

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**

**POLİMER MATRİS ESASLI KOMPOZİT ÜRETİMİNDE
KULLANILAN FARKLI KARBON FİBER YAPILARIN
MEKANİK DAYANIMINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CEYDA OKTA

DENİZLİ, KASIM - 2021

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**



**POLİMER MATRİS ESASLI KOMPOZİT ÜRETİMİNDE
KULLANILAN FARKLI KARBON FİBER YAPILARIN
MEKANİK DAYANIMINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CEYDA OKTA

DENİZLİ, KASIM - 2021

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.



CEYDA OKTA

ÖZET

**POLİMER MATRİS ESASLI KOMPOZİT ÜRETİMİNDE KULLANILAN
FARKLI KARBON FİBER YAPILARIN MEKANİK DAYANIMINA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
CEYDA OKTA
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**

(TEZ DANIŞMANI:DR. ÖĞR. ÜYESİ SİDEM KANER)

DENİZLİ, KASIM - 2021

Günümüzde kompozitlere olan talep ve ihtiyaç artmaktadır. Düşük yoğunluğa bağlı olarak konstrüksiyonlarda sağladığı hafiflik, yüksek performans özellikleri ile kompozitler aranan malzemeler haline gelmektedir. Tekstil takviyeli kompozitler üretiminde sahip olduğu materyaller (dokuma, örme kumaş) polimerik kompozitlere dönüştürülerek fonksiyonellik ve teknik performans kazanmaktadır. Bu tez çalışmasında, farklı yoğunluk ve kalınlıkta oluşturulmuş karbon fiber kompozit malzemelerin dokuma ve örgü yapılarının mekanik özellikleri incelenmiştir. Dokuma tipinde 3 katlı 200 g/m² bezayağı, 200 g/m² dimi ve 245 g/m² dimi karbon fiber kumaş ile tek kat 1x1, 2x1, 3x1 interlok örgü yapısına sahip karbon fiber kompozit malzemeler el yatırması ve vakum pres yöntemleri ile üretilmiştir. Üretilen plakaların mekanik özelliklerinin incelenmesi için ASTM D3039 ve ASTM D790 standartlarına göre çekme ve üç nokta eğme testleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda dokuma karbon fiber yapısına sahip kompozit plakaların ve örgü plakaların çekme ve eğme dayanımları incelenmiştir. Dokuma ile elde edilen fiber kompozitlerin çekme ve eğme dayanımının daha yüksek değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Plakaların deneysel çalışmalarda elde edilen kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (FESEM) ile incelenmiş ve elde edilen dayanım değerleri hakkında yorumlama yapılmıştır.

ANAHTAR KELİMELEER: Kompozit malzemeler, karbon fiber kumaş, karbon fiber takviyeli kumaşlar, mekanik özellik.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT CARBON FIBER STRUCTURES USED IN POLYMER MATRIX BASED COMPOSITE PRODUCTION ON MECHANICAL STRENGTH

MSC THESIS

CEYDA OKTA

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
AUTOMOTIVE ENGINEERING**

(SUPERVISOR:ASSIST. PROF. DR. SİDEM KANER)

DENİZLİ, NOVEMBER 2021

Today, the demand and need for composites are increasing. Due to its low density, its lightness in constructions and its high performance properties make composites sought-after materials. In producing of textile reinforced composites, the materials (woven, knitted fabric) are transformed into polymeric composites and gain functionality and technical performance. In this thesis, the mechanical properties of the woven and knitted structures of carbon fiber composite materials formed in different densities and thicknesses were investigated. In weaving type, 3-ply 200 g/m² Plain, 200 g/m² Twill and 245 g/m² Twill carbon fiber fabrics and single-ply 1x1, 2x1, 3x1 interlock carbon fiber composite materials are produced by hand lay-up and vacuum pressing methods. In order to examine the mechanical properties of the produced plates, a tensile test, the three-point flexural test was carried out according to the ASTM D3039 and ASTM D790 standards.

