerin

birleşiminde bulunan matris ve takviye malzemeleri genel olarak seramik, cam, polimer ve metallere oluşmaktadır. Matris malzeme büyük çoğunlukla polimer malzemeden oluşmaktadır. Matris malzeme genel olarak takviye malzemesinden daha az yoğun, daha az sert ve daha düşük mukavemette oluşmaktadır. Matris ve takviye malzeme birleşimi düşük yoğunluğa sahip olsa da yüksek sertlik ve mukavemete sahip olabilmektedir. İlk kullanım esnasında sıvı formda olan matris malzeme belirli bir süre sonra katı forma kolaylıkla geçebilmektedir. Kullanılan takviye malzemesi ise küresel yapıda, lif şeklinde ve silindirik olabilmektedir. Bir kompozit malzemenin birleşiminde tek bir çeşit takviye fazı kullanıldığı gibi birden fazla da kullanılabilir. Kompozitleri oluşturan matris malzeme ile takviye malzemesi arasında bir bağlayıcılık mevcuttur. Bu bağlayıcılığı sağlayan ara yüz kırılma bir özellik göstermektedir. Bu özellikte olmasına rağmen mevcut herhangi bir kuvveti çözülmeye ve kırılmaya uğramadan takviye fazına iletir. Ayrıca ara yüz mevcut kompozit malzemenin elastikiyet modülünü belirleyen en önemli alandır. Bu sebeple bir kompozit malzemenin sahip olduğu dayanıklılık, ara yüzey bağının istenilen düzeyde olmasına bağlıdır (Kaya, 2016). Kompozit malzemelerde matris ve fiberi temsili gösteren görsel Şekil 3.1’de yer almaktadır. Matris malzeme ile takviye malzemesi arasında oluşan ara yüzeyi ifade eden görsel Şekil 3.2 de yer almaktadır.



Şekil 3.1 Kompozit bir yapıda matris ile takviye elemanın görünümü (Dokur, 2009)



Şekil 3.2 Matris malzeme ile takviye malzemesi arasında oluşan ara yüzey (Kaya, 2016)

3.1 Geçmişten Günümüze Kompozit Malzemeler

Kompozitler geçmişten günümüze belirli alanlarda bazı amaçlar doğrultusunda kullanılmıştır. Kompozit malzemelerin tarihte kullanımları oldukça eskilere dayanmaktadır. Bu malzemelerin geçmiş zamanlarda kullanımlarına baktığımızda çoğunlukla doğada var olan bazı malzemelerin kombinasyonu şeklinde görülmüştür. Bunlara örnek olarak, ilk zamanlarda insanlar gevrek olan bazı malzemeleri doğada bulunan hayvansal ve bitkisel liflerle destekleyerek bu kırılganlığı azaltmayı hedeflemişlerdir. Geçmişte kullanılan ve en çok bilinen kompozit malzemeye örnek olarak kerpiç gösterilebilir. Eski çağdan beri insanlar killi çamurun içerisine çeşitli lifler, saman ve sap ekleyerek kullanım esnasında dayanıklılığını arttırmayı hedeflemişlerdir. Geçmiş tarihten beri kullanılan bir diğer kompozit malzeme olan kontrplak, eski Mısırlılar tarafından kullanılmıştır. İlk zamanlarda deve kılıları küçük parçalar halinde kesilmiş ve çeşitli inşaat faaliyetlerinde kullanılmıştır. Kullanılan bir diğer kompozit bileşenler arasında demir ile beton ve kireç ile kum karışımı mevcuttur. Moğollar tarafından farklı ağaç parçaları ile hayvanlardan elde edilen çeşitli kemik ve liflerin birleşimiyle yapımı bir yıldan fazla süren kompozit yaylar kullanılmıştır. Japon samurayların kılıç yapımında lamine çelikleri kullanması başka bir kompozit yapıya örnektir. Doğada mevcut materyallerin farklı birleşimleriyle elde edilen kompozitlerin kullanılmasının yanı sıra zaman ilerledikçe, insanoğlunun çeşitli arayışlarının sonucunda kompozit malzeme alanında önemli adımlar atılmış ve geliştirilmiştir. Bu alanda geleneksel olarak elde edilip kullanılan kompozit malzemelerin yanı sıra modern kompozit malzemelerin elde edilmesinin ilk adımları atılmıştır. 1937 yılında cam elyafın ticari olarak üretilmesi ile cam elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitler geliştirilmiştir. Bu adım modern kompozit malzemelerin doğuşunun başlangıcı olarak

kabul edilmektedir. 2. Dünya savaşı yıllarında artan sanayi hamlelerine ve askeri alanda rekabetin sonucuna bağlı olarak 1946 yılında ilk kompozit botlar üretilmiş ve askeri sanayi alanına dâhil edilmiştir. 1961 yılında karbon fiberlerin üretilmesi ile karbon elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitler geliştirilmiştir. Bor elyafının 1965 yılında üretilmesi ve kompozit malzeme sınıfına dâhil edilmesiyle farklı takviye malzemesi alternatifleri ortaya çıkmıştır. Aramid (kevlar) elyafın da 1971 yılında takviye malzemesi olarak kompozit malzeme sınıfına dahil olması önemli bir adım olarak tarihe geçmiştir. Metal ve metal alaşımları ile seramiklerin 1970'li yılların sonucunda kompozit malzemelere dâhil edilmesiyle metal matrisli kompozitler ve seramik matrisli kompozitler bu malzeme sınıfına kazandırılmıştır. Metal ve seramik matrisli kompozitlerin bu alana girmesiyle kompozit malzeme sınıfı önemli derecede sayılabilecek bir olgunluğa erişmiştir.

3.2 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit malzemeler diğer malzeme gruplarına göre sağladığı bazı önemli üstünlükler neticesinde, hızla geliştirilmesiyle bu malzeme gruplarının yerini almaya ve alternatif bir mühendislik malzemesi olmaya hazırdır. Kompozitleri oluşturan cam seramik, polimer ve metal malzemelerin uygun kombinasyonlarla bir araya gelmesinin neticesinde tek başına istenilen özellikleri sağlayamayıp, birleşim olarak kullanıldığında gösterdikleri malzeme davranışları ve üstünlükleri onları cazip ve geliştirilebilir malzeme haline getirmiştir. Oluşan malzeme birleşimlerinin avantajlarının yanı sıra dezavantajları da mevcuttur. Bu bölümde kompozit malzeme sınıfının avantaj ve dezavantajlarından bahsedilecektir.

3.2.1 Kompozit Malzemelerin Avantajları

- Hafiflik
- Yüksek mukavemet
- Kolay şekillendirilebilme
- Düşük termal genleşme
- Karmaşık yapıların imalatında sağladığı kolaylıklar

- Kolay bağlanabilme
- Yüksek sertlik
- Korozyona karşı direnç
- Kırılma direncinin iyi olması
- Titreşim sönümleyebilme
- İyi bir yalıtkan ve iyi bir iletken olabilmeleri

3.2.2 Kompozit Malzemelerin Dezavantajları

- Gizli hasar (iç çatlak vb.)
- Düşük süneklik
- Malzeme maliyetinin yüksekliği
- Üretimlerinde sürenin uzunluğu
- Montaj maliyeti
- Dizayn edilebilmede eksiklik
- Hassas imalata uygun olmamaları
- Talaşlı imalata uygun olmamaları

3.3 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemelerin hızla geliştirilmesi ve sağladığı üstün bazı mekanik davranışlarının etkisiyle birçok alanda kullanımları yaygınlaşmıştır. Kompozit malzemeler başta havacılık sanayi olmak üzere, otomotiv sanayinde, elektronik ve elektrik sanayinde, inşaat sektöründe, iş makinaları sektöründe, ev aletlerinde, günlük yaşamda, tarım sektöründe, uzay sanayisinde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Yukarıda bahsettiğimiz sektörlerde kompozitlerin kullanımına baktığımızda otomotiv endüstrisinde araçların tampon saclarında, tampon parçalarında, motor ve araç lastiklerinde kullanılmaktadır. Kompozitlerin hızla kullanılmaya başlandığı havacılık sektöründe hafifliğin getirdiği önemli avantajlar neticesinde uçakların iç tasarımında, uçak motor ve gövdelerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Elektrik ve elektronik sektöründe yalıtımın ve iletkenliğin gerektiği durumlarda kompozit malzemeler oldukça tercih edilmektedir. Karmaşık yapıdaki parçaların üretiminde sağladığı kolaylıklar

neticesinde günlük hayatta aktif olarak kullandığımız masa, sandalye ve çeşitli teknolojik cihazlarda kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin oldukça yaygın kullanıldığı sektörlerin başında inşaat sektörü gelmektedir. İnşaatların dış cephe yalıtımlarında, inşaat kalıplarında, konutların iç tasarımları gibi alanlarda tercih edilen önemli bir malzemedir. İş makinaları sektöründe şoför kabinlerinin tasarımında kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Bu sayede ses ve titreşim izolasyonunda istenilen seviyelere ulaşılabilmektedir. Korozyona karşı gösterdikleri üstün dirençten ötürü kimya sektöründe kompozit malzemeler asitlerin yarattığı tahribata karşı ihtiyaç duyulan alanlarda kullanılmaktadır. Denizlerde tuz, sıcaklık ve nemin etkisiyle meydana gelen korozyona karşı dirençli oldukları için ve çeşitli karmaşık geometrideki parçaların yapımında kolaylık sağladıkları için ve mukavemetlerinde metal saclara göre gösterdikleri üstünlüklerden dolayı kompozit malzemeler tercih edilip kullanılmaktadır. Bu sektörlerin dışında kompozit malzemeler mekanik özelliklerinin sağladığı üstünlükler neticesinde başka sektörlerde de tercih edilmektedir.

3.4 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler birden fazla malzemenin bir araya gelmesinin sonucunda ortaya çıkan malzeme kombinasyonları oldukları için ve bir araya gelen bu malzemeler farklı sınıflara ve özelliklere sahip olduklarından dolayı kompozit malzemelerin sınıflandırılması gerekir. Bu yapıları daha iyi anlamak ve tanımlamak adına kompozit malzemeler matris ve takviye malzemesine göre sınıflandırılırlar.

3.4.1 Takviye Elemanına Göre Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler içerdiği takviye malzemesinin türüne ve şekline göre birbirinden farklı olarak sınıflandırılmaktadır. Takviye elemanlarına göre kompozit malzemeler Şekil 3.3'te gösterildiği gibi dört farklı sınıfta incelenmektedir.

- Elyaf takviyeli kompozit malzemeler
- Parçacık takviyeli kompozit malzemeler
- Tabakalı kompozit malzemeler

- Karma kompozit malzemeler



Şekil 3.3 Takviye elemanına göre kompozitlerin sınıflandırılması (Kaya, 2016)

3.4.2 Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler

- Metal Matrisli Kompozitler
- Seramik Matrisli Kompozitler
- Polimer Matrisli Kompozitler

3.4.2.1 Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozit malzemelerin imalatında metal bir matris kullanılmaktadır. Bu malzeme çeşidinin imalatında yaygın olarak kullanılan matrislerden olan bazı alaşım ve hafif metallerin özellikleri arasında iyi tokluk, düşük yoğunluk gibi bazı mekanik parametreler bulunmaktadır. Ayrıca matris malzemelerinde bulunması istenilen bir diğer mekanik üstünlük ise atmosfer ortamında korozyona karşı dirençlerinin yüksek olmasıdır. Yaygın olarak kullanılan metal matrisler arasında alüminyum ve alaşımları, titanyum ve magnezyum bulunmaktadır. Bunların dışında kullanılan matrisler genel olarak nikel, bakır, bronz ve çinko metalleridir. Bu malzeme türünün imalatında takviye malzemesi bazı durumlarda kullanılmayabilir bunun yerine takviye malzemesi yerine metal bağlayıcılar tercih edilmektedir. Metal matrisli kompozitler üretilirken takviye malzemesi olarak karbon, silisyum karbür, plastik ve seramik kullanılmaktadır. Metal matrisli kompozitler boron elyafı ile iyi bir birleşim elde ederler, fakat diğer elyaf türleri ile aynı performansı gösteremezler. Bu nedenden dolayı üretimleri zorlu ve

pahalıdır. Bu da metal matrisli kompozitlerin en büyük dezavantajları arasında yer almaktadır. Metal matrisi oluşturan malzemelerin toklukları ve rijitlikleri iyi olduğundan imal edilen kompozit yapının da bu özellikleri iyi seviyede çıkmaktadır. Metal matrisli kompozitler havacılık, uzay ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Metal matrisli kompozitlerin bazı mekanik özellikleri Çizelge 3.1’de yer almaktadır. Örnek bir titanyum alaşımlı karbon fiber takviyeli kompozit malzeme görseli ise Şekil 3.4’te yer almaktadır.

Çizelge 3.1 Metal matrisli kompozitlerin bazı mekanik özellikleri (Can, 2017)

Özellik	SiC/Al	Grafit/Al	Çelik	Al
Özgül ağırlık (g/cm^3)	2.6	2.2	7.8	2.6
Young modülü (GPa)	117.2	124.1	206.8	68.95
Çekme dayanımı (MPa)	1206	448.2	648.1	234.4
Isıl genişleme katsayısı ($1/°C$)	12.4	18	11.7	23



Şekil 3.4 Titanyum alaşımlı karbon fiber takviyeli kompozit malzeme

3.4.2.2 Seramik Matrisli Kompozitler

Seramikler malzemeler yüksek sıcaklıklara ve korozyona karşı dirençli olduklarından, hafif olduklarından ötürü oldukça yaygın kullanılan malzemelerdir. Fakat bu önemli avantajlarının yanında, yük altında gevrek davranış sergilediklerinden dolayı kullanım alanları sınırlı kalabilmektedir (Başçı, 1999). Seramiklerin bu yöndeki olumsuz

özelliklerini iyileştirmek için son yıllarda oldukça fazla çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların neticesinde seramik matrisli kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Seramik matrisli kompozit malzemeler genel olarak yüksek sıcaklıklarda çalışan parçaların üretiminde kullanılmaktadır (Kaya, 2016). Seramik malzemelerin mekanik özelliklerine bakıldığında yüksek sertlik ve kırılabilirliğin yanında düşük tokluk ve sünekliğe sahip oldukları görülmektedir. Seramik matrisli kompozitlerin üretimindeki amaç, seramikleri çeşitli liflerle takviye ederek tokluğunu yükseltmektir. Seramik matris ile birlikte bazı elyaflar kullanılarak, elyafın sağladığı mekanik özellikler çerçevesinde yük altında oluşan çatlakların ilerlemesini engellemesi veya geciktirebilme performansına göre bu malzemenin tokluğunun artırıldığı veya azaltıldığı gözlemlenir. Yani tokluğunun iyileştirilmesi tamamen kullanılan takviye elyafının yükleme altındaki sergilediği davranışa bağlıdır. Seramik matrisli kompozitler yüksek elastiklik modülüne sahiptirler ve elektriksel olarak iyi birer yalıtıcıdır (Seydibeyoğlu, 2012). Seramik matrisli kompozitlerde herhangi bir yükleme altında matris malzeme takviye elemanını korozyona karşı korur, takviye elemanı ise gelen yükleri taşır. Bu malzeme türünde yükleme altında elyaf malzemesi matris malzemenin içerisine gömülür. Silisyum karbür, silisyum nitrid ve alümina yaygın olarak kullanılan seramik matrisli kompozitlerdir. Turbujet motorlarında, roketlerde ve uzay araçlarında yüksek sıcaklıklar altında iyi mekanik performanslar sergilediklerinden dolayı tercih edilmektedir. Örnek bir seramik matrisli kompozit panel görseli Şekil 3.5'te yer almaktadır.



Şekil 3.5 Seramik matrisli kompozit panel (Özdemir, 2020)

3.4.2.3 Polimer Matrisli Kompozitler

Kompozit malzemeleri oluşturan bileşenler tek başına kullanıldığında istenilen özellikleri gösteremediğinden dolayı, bir bileşim halinde kullanılırlar. Bu sayede yalnız başına kullanıldığında mekanik olarak iyi özellikler sunmayan malzemeler birlikte kullanıldığında daha verimli ve istenilen değerlerde performanslar sergileyebilmektedir. Kompozit malzemelerin üretim amaçları da tam olarak budur. Kompozitler kendilerini oluşturan malzemelerin bir arada sağladığı üstün mekanik davranışlarının neticesinde oldukça fazla kullanım alanlarına sahiptirler. Belirli bir sektörün gereksinimleri doğrultusunda istenilen mekanik özellikleri karşılayabilme ihtiyacında en önemli malzeme grupları haline gelmişlerdir.

Bu yüksek lisans tezinin bu bölümünde tezin asıl konusu olan polimer matrisli kompozitler ele alınacaktır. Bu bölümde polimer matrisli kompozitlerin genel tanımları, kullanım alanları, avantajları ve dezavantajları, üretim yöntemleri alt başlıklarına değinilecektir. Polimer matrisli kompozit malzemelerin imalatında matris görevlerini termoset ve termoplastikler üstlenmektedir. Bu malzemeler ısıya karşı gösterdikleri tepkiler neticesinde birbirinden ayrılmaktadır. Termoplastik malzemeler termosetlere göre daha zor üretildiklerinden ve daha pahalı olduklarından dolayı kullanım alanları termosetlere kıyasla daha sınırlıdır. Farklı sektörlerde tercih edilen kompozit malzemelerin büyük çoğunluğu ucuz ve hafif olduklarından dolayı polimer matrisli kompozitlerdir. Metal matrisli ve seramik matrisli kompozitlere oranla çok fazla tercih edilmekte ve kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozit malzemeler korozyona karşı dirençli, kolay şekil alabilen, hafif, uzun süreli kullanımlara uygun ve yüksek mukavemete sahip malzemelerdir. Sahip oldukları bu diğer özelliklerden dolayı da kullanım alanları daha geniş kapsamlıdır. Bu malzemelerin sahip olduğu bazı dezavantajlar ise kolay bir şekilde geri dönüştürülememeleri, düşük çarpışma enerjisi performansı ve maliyetlerdeki baskıdır. Polimer matrisli kompozitlerin sahip olduğu en önemli üstün mekanik özellik metal ve alaşımlarına göre özgül mukavemetlerinin çok yüksek olmasıdır. Örneğin özgül elastisite değeri alüminyuma göre 5 kat daha yüksektir. Bu sayede hafifliğin ve dayanımın istendiği havacılık, uzay ve askeri sanayide alüminyum ve alaşımlarının yerini almaktadır (Özdemir, 2020). Yeni ve üstün bir malzeme alternatifi olarak polimer matrisli kompozit malzemeler mühendislik

bakımından geliştirilmekte ve geleneksel malzeme sınıflarından sergilediği üstün mekanik özellikler neticesinde ayrılmaktadır.

3.5 Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Yapı Bileşenleri

Bir kompozit malzemeyi oluşturan yapı bileşenleri matris ile takviye elemanlarıdır. Oluşan kompozit malzemenin mevcut özelliklerini kullanılan takviye ile matris elemanları belirlemektedir. Bu açıdan bir kompozit malzemeyi ele almak ya da kompozit malzemeyi anlamaya çalışmak için matris ve takviye elemanlarının detaylı incelenmesi daha makul olacaktır. Polimer matrisli kompozit malzemeler de diğer kompozit türleri gibi kendilerini oluşturan bir matris fazına ve takviye elemanına sahiptir. Polimer matrisli kompozitleri oluşturan matris fazları termoplastik ve termosetler olarak ayrılmaktadır. Kendilerini oluşturan takviye malzemelerine bakıldığında ise parçacık takviyeli ve elyaf takviyeli kompozitler olarak ele alınmaktadır. Polimer matrisli kompozitlerin imalatında kullanılan elyaflar genel olarak cam elyaf, karbon elyaf, aramid elyaf, bor elyaf ve alümina elyafıdır.

3.5.1 Polimer Matrisli Kompozitleri Oluşturan Matris Malzemeleri

Polimer matrisli kompozitlerin imalatında kullanılan matrisler termosetler ve termoplastikler olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu bölümde termoset ve termoplastik polimerlere değinilecektir.

3.5.1.1 Termoset Polimerler

Termosetler matris malzemesi olarak en çok kullanılan polimerlerdir. Termoset polimerler sertleşmemesi için dondurucularda muhafaza edilir. Termosetler yüksek sıcaklıklarda tekrar yumuşamayan rijit polimerlerdir. Bu malzemeler uzun ömürlü kullanıma sahip oldukları gibi herhangi bir kimyasal etki sonucunda çözülmezler. Bu sebeple geri dönüşümleri mümkün değildir (Özdemir, 2020). Termoplastiklere göre daha yüksek dayanıma sahip ve daha gevrek malzeme davranışı sergilerler. Termoset polimerler otomotiv endüstrisinde oldukça yaygın kullanılırlar ve bu malzemeler için

polimerizasyon oda sıcaklığında gerçekleşir (Sönmez, 2009). Termoset polimer grubundan olan polyester dünyada cam elyaf takviyesiyle en iyi uyumu sağlayan matristir. Polyesterlerin sertleşme öncesi viskoziteleri düşük olduğundan cam elyafa iyi yayılır ve bunun sonucunda iyi bir kompozit malzeme elde edilir. Bu malzemelerin kullanımları oldukça kolay ve büyük çoğunlukla tüm üretim yöntemlerine uygundur. Termosetlerin polimerizasyon sonucunda kimyasallara ve suya karşı kısa sürede yitirilmeyen bir dirençleri mevcuttur. Örneğin termoset polimer grubundan olan epoksi reçine sıvı fazda 140 °C katı fazda ise 220 °C varan sıcaklıklarda ısı ve mekanik dayanımlara sahip bir matristir (Özdemir, 2020). Bu alandan yapılan son çalışmalara göre epoksi reçinenin karbon elyaf takviyesi ile polyesterin ise cam elyaf takviyesinin sonucunda mekanik özellik bakımından en ideal kompozit malzemenin üretildiği tespit edilmiştir (Özdemir, 2020). Polyester reçine epoksi reçineye göre daha ucuz bir malzeme olduğundan kullanımı epoksi reçineye göre gün geçtikçe daha da yaygınlaşmaktadır. Yaygın olarak kullanılan termosetler arasında epoksi reçine, polyester reçine, vinilester reçine, fenolik reçine, silikon ve poliüretan polimerlerdir.

Polyester Reçine: Polimer matrisli kompozit malzemelerin imalatında matris olarak en çok kullanılan malzemedir. Bu malzeme kompozit endüstrisinde büyük bir kullanım alanına sahip ve örnekleri sayılamayacak kadar fazladır. Düşük maliyetli ve kolay imal edilebilen bir polimerdir. Çevresel etkilere karşı dayanımı oldukça iyi seviyededir. Epoksi reçineler gibi hem oda sıcaklığında hem de daha yüksek sıcaklıklarda kullanıma uygun matrislerdir. Cam elyaf takviyesiyle matris olarak kullanıldığında mekanik özellikler bakımından çok iyi bir kompozit yapı oluşturmaktadır. Sahip olduğu dezavantajlar arasında düşük yapışma özelliği ve işlenmeleri sırasında çatlama eğilimleri mevcuttur. Otomotiv endüstrisinde, gemi ve yat endüstrisinde, inşaat sektörlerinde geniş kullanım alanlarına sahiptir.

Epoksi Reçine: Polimer matrisli kompozitlerin imalatında polyester matrisler kadar çok kullanılan bir diğer matris malzemedir. Elyaf takviyeleri ile iyi bir kompozit bileşen oluştururlar. Epoksi reçineler oda sıcaklığında kürleşebilme özelliğine sahiptirler karbon elyaf ve cam elyaf ile yaygın olarak kullanılan matris türüdür. Epoksi reçineler polyesterlere kıyasla daha pahalı malzemelerdir. Epoksi reçineler uçucu değildirler, korozyona ve kimyasallara karşı dirençleri oldukça yüksektir. Mekanik ve elektriksel

özellikleri oldukça iyidir bu sayede bazı sektörlerde oldukça yaygın tercih edilmektedir. Matris malzemesi olarak kullandığında kürlenmeye yardımcı olmak amacıyla çeşitli sertleştirici malzemelerle beraber kullanılır. Kompozit malzemeleri üretirken kullanılan epoksi reçine Şekil 3.6’da yer almaktadır.



uyumlu bir malzemedir. Bu yönden önemli derecede kullanılan bir kompozit malzeme bileşenidir. Polimer matrisli kompozit yapıların üretiminde kullanılan en yaygın termoset polimerlere yukarıda değindik. Kullanılan bazı termoset matrislerin mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de yer almaktadır.

Çizelge 3.2 Bazı termoset matrislerin mekanik özellikleri (Can, 2017)

Özellik	Polyester	Epoksi	Polimit
Yoğunluk(gr/cm^3)	1.1 - 1.4	1.1 – 1.2	1.43 – 1.9
Çekme Mod.(GPa)	1.2 - 4	2 - 5	3.1 – 4.9
Kayma Mod. (GPa)	1 - 2	1.5	-
Çekme Muk.(MPa)	45 - 95	55 - 120	70 - 110
Basma Muk.(MPa)	140 – 90	-	288
Poisson Oranı	0.35 – 0.36	0.25 – 0.39	-
Kopma Uzaması(%)	2 - 6	1.5 – 8.5	1.5 - 3

3.5.1.2 Termoplastik Polimerler

Termoplastik polimerler, oda sıcaklığında katı halde bulunan, yüksek sıcaklıklara karşı yumuşayan ve sonrasında ergiyen malzemelerdir. Bu malzemeler bir soğutma işlemi sonrasında tekrar katılaşabilirler. Termoplastik malzemeler kolay şekil alabilen, tekrar tekrar ısıtılıp ergimelerinin sonucunda soğutularak katılaşabilirler. Termoplastik polimerlerin en önemli avantajları arasında geri dönüştürülebilme özelliği bulunmaktadır. Bu malzemelerin sertleşmesini sağlamak için herhangi bir işlemi yapmaya gerek yoktur. Soğuduklarında kendi sertliklerine kendileri ulaşabilmektedir. Termoplastik polimerler, polimer malzeme endüstrisinde oldukça yaygın kullanılan malzemeler arasındadır. Kompozit malzemeleri oluştururken bazı elyaflarla iyi bir yapı oluşturmaları nedeniyle tercih edilmekte ve daha fazla kullanımlarını arttırmak için üzerlerinde çalışılmaktadır. Bu polimerlerin çeşitli kimyasallara ve çevre şartlarına karşı dayanımları oldukça iyidir. Kompozit yapılarda kullanımları geri dönüştürülebilme özellikleri sayesinde. Termoset polimerlere göre matris malzemesi olarak daha az kullanılmaktadırlar. Termoplastikler termoset polimerlere göre daha pahalı malzemelerdir ve üretim aşamasında belirli zorlukları mevcuttur. Otomotiv ve uçak endüstrisinde kullanılmaktadırlar. Polimer matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak

polipropilen, polietilen, polivinil klorür, poliamid, poliasetal ve polikarbonat termoplastikleri kullanılmaktadır. Bu bölümde bu polimerlere kısa değinilecektir.

Polivinil Klorür (PVC): En yaygın kullanılan polimer malzeme, aynı zamanda ucuz olması, kolay işlenebilir olması, kimyasal ve nem direncinin yüksek olması, titreşim sönümleyebilme özelliğinin iyi olması, iyi mukavemete sahip olması gibi avantajlarının yanında insan sağlığına karşı zararlı olması ve çevreye verdiği zarar neticesinde kullanımı gün geçtikçe azalan bir polimerdir. Kompozit malzeme endüstrisinde kaplama malzemelerinde, borularda, tel yalıtımlarında kullanılmaktadır.

Polietilen: Kolay işlenebilmesi ve maliyet olarak uygun olması neticesinde belirli alanlarda kullanıma sahip bir polimerdir. İyi mekanik özelliklerinin yanında neme karşı direnci yüksek, kimyasal olarak kararlı ve deformasyon direnci yüksek bir malzemedir. Isı ve çevresel etkilere karşı kolay etkilenmeleri neticesiyle kolaylıkla çatlak oluşturabilirler. Ev eşyalarında ve paketleme sektöründe oldukça fazla kullanılan bir polimer malzemedir.

Poliamid: Pahalı ancak iyi mekanik özelliklere sahip bir polimer malzemedir. Naylon olarak bilinen malzeme bu polimerin en çok kullanılan ürünüdür. En büyük dezavantajı nem almasıdır. Poliamidler kendilerini yağlayabilme özelliğine sahiptirler ve bu sayede düşük sürtünmenin gerektirdiği bazı durumlarda tercih edilirler. Aramid bu polimerin bir ürünüdür ve çeliğe göre çok iyi yoğunluğa ve mekanik dayanıma sahip bir malzemedir.