As a result of experimental studies, the tensile strength of composite plates and knitted plates with woven carbon fiber structures were investigated. It has been determined that the tensile strength of fiber composites obtained by weaving is higher. The fracture surfaces of the plates obtained in experimental studies were examined by scanning electron microscopy (FESEM), and interpretations were made about the strength values obtained.

KEYWORDS: Composite materials, carbon fiber fabric, carbon fiber reinforced fabrics, mechanical strength.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
TABLO LİSTESİ	xi
SEMBOL LİSTESİ	xii
ÖNSÖZ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Araştırması	1
1.2 Çalışmanın Amacı	12
2. KOMPOZİT MALZEMELER	13
2.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı	13
2.2 Kompozit Malzemelerin Özellikleri.....	15
2.3 Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları	15
2.3.1 Kompozit Malzemelerin Avantajları	16
2.3.2 Kompozit Malzemelerin Dezavantajları	16
2.4 Kompozit Malzemelerin Genel Kullanım Alanları	17
2.4.1 Havacılık Sanayi	17
2.4.2 Denizcilik Sanayi.....	17
2.4.3 Yenilebilir Enerji Sektörü	18
2.4.4 Spor Malzemeleri.....	18
2.4.5 Otomotiv	18
2.4.6 Sağlık	19
2.4.7 Müzik aletleri.....	19
2.4.8 Yapı sektörü.....	20
2.4.9 Şehircilik.....	20
2.4.10 Ev Aletleri.....	20
2.4.11 Elektrik/Elektronik Sanayi.....	21
2.5 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	21
2.5.1 Takviye Türüne Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	21
2.5.1.1 Partikül Takviyeli Kompozitler.....	22
2.5.1.2 Fiber Takviyeli Kompozitler.....	22
2.5.1.3 Tabakalı Kompozitler.....	23
2.5.1.4 Karma (Hibrit) Kompozitler	25
2.6 Kompozit Malzemelerin Matris Türüne Göre Sınıflandırılması	25
2.6.1 Metal Matrisli Kompozitler	26
2.6.2 Seramik Matrisli Kompozitler	27
2.6.3 Polimer Matrisli Kompozitler	28
2.7 Polimer Matris Çeşitleri	29
2.7.1 Termoplastik Matrisler	29
2.7.2 Termoset Matrisler.....	30
2.7.3 Polyester Reçineler	32

2.7.4	Vinilester Reçineler	32
2.7.5	Fenolik Reçineler	32
2.7.6	Epoksi Reçineler	33
2.7.6.1	Epoksi Reçinelerin Özellikleri	34
2.8	Elyaf Takviye Malzemeleri	35
2.8.1	Karbon Elyaf	35
2.8.2	Cam Elyaf	36
2.8.2.1	E Camı	36
2.8.2.2	C Camı	37
2.8.2.3	S Camı	37
2.8.3	Kevlar (Aramid) Elyaf	37
2.9	Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	38
2.9.1	El Yatırma Yöntemi	38
2.9.2	Vakum İnfüzyon Yöntemi	40
2.9.2.1	Vakum İnfüzyon Yönteminin Avantajları	42
2.9.3	Reçine Transfer Kalıplama (RTM)	43
2.9.4	Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama (VARTM)	44
2.9.5	Karbon Spreading (yayma) Teknolojisi	45
2.9.6	Püskürtme Yöntemi (Spray-up)	46
2.9.7	İplik Sarma	47
2.9.8	Pultrüzyon (Profil Çekme)	48
2.9.9	Karbon Prepreg	48
2.9.10	Otoklav	49
2.9.11	Vakum Torbalama Yöntemi	50
2.9.12	Ekstrüzyon Yöntemi	51
2.9.13	Basınçlı Kalıplama	51
3.	DOKUMA VE ÖRGÜ KARBON FİBER KUMAŞLAR	53
3.1	Dokuma Kumaş Takviyeler	54
3.1.1	Bezayağı (Plain)	54
3.1.1.1	Bezayağı Örgü Özellikleri	56
3.1.2	Dimi Dokuma	57
3.1.2.1	Dimi Dokuma Özellikleri	58
3.1.3	Saten Dokuma Kumaş	58
3.1.3.1	Saten Örgülerin Özellikleri	59
3.2	Örgü Karbon Fiber	60
3.2.1	İnterlok Örgü	60
3.2.2	Dikişli-Çok Eksenli Elyaf Kumaş Takviyeli Kompozitler	61
3.2.3	Çok yönlü (multiaxial) örgüler	62
3.2.4	Tek yönlü (unidirectional) örgüler	63
3.2.5	Çift yönlü (biaxial) örgüler (İki eksenli örgülü kumaşlar)	63
3.2.6	Üç yönlü (triaxial) örgüler (Üç Eksenli Örgülü Kumaşlar)	64
3.2.7	Dört yönlü (quadraxial) örgüler	65
4.	MATERYAL VE METOT	66
4.1	Materyal	66
4.2	Kompozit Plakaların Üretimi	68
4.3	Mekanik Test	76
4.3.1	Çekme Testi	76
4.3.2	Üç Nokta Eğme Testi	78
5.	BULGULAR	82
5.1	Çekme Testi Sonuçları	82

5.1.1	Çekme Dayanımı	87
5.2	Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları	90
5.2.1	Eğilme Dayanımı	91
5.3	FESEM Analizi (Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu) ..	95
5.4	EDS Analizi	103
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	107
7.	KAYNAKLAR.....	110
8.	ÖZGEÇMİŞ	123



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Kompozit malzemenin bileşenleri (Bulut 2014).....	14
Şekil 2.2: Kompozit malzeme yapısı ve genel malzeme grupları (Gaga 2020)....	15
Şekil 2.3: Takviye yapısına göre kompozitler a)elyafı, b) parçacıklı, c) tabakalı ve d) karma kompozitler (Okta 2017).....	21
Şekil 2.4: Parçacık takviyeli kompozit (Cabiroğlu 2012).....	22
Şekil 2.5: Kompozit malzemelerde elyafın yönlenmesi a) tek boyutlu sürekli elyaf, b) dokunmuş bir kumaş şeklindeki düzlemsel sürekli elyaf, c) rastgele süresiz elyaf (Şahin 2011)	23
Şekil 2.6: Tabakalı yapı (Koruvatan 2008).....	24
Şekil 2.7: Tabakalı kompozitlerde yön dizilimi a) Tek katmanlı kompozit yapıda tek yönlü fiber dizilimi, b) Tek katmanlı kompozit yapıda örgü fiber dizilimi (Okta 2017).....	24
Şekil 2.8: Metal matrisli kompozitler.....	26
Şekil 2.9: Seramik matrisli kompozit.....	27
Şekil 2.10: Polimer matrisli kompozitler.....	28
Şekil 2.11:Termoplastik yapılar a) doğrusal ve b) dallı zincir termoplastik yapılar (Morillas 2015).....	30
Şekil 2.12: Polimer moleküllerin düzenleri a) amorf, b)yarı kristal (Chawla 2012).....	31
Şekil 2.13: Polimerik reçine.....	33
Şekil 2.14: Termoset reçinelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.....	34
Şekil 2.15: El yatırma yöntemi a) kalıp yüzeyi, b) işlemin şematik gösterimi (Olgun 2020).....	39
Şekil 2.16: Vakum infüzyon yöntemi (Durgun 2014).....	41
Şekil 2.17: Vakum infüzyon yöntemi ile üretim sistemi (Esenkaya 2019).....	42
Şekil 2.18: RTM kalıplama sistemi (Eker 2008).....	44
Şekil 2.19: Karbon spreading teknolojisi ve kumaş yapısı a) karbon spreading teknolojisi, b) Spread edilmiş ipliklerle üretilmiş biaksial karbon kumaş.....	45