Polipropilen: Bu polimer hafif ve düşük sıcaklıkta yumuşama özelliğine sahiptir. Genellikle polietilenin yerine tercih edilmesinin sebebi kimyasal aktifliğinin daha yüksek olmasıdır. Elektrik iletkenliği ıslak alanlarda dahi oldukça düşük bir polimerdir. Oda sıcaklığında mekanik dayanımları oldukça iyidir ve genellikle beyaz eşyaların üretiminde ve otomotiv parçalarının imalatında kullanılmaktadır.

Poliasetal: Tokluğu, rijitliği, mekanik dayanımı ve aşınma direnci yüksek bir malzemedir. Ergime derecesi diğer termoplastiklere göre daha yüksek sayılabilir. Genellikle POM adıyla bilinmektedir. Çeşitli elektronik ürünlerde, otomotiv parçalarında ve yat endüstrisinde kullanılmaktadır.

Polikarbonat: Sert, darbeye karşı dayanımı iyi olan pahalı bir malzemedir. Yüksek sıcaklıklarda yumuşayan, kolayca renklendirilip cam berraklığında elde edilebilen bir polimerdir. Çeşitli kimyasal maddelere karşı dayanımı oldukça düşüktür. Genel olarak

kullanıldığı alanlar arasında ev eşyaları, optik cihazlar ve çeşitli elektronik cihazlar yer almaktadır.

Polimer matrisli kompozitlerin imalatında kullanılan bazı termoplastik polimerlere yukarıda değindik. Kullanılan bazı termoplastik matrislerin mekanik ve termal özellikleri Çizelge 3.3'te yer almaktadır.

Çizelge 3.3 Bazı termoplastik matrislerin mekanik ve termal özellikleri (Can, 2017)

Malzeme Adı	Öz Kütle g/cm ³	Çekme Muk. MPa	Elastik Mod. MPa	Sıcaklık Sınırı °C
Poli-Etilen (PE) (düşük yoğunluk)	0.92-0.93	7-17	105-280	80
Poli-Etilen (PE) (yüksek yoğunluk)	0.95-0.96	20-37	420-1260	100
Poli-Vinil-Klorür (PVC)	1.50-1.58	40-60	2800-4200	110
Poli-Propilen (PP)	0.90-0.91	50-70	1120-1500	105
Poli-Stiren (PS)	1.08-1.10	35-68	2660-3150	85
Akronitril-Butadien-Stiren (ABS)	1.05-1.07	42-50	-	75
Poli-Met-Metha-Arkilik (PMMA)	1.11-1.20	50-90	2450-3150	125
Poli-Tetra-Flor-Etilen (PTFE) (Teflon)	2.10-2.30	17-28	420-560	120
Poli-Amids (PA) Naylor 6.6	1.06-1.15	60-100	2000-3500	82

3.6 Polimer Matrisli Kompozitlerin Takviye Malzemeleri

Polimer matrisli kompozitlerin oluşumunda yaygın olarak kullanılan matris malzemelerine önceki bölümde kısaca değinmiştik. Bu bölümde ise polimer kompozitleri, matris ile bir araya gelerek oluşturan takviye malzemelerini ele alacağız. Bilindiği üzere en yaygın üretilen polimer kompozitler ince elyafların matrislerle bir araya gelmesinin sonucunda elde edilirler. Takviye elemanının yani, kullanılan elyafın ana malzeme içerisindeki mevcut dağılımı üretilen kompozitin mekanik özelliklerini belirlemektedir. Üretilen kompozit parçanın kullanılacağı yere göre, istenen mekanik özellikler çerçevesinde elyaflar yatay doğrultuda, dikey doğrultuda veya liflerin yönlerine göre farklı açılarda matris malzemesi içinde kullanılabilir. Örneğin paralel yerleştirilen elyafın eksenler doğrultusunda mekanik özellikleri artabilirken, eksenlere dik doğrultuda bu özellikler azalmaktadır (Kim ve Mai, 1998). Kompozit yapılarda kullanılan elyafın mukavemeti imal edilen kompozit malzemenin mukavemetini belirleyen en önemli unsurdur. Mukavemeti belirleyen bir diğer önemli unsur ise elyaf ile

matris arasındaki bağıdır. Matris fazı ile takviye malzemesinin uyumlu bir bağ oluşturması oluşan kompozitin iyi mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. Matris malzemesinin içerisindeki boşluklu yapılar ve nem oranı takviye elemanı ile arasındaki bağı bozabilmektedir. Bunun da sonucunda düşük mekanik özelliklere sahip kompozit malzeme ortaya çıkacaktır. Elyaf takviyeli bu yapılarda kullanılan elyafın oranı ile imal edilen parçanın mukavemeti birbiri ile ilişkilidir. Belirli bir değere kadar elyaf oranını arttırdığımızda malzemenin mukavemeti artmaktadır. Elyaf oranını daha fazla arttırdığımızda ise kompozit yapının içerisinde matris yoğunluğu azalacağından, matris sahip olduğu işlevleri göremeyecek ve elyafları bir arada tutamayacağından bunun neticesinde olumsuz bir durum ortaya çıkacaktır. Mukavemeti belirleyen bir diğer unsur ise elyaf kalınlığıdır. İnce elyaf takviyesiyle hazırlanan kompozitlerde matris ile elyaf arasındaki temas yüzeyi, kalın elyaf ile hazırlanan kompozite göre çok daha fazla olacağından dolayı, bu ikisinin arasındaki bağlar yükü kolaylaştırdığı için ince elyaf ile hazırlanan kompozitler daha mukavemetlidir.

Günümüz kompozit endüstrisinde takviye malzemesi olarak cam elyaf, karbon elyaf ve aramid elyaf oldukça yaygın kullanılmaktadır. Bu bölümde polimer matrisli kompozitlerin imalinde en çok kullanılan bu elyaflara değinilecektir.

3.6.1 Cam Elyaf

İngilizcede fiberglas olarak bilinen bu malzeme polimer matrisli kompozitlerde en çok kullanılan takviye elemanıdır. Cam elyaf eritilmiş camın belirli çaplara sahip deliklerden geçirilmesi sonucu elde edilmektedir. İstenilen çap ve boylarda imal edilebilen bir takviye malzemesidir. Üretilen cam lifleri çevresel ve kimyasal etkilere karşı korumak için ve mukavemetlerini arttırmak için yüzeyleri çeşitli polimerler ile kaplanır. Cam elyaf elastik bir malzemedir. Çeşitli yüklemeler altında kopma sınırına kadar uzayıp yükün kalkması sonucunda hiçbir akma özelliği göstermeyen bir takviye edicidir (Totiger vd., 2015). Yüksek mukavemet, yüksek kimyasal dirence ve iyi yalıtım özelliğine sahip malzemelerdir. Birim ağırlık başına mukavemetleri çeliğinkinden daha fazladır. Cam elyaf ile takviye edilen kompozitlerin imalatının kolay ve düşük maliyetli olmasının yanında nem absorbe etmemesinden dolayı çeşitli sektörlerde kullanıma uygun görülmektedirler. Bu sektörler arasında inşaat, havacılık, otomotiv vb. yer almaktadır.

Cam elyafın üretilen farklı tipleri mevcuttur. Sahip olduğu bazı özellikler ve üretim amacı belirlenerek bu elyaflara çeşitli isimler verilmektedir. Bunlar arasında E-cam, S-cam, D-cam ve A-cam'dır. E-camı sahip olduğu yalıtım özelliği ve üstün mekanik özellikleri sayesinde yoğun olarak kullanılan bir elyaftır. Burada 'E' elektrikten gelir ve bu elyaf elektrik uygulamaları üretilmiştir. Bunlarında yanında yapısal uygulamalar ve çeşitli dekorasyon uygulamalarında da kullanılmaktadır. S-camı ise yüksek mukavemet ve tokluğa sahip bir elyaf malzemedir. Buradaki 'S', silikadan gelmektedir. A-camı veya alkali, yüksek oranda alkali içeriğine sahip bir elyaf malzemesidir. Elektriğe karşı dirençleri az fakat kimyasallara karşı dirençleri oldukça yüksektir. Genellikle şişe imalatlarında kullanılmaktadır. Bu malzemenin takviye elemanı olarak kullanıldığı bir örneğe rastlanmamaktadır. C-camı veya korozyon camı olarak adlandırılan cam türünün ise düşük mekanik özellikleri mevcuttur fakat kimyasal dirençleri oldukça yüksektir. Buradaki 'C' korozyondan gelmektedir. Korozyona karşı direncin yüksek istendiği imalatlarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Çeşitli tanklarda yüzey kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır. Cam elyaf türlerinin mekanik özellikleri ve içerdiği katkı malzeme oranları Çizelge 3.4'te yer almaktadır.

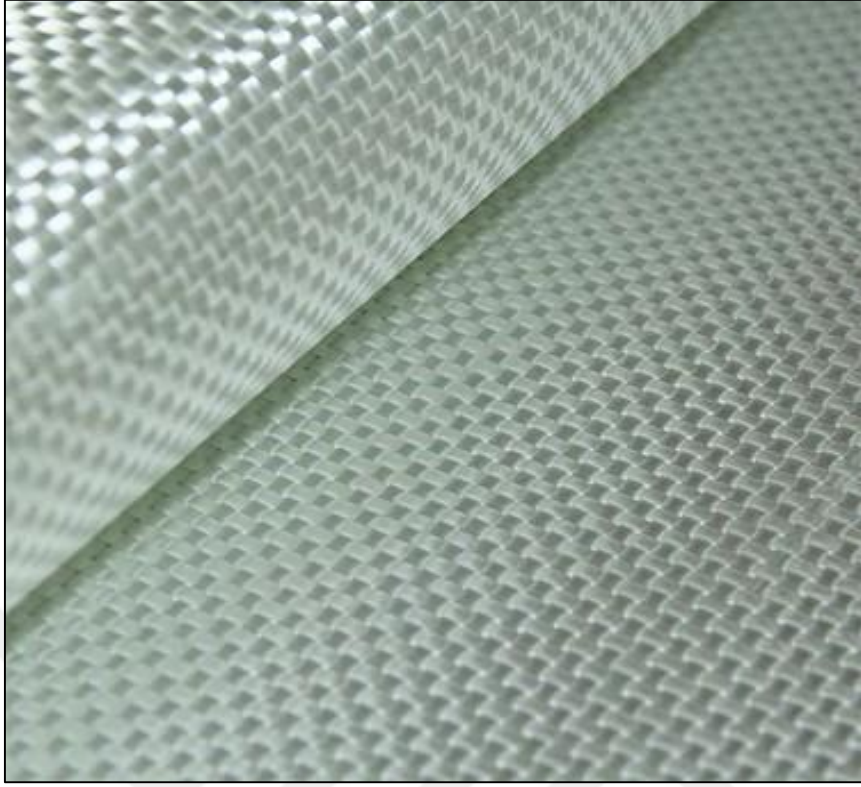
Çizelge 3.4 Cam elyaf türlerinin mekanik özellikleri (Can, 2017)

Özellikler	Cam Tipi			
	A	C	E	S
Ozgül ağırlık (gr/cm ³)	2.50	2.49	2.54	2.48
Elastik modül (GPa)	-	69.0	72.4	85.5
Çekme mukavemeti (MPa)	3033.0	3033.0	3448.0	4585.0
Isıl genleşme katsayısı (m/m ^o Cx10- ⁶)	8.6	7.2	5.0	5.6
Yumuşama sıcaklığı (°C)	727.0	749.0	841.0	970.0
Katkı Malzemeleri (%)				
SiO ₂	72.0	64.4	52.4	64.4
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	0.6	4.1	14.4	25.0
CaO	10.0	13.4	17.2	-
MgO	2.5	3.3	4.6	10.3
Na ₂ O, K ₂ O	14.2	9.6	0.8	0.3

İmal edilen cam lifleri farklı tipte dokunarak cam elyafını oluşturmaktadır. Farklı dokuma tiplerine göre imal edilen cam elyafların kullanım alanları ve sahip olduğu mekanik özellikler değişebilmektedir. Bu açıdan lif yönelim açısı oldukça önemlidir. Elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitler bilindiği üzere anizotropik yapıya sahip malzemeler olduğundan takviye elemanı olarak kullanılan cam elyafı oluşturan cam liflerinin dokuma açısı üretilen polimer kompozitin mekanik özelliklerini belirlemektedir. Değişen lif yönelimine göre mekanik özelliklerde değişebilmektedir. Cam elyaf malzemesinin en iyi uyum sağladığı polimer matrisler arasında polyester yer almaktadır. Aynı zamanda cam elyaf bütün matris malzemesi olarak kullanılan termoplastik polimerle iyi bir kompozit yapı oluşturmaktadır. Örnek bir cam iplik malzemesi Şekil 3.7’de, dokuma cam elyaf ise Şekil 3.7’de sunulmuştur.



Şekil 3.7 Cam iplik malzeme



Şekil 3.8 Dokunmuş cam elyaf

3.6.2 Karbon Elyaf

Cam elyafa göre daha yüksek mukavemete ve düşük yoğunluğa sahip bir malzemedir. Cam elyaftan sonra takviye malzemesi olarak en çok kullanılan bir elyaf çeşididir. Isıya karşı yüksek dayanımı, korozyona karşı gösterdiği direnç, yüksek sertlik ve yorulma dayanımı sahip olduğu üstün özelliklerdir. Matris olarak bütün reçinelerle iyi bir kompozit yapı oluşturabilir. Epoksi reçine ile birleşiminde üstün özelliklere sahip bir kompozit yapı elde edilmektedir. Üretim maliyetleri oldukça yüksek olduğundan performansın maliyetin üstünde istenilen sektörlerde tercih edilmektedir. Bu sayede havacılık ve denizcilik sektöründe kullanılmaktadır. Üretim maliyetlerinin yüksek oluşu kullanım alanlarını diğer elyaf çeşitlerine göre kısıtlamaktadır. Ülkemizde son yıllarda yaşanan depremler sonrasında hasar gören binaların güçlendirme işlemlerinde kullanılmakta olan ve yaygınlaşan bir malzemedir. Şekil 3.9 ve 3.10'da sırası ile karbon fiber malzemesi ve taşıyıcı elemanlardaki kullanımı gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Karbon elyaf malzemesi



Şekil 3.10 Karbon elyaf ile taşıyıcı eleman güçlendirmesi

3.6.3 Aramid Elyaf (Kevlar)

Yüksek çekme mukavemetine, düşük ağırlığa, yüksek darbe direncine sahip ve kolay şekillendirilebilen bir malzemedir. Bazı kimyasal maddelere karşı direnci yüksek olmasına rağmen asitlerden etkilenmektedir. Yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı çok iyi olan bir malzemedir. Kevlar 29 ve keklar 49 olarak adlandırılan iki çeşidi mevcuttur. Bunlardan keklar 49'un elastiklik modülü keklar 29'a göre çok daha yüksektir. Farklı sayıdaki polimer matrislerle iyi bir kompozit yapıya uygunluk göstermektedir. Bazı uygulamalarda aramid elyaf karbon ve cam elyaf ile birlikte kullanılabilir. Bu netice sayesinde havacılık, otomotiv sektöründe kullanılmaktadır. Sarı renkli bir malzemedir, aramid elyafarla takviye edilen kompozit malzemeler cam elyaf ile takviye

edilen kompozitlerden çok daha hafiftir. Aramid elyaf lifleri ve dokuması sırası ile Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de yer almaktadır.



Şekil 3.11 Aramid elyaf lifleri



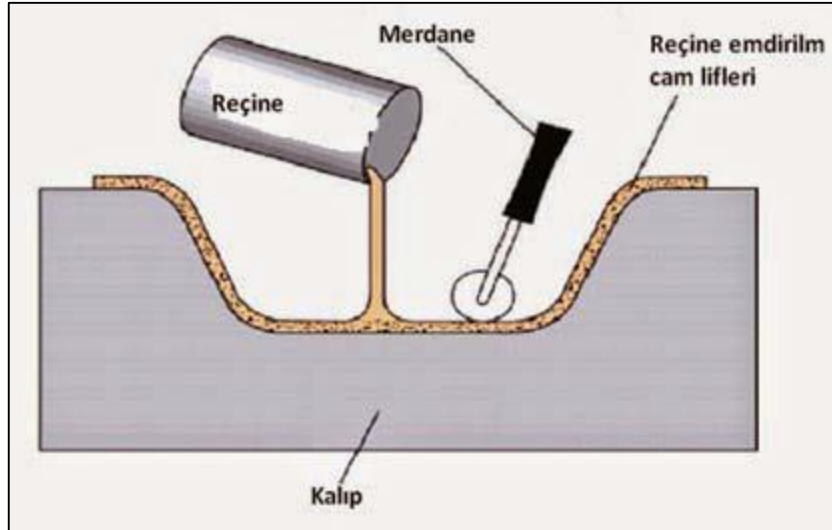
Şekil 3.12 Dokunmuş aramid elyafı (Kevlar)

3.7 Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Polimer matrisli kompozit malzemelerin imalatında seçilecek üretim yöntemi, kompozit malzemedeki istenilen özelliklere, matris malzemesine, takviye elemanına ve parça şekline göre değişiklik gösterebilmektedir. Tabii imalat sürecinde seçilen üretim yöntemi malzemenin kullanılacağı alana ve maliyetlere de bağlı olabilmektedir. Polimer matrisli kompozitler matris malzemenin takviye malzemesi ile oluşturduğu ara yüzey neticesinde istenilen özellikteki kompozit yapıya göre makro seviyede bir araya getirilmesi ile elde edilirler. İmal edilen kompozit yapıların özellikleri matris ve takviye elemanına bağlı olduğu gibi üretim yöntemine ve üretim koşullarına da bağlıdır. Matris ve takviye malzemelerinin ilk aşamada bir araya gelmesi ve çeşitli dolgu malzemeleri katalizör veya sertleştiricilerle takviye edilmesinin sonucunda belirli bir süre sonra gerçekleşen polimerizasyon çok önemli bir aşamadır. Polimerizasyon olarak adlandırdığımız sertleşme adımından önce matris malzeme sıvı haldeyken bu işlem sonrasında matris malzemesi katı faza geçer ve elyaf ile sıkı bir bağ oluşturur. Sertleşme işleminde ısı, basınç ve zaman faktörleri çok etkilidir. Polimer matrislerin imalatında kullanılacak tüm üretim tiplerinde takviye malzemesinin matris ve bağlayıcılarla iyi ıslatılması yani reçine dağılımının homojen ve eşit olması ve takviye malzemesinin doğru bir şekilde konumlandırılmış olması dikkat edilmesi gereken en önemli işlemdir. Polimer matrisli kompozit malzemelerin imalatında istenen numuneye göre kullanılan çeşitli üretim yöntemleri mevcuttur. Kullanılan yöntemler arasında açık kalıplama ve kapalı kalıplama yöntemleri mevcuttur. Açık kalıplama yöntemlerinin genel prensibi viskozitesi düşük olan matris malzemenin takviye elemanı tarafından emilmesi esasına dayanmaktadır. Bu yöntemler arasında el yatırması yöntemi oldukça yaygın ve basit olarak öne çıkmaktadır. Polimer matrisli kompozitlerin üretim yöntemlerinden bazılarını bu bölümde değinilmiştir.

3.7.1 El Yatırması Yöntemi

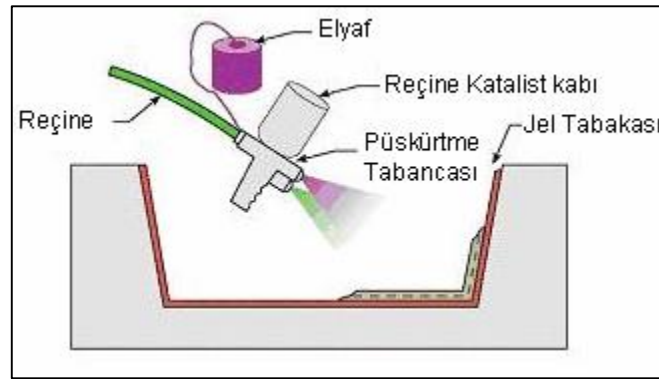
Polimer matrisli kompozitlerin imal edilmesinde en çok ve en yaygın şekilde kullanılan düşük maliyetli bir üretim tekniğidir. Bu yöntemde üretilecek kompozit yapıya göre kalıp hazırlanır ve takviye malzemeleri kalıbın içerisine yerleştirilerek matris malzemeleri takviye edilir. Matris ilavesi yapılan kompozit numunesi belirli bir süre bekletildikten sonra çıkarılarak kompozit yapının şekline göre çeşitli işlemlere tabi tutulur. Bu imalat yönteminde dikkat edilmesi gereken en önemli husus matris takviyesi sırasında takviye elemanı arasında gözeneklerin olmamasıdır. Çünkü mevcut gözenekler mukavemet gibi mekanik özelliklere olumsuz etki yapmaktadır. Bu imalat tekniğinde genellikle matris malzemesi olarak termoset polimerler (epoksi, polyester) kullanılmaktadır. Takviye elemanı olarak ise elyaflar tercih edilmektedir. Bu teknik ile karmaşık yapılara sahip kompozitlerin imalatı mümkündür ve kalıp maliyeti oldukça minimum seviyededir. Bu üretim tekniğinde işlemi yapacak olan personel tecrübeli olmalı ve aşamalara hâkim olmalıdır. İşçiliği oldukça fazla olan bir imalat tekniğidir. İşlemi yapan personel takviye malzemesine sürülen reçinenin kalınlığını iyi ayarlamalı ve reçineyi homojen dağıtmaya özen göstermelidir. Aksi takdirde boşluklu bir yapı oluşabilir bu da istenmeyen bir durumdur. El yatırması yöntemi şematik gösterimi Şekil 3.13'te yer almaktadır.



Şekil 3.13 El yatırması yöntemi şematik gösterimi (Gülmez, 2018)

3.7.2 Püskürtme Yöntemi

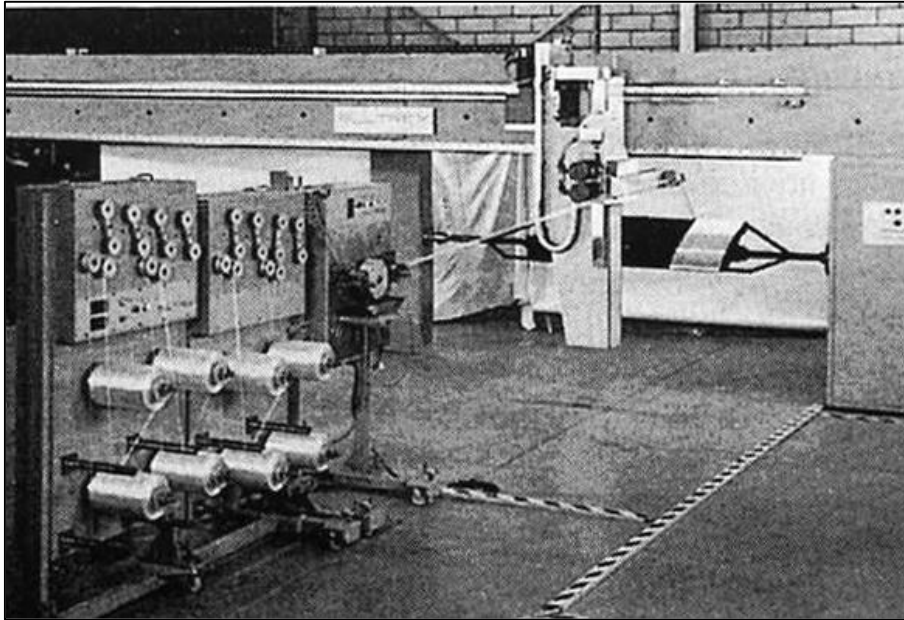
Bu imalat tekniğinde istenilen kompozit parçaya göre hazırlanan kalıba takviye malzemesi ve sıvı haldeki matris püskürtülerek kompozit yapı elde edilmeye çalışılmaktadır. El yatırması yöntemine benzer fakat daha modern bir teknik olarak karşımıza çıkmaktadır. Burada kullanılan takviye malzemesi püskürtme düzeneğinin üzerinde bulunan bir düzenek yardımıyla kırılıp kalıba püskürtülmektedir. Kullanılan takviye malzemesinin herhangi bir doğrusal yerleşimi mevcut olmayıp tamamen tabanca vasıtasıyla açık kalıba püskürtme şeklinde dağınık halde yerleşmektedir. Bu yöntem ile karmaşık yapılar imal edilmektedir. Takviye püskürtme şeklinde olacağından daha az takviyeli olan bir üretim tekniğidir. El yatırması yöntemi gibi tek tip bir kalıp kullanıldığından daha az maliyetli olarak karşımıza çıkmaktadır. Matris ve takviye elemanı püskürtme şeklinde olduğundan el yatırması tekniğine göre daha az işçiliktir ve ürün kompozisyonu daha iyidir. Bu yöntemin önemli bir dezavantajı püskürtülen elyaf ile matrisin oranıdır. Elyaf oranı belirli bir oranın üstüne çıktığında matris püskürtülemez veya püskürtüldüğünde de elyaf malzemesi ile iyi bir birleşim sağlayamaz bu da istenmeyen bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun neticesinde matris malzemesinin dağılımı homojen bir şekilde olmayabilir. Açık kalıp sistemi ile bir imalat tekniği olduğu için matris içerisine yerleştirilen çeşitli kimyasal sertleştiriciler ortama zarar verebilmektedir. Bu yöntemle genellikle otomobil kaportaları imal edilmektedir. Püskürtme yöntemi şematik gösterimi Şekil 3.14'te yer almaktadır.



Şekil 3.14 Püskürtme yöntemi şematik gösterimi (Deniz, 2005)

3.7.3 Elyaf Sarma Yöntemi

Elyaf sarma tekniği modern ve tam otomasyonla imalat gerçekleştirilebilen bir yöntemdir. Bu teknikte kullanılan takviye malzemeleri yani elyaflar matris malzeme ile dolu tanklardan geçirilerek birbirine sarılmaktadır. Matris ile takviye arasında iyi bir uyum sağlanabilen ve yüzey pürüzlülüğü gayet verimli olan bir yöntemdir. İmal edilen kompozit yapının istendiği özelliklere göre sarım esnasındaki kalınlığı ve sarım açıları belirlenir. Bu teknik yardımıyla imal edilen kompozit yapıların mukavemetleri oldukça yüksektir. Kullanılan reçineler genellikle epoksi ve polyeester reçinelerdir. Termoset polimerler matris malzemesi olarak kullanıldığı gibi termoplastik polimerlerde matris olarak kullanılabilir. Bu yöntemde sarma işlemi bir makara yardımı ile yapılacağından sadece belirli geometrilerdeki parçaların imalatında kullanılmaktadır. Bu da kullanım alanlarını sınırlamakta önemli bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Genellikle silindirik geometriye sahip parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Genel olarak silindirik borular, araba şaftları, silindirik bazı tankların üretiminde tercih edilen bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Tamamen makineleşme ile çalışan bir sistem olduğundan neredeyse işçilik yok denilecek seviyededir. Elyaf sarma yontemimim şematik gösterimi şekil 3.15'te sunulmuştur.

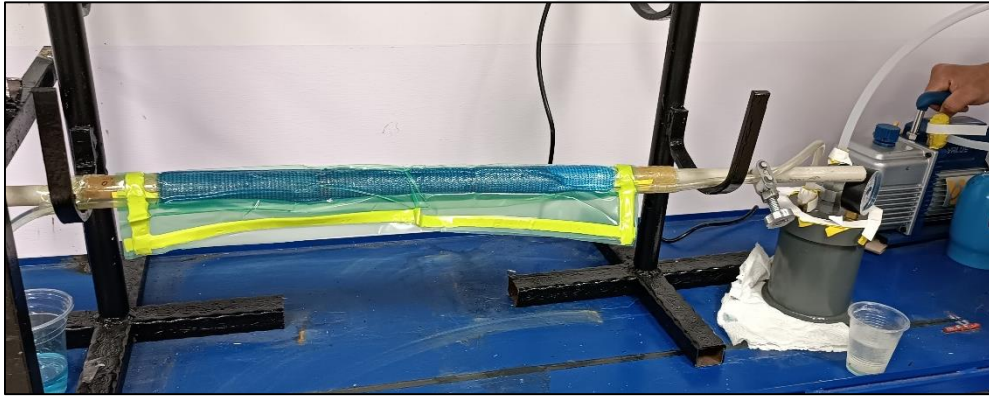


şekil 3.15 Elyaf sarma yöntemi şematik gösterimi (Sönmez, 2009)

3.7.4 Reçine Transfer Yöntemi

Reçine transfer yönteminin farklı türleri olmakla beraber genel olarak bu teknikte kullanılan prensibi şu şekilde izah etmek mümkündür. Bu yöntemde üretilecek olan kompozit yapının uzunluğuna ve geometrisine bağlı olarak kalıp malzeme üretilir. Kullanılan kalıp malzemeler genel olarak üretilen kompozitin kendisinden kolayca ayrılmasını sağlamak için karton, alüminyum ve alaşımlarından olabilir. Hazırlanan kompozit yapının kalıbına elyaf malzemesi sarılmadan önce kürlenme işleminden sonra kolayca ayrılması adına bant sarılır ve bu bandın üzerine malzemenin geometrisine ve kalınlığına göre elyaf sarılır. Elyafın üzerine ayırıcı kumaş serildikten sonra reçinenin homojen dağılmalarını sağlamak adına grid kumaşı serilir. Bu işlemlerin ardından ısıya dayanıklı vakum sızdırmaz bantlarla kalıp yüzeyi kapatılır ve reçine girişi sağlandıktan sonra ısıya dayanıklı kalıp hazırlamaya yarayan naylonlar sayesinde hava geçirmez bir kalıp daha oluşturulur. Vakum testi yapıldıktan sonra reçine hazırlanır ve bir vakum pompası yardımıyla reçine aktarılması sağlanır. Bu yöntemde matris malzeme olarak çoğunlukla epoksi reçine tercih edilmektedir. Takviye elemanı olarak ise istenilen nihai ürünün mekanik özelliklerine ve kullanım alanlarına göre maliyet faktörleri de göz önünde bulundurularak cam elyaf, karbon elyaf ve aramid elyaf tercih edilmektedir. İyi yüzey pürüzlülüğü sağlayan bir yöntemdir. Bu işlemde kürlenme işlemi genel olarak oda sıcaklığında 24 saat süre ile gerçekleşmektedir. Kullanılan epoksi malzemesinin içerisine kürlenmeye yardımcı olabilmesi adına bir çeşit kimyasal sertleştiriciler eklenmektedir. Bu yöntemle oldukça iyi kalınlığa sahip kompozit yapılar üretilebilir ve elyaf yoğunluğunu oldukça makul sağlayan bir tekniktir. İmal edilen yapılar reçinenin homojen dağılması yardımıyla iyi mukavemete sahip olabilmektedir. Yaygın olarak kullanılan bir polimer kompozit üretim tekniğidir. Üretilen kompozitin türüne göre işçiliği değişebilmektedir. Kompleks yapıların aynı yüzey ve kalitede üretilmesini kolaylaştıran bir tekniktir. Dikkat edilmesi gereken en önemli detaylar arasında seçilen kalıbın kullanılan takviye ve matris malzemedeki kaynaklı kürlenme işleminden sonra üretilen numuneden ayrılabilmesine dikkat edebilmektir. Bunun dışında ikincil kalıp oluştururken kalıbın zarar görmemesi gerekir ve vakum testi yapıldığında basınç değerinin istenilen değerde olmasına önem gösterilmelidir. Kullanılan reçine ve ek diğer kimyasalların oranını iyi belirlemek gerekir bu sayede matrisin viskozitesi önemli bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır. Farklı reçine transfer yöntemleri kullanılmaktadır. Fakat yaygın

olarak kullanılanlar arasında vakum pompası yardımı ile reçine transferi sağlayan tekniktir. Polimer matrisli kompozitlerin hızlı homojen dağılımda iyi mekanik özelliklerde üretilmesini sağlayan önemli ve yaygın bir üretim tekniği olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntemin sağladığı en büyük avantajlar arasında özellikle vakumlanan ve sonrasında reçine geçişine hazırlanan numunede matris homojen dağılırken kalıbın hazırlanma aşamasında veya diğer bileşenlerden kaynaklı çıkan bir sorunda biriken reçinenin de kalıp boyunca numuneden atılması vakum pompası çalıştığı sürece mümkündür. Bu sayede eşit bir şekilde dağılmış ve elyafla iyi bir yapı oluşturmuş reçine ve iyi pürüzlülüğe sahip numuneler elde etmek mümkündür. Vakum destekli reçine transfer kalıplama, kontrollü hızlı reçine kalıplama yöntemi, vakum destekli sıklık azaltma bu yöntem dâhilinde olup aynı prensiplere dayanan fakat istenilen kompozit yapıya göre tercih edilebilen yöntemler arasında karşımıza çıkmaktadır. Laboratuvarımızda kullandığımız vakum pompası yardımıyla reçine transfer tesisatı Şekil 3.16’da verilmiştir.

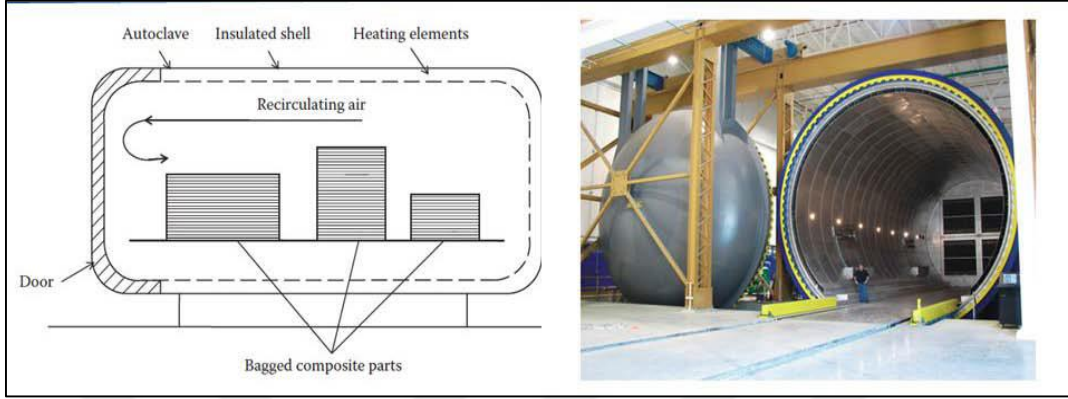


Şekil 3.16 Vakum pompası yardımıyla reçine transfer yöntemi

3.7.5 Otoklav Yöntemi

Otoklavda kalıplama yöntemi büyük parçaların imalatında tercih edilen bir tekniktir. Bu teknikte genel prensip şu şekildedir. Üretilmek istenen kompozit numune basıncı ayarlanabilen bir bölmeye yerleştirildikten sonra basınca maruz bırakılır. Basınç altındaki numune bir yandan da sıcaklığın etkisiyle kürlenmeye maruz kalır. Etki eden sıcaklığın iki aşamada olmasının sebebi ilk seviyede kabarcıkları gidermek ve viskoziteyi düşürmek olurken ikinci seviyede ise malzemenin polimerizasyonunu sağlamak yani

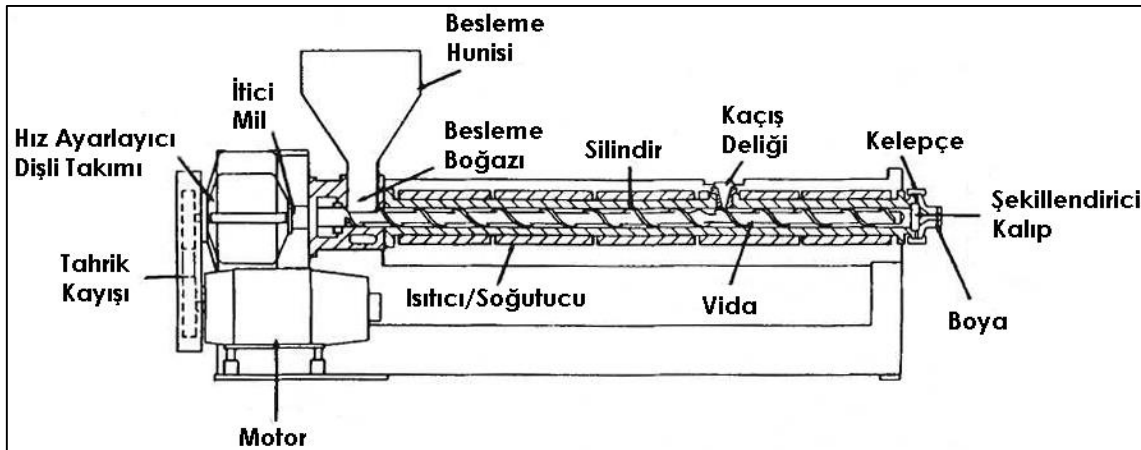
numunenin kürlenmesini sağlamaktır. Uzun süreli ve pahalı bir yöntem olmasına karşın genel olarak havacılık sektöründe kullanıldığı görülmektedir. Otoklav yöntemi şematik gösterimi Şekil 3.17de yer almaktadır.



Şekil 3.17 Otoklav yöntemi şematik gösterimi (Gülmez, 2018)

3.7.6 Enjeksiyon Yöntemi

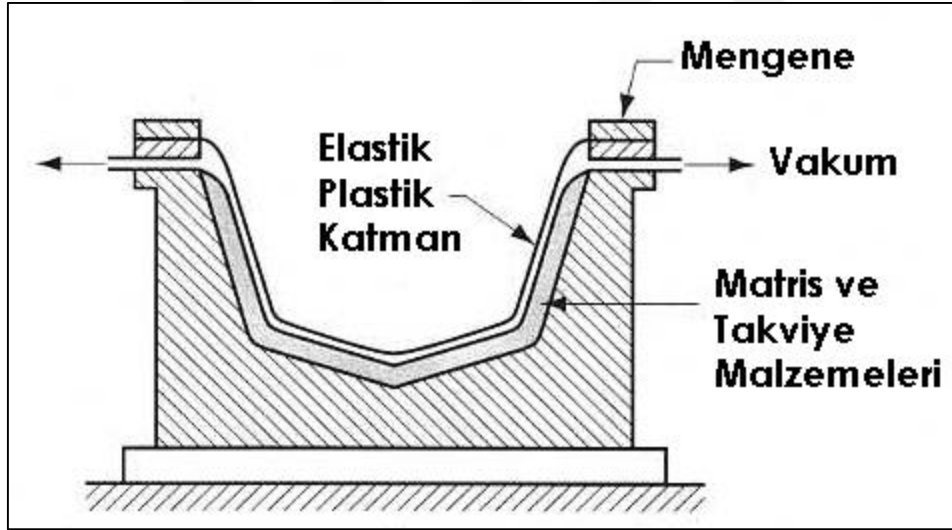
Bu imalat yönteminde matris ve takviye malzemesi bir hazneye dâhil edilerek sürekli dönen bir disk sayesinde karıştırılır ve bu sayede istenilen homojenlik elde edilir. İstenilen kompozit yapıya uygun hazırlanan kalıba bu karışım ilave edilir ve bu sayede kompozit malzeme imal edilir. Çoğunlukla kısa fiberli kompozitlerin imalatında tercih edilen bir yöntemdir. Plastik enjeksiyon yöntemi ile kompozit üretimi şematik gösterimi Şekil 3.18’de sunulmuştur.



Şekil 3.18 Plastik enjeksiyon yöntemi şematik gösterimi (Sönmez, 2009)

3.7.7 Vakumla Kalıplama Yöntemi

Vakumla kalıplama yöntemi polimer matrisli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan diğer açık kalıplama yöntemlerinde de olduğu gibi, prepreg ürüne şekil verecek olan kalıbın üzerine konulur. Bu yöntemde vakumlama kalıbın etrafına sarılan plastik bir elastik katman tarafından sağlanmaktadır. Serilen plastik katmanın altına uygulanan vakum yardımıyla malzeme atmosferik basınç sayesinde şekil alır ve hava kabarcıkları bu sayede alınarak ürün üretimi sağlanır. Vakumla kalıplama yönteminde malzeme üretilirken polimerizasyon için ısı ve basınç birlikte kullanılmaktadır.

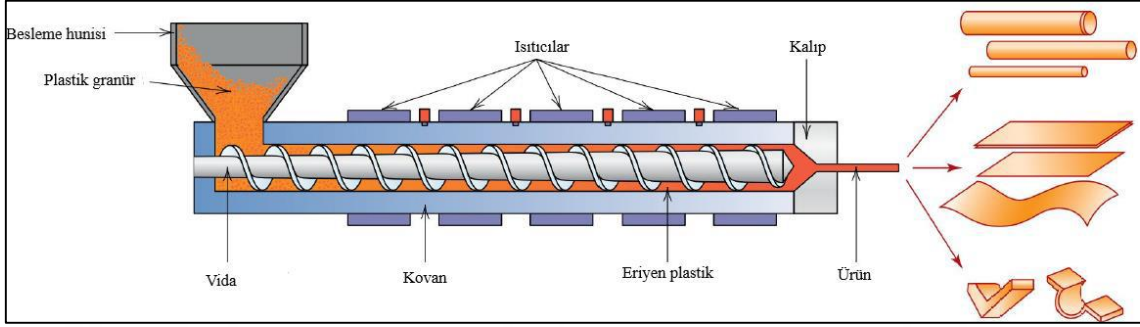


Şekil 3.19 Vakumla kalıplama yöntemi şematik gösterimi (Sönmez, 2009)

3.7.8 Ekstrüzyon Yöntemi

Ekstrüzyon yöntemi ile malzeme üretiminde kullanılan matris malzemesi belirli bir ısı altından yumuşatılarak üretilmek istenen parçanın şekline göre hazırlanan kalıptan geçirilir ve bu sayede malzeme üretimi yapılır. Genellikle plastik ve alüminyum malzemelerin karmaşık kalıplarda seri bir şekilde üretilmesini sağlayan bir tekniktir.

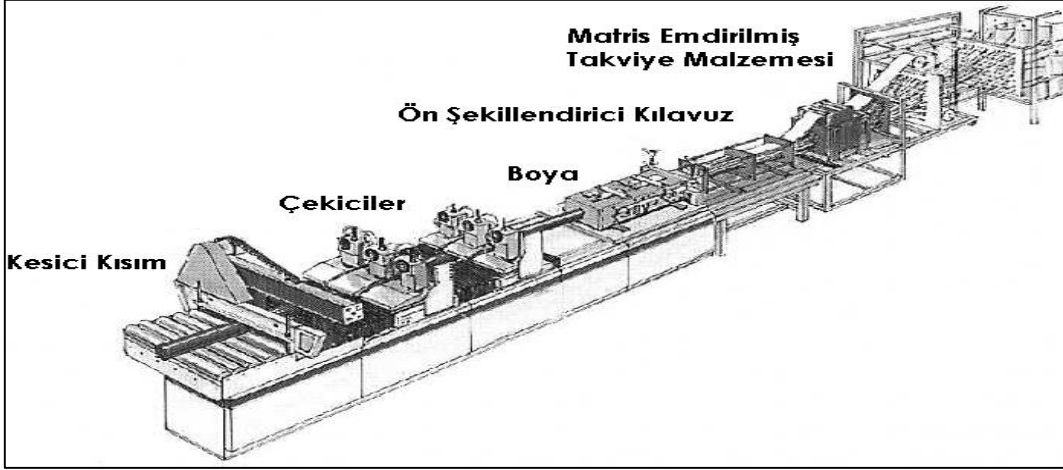
Yaygın kullanılan ve seri üretime uygun bir üretim yöntemidir. Burada kullanılan matris malzemeleri genel olarak termoplastik polimerlerdir. Silindirik profillerin, kutu profillerin üretiminde tercih edilen bit imalat tekniği olarak karşımıza çıkmaktadır. Ekstrüzyon yöntemi şematik gösterimi Şekil 3.20’de yer almaktadır.



Şekil 3.20 Ekstrüzyon yöntemi şematik gösterimi (Arı, 2022)

3.7.9 Profil çekme (Pultrüzyon) Yöntemi

Profil çekme yönteminde kullanılan takviye malzemesi filament sarma yöntemine benzer olarak matris banyosundan geçirilerek sonrasında çeşitli silindirik kalıplarda doğrusal ilerleyerek şekil alır. Silindirik çaplardan geçtiği yönde oldukça yüksek bir mukavemete sahiptir. Düşük maliyetli olmasına karşın büyük parçaların üretimine olanak sağlayan bir tekniktir. Belirli sabit geometrilere sahip uzun parçaların imalatında tercih edilen bir yöntemdir. Kullanılan matris malzemelerine baktığımızda epoksi reçine, polyester ve vinilester karşımıza çıkmaktadır. Takviye malzemesi olarak ise cam elyaf, karbon elyaf tercih edilmektedir. Profil çekme yöntemi şematik gösterimi Şekil 3.21’de verilmiştir.



Şekil 3.21 Profil çekme yöntemi şematik gösterimi (Sönmez, 2009)

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1 Malzeme Seçimi

Bu yüksek lisans tez çalışmasının bu bölümünde farklı açılarla sarılmış cam elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitten üretilen silindirik çarpışma kutuları imal edilirken malzeme seçiminden, laboratuvar ortamında numune üretimine ve üretilen numunelerin test aşamalarına kadar olan tüm süreçler ele alınmıştır.

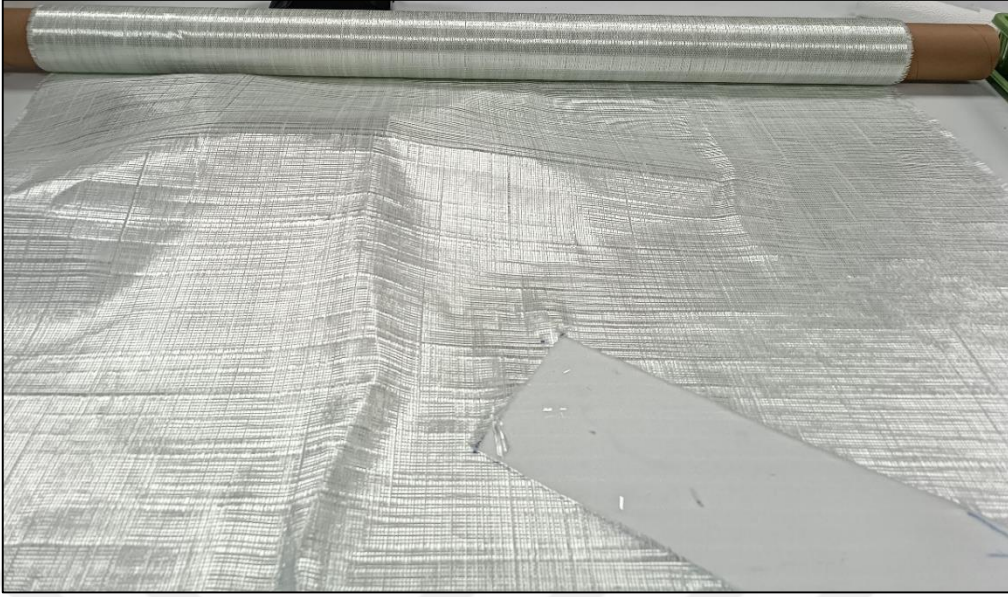
Cam elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeden üretilen silindirik çarpışma kutusu numuneleri imal edilirken kalıp malzemesi olarak Şekil 4.1’de yer alan 32 mm dış çapında karton silindirik çubuklar kullanılmıştır.



Şekil 4.1 Kalıp malzemesi olarak kullanılan 32 mm dış çapında karton silindirik çubuklar

Kalıp malzemesi olarak karton silindirik çubuk tercih edilmesinin en önemli sebebi üretilen numunenin kalıp malzemesinden ayırma aşamasında bir zorlukla karşılaşmadan numuneyi ayırmaktır. Karton suda yaklaşık olarak 10–15 dakika bekletildiğinde zayıflayacak ve bu sayede numuneden kolayca ayrılacaktır. Bu anlamda silindirik karton çubuklar en uygun seçenek olarak görülmüştür.

Laboratuvar aşamasında polimer matrisli kompozitleri imal ederken takviye malzemesi olarak tek yönlü 200 g/m² yoğunluğundaki cam elyaf (Şekil 4.2), matris malzeme olarak termoset polimer grubundan epoksi reçine (Hexon lr 160) ve sertleştirici (Hexon lh 160) (Şekil 4.3) kullanılmıştır.



Şekil 4.2 Takviye malzemesi olarak kullanılan cam elyaf malzemesi

İstenilen kompozit malzeme özelliğine ve geometrisine uygun olarak maliyet etkenleri de göz önünde bulundurularak takviye malzeme seçiminde cam elyaf (fiberglass) tercih edilmiştir. Cam elyaf sahip olduğu mekanik avantajlar sayesinde ve termoset polimer matrisleriyle bir araya geldiklerinde iyi bir kompozit yapı oluşturduklarından, bizim istediğimiz kompozit malzeme özellikleri çerçevesinde en uygun takviye elemanı olarak görülmüştür.

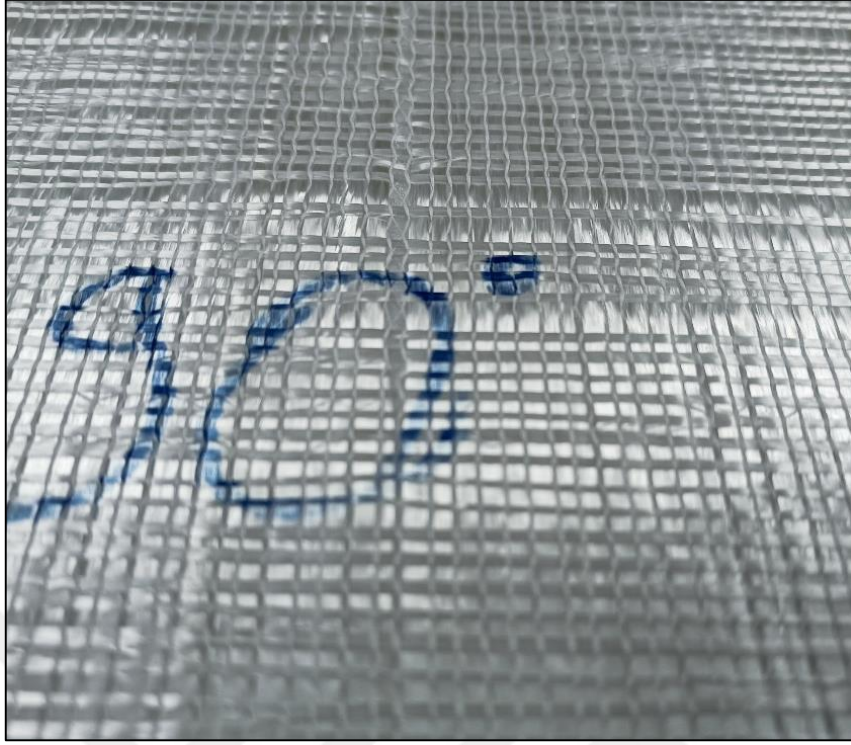


Şekil 4.3 Epoksi reçine ve sertleştirici malzeme

Üretilen numunelere reçine geçişi sağlandıktan sonra belirli zaman aralığında ve belirli sıcaklıkta reçinenin kürlenmesini sağlamak ve kolaylaştırmak adına kimyasal sertleştirici takviyesi kullanılmıştır. Kullanılan epoksi ve sertleştirici malzeme (Şekil 4.3).

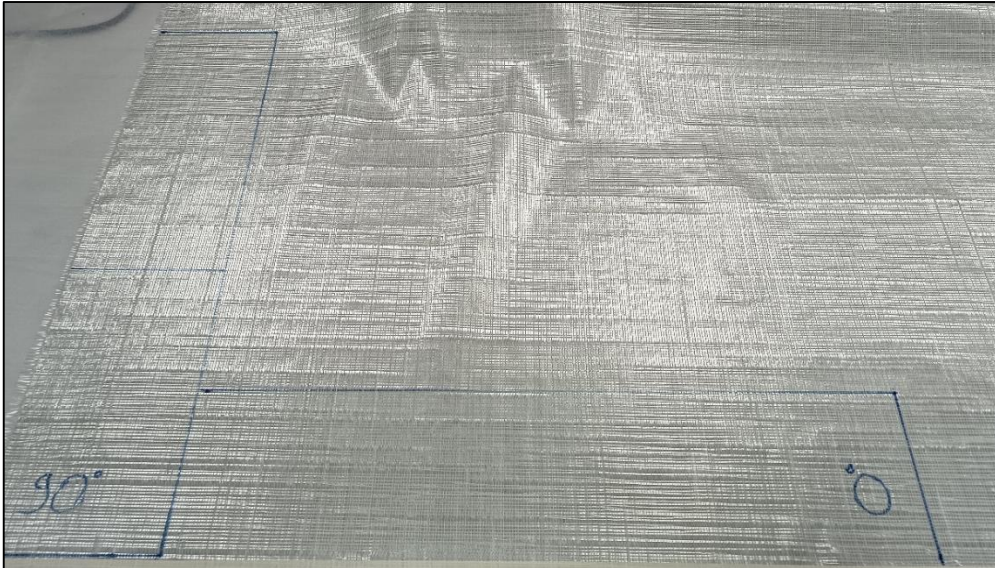
4.2 Numune Üretimi

Bu yüksek lisans tezinin laboratuvar aşamasında kompozit çarpışma kutusu numuneleri üretilirken, takviye malzemesi olarak kullanılan cam elyafın birbirinden farklı açılarla sarılması sonucunda elde edilen verilerin karşılaştırılması hedeflenmiştir. Cam elyaflar kendilerini oluşturan cam ipliklerinin farklı tipte dokumalarıyla meydana gelmektedirler. Sahip oldukları dokuma tiplerine ve yönüne bağlı olarak gösterdikleri sonuçlar neticesinde anizotropik yapıya sahiptirler. Yani cam elyafın dokuma türü kullanıldığı herhangi bir kompozit yapı takviyesinde etki altında kaldığı yükün sonrasında farklı mekanik özellikler sergileyebilmektedir. Numune üretimlerinde kullanılan elyaf, cam ipliklerinin tek doğrultuda yönelmesiyle dokunmuş (unidirectional) bir elyaf türüdür. Bu durum sayesinde elyaflar farklı açılarla kolay kesilebilmektedir. Rulo halinde sarılmış cam elyaf malzemesini üzerinde rahat çalışmak adına masaya açarak sıra olmaksızın 0° , 90° , $+45^\circ$, -45° , $+60^\circ$, -60° , $+30^\circ$, -30° 'lik açılarla en uygun sarım kalınlığı önceden yapılan deneme yanılma testleri neticesinde belirlenerek kesilmiştir. Kesilen bu açılı elyaflar arasında ilk etapta $(0, 90, 60, 30, 45)^\circ$ 'lik kesilen elyafların her biri bir numune oluşturacak şekilde 15 cm genişliğinde ve 66 cm uzunluğunda kesilmişlerdir. Buradan elde edilen 5 adet numuneye ek olarak $(+45, -45)^\circ$, $(+30, -30)^\circ$, $(+45, -45)^\circ$ ve $(0, 90)^\circ$ açılarında 15 cm genişliğinde ve 33 cm uzunluğunda elyaflar kesilerek, iki farklı açı tek numunede parantez içerisinde verilen sıra dikkate alınarak sarılmıştır. Buradan da elde ettiğimiz 4 numune neticesinde toplamda 9 adet numune elde edilmiştir. Farklı açılarda kesilen cam elyaf görselleri Şekil 4.5 - Şekil 4.8 aralığında verilmiştir.