Şekil 2.20: Püskürtme yöntemi	46
Şekil 2.21: İplik sarma yöntemi	47
Şekil 2.22: Profil çekme yöntemi	48
Şekil 2.23: Otoklav üretim yöntemi.....	50
Şekil 2.24: Vakum torbalama yöntemi (Eker 2008).....	51
Şekil 2.25: Basınçlı kalıplama yöntemi.....	52
Şekil 3.1: Karbon elyaf dokuma örnekleri	53
Şekil 3.2: 0°/90° yönlü iki eksenli cam elyaf dokuma kumaş.....	53
Şekil 3.3: Bezayağı dokuma kumaş yapısı a) bezayağı dokuma şematik gösterimi (Derakhshan ve Pourfakharan), b) düzlemsel gösterimi (Naik ve Ganesh 1992).....	54
Şekil 3.4: 200 g/m ² bezayağı dokuma karbon fiber kumaş.....	55
Şekil 3.5: Elyaf dokuma tipleri.....	55
Şekil 3.6: Bezayağı dokuma.....	56
Şekil 3.7: Dimi dokuma örgü raporu a) 2/2 dimi dokuma, b) 3/1 dimi dokuma, c) 3/2 dimi dokuma, d)3/3 dimi dokuma (Özdemir ve diğ.2018).....	57
Şekil 3.8: Dimi dokuma (Çeken 2008).....	57
Şekil 3.9: 200 g/m ² dimi dokuma kumaş yapısı.....	58
Şekil 3.10: Saten örgü örnekleri a) 5’li saten, çözgü etkili, atlama sayısı =2, b) 5’li saten, atkı etkili, atlama sayısı=3 (Çetin 2007).....	59
Şekil 3.11: Tekrarlı saten örgü örnekleri a) 4’lü tekrarlı saten, b) 5’li tekrarlı saten, atlama sayısı 2, c) 5’li tekrarlı saten atlama sayısı 3 (Çetin 2007).....	59
Şekil 3.12: İnterlok örgü a) ön yüz, b) arka yüz (Çeken 2008).....	61
Şekil 3.13: İnterlok örgü raporu (Çeken 2008).....	61
Şekil 3.14: İki sıranın iç içe geçmiş hali (Çeken 2008).....	61
Şekil 3.15:Dokuma kumaş ve iki eksenli dikişli kumaş (0°/90°yönlü) karşılaştırılması (Yalçın 2012).....	62
Şekil 3.16: Tek yönlü (0° yönlü) kumaş yapısı (METYX Kompozit 2012).....	63
Şekil 3.17: Tek yönlü örgü yapısı.....	63
Şekil 3.18: İki eksenli (0°/90°) kumaş (METYX Kompozit 2012).....	64
Şekil 3.19: Biaxial cam elyaf örgü yapıları a) 0°/90°, b) +45°/-45 açılı.....	64
Şekil 3.20: Üç eksenli kumaş yapısı a) (45°/90°/-45°) açı diziliminde (Metayx Kompozit 2012), b) 0°/+45°/-45 açı diziliminde bir triaxial kumaş	

yapısı (Yalçın 2012).....	64
Şekil 3.21: Dört eksenli (0°/45°/-45°/90°) kumaş (Yalçın 2012).....	65
Şekil 4.1: 3K karbon fiber ip (DowAksa2021).....	66
Şekil 4.2: Passap Duomatic 80 örme makinesi.....	67
Şekil 4.3: Karbon fiber kumaşların ön yüz görünimleri (a) bezayağı konstrüksiyonundaki kumaş, (b) 200 g/m ² gramajındaki 2/2 dimi konstrüksiyonundaki	68
Şekil 4.4: Deneysel çalışmada kullanılan epoksi reçine ve sertleştirici a) EPX 200 epoksi reçine, b) 385 H sertleştirici (Epakem 2019).....	69
Şekil 4.5: Kompozit plakaların testere ile kesilmesi.....	71
Şekil 4.6: Örgü karbon fiber kumaşların kesim işlemi a) 1x1 interlok örgü, b) 2x1 interlok örgü, c) 3x1 interlok örgü.....	72
Şekil 4.7: Dokuma karbon kompozit plakalar a) 200 bezayağı dokuma, b) 200 dimi dokuma, c) 245 dimi dokuma.....	72
Şekil 4.8: Hazırlanan çekme numunelerinin kesitleri (ASTM D 3039).....	72
Şekil 4.9: Numunelerin giyotin makas ile kesilmesi.....	73
Şekil 4.10: 180 mesh zımpara kağıdı.....	73
Şekil 4.11: Örgü ve dokuma karbon fiber numunelerin yüzeylerinin zımpara işlemi.....	74
Şekil 4.12: Araldite 2015-1 kimyasal yapıştırıcı.....	74
Şekil 4.13: Araldite 2015-1 kimyasal yapıştırıcı tabancası.....	74
Şekil 4.14: Araldite 2015-1 kimyasal yapıştırıcının plaka yüzeylerine yapıştırma işlemi.....	75
Şekil 4.15: Numunelerin hazırlık aşaması a) Kesilmiş numunelerin plaka yüzeyine yapıştırma işlemi, b)Strech film ile sarılan numunelerin bantlama işlemi, c)Mandal ile tutturulması.....	75
Şekil 4.16: Çekme deneyi cihazı	77
Şekil 4.17: 245 dimi dokuma tipinde çekme numunesinin cihazına bağlanması.....	77
Şekil 4.18: Kompozit plakaların kırılma yüzeyleri a) 245 dimi dokuma tipinde kırılma yüzeyi, b) dokuma tipinde karbon fiber lif ayrılması, c) dokuma tipinde karbon fiber lif ayrılması, d) 200 bezayağı dokuma tipinde kırılma yüzeyi.....	78
Şekil 4.19: Üç nokta eğme test cihazı ve numunenin cihaza yerleştirilmesi.....	79

Şekil 4.20: Kompozit numunelerin şematik gösterimi.....	79
Şekil 4.21: Dokuma tipinde eğme testi numuneleri a) 200T, b) 200P ve c)245T.....	80
Şekil 4.22: Örgü tipinde eğme testi numuneleri a) 1x1, b) 2x1 ve c) 3x1 interlok	80
Şekil 4.23: Eğilme test yüzeyleri a)200P1, b)200P3, c)200T1 ve d)245T2.....	80
Şekil 5.1: 200 bezayağı dokuma tipinde karbon kompozit numunelerin gerilim- gerinim eğrileri.....	83
Şekil 5.2: 200 dimi dokuma tipinde karbon kompozit numunelerin gerilim- gerinim eğrileri.....	84
Şekil 5.3: 245 dimi dokuma tipinde karbon kompozit numunelerin gerilim- gerinim eğrileri	85
Şekil 5.4: 1x1 interlok örgü tipine sahip karbon kompozit numunelerin gerilim- gerinim eğrileri.....	85
Şekil 5.5: 2x1 interlok örgü tipine sahip karbon kompozit numunelerin gerilim- gerinim eğrileri.....	86
Şekil 5.6: 3x1 interlok örgü tipine sahip karbon kompozit numunelerin gerilim- gerinim eğrileri.....	87
Şekil 5.7: FESEM analiz cihazı.....	96
Şekil 5.8: Kaplama cihazı.....	96
Şekil 5.9: SEM cihazı işlem aşamaları (a) Holdera yerleştirilen numunelerin Au- Pd kaplanması, (b) Kaplanan numunelerin görüntüsü.....	97
Şekil 5.10: Kaplama işlemi yapılmış kompozit plakalar (a) Kaplanmış numuneler, (b)Numunelerin üstten kırılma yüzeylerinin görüntüsü.....	97
Şekil 5.11: 245 dimi dokuma kumaş yapısına sahip numunenin FESEM analizi görüntüleri a) 100X büyütme, b) 250X büyütme, c) 500X büyütme, d) 1000X büyütme.....	98
Şekil 5.12: 200 dimi dokuma kumaş yapısına sahip numunenin FESEM analizi görüntüleri a) 250X büyütme, b) 500X büyütme, c) 1000X büyütme.....	100
Şekil 5.13: 3x1 interlok örme kumaş yapısına sahip numunenin FESEM analizi görüntüleri a)250X büyütme, b) 500X büyütme, c) 1000X büyütme.....	102

Şekil 5.14: 245 dimi dokuma karbon kompozit numunenin EDS analizi.....	104
Şekil 5.15: 200 dimi dokuma karbon kompozit numunenin EDS analizi.....	105
Şekil 5.16: 3x1 interlok örme karbon kompozit numunenin EDS analizi.....	106