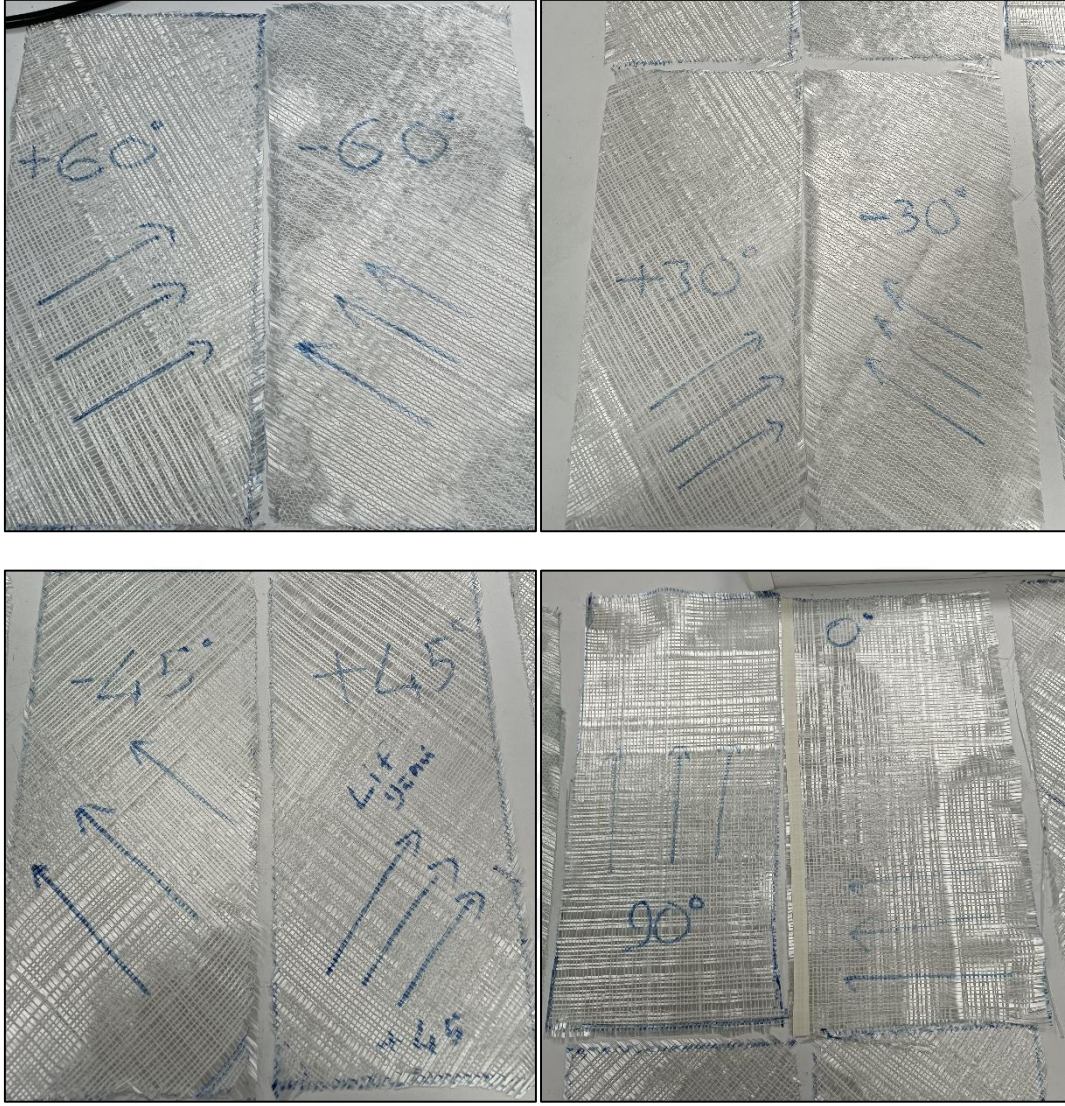


Şekil 4.4 Cam ipliklerinin dokuma yönünü gösteren örnek görsel

Elyaf malzemesi üzerinde açılar belirlenirken liflerin yönelimi dikkate alınması gereken en önemli unsur olarak karşımıza çıkmaktadır.

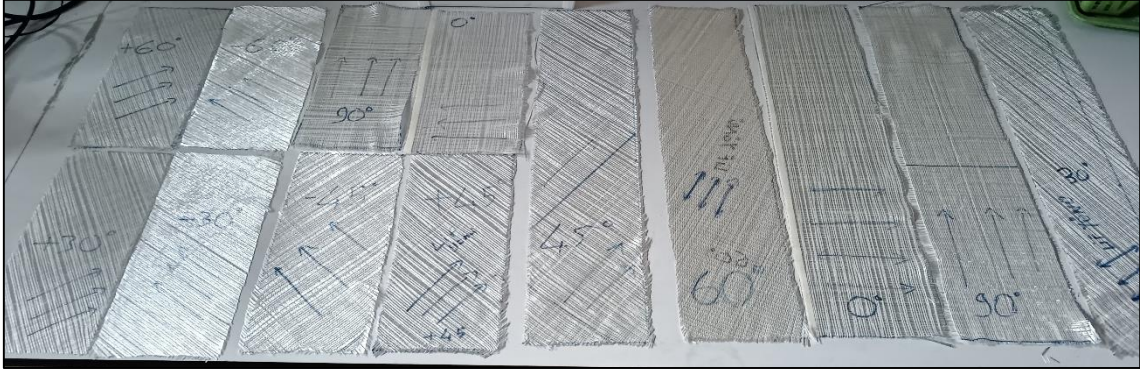


Şekil 4.5 Cam elyaf üzerinde liflerin dokuma yönü dikkate alınarak açılar belirlenmesi



Şekil 4.6 15X33 cm uzunluğunda (0, +45, -45, +30, -30, 90, +60, -60)°'lik cam elyaflar

15X33 cm uzunluğunda kesilen Şekil 4.6'da yer alan cam elyaflar tek numunede iki elyaf olmak üzere yukarıda belirttiğimiz sıra dâhilinde toplam uzunluğu (2x33) cm yani deneme yanılma yoluyla bulduğumuz en iyi ve makul kalınlık olan takribi 6.6 katlık bir elyaf sarımına tekabül etmektedir.



Şekil 4.7 15X33 ve 15X66 cm ölçülerinde belirlenen açılarda kesilen numuneler



Şekil 4.8 Açılı kesimler sonucunda cam elyafının son görüntüsü

Numune üretiminde kullanılan malzemeler hazır hale getirildikten sonra 3 adet silindirik karton çubuk üzerinde, her birine 3 adet numune gelecek şekilde hazırlık yapılmıştır. Böylelikle toplamda 3 adet silindirik kalıp malzemenin her birinden 3 adet numune elde etmek amacıyla 9 numune hazırlanmıştır. Bunu yapmamızdaki amaç numuneleri daha hızlı üretmek, aynı silindirik çubuk üzerinde hazırlanması neticesinde reçinenin kolay akışını sağlamak ve aynı yüzeyleri elde etmek. Bunun yanı sıra vakum yöntemi üretim şartlarının aynı olması istenmiştir.

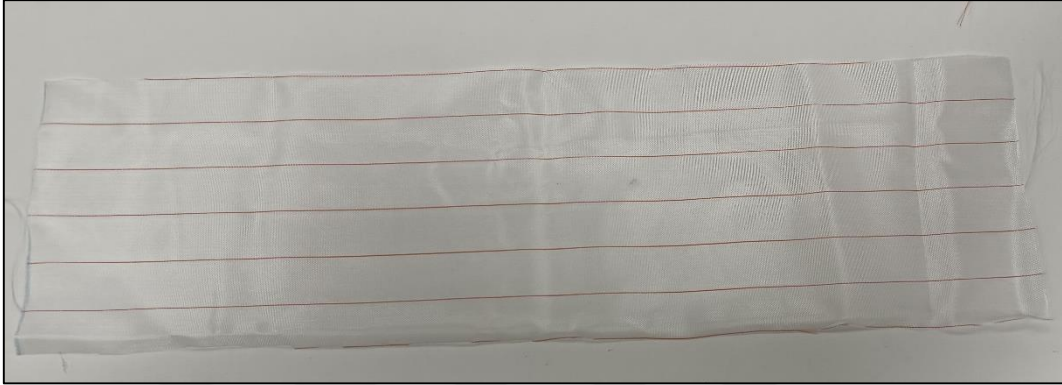
Cam elyafın farklı açılarda kesilip sarmaya hazır hale geldiği numuneleri hazırlama aşamasında reçine transferinden sonra numunenin karton çubuktan kolayca ayrılmasını sağlamak amacıyla silindirik karton çubuk boydan boya bant ile tek kat boşluksuz sarılmıştır. Bant sarma işleminden sonra kalıp malzeme elyaf sarma işlemine hazır hale gelmiştir (Şekil 4.9).



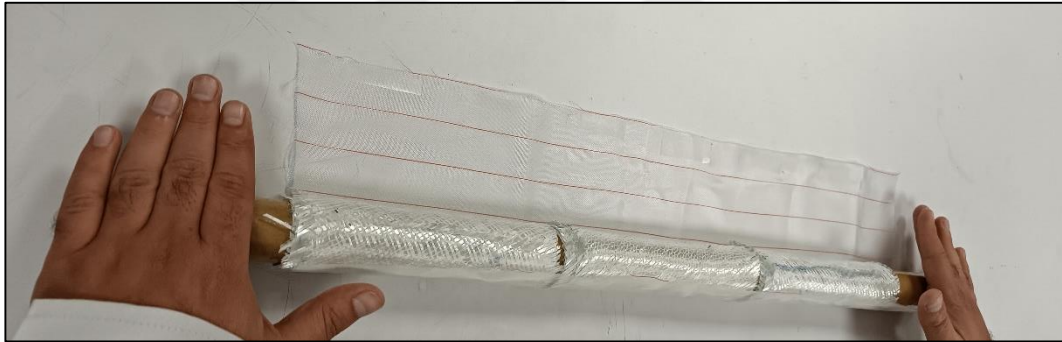
Şekil 4.9 Tek kat bantla sarılıp elyafa hazır hale gelen kalıp malzeme örneği

Elyaf sarmaya hazır hale gelen kalıp malzemesine kestiğimiz elyaflar masanın üzerine serilerek arada boşluk ve elyaf birikmesi kalmayacak şekilde yavaş bir şekilde sarılmıştır. Elyaf sarma işleminde elyafların birbirine daha iyi tutunması ve birikme olmaması adına elyafların arasına belirli mesafelerde seyrek bir şekilde reçine geçişi sırasında bir olumsuzluk yaratmamak suretiyle çift taraflı bantlar yapıştırılmıştır (Şekil 4.10). Yapılan bu işlem tüm elyaf sarma işlemi sırasında tüm numunelere uygulanmıştır.

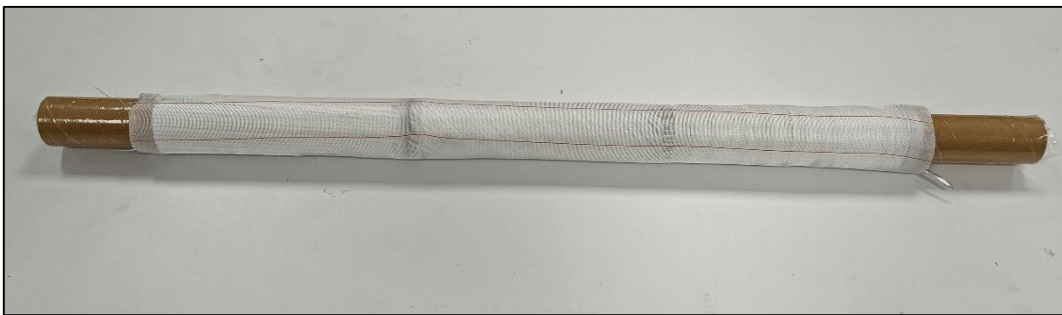
Elyaf sarma işleminden hemen sonra olan aşama elyafların üzerine ayırıcı kumaşı sermektir (Şekil 4.12). Ayırıcı kumaş adından da anlaşıldığı gibi reçinenin sertleşmesinden sonra numuneleri zorlanmadan diğer bileşenlerden çıkarmaya yarayan bir malzemedir. Bir diğer işlevi ise sertleşen cam elyaflara yapışmaz ve yüzey pürüzlülüğüne yardımcı olan bir malzemedir.



(a)



(b)



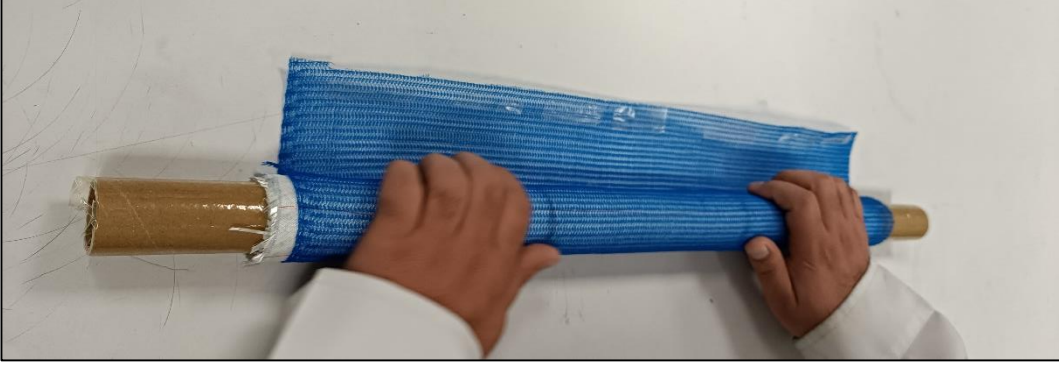
(c)

Şekil 4.12 Ayırıcı kumaş (a), Ayırıcı kumaş sarma (b), Ayırıcı kumaş serilmiş hali (c)

Ayırıcı kumaş serme işleminden sonra epoksi reçine geçişini kolaylaştırmak, reçine geçişini hızlandırmak ve reçinenin homojen dağılmasını sağlamak amacıyla ayırıcı kumaş üzerine grid adı verilen bir malzeme serilmiştir (Şekil 4.13).



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.13 Grid kumaşı (a), Grid sarma işlemi (b), Grid sarma işlemi bitmiş hali (c)

Grid sarma işlemi bittikten sonra numuneleri vakum torbasına alma işlemi yapılmıştır. Vakum torbası hazırlanırken kullanılan en önemli malzemeler arasında

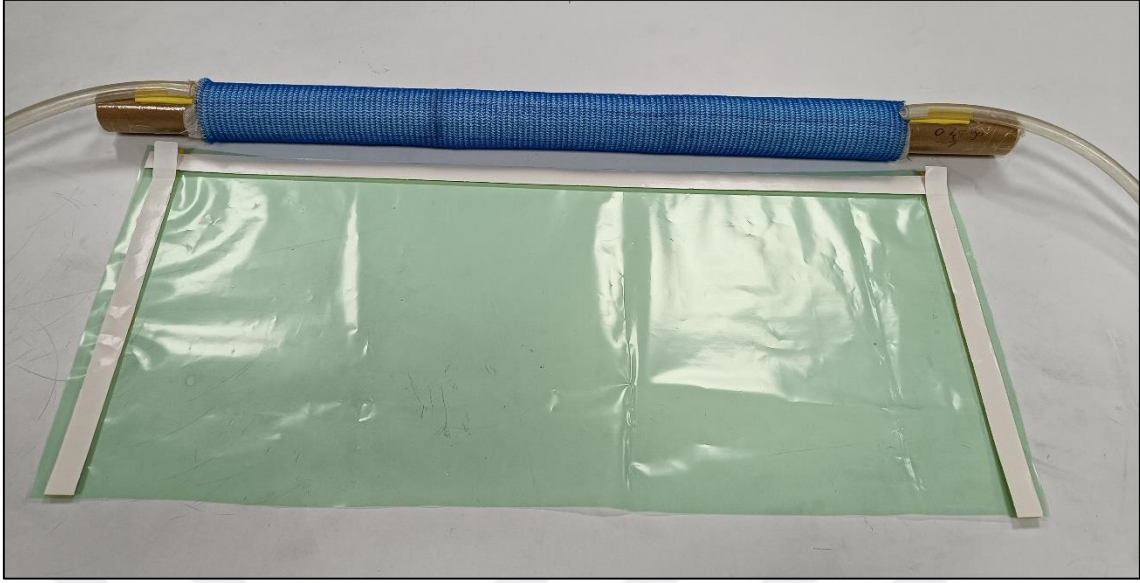
sızdırmazlığı sağlayan çift taraflı vakum sızdırmaz bant ve ısıya dayanıklı naylon kullanılmıştır. Kullanılan çift taraflı vakum sızdırmaz bant 150 °C'a kadar varan sıcaklıklara karşı dayanabilmektedir. Vakum torbası hazırlama sürecinde vakum torbasında bulunan havayı vakumlamak ve reçine geçişini sağlamak amacıyla 8 mm çapında terazi hortumlar kullanılmıştır. Bu hortumların vakum torbası içerisinde kalan uçlarına reçine geçişi sırasında ezilme ve sıcaklıktan büzülüp tıkanma ihtimaline karşı kendi çaplarından daha küçük sert bir silindirik madde yerleştirilmiştir. Vakum torbası hazırlama aşamaları Şekil 4.14'te gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.14 Vakum torbası hazırlama aşamaları sırasıyla (a), (b), (c), (d) (devam)

Vakum torbası hazırlama işleminden sonra hazırlanan vakum torbasını test etmek ve içerisindeki havayı vakumlamak için numune vakum pompasına (Şekil 4.15) takılmak için düzeneğe yerleştirilmiştir. Vakum torbası hazırlanırken dikkat edilmesi gereken en önemli husus vakum torbası içerisinde herhangi bir yırtık hava kaçağı vb. olumsuzlukların olmamasıdır. Böyle istenmeyen bir durumla karşılaşıldığında vakum torbası çift taraflı vakum sızdırmaz bantla tamir edilemiyorsa tekrardan bir vakum torbası hazırlanmalıdır. Aksi takdirde istenilen basınç değeri yakalanmayacak ve reçine geçişi sağlıklı bir şekilde gerçekleşmeyecektir. Vakum torbası hazırlanan numunenin vakum pompasına takılma ve içerisindeki hava basıncını test etme işlemleri Şekil 4.16'da

gösterilmiştir. Burada vakum pompası tarafından ölçülen basınç değeri -720 mmHg olarak ölçülmüştür. Vakum torbası içerisindeki hava tamamen alındıktan sonra numune reçine transferine hazırdır. Eğer vakum içerisindeki basınç istenilen değerlerde değil ise bu basınç değeri yakalanmadan epoksi verilmemelidir. Hazırlanan numunelerimiz istenilen basınç değerlerinde olduklarından epoksi transfer işlemine başlanılmıştır.



Şekil 4.15 Reçine geçişini sağlayan vakum pompası



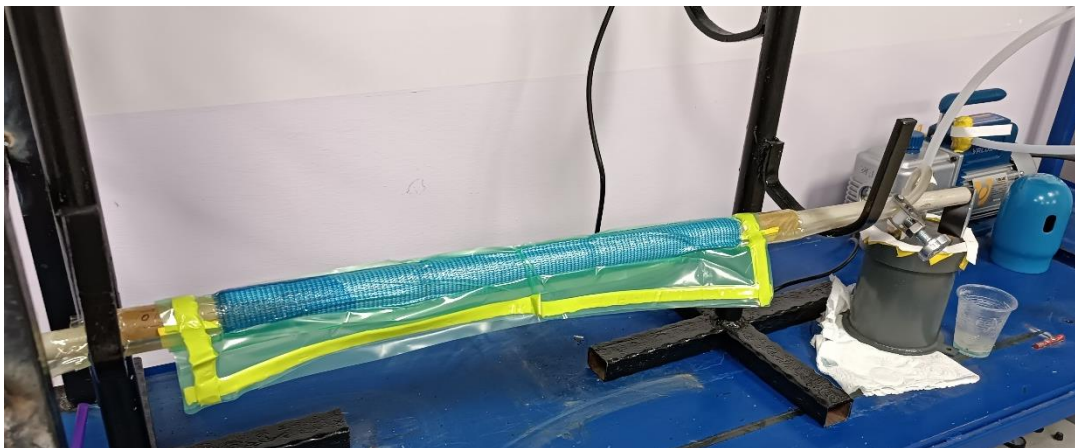
Şekil 4.16 Hava basıncı testine tabi tutulan numune

Epoksi reçine ve sertleştirici karışımı hazırlanırken sertleştirici oranı reçine oranının $\frac{1}{4}$ değerinde hazırlanmıştır. Bu karışımda tüm numunelere 36 g sertleştirici 144 g epoksi reçine kullanılmıştır. Hazırlanan bu karışım belirli bir süre karıştırılarak reçine ile sertleştiricinin homojen olması sağlanmıştır (Şekil 4. 17).



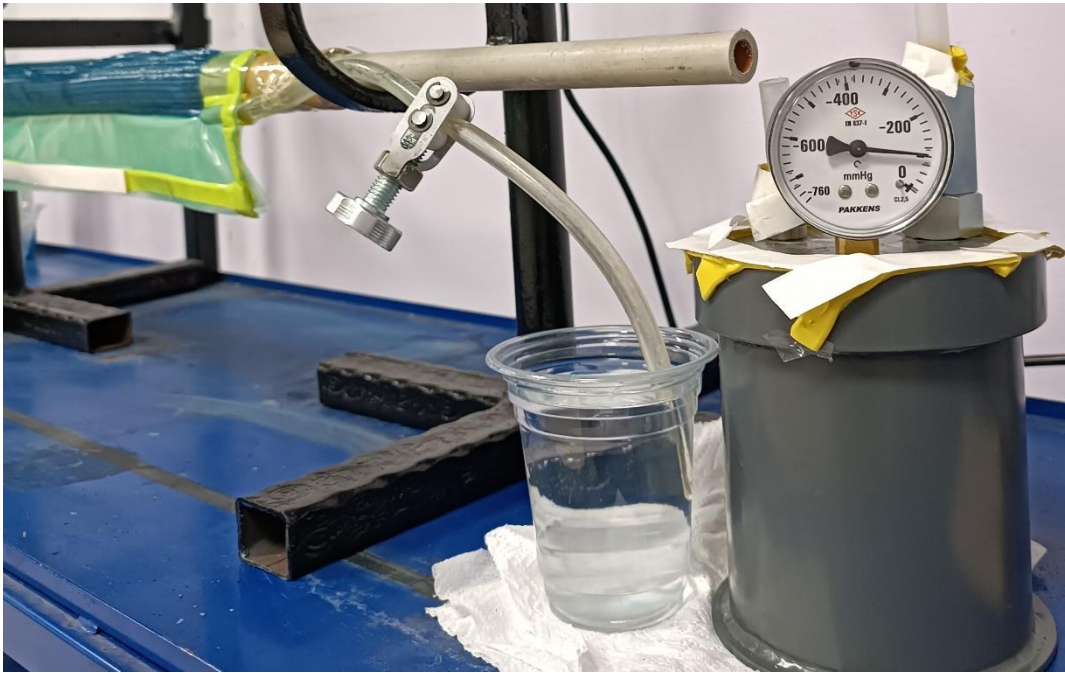
Şekil 4.17 Epoksi reçine sertleştirici karışımı

Numuneye reçine transferi yapılmadan önce vakum torbasının bir ucundaki hortum reçine karışımına diğer ucu ise vakum basıncı değerini gösteren cihazı takılır ve reçine geçişini sağlayan kelepçeler açılır. Bu süreçte numune artık reçine almaya hazırdır. Reçine verilen numune örneği Şekil 4.18’de yer almaktadır.



Şekil 4.18 Vakum pompası yardımıyla reçine transferi

Reçine transferi numunenin bir ucundan diğer ucuna kadar sağlandıktan sonra her iki uçtaki hortumlara bağlı kelepçeler hemen kapatılır. Sonrasında ise vakum pompasına bağlı olan hortumun ucu su dolu bir şişeye (Şekil 4.19), diğer ucu ise reçine karışımı dolu şişeden çıkarılmamalıdır. Bu sayede numune hava almaz ve hiçbir şekilde gözenek oluşmaz. Bu işlemlerden sonra numune kürlenmeye bırakılır. Kürlenme işlemi oda sıcaklığında 24 saat süre ile gerçekleşmektedir. Üretimden arta kalan oda sıcaklığında 24 saat süre sonrasında kürleşen epoksi reçine görüntüsü Şekil 4.20’de sunulmuştur.

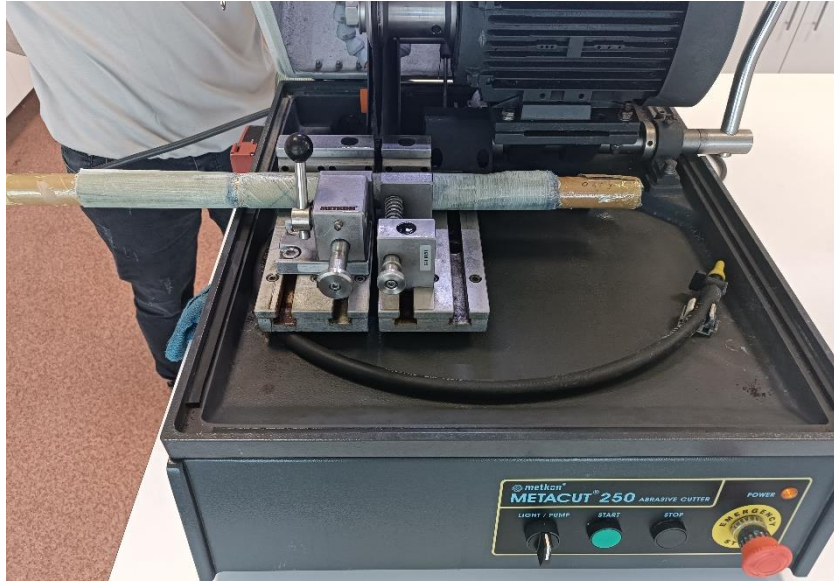


Şekil 4.19 Reçine transferi tamamlanmış kürlenmeye bırakılan numune



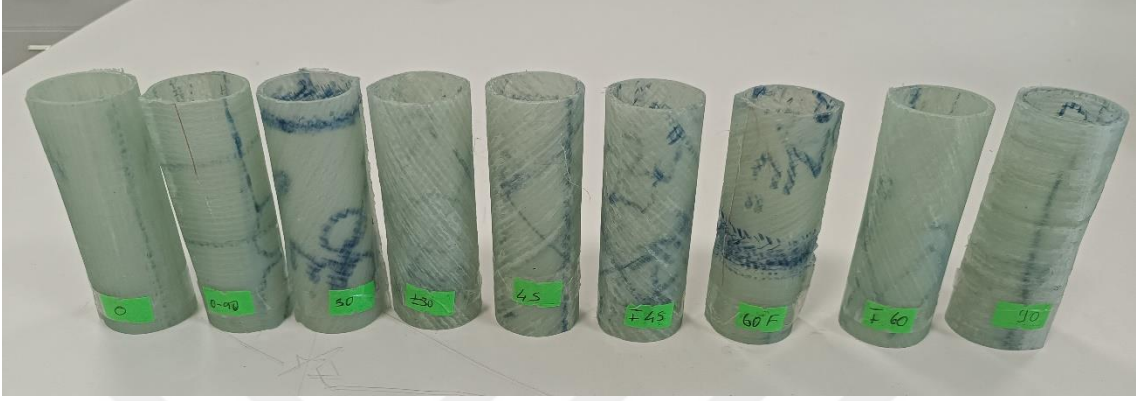
Şekil 4.20 Oda sıcaklığında 24 saat süre sonrasında kürleşen epoksi reçine

Reçine kürlenme işleminden sonra kesime hazır olan numuneler net olarak 10 cm uzunluğunda kesme cihazlarında kesilmiştir. Başlangıçta 15 cm olarak imal edilen numunelerin epoksi transferi sırasında fiziksel olarak düzgün çıkan yerleri 10 cm uzunluğu belirlenerek kesilmiştir. Üretim sonrası test için uygun hale getirilme işlemi Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.21 Kesme işlemine tabi tutulan numuneler

Kesme işlemi sonrasında iç çapları 32 mm, et kalınlıkları 2.5 mm, dış çapları 37 mm, uzunlukları 100 mm ve ağırlıkları 39.6 g olan toplamda 9 adet kompozit çarpışma kutusu numunesi elde edilmiştir. Bu numuneler Şekil 4.22 ve 4.23'te görülebilir.



Şekil 4.22 [(0, (0-90), 30, (+30, -30), 45, (+45,-45), 60, (+60, -60), 90)]° açılı numuneler



Şekil 4.23 Üretilen numunelerin üstten görünüşleri



5. BULGULAR

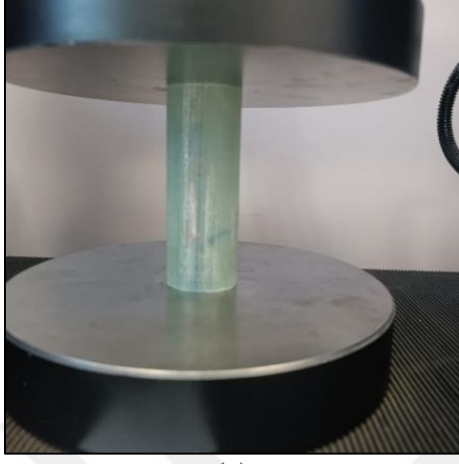
İmal edilen 9 adet silindirik kompozit çarpışma kutusu numunesi yarı statik basma testine tabi tutularak kuvvet – deformasyon ve gerilme - deformasyon grafikleri elde edilmiştir. Bu bölümde üretilen numuneler yarı statik basma test cihazı tarafından 2 mm/dk hızında numunenin 50 mm uzunluğuna denk gelecek şekilde basma testlerine tabi tutulmuştur. Kullanılan basma test cihazı RAAGEN malzeme test cihazı olup, yaklaşık olarak 50 kN kadar basabilen üniversal test cihazıdır. Şekil 5.1’de basma test cihazı görülmektedir.