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Matris-Takviye elemanı malzeme cinsine göre kompozitler.....	29
Tablo 2.2: Yaygın kullanılan polimer matrisler.....	32
Tablo 2.3: Çeşitli fiberler ile takviyelendirilmiş epoksilerin karşılaştırılması(0°- 90°) (Crawford 2002).....	38
Tablo 4.1: Çalışmada kullanılan 3K karbon elyafa ait teknik bilgiler.....	67
Tablo 4.2: Çalışmada kullanılan karbon dokuma kumaşların teknik bilgiler (Epakem 2019).....	68
Tablo 4.3: EPX 200 epoksi reçine özellikleri.....	69
Tablo 4.4: Deneysel çalışmada kullanılan kumaş ve reçine özellikleri.....	70
Tablo 5.1: 200 bezayağı, 200 ve 245 dimi dokuma ve 1x1, 2x1, 3x1 interlok örgü tipinde karbon kompozit numunelerin çekme testi sonuçları.....	82
Tablo 5.2: Üç nokta eğme testi sonuçları.....	90

SEMBOL LİSTESİ

σ	: Çekme dayanımı
CFRP	: Karbon fiber takviyeli polimerler
GFRP	: Cam fiber takviyeli polimerler
UV	: Ultraviyole
VARTM	: Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama
RTM	: Reçine Transfer Kalıplama
KNT	: Karbon Nanotüp Takviye
TG-DTG	: Termal Gravimetre- Diferansiyel Termal Gravimetre Analizleri
e.a.ü	: %Elyaf(kumaş) ağırlığı üzerinden hesaplama

ÖNSÖZ

Tez çalışması ile elde edilen verilerin, tekstil takviyeli kompozitlerin çalışma alanlarında yararlı olmasını dilerim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana her konuda yardımcı olan, çalışmalarına katkıda bulunan, her zaman desteğini hissettiğim çok değerli danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Sidem KANER'e teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisans eğitimimde bilgi ve değerli görüşlerini esirgemeyen, deneysel çalışmaların verimli sürdürülebilmesi için vermiş olduğu desteklerden dolayı değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Engin TAN'a teşekkür ederim.

Tezin gelişimi açısından her zaman yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Dr. Cem Gök'e ve Dr. Öğr. Üyesi Sinan AKSÖZ'e teşekkür ederim.

Her zaman desteklerinden dolayı çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Ömer Altan DOMBAYCI' ya teşekkür ederim.

Her konuda desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olan, maddi ve manevi güç kahramanlarım, canım anneme ve babama minnettarım. Her zaman yanımda olan canım meslektaşım, ikizime teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, her geçen önem kazanmaktadır ve kullanım alanlarının artışıyla üretim alanına kolaylıklar sağlamaktadır. Üstün mekanik özellikleri sayesinde tercih edilme unsurları sağlayan, ileri teknolojik malzemelerin ortaya çıkışıyla geniş bir kesime ürün sunmaktadır. Avantajların sağladığı çalışmalar sürekli artarak yeni kullanım alanları yaratmaktadır. Günümüzde havacılık, sivil savunma ve otomotiv sanayinde kullanım oranları artışı ile sektörel bazda kompozit malzemelerin üretim metodolojileri gelişim göstermektedir. Karbon ve cam fiber kompozit malzemelerin üretimi üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Dokuma ve örgü tipinde karbon kompozitler üzerine literatürde az çalışma bulunmaktadır. Mekanik özelliklerin incelenmesi hususunda kaynaklık edebileceği beklenmektedir.