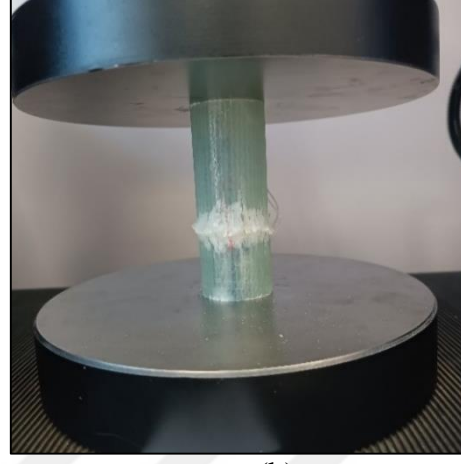
Şekil 5.1 Üniversal basma test cihazı

İlk numunemiz olan 0° açı ile sarılmış numunenin basma testi görüntüleri aşamalı olarak Şekil 5.2’de sunulmuştur. 0°’lik açıyla sarılmış numunenin basma testi ve sonrasındaki görünümüne Şekil 5.2’deki görsellerden baktığımızda elyafın sarım açısı etki eden kuvvetin doğrultusu ile aynı yöndedir. Kuvvetin etki etmesiyle Şekil 5.2 (b)’de görüldüğü gibi ilk çatlama numunenin ortasında kuvvete paralel yönde olduğu görülmektedir. Şekil 5.2 (c)’de görüldüğü gibi belirli bir süre sonra elyaflar ilk çatlamanın olduğu yerden kırılmış ve birbirinden ayrılarak aşağıya doğru şekil değişimine başlamıştır. Son olarak Şekil 5.2 (e)’de numunenin kırılmanın olduğu yerden en çok hasara maruz kaldığı gözlemlenmiştir. Elyaf yönü kuvvet ile aynı yönlü olduğu için

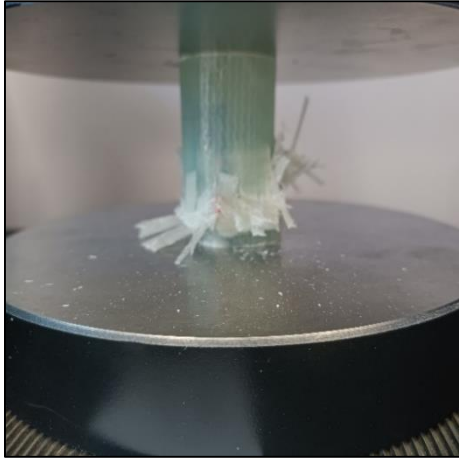
yüklemeye sonucu fiberlerin kopmasından daha çok fiberlerin matristen ve birbirinden sıyrılması ile enerji soğurması gerçekleşmiştir.



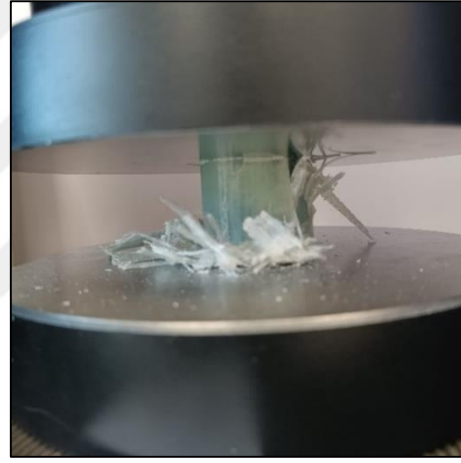
(a)



(b)



(c)



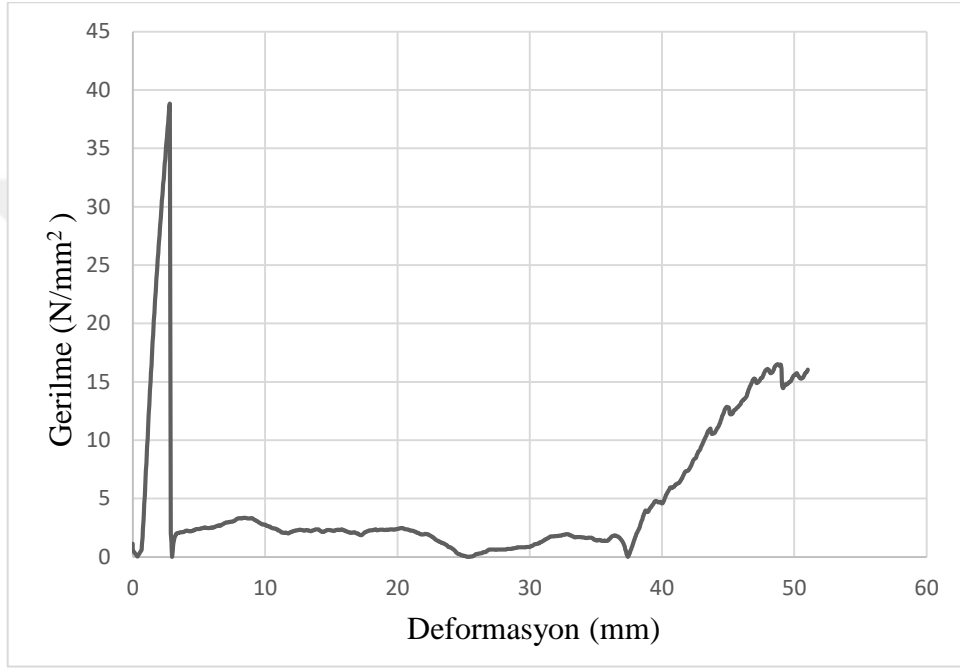
(d)



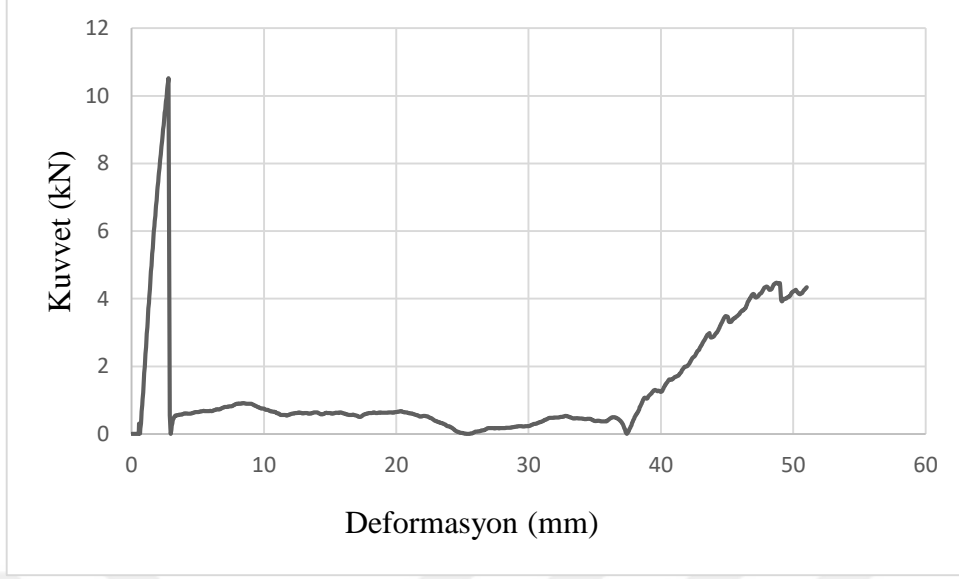
(e)

Şekil 5.2 0°'lik açıyla sarılmış numunenin basma testi esnasındaki hasar görüntüleri

0° açı ile sarılmış kompozit numunesinin basma testinden elde edilen gerilme-deformasyon ve kuvvet – deformasyon eğrileri Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te sırası ile verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen veriler şu şekildedir. Toplam absorbe edilen enerji 69 joule, maksimum deformasyon kuvveti 10.54 kN, ortalama deformasyon kuvveti ise 1.35 kN olarak tespit edilmiştir.

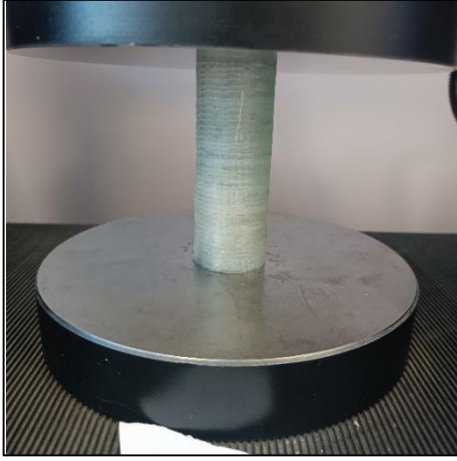


Şekil 5.3 0° ile sarılmış numunenin gerilme deformasyon eğrisi

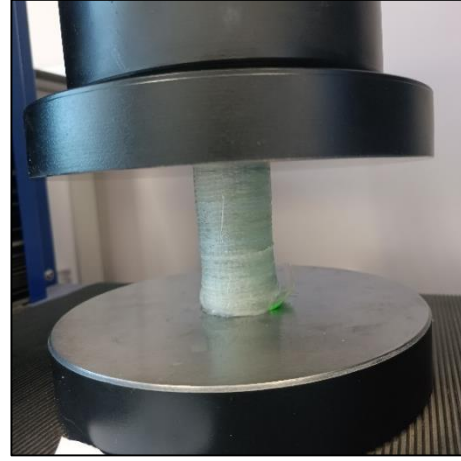


Şekil 5.4 0° ile sarılmış numunenin kuvvet deformasyon eğrisi

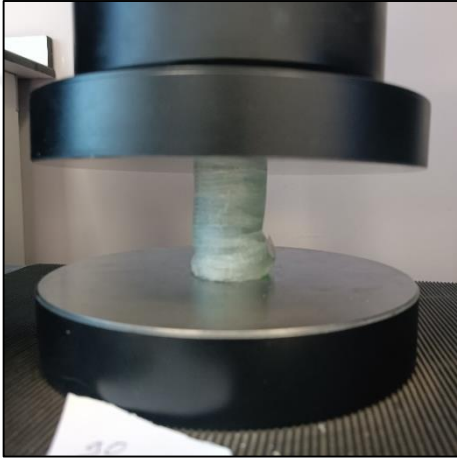
İkinci numune tipi 90° açı ile sarılmış olan numunedir. Bu numunede fiber yönelimi basma kuvvetine 90 derecedir. 90°'lik açıyla sarılmış numunenin basma testi ile elde edilen adım adım görüntüler Şekil 5.5'te yer almaktadır. Bu şekiller incelendiğinde Şekil 5.5 (b) ve (c)'de görüldüğü gibi kuvvetin etkisinden elyaflar sarım doğrultusunda küçük katlanmalar gerçekleştirerek üst üste binmeye başlamıştır. Etki eden bu kuvvet sonucunda son görselden görüldüğü gibi numune cam liflerinin doğrultusunda katlanmalar neticesinde sıkışmış ve kırılmıştır. Şekil 5.5 (e)'den de anlaşılacağı gibi liflerin sarım doğrultusu malzemenin yük altındaki davranışını belirlemektedir. Görseller incelendiğinde fiber kopmalarının minimum düzeyde olduğu ve gelen yüke büyük oranda direnç gösteren elemanın matris olduğu görülmektedir. Bu sebeple tek açı ile sarılmış kompozitler içerisinde en zayıf olanının bu numune olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebi fiber sıyrılmasının ve kopmasının minimum düzeyde olması ve tüm yükün büyük bir kısmının matris üzerine gelmesidir.



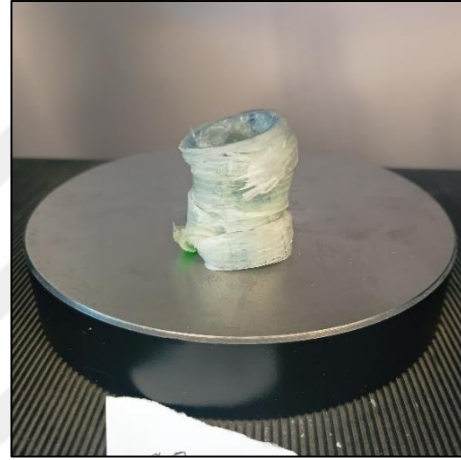
(a)



(b)



(c)



(d)

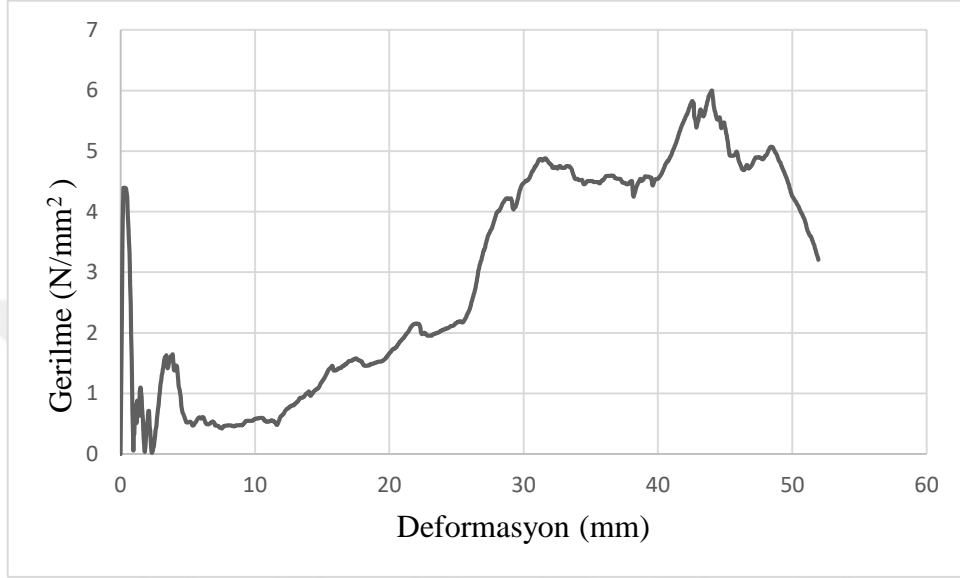


(e)

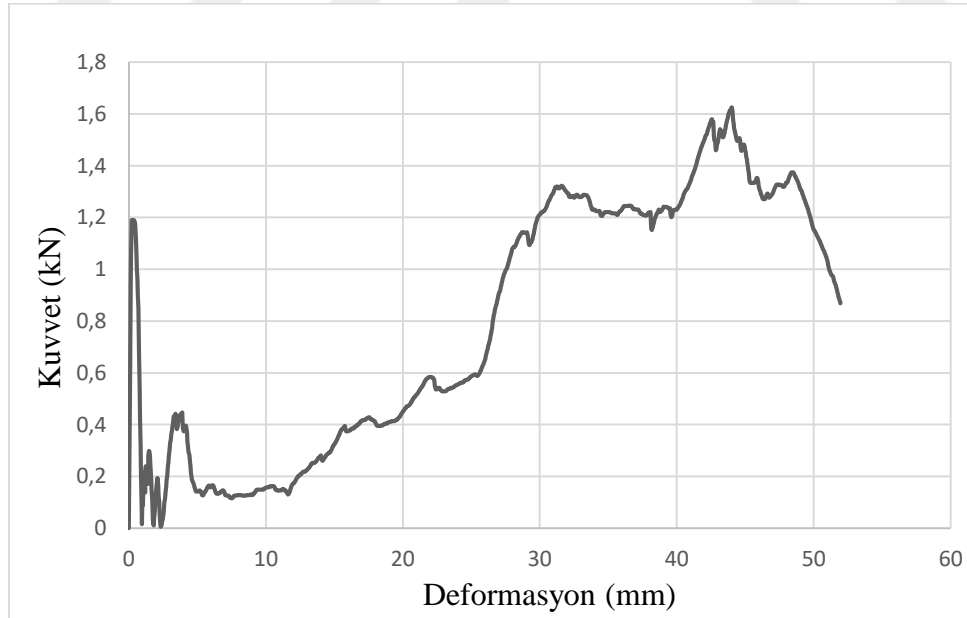
Şekil 5.5 90°'lik açıyla sarılmış numunenin basma testi esnasındaki hasar görüntüleri

90° açı ile sarılmış numunelerden elde edilen gerilme-deformasyon ve kuvvet-deformasyon eğrileri sırası ile Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de yer almaktadır. Bu eğrilerden elde edilen verilere göre absorbe edilen enerji 41 joule, ortalama deformasyon kuvveti 0.79

kN ve maksimum deformasyon kuvveti 1.62 kN olarak tespit edilmiştir. Çarpışma kutusunun hasar görüntüleri incelendiğinde hasar esnasında daha az oranda fiberin zarar görmesi ile ortaya çıkan daha az enerji soğurma sonucu ortaya çıkmıştır. Doksan derece ile üretilmiş numune sıfır dereceli olana göre % 40 oranda daha az enerji soğurmuştur.



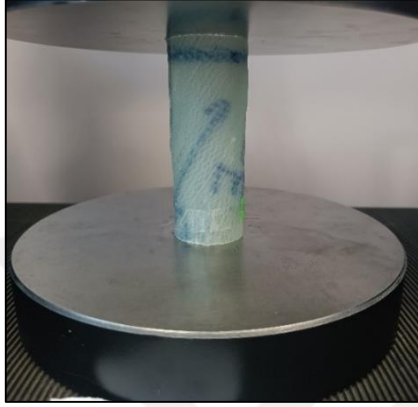
Şekil 5.6 90° ile sarılmış numunenin gerilme deformasyon eğrisi



Şekil 5.7 90°'lik açıyla sarılmış numunenin kuvvet deformasyon eğrisi

Bir diğer tek açı ile sarılmış numune 30° açı ile sarılmış numunedir. Bu numunelerin basma testi esnasındaki adım adım görüntüleri Şekil 5.8'de yer almaktadır.

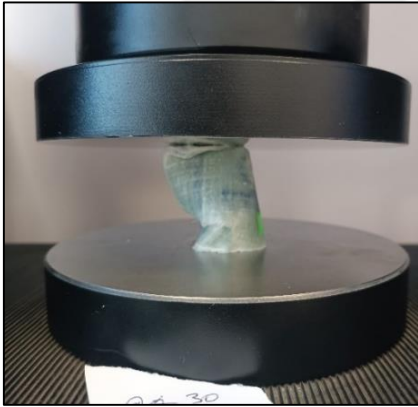
30°'lik açıyla sarılmış numunenin basma testi ve sonrasındaki görünümüne baktığımızda etki eden kuvvet sonrasında ilk tepkimenin cam liflerinin sarıldığı açı doğrultusunda Şekil 5.8 (b)'de olduğu gözlemlenmektedir. Kuvvet devam ettikçe numunenin alt ve üst bölgelerinde sarım açısı doğrultusunda çeşitli içe doğru çökmelerin olduğu Şekil 5.8 (c)'de gözlemlenmiştir



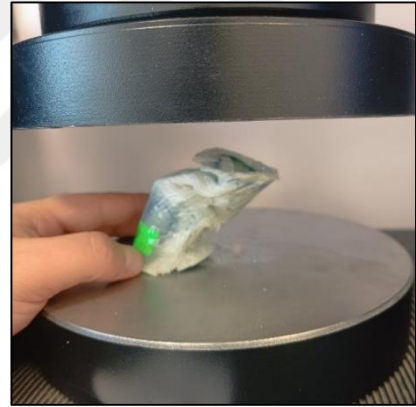
(a)



(b)



(c)



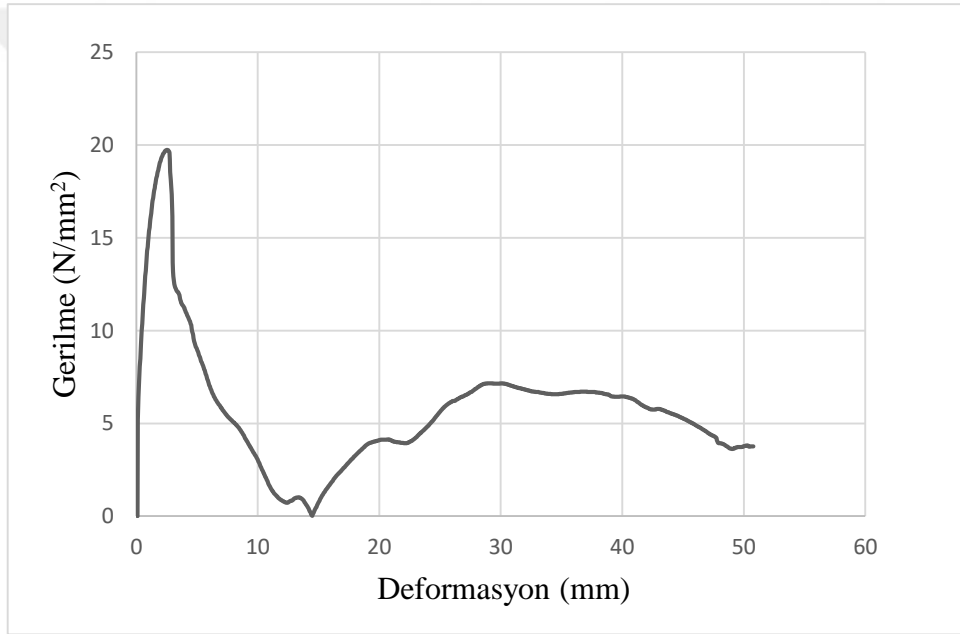
(d)



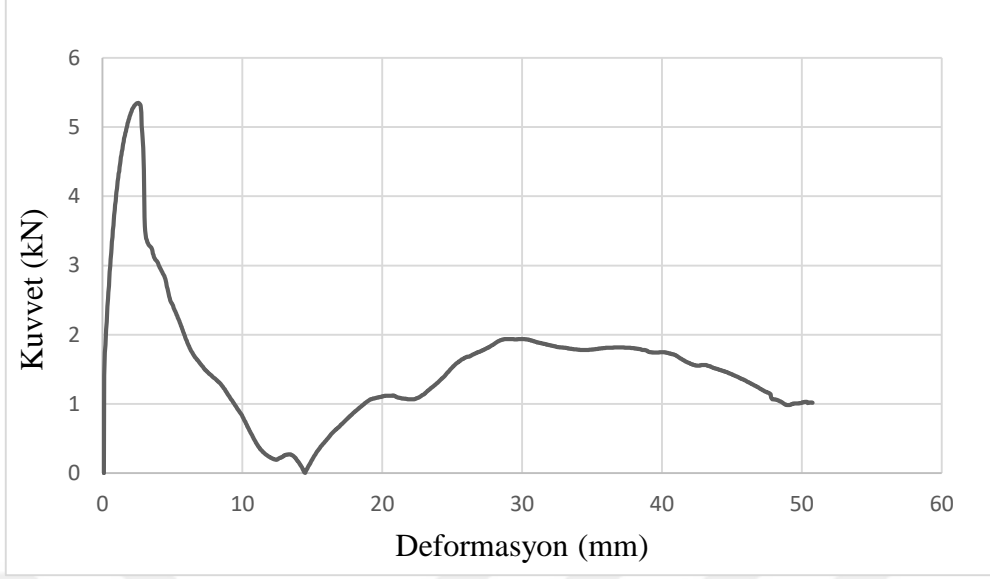
(e)

Şekil 5.8 30°'lik açıyla sarılmış numunenin basma testi esnasındaki hasar görüntüleri

30° açılı ile sarılmış kompozitlerin basma testlerinden elde edilen gerilme-deformasyon ve kuvvet deformasyon eğrileri sırası ile Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da yer almaktadır. Bu eğriden elde edilen veriler neticesinde absorbe edilen enerjinin 78 joule olduğu tespit edilmiştir. Bu değer en yüksek absorbe edilen enerji değeridir. Burada açılı bir kırılma esnasında enerji dağılımının artırılmasının en büyük sebep olduğu düşünülmektedir. Otuz derece açılı ile sarılmış numune sıfır ve doksan a göre sırası ile % 13 ve % 90 daha fazla enerji absorbe etmiştir. Bu numune için ortalama deformasyon kuvveti ve maksimum deformasyon kuvveti sırası ile 1.56 kN ve 5.34 kN olarak tespit edilmiştir.

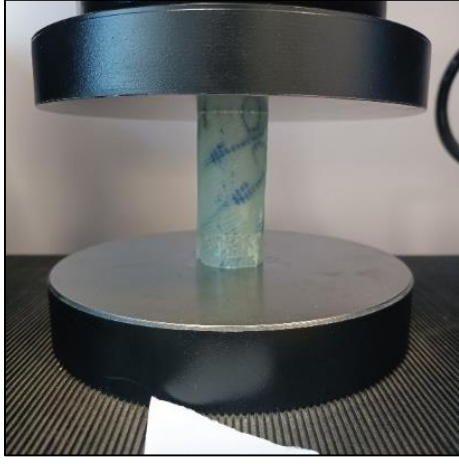


Şekil 5.9 30° ile sarılmış numunenin gerilme deformasyon eğrisi

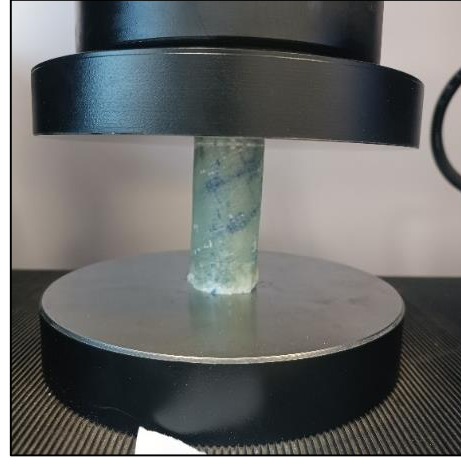


Şekil 5.10 30 °'lik açıyla sarılmış numunenin kuvvet deformasyon eğrisi

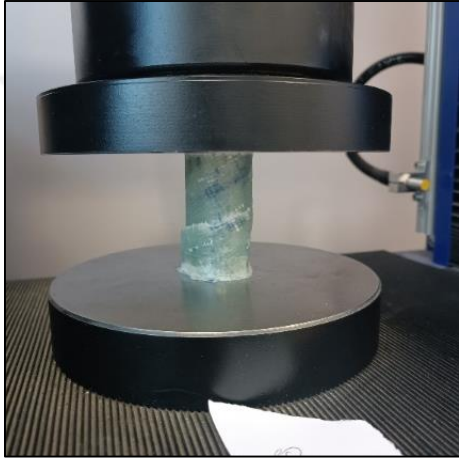
Tek açı ile üretilmiş bir başka numune de 60° açı ile sarılmış numunedir. 60°'lik açıyla sarılmış numunenin basma testi esnasındaki ve sonrası görünümüne Şekil 5.11'de yer verilmiştir. Bu görseller incelendiğinde etki eden kuvvet sonucunda numunede ilk gözlemlenen tepkilerin otuz derece açılı olan numuneye benzer bir şekilde fiber sarım açısı doğrultusunda olduğu gözlemlenmiştir. Görsellerden de görüldüğü gibi numune lif sarım açısı doğrultusunda kırılma göstererek iç içe geçmiş şekilde hasar almaya devam etmiştir. Numune yapısı otuz derecelik olanın aksine bütün olarak değil parçalanmış bir halde hasarlanmıştır. Bu numuneyi otuz derecelik numuneden ayıran tarafı hasar esnasında açının büyümesi ile yük daha fazla fiberlere binmiş ve fiberi doğrudan koparmaya yönelik olmuştur. Otuz dereceli olan numunede açı daha düşük olması sebebi ile yük doğrudan fibere dönük olmayıp fiber ve matrise daha homojen olarak dağılmıştır. Bu sebeple bu numunede enerji absorpsiyon miktarının daha düşük olması beklenmektedir.



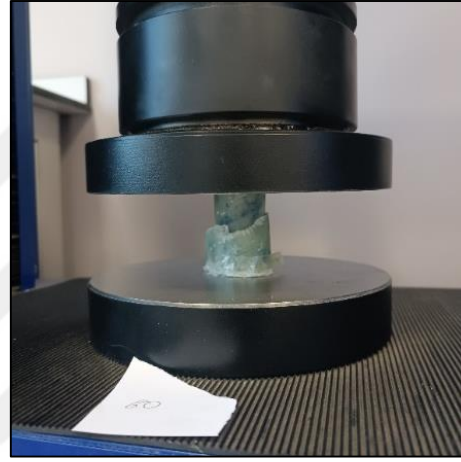
(a)



(b)



(c)



(d)

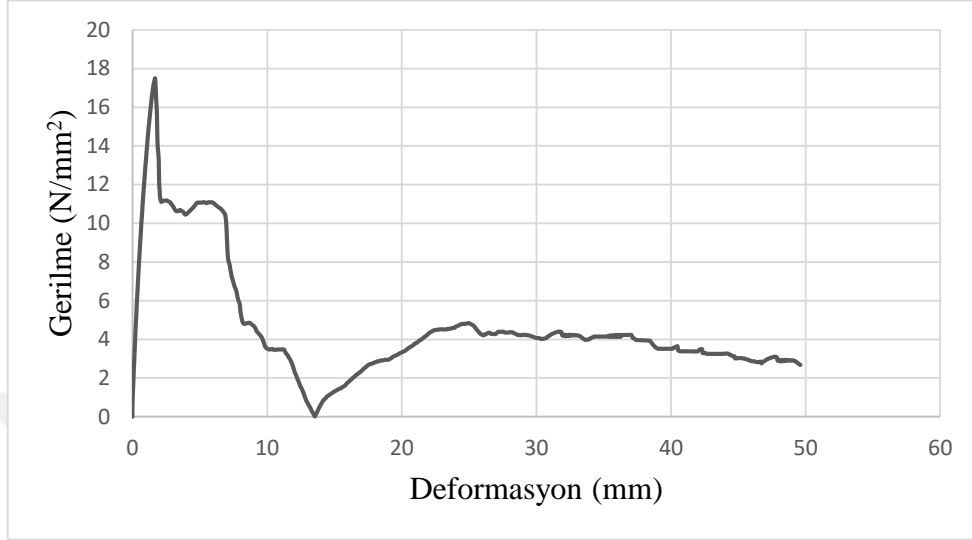


(e)

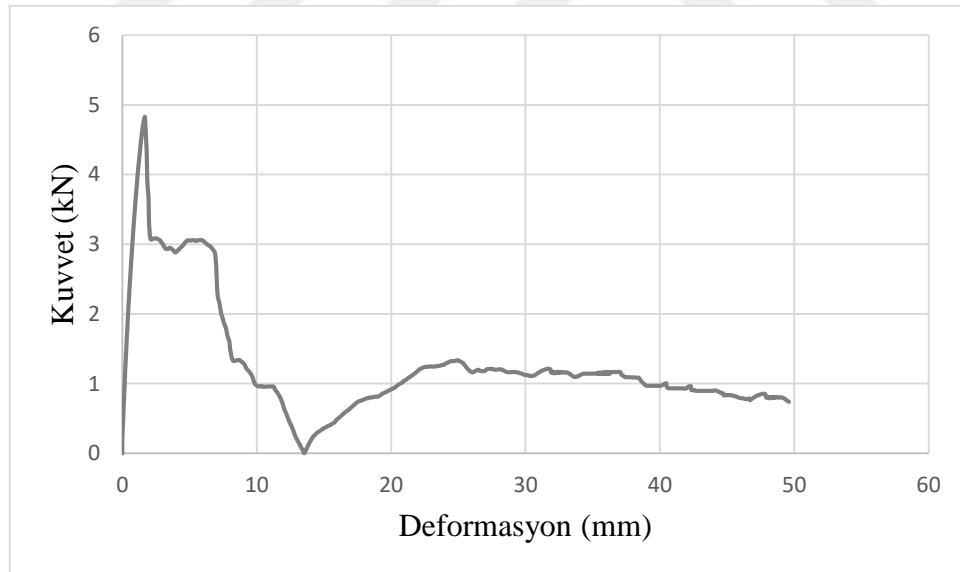
Şekil 5.11 60°'lik açıyla sarılmış numunenin basma testi esnasındaki hasar görüntüleri

60° açı ile üretilmiş numunelerin basma testi ile elde edilen dataları Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te sırası ile gerilme-deformasyon ve kuvvet – deformasyon olarak

izdirilmiştir. Bu datalardan absorbe edilen enerjinin 49.1 joule olduğu, ortalama kuvvet ve maksimum deformasyon kuvvetinin ise sırasıyla 1.37 ve 4.74 kN olarak belirlenmiştir.



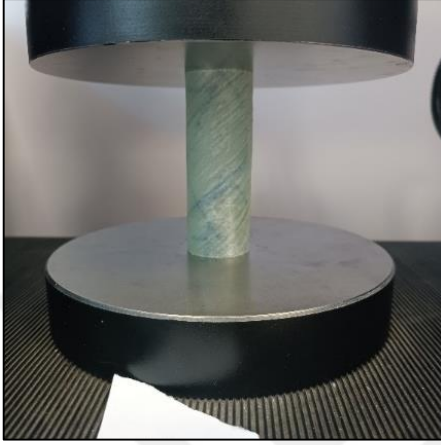
şekil 5.12 60° ile sarılmış numunenin gerilme deformasyon eğrisi



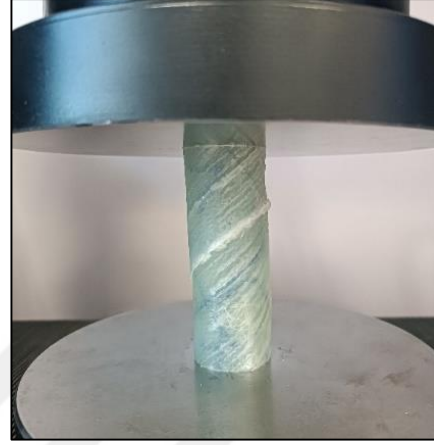
şekil 5.13 60° ile sarılmış numunenin kuvvet deformasyon eğrisi

Sonuncu tek aı ile sarılmış numune 45°'lik numunedir. 45°'lik açıyla sarılmış numunenin basma testi esnasındaki ve sonrası görünümü şekil 5.14'te sunulmuştur. Görsellere baktığımızda etki eden kuvvet sonucunda önceki numunelere benzer bir şekilde ilk tepkinin fiberin sarım doğrultusunda olduğu gözlemlenmiştir. Kuvvetin devam

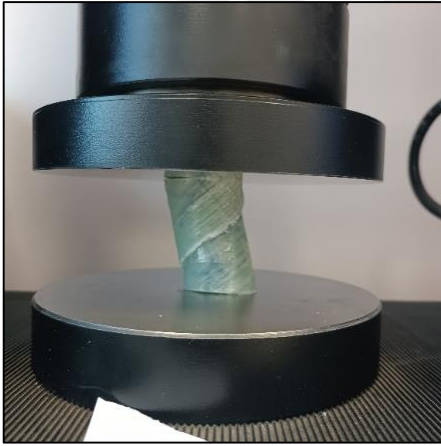
etmesiyle Şekil 5.14 (d)'de görüldüğü gibi numune tam ortadan lif doğrultusunda kırılma gerçekleştirmiş ve iç içe geçerek katlanmıştır. Son görselde de görüldüğü gibi etkiyen kuvvet kaldırıldığında iç içe geçen numune birbirinden ayrılarak eski uzunluğuna gelmiştir.



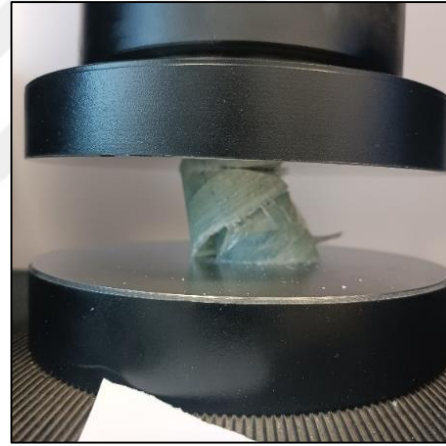
(a)



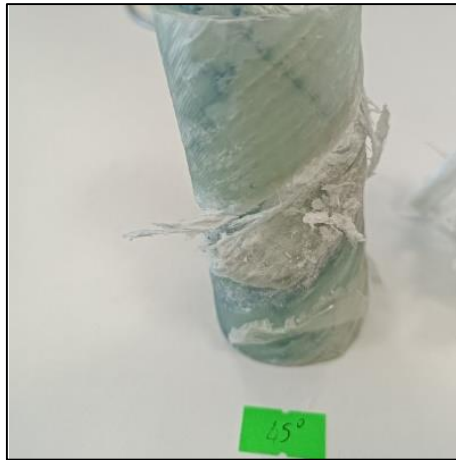
(b)



(c)



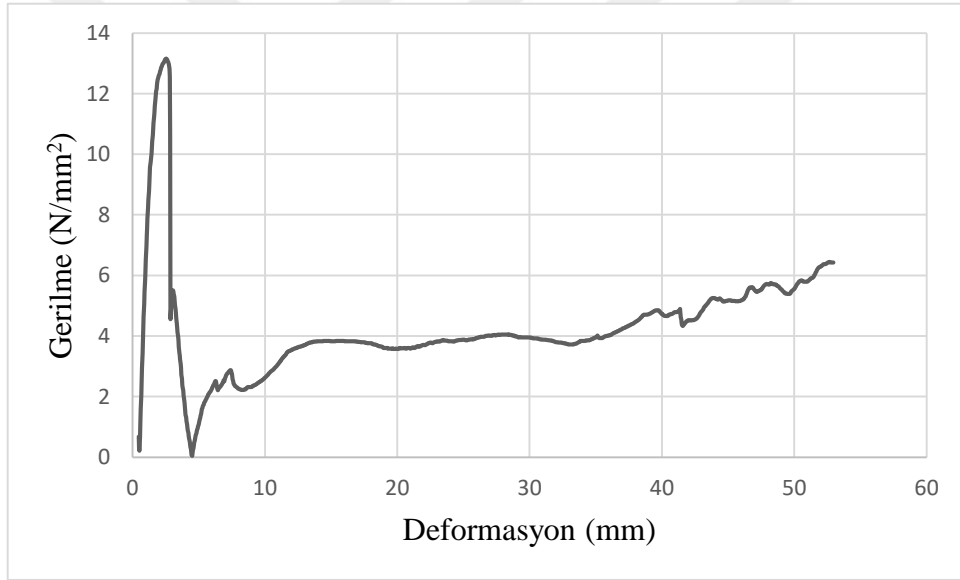
(d)



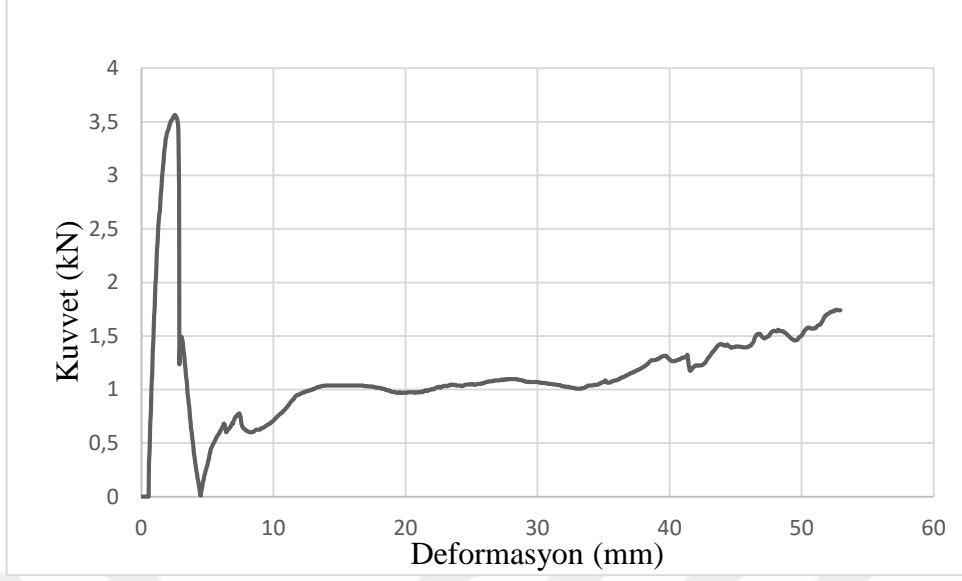
(e)

Şekil 5.14 45°'lik açıyla sarılmış numunenin basma testi esnasındaki hasar görüntüleri

45°'lik açı ile sarılmış numunelerin basma testi sonrası datalar ile çizdirilmiş gerilim-deformasyon ve kuvvet-deformasyon eğrileri sırası ile Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da sunulmuştur. Bu datalardan elde edilen sonuçlara göre 45°'lik açı ile sarılmış numune 60 joule enerji absorbe ettiği tespit edilmiştir. Bunun yanında ortalama kuvvet ve maksimum kuvvet ise sırası ile 1.15 kN ve 3.56 kN'dur. 45°'lik açı ile sarılmış numune 30°'lik numuneye göre % 23 daha az enerji absorbe ederken 60°'lik numuneye göre %22 daha fazla enerji absorbe etmiştir. Bu açılı numune sonuçlarına göre açı yükseldikçe enerji absorpsiyon miktarının azaldığı sonucuna varılabilir. Bu trendi bozan sadece 0°'lik numune örneğidir. Buda sıfır derecenin kırılma esnasında açılı ilk tetikleme olayına mahal vermemesi sonucu ile bağdaştırılabilir.

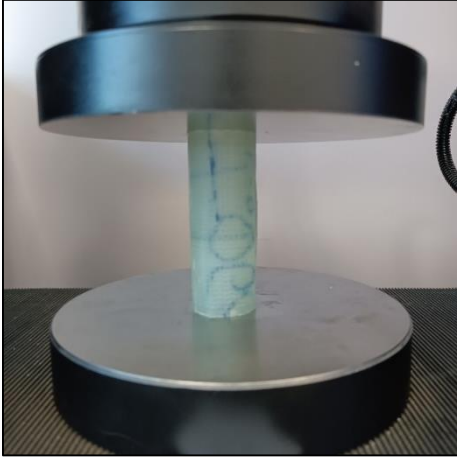


Şekil 5.15 45° ile sarılmış numunenin gerilme deformasyon eğrisi

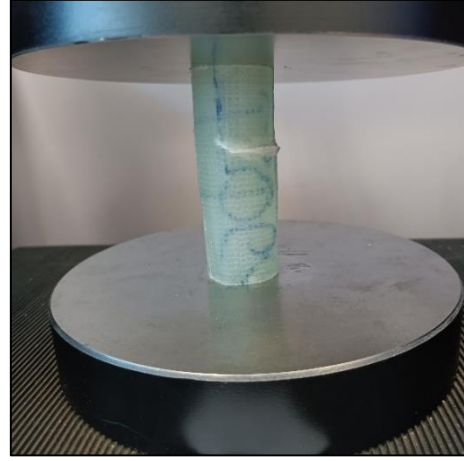


Şekil 5.16 45° ile sarılmış numunenin kuvvet deformasyon eğrisi

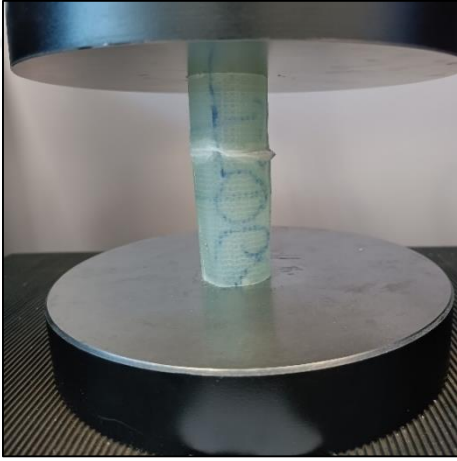
İkili açılar ile sarılan ilk numune (0-90)°'lik açılar ile sarılan numunedir. Bu kompozit üretilirken toplam kumaşın yarısı sıfır derecede diğer yarısı sıfır derecenin üzerine gelecek şekilde doksan derecede sarılıp üretilmiştir. (0-90)°'lik açılarla sarılmış numunenin basma testi ve sonrası görüntüleri Şekil 5.17'de görülmektedir. Bakıldığında etki eden kuvvet sonucunda Şekil 5.17 (b)'de görüldüğü gibi numunenin dış tarafında 90°'lik açıyla sarılmış elyafın kuvvet doğrultusuna dik şekilde bir çatlama maruz kaldığı gözlemlenmiştir. Devam eden kuvvet sonrasında Şekil 5.17 (d) ve (e)'de görüldüğü gibi kuvvet doğrultusuna dik çatlamlar tüm çapı sararak üst bölgeden katlanarak numunenin içine geçtiği gözlemlenmiştir.



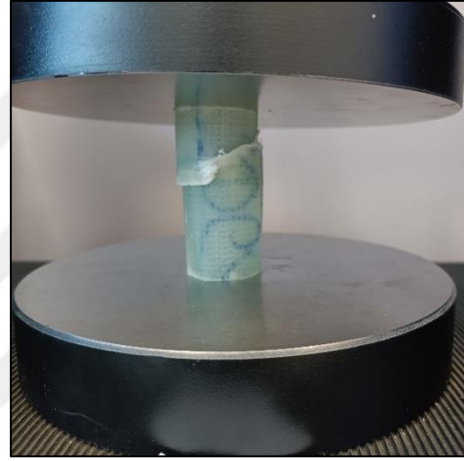
(a)



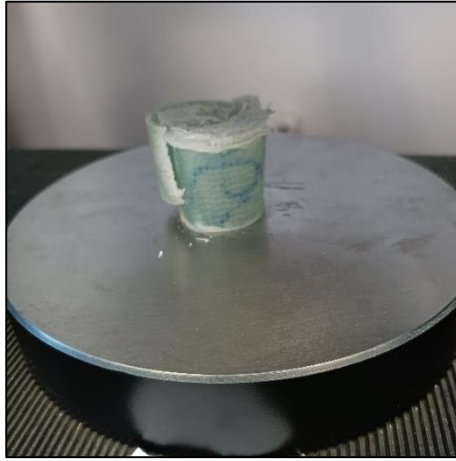
(b)



(c)



(d)

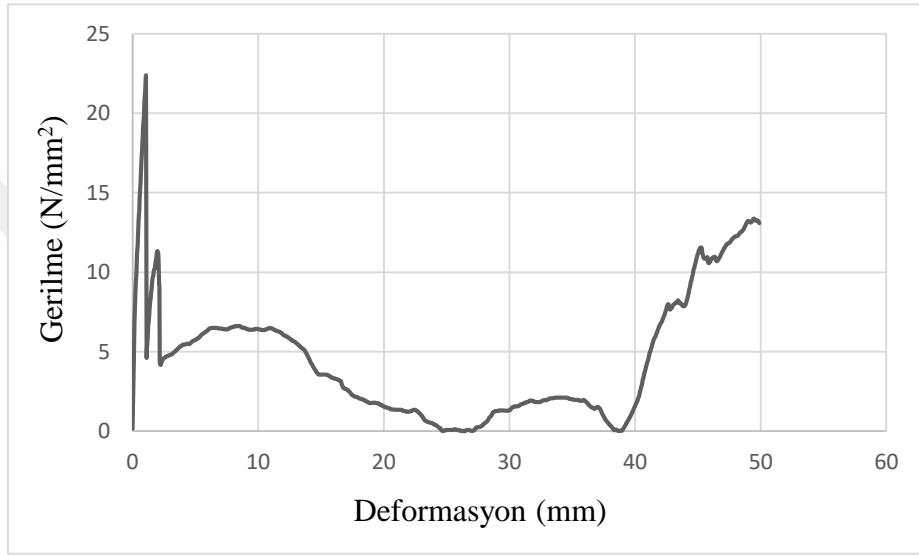


(e)

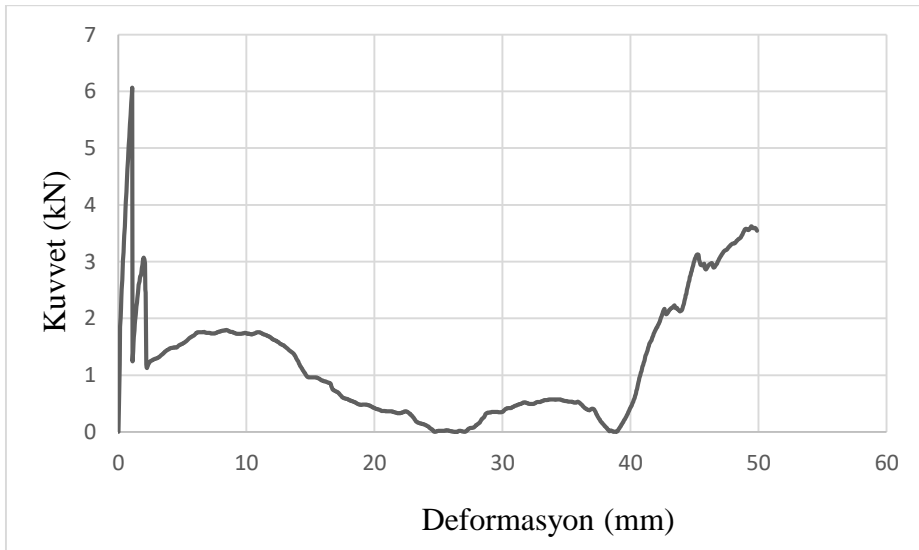
Şekil 5.17 (0-90)°'lik açıyla sarılmış numunenin basma esnasındaki hasar görüntüleri

(0-90)°'lik numunelerin yarı statik basma testleri sonrası gerilme deformasyon ve kuvvet deformasyon eğrileri sırası ile Şekil 5.18 ve 5.19'da yer almaktadır. Bu

grafiklerden elde edilen verilere göre bu numunenin absorbe ettiği enerji 60.1 joule olarak hesaplanmıştır. Bu değer sıfır derece ile sarılan ve doksan derece ile sarılan numunenin arasında bir değerdir. Sıfır dereceli numune 69 joule absorbe etmişken doksan dereceli numune 41 joule absorbe etmişti. Buradan yola çıkarak sonuçların birbiri ile örtüştüğü sonucuna varabiliriz. Sıfır-doksan numunesinin sırası ile absorbe ortalama kuvveti ve maksimum deformasyon kuvveti 1.22 kN ve 6.06 kN'dur.

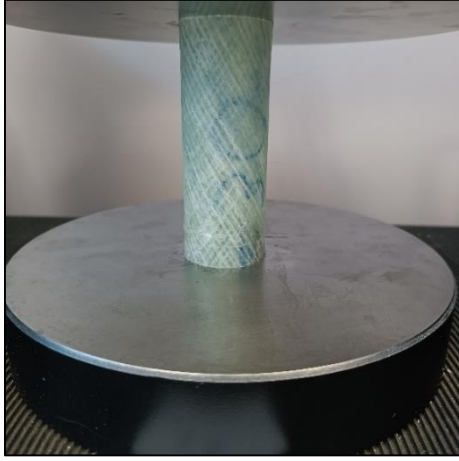


Şekil 5.18 (0-90)° ile sarılmış numunenin gerilme deformasyon eğrisi

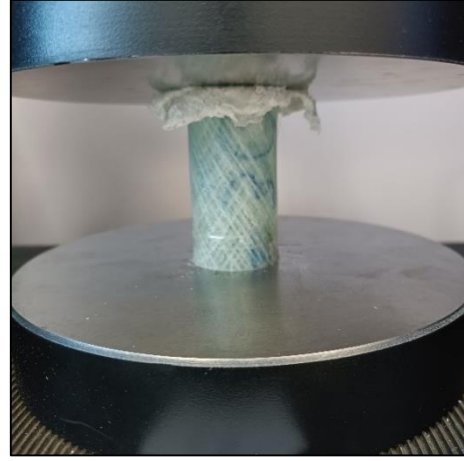


Şekil 5.19 (0-90)° ile sarılmış numunenin kuvvet deformasyon eğrisi

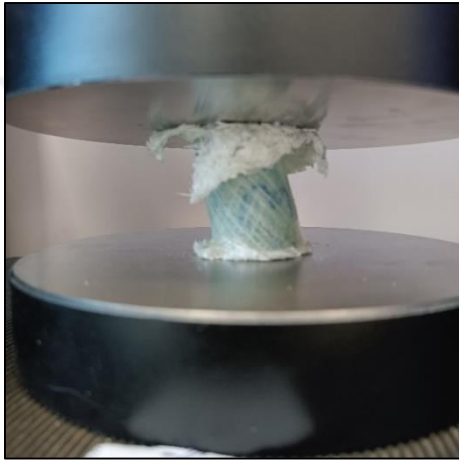
İkili açı ile sarılmış bir diğer numune (+30, -30)°'lik numunedir. Bu numune üretilirken ilk otuz derece analitik düzlemde birinci bölgede bulunup yatay x eksenine ile otuz derece açı yapmaktadır. İkinci kumaş parçasındaki liflerin açısı birinci açı referansından ikinci bölgede yer alıp eksi otuz derece açıdadır. (+30, -30)°'lik açılarla sarılmış numunenin basma testi esnasındaki hasar görüntüleri ve test sonrası görünümü Şekil 5.20'de yer almaktadır. Şekil 5.20 incelendiğinde etki eden kuvvet sonrasında numunede oluşan ilk tepkinin Şekil 5.20 (b)'de üst kısımdan başlanarak alt taraflara olduğu gözlemlenmiştir. Dış taraftan sarılan elyafın kendi doğrultusunda, iç taraftan sarılan elyafın ise kendi doğrultusunda katlanarak yırtıldığı ve hasar aldığı görülmektedir. Etkiyen kuvvet numuneden kaldırıldığında Şekil 5.20 (d)'de olduğu gibi numune üzerinde sarmal bir yapının oluştuğu görülmüştür. Fiber ve matris kırılmalarının oldukça fazla olduğu ayrıca gözlemlenmiştir.



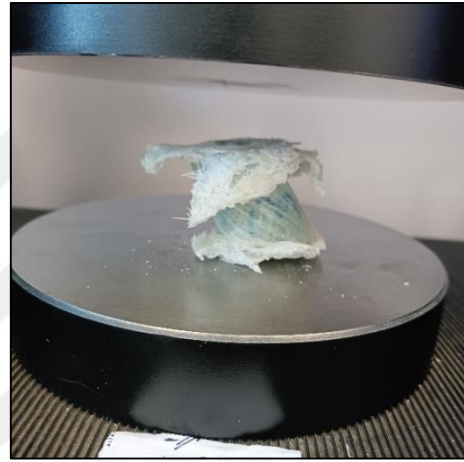
(a)



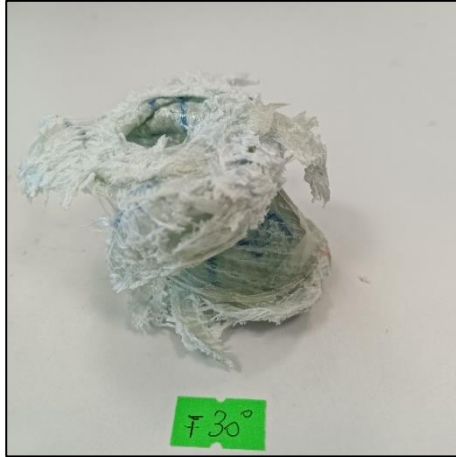
(b)



(c)



(d)

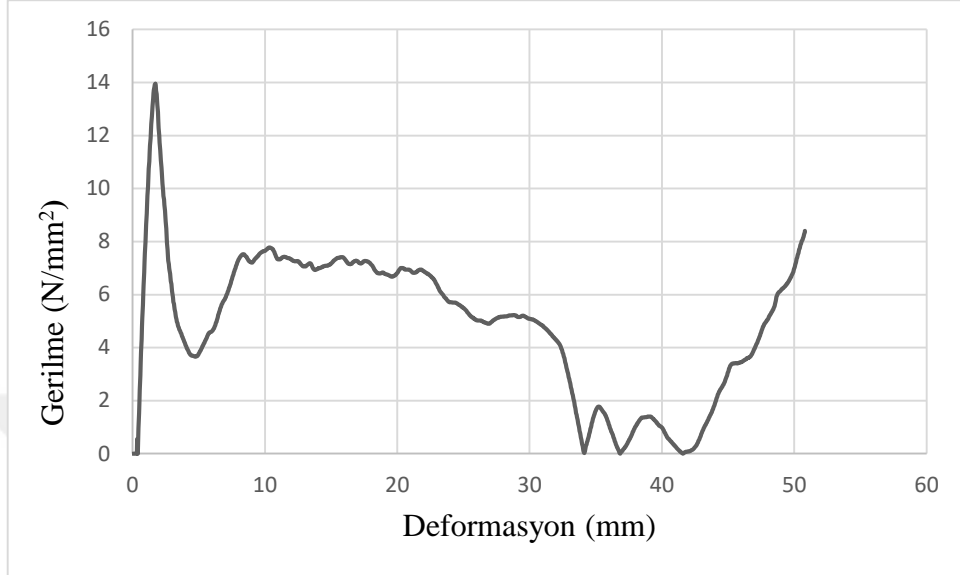


(e)

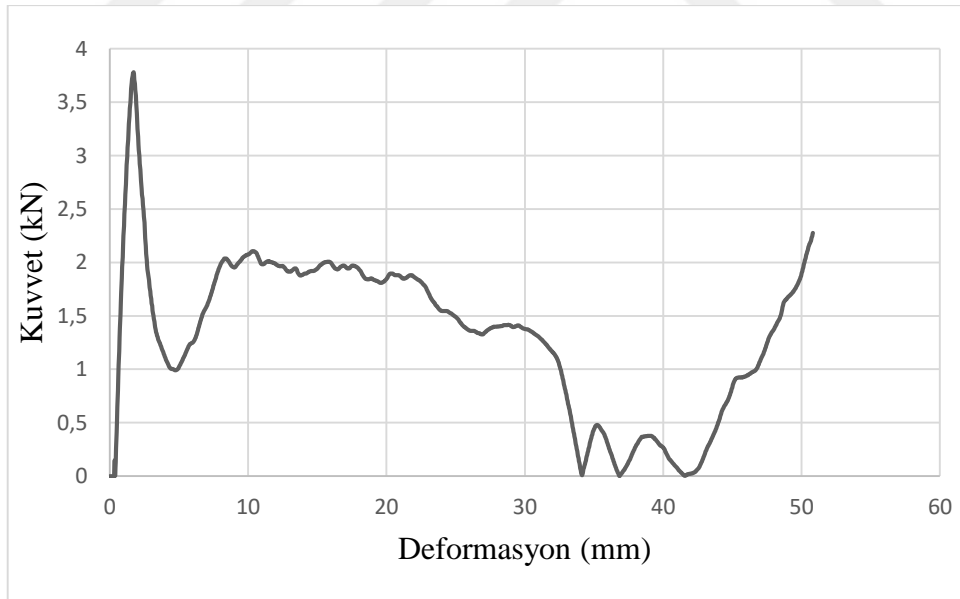
Şekil 5.20 (+30, -30)^o'lik açıyla sarılmış numunenin basma esnasındaki hasar görüntüleri

(+30, -30)^o'lik açılar ile sarılmış numunelerin gerilme deformasyon eğrisi Şekil 5.21'de kuvvet deformasyon eğrisi de Şekil 5.22'de verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen verilere göre bu numunenin absorbe ettiği enerji 67 jouledir. Bu değer ikili açı ile

sarılmış numuneler içerisinde en yüksek değerdir. Tek açılılar içerisinde de otuz derece açılı numune en yüksek enerji absorbe eden numune olarak tespit edilmiştir.