1.1 Literatür Araştırması

Doğan (2020) çalışmasında fiber takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde takviye malzemesi olarak Kevlar, karbon ve S-2 cam fiber kullanmıştır. Kevlar fiber 300 g/m^2 , karbon fiber 200 g/m^2 , S-2 cam fiber ise 190 g/m^2 alan yoğunluğuna sahiptir. Çalışmada sahip oldukları materyaller sırasıyla 3/1 dimi örgü, düz örgü ve düz örgü tipindedir. Matris malzemesi epoksi reçine tercih edilerek vakum destekli reçine infüzyon (VARTM) üretim metodu ile kompozit numuneler üretilmiştir. Standartta uygun olarak gerçekleştirilmiş olan düşük hız darbe testi sonucunda 20 J, 40 J ve 60 J enerji değerleri için kuvvet deformasyon incelemeleri yapılmıştır. Farklı sıcaklık parametrelerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda kompozit plakaların kevlar ve karbon elyaf takviyeli numunelerde enerji seviyesi arttıkça numune yüzeylerinde delinme meydana gelmiştir. Aynı kalınlığa sahip olan numuneler olsa bile kumaş kat sayısının darbe tepkisine etkisi saptanmıştır.

Tugan (2021), tekstil esaslı kompozitler de cam, karbon ve bazalt liflerinden elde edilen dokuma tipindeki kompozitlerin mekanik özelliklerini deneysel olarak incelemiştir.

Çalışma kapsamında, 1200 tex iplikte bazalt, 3K, 12K karbon ve E tipi 300 tex cam iplikler bezayağı örgüsünde dokuma ile kumaş haline getirilmiştir. Kumaş yapılarına uygun olarak epoksi reçine ve sertleştirici kullanılmıştır. Elle yatırma yöntemi ile kompozit yapılar elde edilmiştir. Çekme ve üç nokta eğme testi sonuçlarında elde edilen verilere göre; çözgü yönünde en büyük çekme ve eğme dayanımı cam elyaf hibrit kompozitte, atkı yönünde en büyük çekme dayanımı 12K karbon ile yapılan hibrit kompozitte en büyük eğme dayanımı ise bazalt ile yapılmış kompozitlerde ulaşılmıştır.

Tursun (2019) iki boyutlu ortogonal dimi dokuma kumaş tipinde kompozit laminatın elastik analizi için deneysel çalışmalar yapmıştır. Takviye ve matris malzemesi olarak sırasıyla cam elyaf kumaş/epoksi ile karbon elyaf kumaş/epoksi reçine 12 katmanlı yapıda kompozitler vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin mekanik davranışlarını incelemek için standartlara uygun olacak şekilde mekanik testler yapılmıştır. Çekme testi sonuçlarında edilen verilere göre elastisite modülü, Poisson oranı ve kayma modülü değerleri yorumlanmıştır. Cam elyaf kumaş/epoksi numunelerin ortalama çekme gerilmesi, karbon elyaf kumaş/epoksi numunelerden daha düşük sonuçlara ulaşılmıştır. CFRP ve GFRP numunelerin sayısal gerilme değerleri deneysel gerilme değerlerinin sonucuna oranla sırasıyla %21 ve %29 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Gülcan (2019) yaptığı çalışmada farklı ağırlıklardaki örgü tiplerinde karbon dokuma kumaş kullanmıştır. Tek ve çift katlı kompozit plaka yapısına sahip 3K ve 12K karbon elyafların 200 ve 600 g/m² ağırlığında kumaşlar kullanılmıştır. Kompozit numuneler vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi ile üretilmiştir. Dimi/dimi, bezayağı/bezayağı ve dimi/bezayağı tipinde hibrit yapıda olacak şekilde ayarlanmıştır. Çekme testi yapılmış numuneler incelendiğinde, 200 g/m² ağırlığında bezayağı kumaş tipindeki kompozit plakada, dimi kumaş tipindeki kompozit plakadan daha yüksek modül değerine ulaşılmıştır. 600 g/m²'lik kumaşlar için de benzer durum geçerlidir. Farklı ağırlık etkisi hususunda karşılaştırıldığında 200 g/m²'lik kumaşların daha yüksek modül değerleri saptanmıştır. Bu durum 200 g/m²'lik kumaşta atkı ve çözgü iplikleri üzerinde 3000 filament, 600 g/m²'lik kumaşta 12000 filament yer değiştirmesine bağlı olarak açıklanmaktadır.