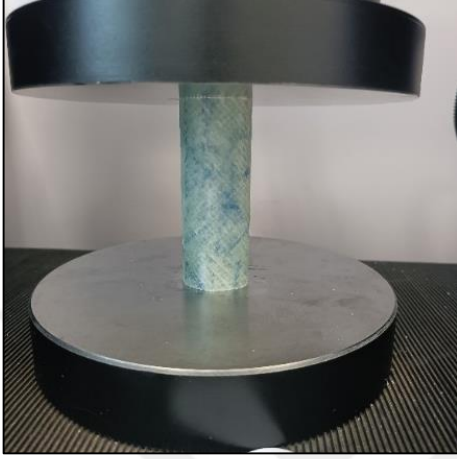
Şekil 5.21 (+30, -30)° ile sarılmış numunenin gerilme deformasyon eğrisi



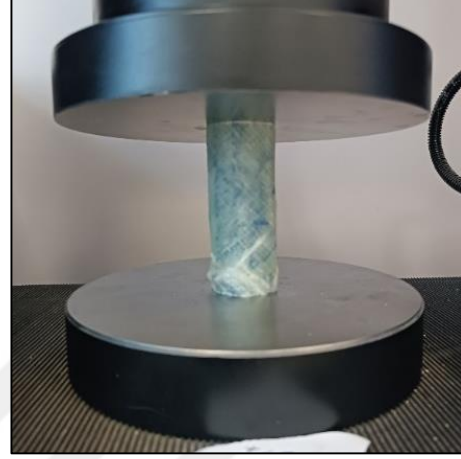
Şekil 5.22 (+30, -30)° ile sarılmış numunenin kuvvet deformasyon eğrisi

İkili açı ile sarılmış bir diğer numune de (+45, -45)°'lik numunedir. Açılıların sarılma yöntemi artı eksi otuzda anlatıldığı gibi gerçekleştirilmiştir. (+45, -45)°'lik açılılarla sarılmış numunenin basma testi ve sonrası görünümüne Şekil 5.23'te sunulmuştur. Şekil incelendiğinde etkiyen kuvvet sonrasında numune üzerinde oluşan ilk

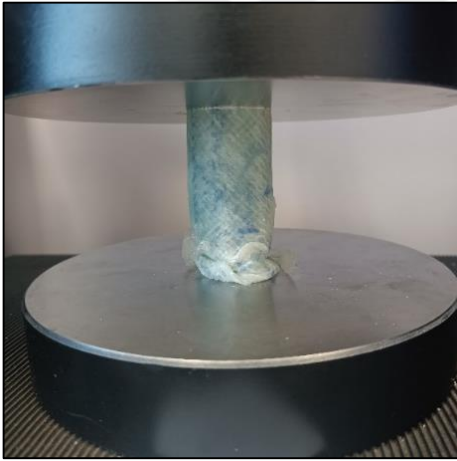
tepkimenin alt bölgeden $+45^\circ$ ve -45° 'lik sarım açısı doğrultularında olduğu Şekil 4.32 (b)'de görülmektedir. Etkiyen kuvvetin sonrasında alt bölgeden başlayan deformasyon sonraki görsellerde görüldüğü gibi belirli bir bölgeden sonra dayanımını kaybetmiş ve malzeme katlanarak şekil değiştirmiştir.



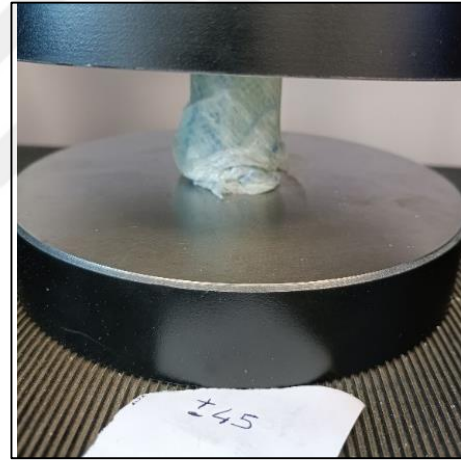
(a)



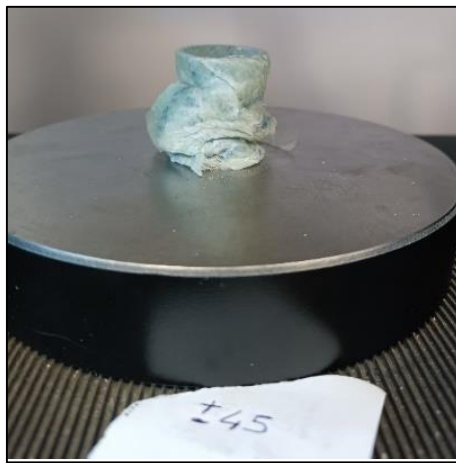
(b)



(c)



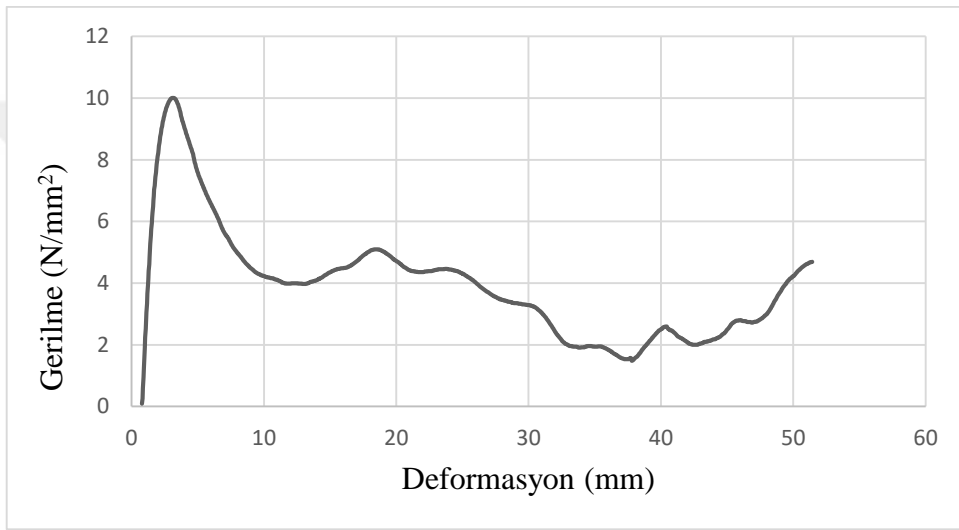
(d)



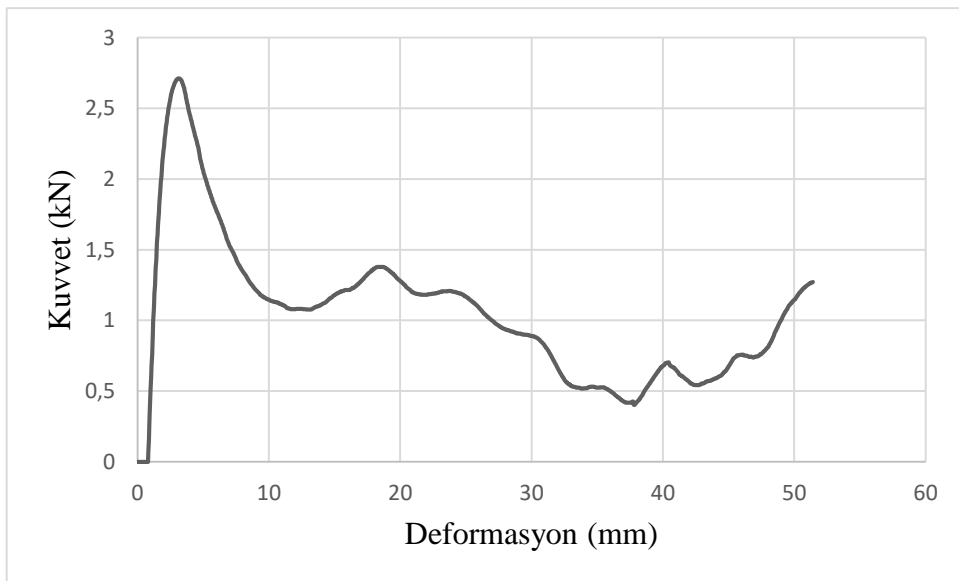
(e)

Şekil 5.23 $(+45, -45)^\circ$ 'lik açıyla sarılmış numunenin basma esnasındaki hasar görüntüleri

(+45, -45)°'lik açılarla sarılmış numunelerin basma testi sonucu elde edilen gerilme deformasyon ve kuvvet deformasyon eğrileri sırası ile Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'te verilmiştir. Bu datalardan elde edilen sonuçlara göre absorbe edilen enerji miktarı 57 jouledir. Bu değer tek açılı kırk beş derece olana yakın bir değerdir. (+45, -45)°'lik açılı numunenin absorbe ettiği enerji miktarı (+30, -30)°'lik numuneye göre %15 daha azdır. Tek açılı numunelerde de 45° lik numuneler 30° lik numuneden daha az enerji absorbe etmiştir. (+45, -45)° numunenin ortalama deformasyon kuvveti ve maksimum deformasyon kuvveti sırası ile 1.067 ve 2.71 kN olarak hesaplanmıştır.

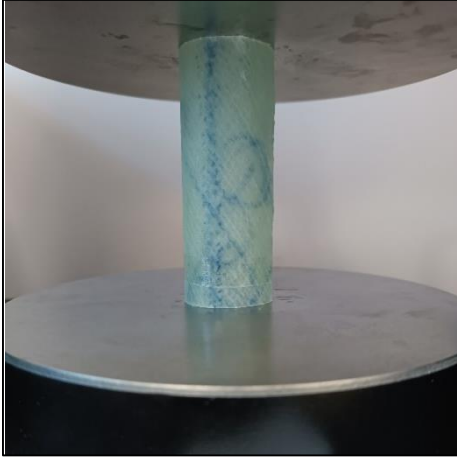


Şekil 5.24 (+45, -45)° ile sarılmış numunenin gerilme deformasyon eğrisi

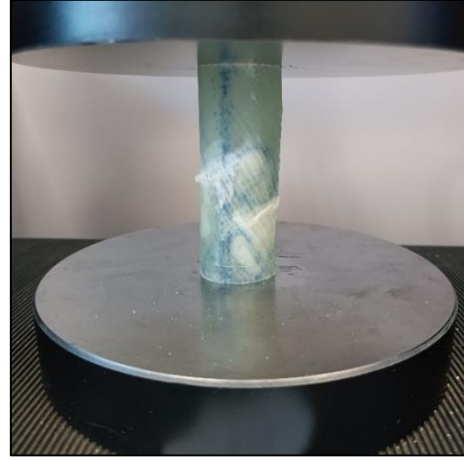


Şekil 5.25 (+45, -45)° ile sarılmış numunenin kuvvet deformasyon eğrisi

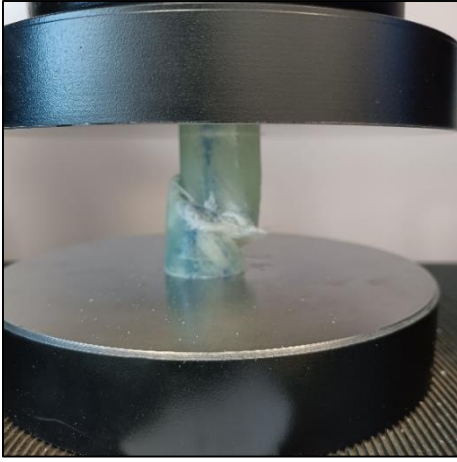
Son ikili açılı ile üretilmiş numune (+60, -60)°'lik açılı ile sarılmış numunedir. (+60, -60)°'lik açılılarla sarılmış numunenin basma testi esnasında ve sonrasındaki görüntülerine Şekil 5.26'da ulaşılabilir. Şekil 5.26 incelendiğinde kuvvet uygulanması sonucunda ilk tepkinin numunenin alt bölgesinden orta bölgelerine doğru bir kırılmanın dış tarafa sarılan -60°'lik açılına doğrultusunda olduğu Şekil 5.26 (b)'de görülmüştür. Bu kırılma neticesinde numune aynı doğrultuda kuvvetin etkisiyle çapraz katlanıp iç içe geçmiştir. Numune üzerinde en fazla deformasyonun alt bölgelerde meydana geldiği sonraki görsellerde gözlemlenmiştir. Sonuç olarak açılı numunelere yaygın kırılma davranışının açılı doğrultusunda meydana geldiği ikili sarım durumlarda ise iç ve dış açılılar birbirlerinin aksi yönünde hasar oluşumunun daha hızlı meydana geldiği ve katlanarak testin sonuçlandırıldığı tespit edilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

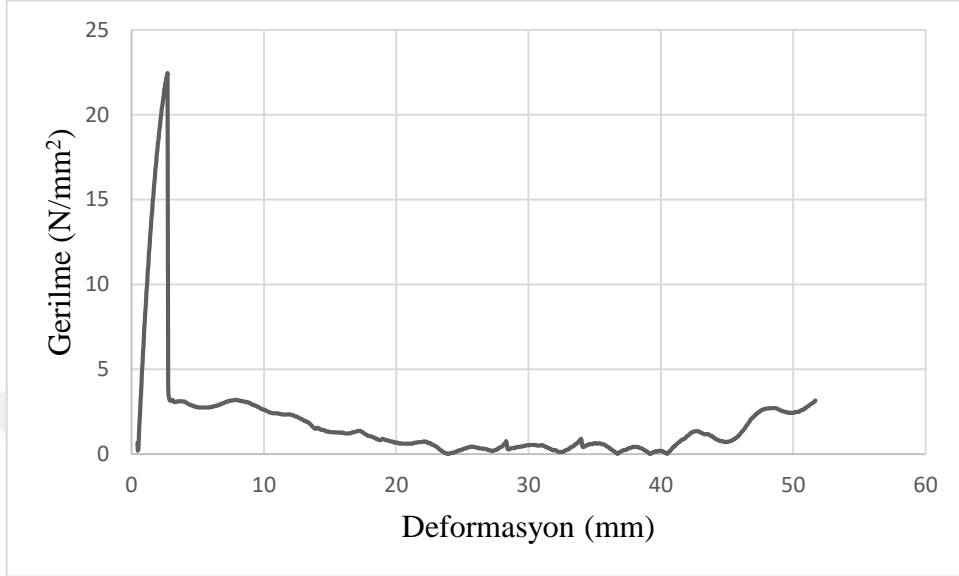


(e)

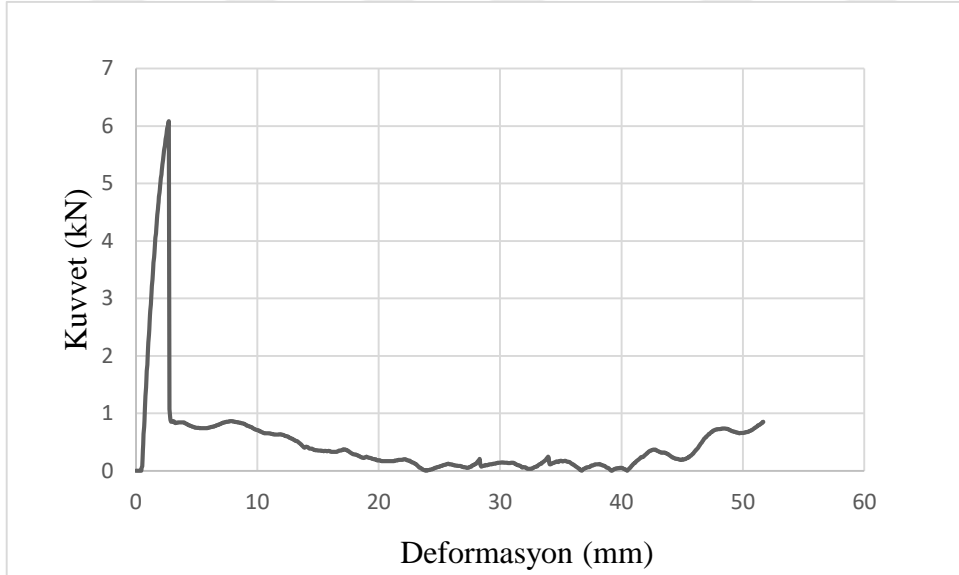
Şekil 5.26 (+60, -60)°'lik açıyla sarılmış numunenin basma esnasındaki hasar görüntüleri

Son numunemiz olan (+60, -60)°'ye ait gerilme deformasyon ve kuvvet deformasyon eğrileri Şekil 5.27 ve 5.28'de sunulmuştur. Bunlardan elde edilen sonuçlara göre absorbe edilen enerji 26 joule ortalama kuvvet 0.5 kN maksimum deformasyon

kuvveti ise 6.08 kN olarak tespit edilmiştir. Bu numune tüm numuneler içerisinde en az enerji absorbe eden numunedir.

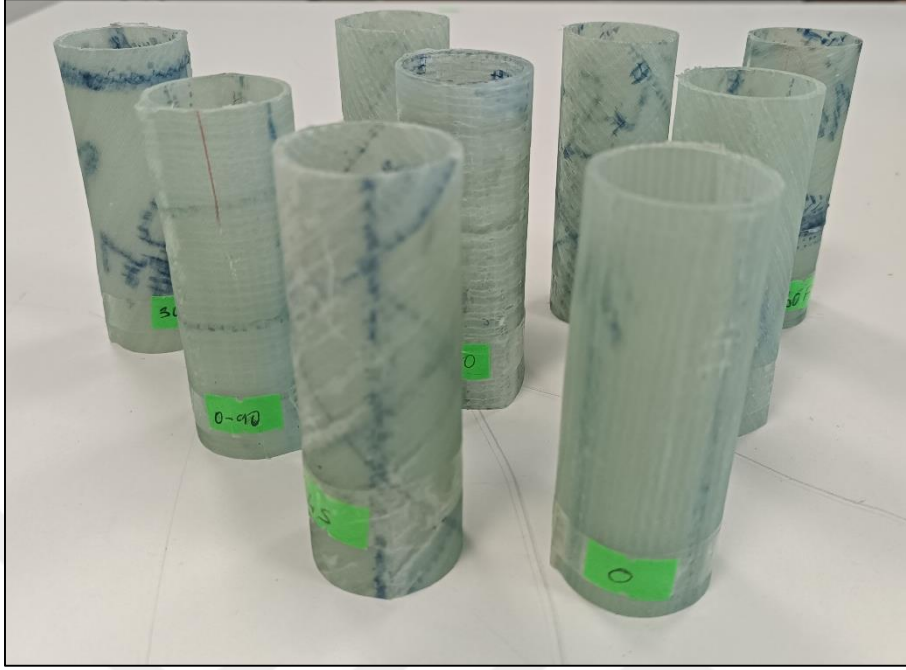


Şekil 5.27 (+60, -60)° ile sarılmış numunenin gerilme deformasyon eğrisi

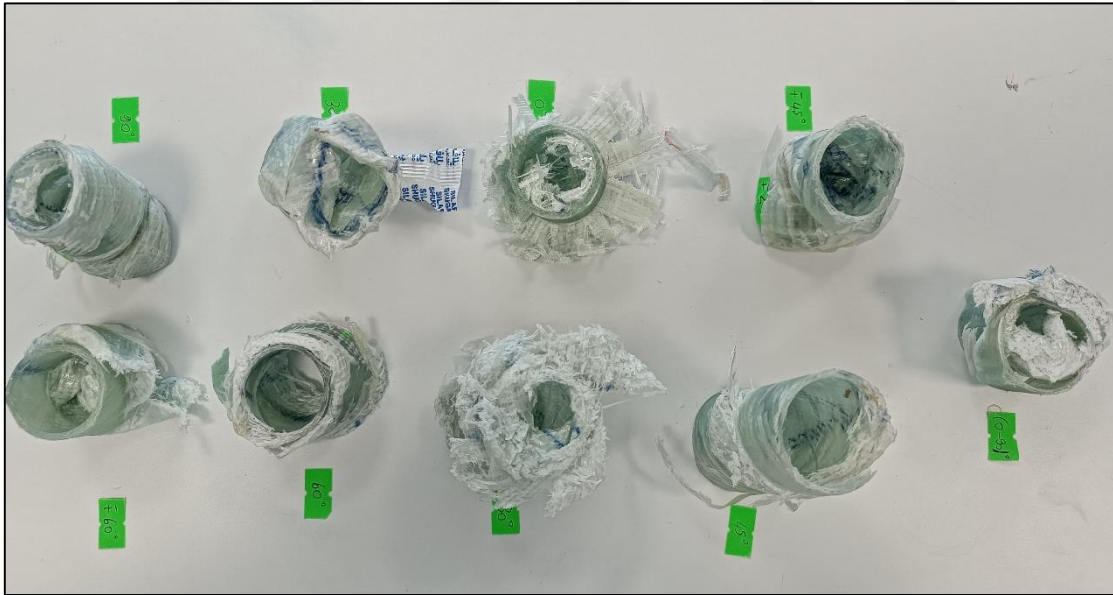


Şekil 5.28 (+60, -60)° ile sarılmış numunenin kuvvet deformasyon eğrisi

Üretim sonrası test için hazır hale getirilen numunelerin bir aradaki görüntüsü Şekil 5.29’da verilmiştir. Test sonrası numunelerin hasar almış görüntüleri üstten ve yandan olmak üzere sırası ile Şekil 5.30 ve 5.31’de sunulmuştur.



Şekil 5.29 Basma testi öncesi numuneler



Şekil 5.30 Basma testi sonrası numunelerin üstten görünümü

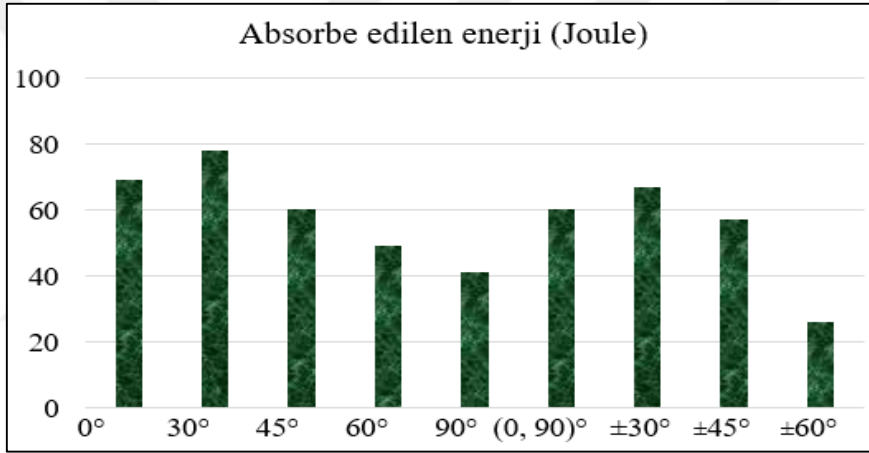


Şekil 5.31 Basma testi sonrası numunelerin önden görünümü

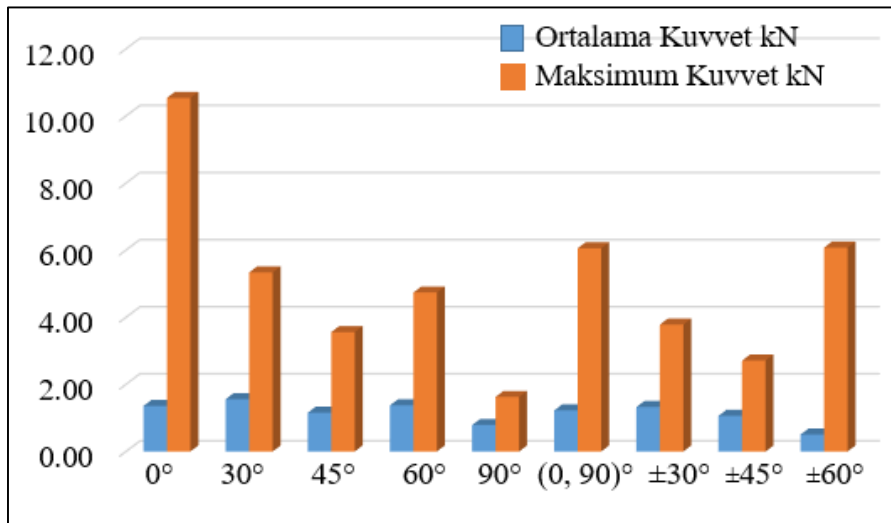
Basma testine tabi tutulan 9 adet kompozit çarpışma kutusu numunesinin test sonrasında gerilme – birim şekil değiştirme ve kuvvet – deplasman grafikleri elde edilen veriler neticesinde oluşturulmuştur. Bu veriler ve grafikler yardımı ile tezin ikinci bölümünde üzerinde durulan formüller kullanılarak bu numunelerin sönümlendiği toplam enerji değerleri, özgül enerji sönümleme değerleri, ortalama deformasyon kuvvetleri, maksimum deformasyon kuvvetleri ve ezilme kuvveti verimi değerleri bulunmuştur. Bu dataların tamamı Çizelge 5.1’de verilmiştir. Ayrıca karşılaştırmaların daha rahat anlaşılması için absorbe edilen enerji karşılaştırması Şekil 5.32’de, ortalama deformasyon kuvveti ve maksimum deformasyon kuvveti karşılaştırmaları Şekil 5.33’te verilmiştir. Son olarak bütün numunelerin ağırlıkları neredeyse eşdeğer olup 39.6 gram olarak ölçülmüştür. Bunun yanında numune kesit alanları 270.911 mm^2 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.1 Test sonrası verilere göre elde edilen analiz sonuçları

Çarpışma kutusu numuneleri	Toplam enerji sönümlenme (j)	Ortalama deformasyon kuvveti (kN)	Maksimum deformasyon kuvveti (kN)	Ezilme kuvveti verimi (%)	Özgül enerji sönümlenme (j/kg)	Kütle (g)
0°	69	1,3572	10,54	0,1287	1742,4	39,6
30°	78	1,56	5,34	0,2921	1969,6	39,6
45°	60	1,157	3,56	0,325	1515,1	39,6
60°	49,1	1,1760	4,74	0,2902	1239,8	39,6
90°	41	0,7917	1,625	0,4872	1051,2	39,6
(0, 90)°	60,1	1,227	6,06	0,2024	1517,6	39,6
(+30, -30)°	67	1,326	3,782	0,350	1691,9	39,6
(+45, -45)°	57	1,067	2,71	0,393	1439,3	39,6
(+60, -60)°	26	0,5049	6,08	0,0830	656,5	39,6



Şekil 5.32 Her bir numune için absorbe edilen toplam enerji değerleri



Şekil 5.33 Maksimum ve ortalama deformasyon kuvvetlerinin karşılaştırılması



6. TARTIŞMA VE SONUÇ

İdeal bir çarpışma kutusu tasarımında amaç çarpışma kutusunun herhangi bir kuvvet karşısında iyi enerji sönümleyebilme davranışı sergileyebilmesidir. Malzeme, geometri, et kalınlığı vb. parametreler dikkate alınarak tasarlanan çarpışma kutusunun iyi bir enerji sönümleyici olma özelliği darbeye karşı gösterdiği bazı verilere bağlıdır. İyi bir enerji sönümleyici performansı gösteren çarpışma kutularında özgül enerji sönümleme ve ezilme kuvveti verimi değerlerinin yüksek olması beklenmektedir. Bu değerlerin yanında maksimum deformasyon kuvvetinin ise küçük seviyede olması istenilen bir durumdur. Çünkü maksimum deformasyon kuvveti darbe esnasında meydana gelen en büyük kuvvettir. Bu değer büyük olması çarpışma kutusunun darbeye karşı gösterdiği direncin düşük olduğunu göstermektedir. Bu da aracın ve araçtakilerin darbeden ciddi oranda daha fazla etkilendiği anlamına gelmektedir. Çarpışma kutusu genellikle ilk çarpışma anında bu kuvvetle karşılaşır ve bu kuvvetin büyüklüğü bazı istenmeyen durumlara sebebiyet verebilmektedir. Bu yüzden bu değer küçük seviyelerde olması oldukça önemli bir durumdur. Ezilme kuvveti verimi ve özgül enerji sönümleme değerleri sönümlenen enerji değerlerini temsil ettiği için yüksek çıkmaları istenmektedir. Önemli bir diğer parametre ise maksimum deformasyon kuvvetinin ortalama deformasyon kuvvetine yakın olmasıdır. Bu sayede ezilme kuvveti değerleri yüksek çıkabilmektedir.

İmalatı ve testleri gerçekleştirilen 9 adet kompozit çarpışma kutusu numunelerinin test sonrasında elde edilen ve derlenen matematiksel verilerine bakıldığında en yüksek enerji sönümleme performansının 30° ile sarılmış çarpışma kutusu numunesinin gösterdiği görülmektedir. Tüm çarpışma kutusu numunelerinin aynı kütleye sahip olduğu bilgisi göz önüne alınarak en yüksek özgül enerji sönümleme değerinin, en yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğu için bu numuneye ait olduğu görülmektedir. Bu numunenin sahip olduğu ezilme kuvveti verimi kendisinden daha az seviyede enerji sönümleyen çarpışma kutularından daha düşük değerde olduğu görülmüştür. Bunun temel nedeni genellikle ilk çarpışma sırasında ortaya çıkan maksimum deformasyon kuvvetinin diğer numunelerden yüksek çıkma durumudur. Bunu belirleyen bir diğer parametre ise darbe boyunca maruz kalınan tüm kuvvetlerin ortalaması olan ortalama deformasyon kuvvetinin maksimum deformasyon kuvvetinden daha düşük seviyelerde olmasıdır. Bu numunenin dışında enerji sönümleme değerleri ele alındığında sırasıyla en yüksek değere

sahip numuneler (0, (+30, -30), (0, 90), 45, (+45, -45), 60, 90 ve (+60, -60))° ile sarılan numunelerdir. Kütle hepsinde eşit olduğu için özgül enerji sönümleme değerleri de enerji sönümleme değerlerine bağlı olarak bu sıralamaya tabidir. En düşük enerji sönümleme kapasitesine sahip olan (+60, -60)° ile sarılmış numunenin en düşük özgül enerji sönümlemesine ve ortalama deformasyon kuvvetinin maksimum deformasyon kuvvetinden çok düşük olmasından kaynaklı en düşük ezilme kuvveti verimine sahip olduğu görülmektedir. Numunelerin ortalama deformasyon kuvvetine baktığımızda en yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olanın en yüksek ortalama deformasyon kuvvetine, en düşük enerji sönümleme kapasitesine sahip olan numunenin ise en düşük ortalama deformasyon kuvvetine sahip olduğu gözlemlenmektedir. Bu değerlerden görüldüğü gibi ortalama deformasyon kuvvetinin toplam enerji sönümlemeye doğrudan etki ettiği görülmüştür. Bu sıralama paralelinde ezilme kuvveti veriminin karşılaşılan maksimum deformasyon kuvvetinin büyüklüğüne göre değiştiği görülmektedir.

Sonuç olarak kompozit çarpışma kutusu numunelerinde yük taşıyıcı olarak yer alan elyaf malzemesinin, kullanılan elyafın cam liflerinin dokuma yönüne bağlı olarak farklı açılarla sarılması sonucunda başta sönümlenen toplam enerji değerleri olmak üzere maksimum deformasyon kuvvetine, ortalama deformasyon kuvvetine, ezilme kuvveti verimi ve özgül enerji sönümleme değerlerine farklı etki etmiştir. Elyafların sarım açısından kaynaklı, imal edilen numunelerin darbe karşısında gösterdiği bazı mekanik parametreler farklılık göstermiştir. Özellikle bazı numunelerde örneğin (0, (0, 90), (+60, -60))° ilk darbe anında ve ilk bölgede oluşan, diğer bir deyişle ilk tepe kuvveti olarak adlandırdığımız maksimum deformasyon kuvvetlerinin yüksek çıkması elyafların sarım açısından kaynaklı olarak karşımıza çıkan sönümlenen toplam enerji değerleri ile beraber en önemli somut matematiksel veridir. Bu açıdan, bu değerleri somut örnekler üzerinde somut matematiksel veriler ışığında tespit etmek bu yüksek lisans tezinin birincil amacıdır. Bu açıdan bu çalışma daha idealini tasarlamak ve imal etmek ve geliştirmek için önemli bir adımdır.

KAYNAKLAR

- Abbasi, M., Biddala Reddy, S. R., Ghafarinazari, A., Fard, M. (2015). Multiobjective crashworthiness optimization of multi-cornered thin-walled sheet metal members. *Thin-Walled Structures*, 89, 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.12.009>
- Abdollahpoor, A., Marzbanrad, J. (2010). Crashworthiness study of axial impact in cylindrical aluminium tubes. *Journal of Mechanical Engineering-Strojnicky Časopis*, 61(1).
- Abdullah, N. A. Z., Sani, M. S. M., Salwani, M. S., Husain, N. A. (2020). A review on crashworthiness studies of crash box structure. *Thin-Walled Structures*, 153, 106795. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106795>
- Adanur, Ö. (2019). *Farklı tasarımlarda w kesitlere sahip çarpışma kutuları için darbe sönümleme kabiliyetlerinin deneysel analizi*, Yüksek lisans tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye
- Agrawal, D., Rawat, S., Upadhyay, A. K. (2016). Crashworthiness of circular tubes with structurally graded corrugations. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2016-28-0050>
- Ağcakoca, E., Yaman, Z., Yazıcı, Y. E. (2017). Lif katkılı kompozit kiriş ile çelik kutu profilin darbe deneyi altındaki davranışı. *ISMSIT*.
- Akkuzu, E. E. (2012). *Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin işlenebilirliğinin incelenmesi*, Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/643926>
- Akman, M. (2022). *Polimer çarpışma kutularının darbe yüklemesi altındaki mekanik davranışlarının deneysel olarak incelenmesi*, Yüksek lisans tezi. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye. <https://avesis.uludag.edu.tr/yonetilen-tez/357554f1-5c5c-4201-b8cc-d71e3ba9a78f/polimer-carpisma-kutularinin-darbe-yuklemesi-altindaki-mekanik-davranislarinin-deneysel-olarak-incelenmesi>
- Akpınar, S. (2016). Kompozit malzemelerin sınıflandırılması, slayt. <https://slideplayer.biz.tr/slide/11641716/>
- Aktaş, C., Acar, E., Güler, M., Altın, M. (2021). Tetra kiral ve içe girintili çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 24. <https://doi.org/10.31590/ejosat.901494>
- Aktay, L., Çakıroğlu, C., Güden, M. (2011). Quasi-static axial crushing behavior of honeycomb-filled thin-walled aluminum tubes. <https://doi.org/10.2174/1874088X01105010184>
- Albak, E. İ. (2021). Alüminyum, magnezyum ve çelik malzemelerle tasarlanmış tek hücreli ve çok hücreli çarpışma kutularının çarpışma performanslarının incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(2). <https://dergipark.org.tr/tr/pub/cukurovaumfd/issue/64512/982931>
- Albak, E. İ., Solmaz, E., Öztürk, F. (2022). Çoklu arama stratejileri kullanan çok amaçlı parçacık sürü optimizasyonu yöntemi ile dairesel çok hücreli çarpışma kutusunun optimizasyonu. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 27(1). <https://doi.org/10.17482/uumfd.977327>
- Altın, M. (2017). *Taşıtlarda kullanılan metalik köpük içeren çarpışma kutularının enerji sönümleme kapasitelerinin araştırılması*, Doktora tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye. <https://avesis.gazi.edu.tr/yonetilen->

- tez/5cd83cce-c6aa-4ab8-bdf4-283d4afc67e6/tasitlarda-kullanilan-metalik-kopuk-iceren-carpisma-kutularinin-enerji-sonumleme-kapasitelerinin-arastirilmesi
- Altın, M. (2019a). Çarpışma kutularının üzerine açılan oyukların çarpışma performansı üzerine etkisinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 22(1).
<https://doi.org/10.2339/politeknik.403989>
- Altın, M. (2019b). Investigation of performances of energy absorbing profiles having different geometries under oblique loads. *Gazi Üniversitesi*, 34(3).
<https://doi.org/10.17341/gazimmfd.460549>
- Altın, M., Yücesu, H. S. (2019). Farklı geometrik yapılarıdaki çarpışma kutularının içerisine yerleştirilen alüminyum köpük malzemenin enerji sönümleme kapasitesi üzerine etkisinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 22(1).
<https://doi.org/10.2339/politeknik.426642>
- Arı, A. (2022). *Polimer matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi*, Doktora tezi. Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye. <http://acikerisim.uludag.edu.tr/jspui/handle/11452/29091>
- Ateş, F., Bakirci, A., Günaydin, A. C., Ensarioğlu, C., Çakır, M. C. (2022). Otomobil çarpışma kutularında performans artırıcı yaklaşımların incelenmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24(2).
<https://doi.org/10.25092/baunfbed.1025311>
- Bartın Üniversitesi. (2008). Kompozit malzemeler, slayt.
- Başçı, Ü. G. (1999). *Al2O3 Partikül takviyeli Al-Cu esaslı metal matrisli kompozit malzeme üretimi*, Yüksek lisans tezi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
<https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=UodRiSat-urh1S3G-c527w&no=UodRiSat-urh1S3G-c527w>
- Bayraktar, Ş., Turgut, Y. (2013). Elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin talaşlı şekillendirilebilirliği. 1. **Uluslararası Plastik ve Kauçuk Teknolojileri Sempozyumu**, Ankara, Türkiye.
https://www.researchgate.net/publication/305477720_Elyaf_takviyeli_polimer_kompozit_malzemelerin_talasli_sekillendirilebilirliği
- Bekem, A. (2013). *Elyaf Takviyeli termoplastik matrisli kompozit malzeme üretimi ve karakterizasyonu*, Doktora tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Bilbay, F., Reis, M., Çakan, B. G., Çakır, M. (2019). Otomobillerde ön çarpışma kolu malzemesi olarak fee340 ve dp600 malzemelerin çarpışma performanslarının karşılaştırılması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(1).
<https://doi.org/10.17482/uumfd.492461>
- Boreanaz, M. (2018). *Development of crash box for automotive application*, M.Sc. thesis. Politecnico Di Torino.
- Can, O. (2017). *Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri*, Bitirme çalışması. Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Trabzon, Türkiye.
- Çağar, P. (2021). Endüstriyel ürünlerin tasarımında yaygın yer edinen polimer matrisli kompozit malzemelerin özellikleri. *Turkish Journal of Fashion Design and Management*, 3(2).
- Çakan, B. G., Ensarioğlu, C., Çakır, M. C. (2019). Farklı oranlarda alüminyum köpük takviyeli çarpışma-kutularının mekanik performanslarının karşılaştırılması. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(1).
<https://doi.org/10.25092/baunfbed.547179>

- Çakır, M., Berberoğlu, B. (2018). E-cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerin elyaf oranındaki artış ile mekanik özelliklerindeki değişimlerin incelenmesi. *El-Cezeri*, 5(3). <https://doi.org/10.31202/ecjse.415482>
- Çavdar, K., Bingöl, M. (2016). Farklı takviye malzemelerinin kompozit malzeme mekanik özelliklerinin iyileştirilmesine etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 21(2). <https://doi.org/10.17482/uujfe.35051>
- Çelik, M., Reis, M. (2019). Karbon kompozit çarpışma kutularında poliüretan köpük takviyesinin çarpışma performansına etkisinin deneysel olarak incelenmesi. **1. Uluslararası Bilim ve İnovasyon Kongresi**, Denizli Türkiye. <https://avesis.uludag.edu.tr/yayin/232e5094-5d2a-4bd6-aa2b-d433043fa7c2/karbon-kompozit-carpisma-kutularinda-poliuretan-kopuk-takviyesinin-carpisma-performansina-etkisinin-deneysel-olarak-incelenmesi>
- Demirci, E. (2014). *Taşıtlarda önden çarpışma performansını etkileyen enerji yutucuların optimum tasarımı*, Yüksek lisans tezi. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/115180>
- Deniz, M. E. (2005). *Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ve ısıl işleme presleme tekniği kullanarak kompozit malzeme üretecek bir düzeneğin tasarım ve imalatı*, Yüksek lisans tezi. Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, Türkiye. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=RCmJeZPFhGxulMq0khLCpg&no=fasv52e1ZSW_cySnmMgnoQ
- Djamaluddin, F., Abdullah, S., Ariffin, A. K., Nopiah, Z. M. (2015). Optimization of foam-filled double circular tubes under axial and oblique impact loading conditions. *Thin-Walled Structures*, 87, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.10.015>
- Doğan, S., Şevkat, E., Kelestemur, M., Tümer, H. (2014, Nisan 24). Fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemeden yapılmış basınçlı tankların dünyadaki uygulamaları ve periyodik güvenlik testleri. **10. Uluslararası Kırılma Konferansı**, Kayseri, Türkiye.
- Doğu, G. (2019). *Cam elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemelerde sürünme davranışının incelenmesi*, Yüksek lisans tezi. Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uşak, Türkiye. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/688552>
- Dokur, M. M. (2009). *Karbon fiber esaslı polimerik matrisli kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu*, Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye. <http://hdl.handle.net/11527/8401>
- Durgun, İ., Doruk, E. (2014). Farklı oluk geometrilerinin ezilme kutusu çarpışma performansına etkilerinin incelenmesi. **7. Uluslararası Ulaşım Teknolojileri Sempozyumu ve Fuarı**, İstanbul.
- Durgun, İ., Doruk, E., Başer, T. (2016). Taşıt elemanlarında kullanılan alüminyum alaşımlarının enerji sönmeme yeteneklerinin incelenmesi. *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalurji ve Malzeme Mühendisleri Odası*, 178.
- Engül, M. (2016). *Experimental and numerical investigation of the crushing process of composite crash box*, Yüksek lisans tezi. Boğaziçi Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Evcı, C., Yılmaz, U. (2015). Havacılık ve savunma sektöründe kompozit malzemelerin geleceği. *Savunma Bilimleri Dergisi*, 14(2).
- Genel, K. (2017). *Çift kademeli (ezilme kutusu, konik deformasyon bilezigi) enerji absorbe edici sistem tasarımı ve imalatı*, Proje çalışması. Sakarya Üniversitesi. <https://acikerisim.sakarya.edu.tr/handle/20.500.12619/95031>

- Gülmez, S. (2018). *Otomotiv endüstrisinde kullanılan polimer matrisli kompozit malzemeler*, Yüksek lisans tezi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, Türkiye. <https://gcris.pau.edu.tr/handle/11499/2527>
- Günaydın, K., Rea, C., Kazancı, Z. (2022). Energy absorption enhancement of additively manufactured hexagonal and re-entrant (auxetic) lattice structures by using multi-material reinforcements. *Additive Manufacturing*, 59, 103076. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103076>
- Hoang, H., Langseth, M., Porcaro, R., Hanssen, A.-G. (2011). The effect of the riveting process and aging on the mechanical behaviour of an aluminium self-piercing riveted connection. *European Journal of Mechanics A-solids - EUR J MECH A-SOLID*, 30, 619-630. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2011.02.006>
- Hou, S., Li, Q., Long, S., Yang, X., Li, W. (2008). Multiobjective optimization of multi-cell sections for the crashworthiness design. *International Journal of Impact Engineering*, 35(11), 1355-1367. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.09.003>
- Isaac, C. W. (2020). Crashworthiness performance of green composite energy absorbing structure with embedded sensing device providing cleaner environment for sustainable maintenance. *Sustainable Materials and Technologies*, 25. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00196>
- Isaac, C. W., Oluwole, O. (2016). Energy absorption improvement of circular tubes with externally press-fitted ring around tube surface subjected under axial and oblique impact loading. *Thin-Walled Structures*, 109, 352-366. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.10.006>
- Kaya, A. (2016). Kompozit malzemeler ve özellikleri. *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29.
- Kaya, B. S. (2021). *Otomobil ön tampon kirişi tasarımında ısıtma işlemi görmüş malzemelerin kullanımının çarpışma performansına etkisinin incelenmesi ve kirişlerin optimizasyonu*, Yüksek lisans tezi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, Türkiye.
- Kayar, E. (2019). *Bir taşıt çarpışma kutusunun sonlu elemanlar analizleri*, Yüksek lisans tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/380015>
- Kim, J.-K., Mai, Y.-W. (1998). Engineered interfaces in fiber reinforced composites. *elsevier*.
- Korkusuz, O. B. (2021). *Polimer matrisli kompozitlerin lazer ile işlenmesi*, Yüksek lisans tezi. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye.
- Kösedağ, E., İşler, D. (2023). Effect of section geometry and material type on energy absorption capabilities of crash boxes. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 13(1). <https://doi.org/10.7212/karaelmasfen.1150591>
- Langseth, M., Hopperstad, O. S. (1996). Static and dynamic axial crushing of square thin-walled aluminium extrusions. *International Journal of Impact Engineering*, 18(7). 949-968. [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(96\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(96)00025-5)
- Mirfendereski, L., Salimi, M., Ziaei-Rad, S. (2008). Parametric study and numerical analysis of empty and foam-filled thin-walled tubes under static and dynamic loadings. *International Journal of Mechanical Sciences*, 50(6), 1042-1057.
- Mohammadiha, O., Ghariblu, H. (2017). Crashworthiness study and optimisation of free inversion foam-filled tubes under dynamic loading. *International Journal Of Crashworthiness*, 23, 1-13. <https://doi.org/10.1080/13588265.2017.1368119>

- Nagel, G. M., Thambiratnam, D. P. (2005). Computer simulation and energy absorption of tapered thin-walled rectangular Tubes. *Thin-Walled Structures*, 43(8), 1225-1242. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2005.03.008>
- Özdemir, B. (2020). *Polimer matrisli kompozit malzeme imalatı için vakum destekli mekanizmaların geliştirilmesi ve performanslarının incelenmesi*, Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye. <http://hdl.handle.net/11527/19442>
- Özen, M., Taşkın, N. Ü. (2021). Alüminyum kompozit köpük malzemelerde takviye oranına bağlı olarak darbe davranışının incelenmesi. *Trakya Üniversitesi*, 22(2).
- Özer, G. (2005). *Alüminyum esaslı köpük metal üretimi*, Yüksek lisans tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Özer, H. (2015). *Sürekli cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi*, Yüksek lisans tezi. Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Bursa, Türkiye. <https://avesis.uludag.edu.tr/yonetilen-tez/6b797973-67ec-48e7-98e2-57c2cf02ff01/surekli-cam-elyaf-takviyeli-termoplastik-kompozit-malzemelerin-gelistirilmesi-ve-mekanik-ozelliklerinin-deneysel-olarak-belirlenmesi>
- Özsoy, N. (2015). *Polimer esaslı fiber takviyeli kompozit malzemelerin tribolojik ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*, Doktora tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye. <https://acikerisim.sakarya.edu.tr/handle/20.500.12619/76721>
- Öztürk, İ., Kaya, N. (2008). Otomobil ön tampon çarpışma analizi ve optimizasyonu. <http://acikerisim.uludag.edu.tr/jspui/handle/11452/11912>
- Rajak, D. K., Kumaraswamidhas, L. A., Das, S. (2017). Technical overview of aluminum alloy foam. *Reviews on Advance Materials Science*, 48.
- Rawat, S., Narayanan, A., Nagendiran, T., Upadhyay, A. K. (2017). Collapse behavior and energy absorption in elliptical tubes with functionally graded corrugations. *Procedia Engineering*, 173, 1374-1381. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.12.194>
- Salehghaffari, S., Tajdari, M., Panahi, M., Mokhtarnezhad, F. (2010). Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading. *Thin-Walled Structures*, 48, 379-390.
- Seher Selen Aydın. (2020). *Polimer matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin tahribatlı ve tahribatsız karakterizasyonu*, Yüksek lisans tezi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye. <https://avesis.iuc.edu.tr/proje/3768307f-f321-4bf6-93ce-0997782adbc9/polimer-matrisli-kompozit-malzemelerin-mekanik-ozelliklerinin-tahribatli-ve-tahribatsiz-karakterizasyonu>
- Seydibeyoğlu, M. Ö. (2012). A novel partially biobased pan-lignin blend as a potential carbon fiber precursor. *Biomed Research International*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/598324>
- Sönmez, M. (2009). *Polimer matrisli kompozitlerin endüstri ürünleri tasarımında önemi ve geleceği: Türkiye'den dört örnek firma üzerine bir inceleme*, Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye. <http://hdl.handle.net/11527/952>
- Şevkat, E., Doğan, S., Keleştemur, M. H., Tümer, H. (2014). Fiber takviyeli polimer matrisli kompozit malzemedan yapılmış basınçlı tank uygulamaları ve periyodik güvenlik testleri. **10. Uluslararası Kırılma Konferansı**, Kayseri.

- <https://docplayer.biz.tr/31176924-Fiber-takviyeli-polimer-matrisli-kompozit-malzemededen-yapilmis-basincli-tank-uygulamaları-ve-periyodik-guvenlik-testleri.html>
- Toğulga, M., Tanoğlu, M. (2005). Kompozit Malzemeler, Jeotermal Uygulamaları ve Jeotermal Akışkanın Performansa Etkileri. *TMMOB Makina Mühendisleri Odası*, Jeotermal Enerji Semineri. <https://www.mmo.org.tr/vii-ulusal-tesisat-muhendisligi-kongresi/seminerler>
- Totiger, P. S., Gothe, M. S., Nagavi, S. K., Mulimani, R. G. (2015). Comparative study of mechanical and thermal characterization of glass/carbon hybrid composite. : : *International Journal Of Research In Engineering And Technology*, 4(7).
- Tran, T., Hou, S., Han, X., Tan, W., Nguyen, N. T. (2014). Theoretical prediction and crashworthiness optimization of multi-cell triangular tubes. *Thin-Walled Structures*, 82, 183-195. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.03.019>
- Turgut, T., Kayran, A., Ceylan, M. (2007). Vakum torbalama yöntemi ile kompozit malzemeden yapı üretimi örnek bir havacılık uygulaması. *Mühendis Ve Makine*, 48(566).
- Usta, F. (2015). *Impact analysis of the stepped concentric crash tubes: the effect of the number of tubes*, Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/639096>
- Vinayagar, K., Kumar, A. S. (2017). Crashworthiness analysis of double section bi-tubular thin-walled structures. *Thin-Walled Structures*, 112, 184-193. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.12.008>
- Yakupoğlu, C. (2021). *Otomotivlerde kullanılan crash boxların cmt yöntemi ile birleştirilebilirliğinin ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek lisans tezi. Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi. <https://acikerisim.subu.edu.tr/xmlui/handle/20.500.14002/1064>
- Yaprak, Ş., Akbulut, A. M. (2019). *Trafik kaza ve denetim istatistikleri* (27). Trafik Akademisi Yayınları.
- Yavuz, İ. (2010). Teknik not metalik köpük malzemeler ve uygulama alanları. *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2. https://www.researchgate.net/publication/350451801_Teknik_Not_Metalik_Kopuk_Malzemeler_ve_Uygulama_Alanlari
- Yeni, H., Çelik, H. (2022a). Alüminyum köpük malzemenin plastik ve alüminyum kılıf ile kullanılmasının çarpışma kutularındaki enerji emilimine etkisi. *Uluslararası Bilim Teknoloji Ve Tasarım Dergisi*, 3(1). <https://dergipark.org.tr/tr/pub/istd/issue/71031/1138842>
- Yeni, H., Çelik, H. (2022b). Termoplastik çarpma kutusu ile alüminyum köpük dolgulu alüminyum çarpma kutusunun performansının karşılaştırması. **II.Uluslararası Teknoloji Bilimleri ve Tasarım Sempozyumu**, Giresun. <https://www.giresun.edu.tr/tr/activity-detail/sempozyum-ii-uluslararası-teknoloji-bilimleri-ve-tasarim/1340>
- Yılmaz, T. (2006). *Polimer matrisli kompozitlerin pim ile yük taşıma özelliklerinin incelenmesi*, Doktora tezi. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezDetay.jsp?id=r6L73Nf3qAb0eUqT6BjeIQ&no=lbPJ8vIm5bAMtRlPvEIVfUg>

- Zarei, H., Kröger, M., Albertsen, H. (2008). An experimental and numerical crashworthiness investigation thermoplastic composite crash boxes. *Composite Structures*, 85, 245-257. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2007.10.028>
- Zhou, C., Wang, B., Ma, J., You, Z. (2016). Dynamic axial Crushing of origami crash boxes. *International Journal Of Mechanical Sciences*, 118, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.09.001>





ÖZ GEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Mehmet TAY

Eğitim Bilgileri

Lisans : Makine Mühendisliği
Üniversite : İskenderun Teknik Üniversitesi
Fakülte : Mühendislik ve Doğa Bilimleri
Fakültesi
Bölüm : Makine Mühendisliği
Mezuniyet Yılı : 2018





VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
LİSANSÜSTÜ TEZ ORJİNALLİK RAPORU

Tarih 25/12/2023

Tez Başlığı: FARKLI AÇILARLA SARILMIŞ CAM ELYAF TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTTEN ÜRETİLEN SİLİNDİRİK ÇARPIŞMA KUTULARININ ENERJİ SÖNÜMLEYEBİLME KABİLİYETLERİNİN İNCELENMESİ

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışmamın, kapak sayfası, giriş, ana bölümler ve sonuç bölümlerinden oluşan toplam yüz otuz bir (131) sayfalık kısmına ilişkin, 20/12/2023 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre tezimin benzerlik oranı yüzde dokuz (%9)'dur.

Uygulanan filtreler aşağıda verilmiştir:

- Kabul ve onay sayfası hariç,
- Teşekkür hariç,
- İçindekiler hariç,
- Simge ve kısaltmalar hariç,
- Gereç ve yöntemler hariç,
- Kaynakça hariç,
- Alıntılar hariç,
- Tezden çıkan yayınlar hariç,
- 7 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç (Limit match size to 7 words)

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Lisansüstü Tez Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılmasına İlişkin Yönergeyi inceledim ve bu yönergede belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini bilgilerinize arz ederim.

25/12/2023

Adı Soyadı: Mehmet TAY

Öğrenci No: 20910001241

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği

Programı: Makine Mühendisliği

Statüsü: (✓) Yüksek lisans () Doktora

DANIŞMAN
UYGUNDUR

ENSTİTÜ ONAYI
UYGUNDUR