Uzama değerleri incelendiğinde, 12000 filamentli ipliklerin kullanıldığı 600 g/m²'lik kumaş kullanımı ile üretilen kompozit plakalar, 3000 filamentli iplikten dokunmuş kumaşlara göre daha yüksek uzama değerine sahip olduğu saptanmıştır. Reçinenin filament içerisine homojen olarak nüfuz etmemesi ile filamentler daha serbest dağılım halinde hareket etmektedir. Bu durum yapıda uzama değerinin artışına etki etmektedir.

elik (2020) yaptığı çalışmada, trafikteki otomobil sayısının artması sonucu meydana gelen trafik kazalarına sebep olduğunu dūřındıęı çarpışma kutularının üretilimi üzerine araştırma yapmıştır. Metal olarak örgü tel takviyesinde karbon kompozitlerin çarpma kutularında meydana gelen çarpışma etkisinde performansını incelemiştir. Dört farklı örgü tel kullanılmıştır ve metal takviyesi olan numunelerde örgü tel, karbon fiber kumaş yüzeyleri arasına biaxial formda yerleştirilmiştir. Metal takviye fazı içermeyen numunelerin ilk test numunesinde iki ve üç kat çift eksenli tipte karbon fiber kumaş kullanılmıştır. Tel apı ve yoğunluğu değişkenliğine bağlı olarak düşük çaptaki ince metal tel takviyesi kalın örgülü teldeki sonuçlara göre daha iyi olduğu saptanmıştır. Ağırlık dūřürme testleri sonucuna göre artan kat miktarı ile deformasyon oranı arasında doğrusal bir durum olmadığı saptanmıştır. Örgü tel takviyesiz olan numunelerde 3 katlı olan numune deformasyon miktarı, 2 katlı yapıya sahip numuneden daha az deformasyona uğramıştır.

Salimi ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada cam fiber/karbon fiber/epoksi hibrit kompozitör malzemeler elle yatırma metoduna göre üretilmiştir. Katkı malzemesi olarak amino ile fonksiyonlaştırılmış karbon nanotüp ve nanokil kullanılmıştır. Hibrit kompozitlerin çekme testi sonunda numunelerin kırılmış yüzeyleri incelenmiştir. Amino çok duvarlı karbon nanotüp katkısının hibrit kompozit malzeme üzerinde çekme dayanım değerlerini azalttığı ve nanokil kombinasyonu ile elastisite modülü değerlerini arttırdığı saptanmıştır.

Yanen ve Solmaz (2016) zırh malzemesi olarak tasarımı gerçekleştirilmiş farklı hibrit kompozit malzemelerin balistik performanslarını incelemiştir. Farklı dokuma ve yön yapısına sahip cam, aramid, karbon elyaf takviye malzemeleri kullanılmıştır. Kalınlığı fazla olan 45° oryantasyon açısında karbon ve cam fiber, düz dokuma tipinde aramid elyaf kullanımı yerine dimi dokuma tipinde karbon ve cam fiber kumaş, düz dokuma aramid elyaf numunelerin sonuçlarının daha iyi

olduğu saptanmıştır. Dimi dokuma tipindeki kumaşların balistik direncinin ise daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Korkmaz (2016) yaptığı çalışmada karbon elyaf takviyeli epoksi ve karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit plakaların üç nokta eğme testi ile eğme özelliklerini incelemiştir. Eğme gerilmesi ve eğme modülü değerlerinin matris malzemesine karbon nanotüp modifikasyonu ile yaklaşık olarak % 14.78 ve % 2.43 oranında arttığı gözlenmiştir. Bu artışın matris malzeme fazında yer alan KNT takviyesi ile köprü etkisi sonucunda çatlak oluşumu engellenmektedir.

Kompozit numunelerin çekme testi fibere dik ve fiber yönünde gerçekleştirilmiştir, karbon nanotüp ile matris modifikasyonun kompozit performans özelliklerini iyileştirdiği gözlenmiştir. Üç nokta eğme testi sonucunda elde edilen veriler de matris malzemesi modifikasyonu ile kompozit malzemelerin mekanik performansını iyileştirdiği sonucunu desteklemektedir. Test numunelerinin kırılma yüzeylerinden alınan optik mikroskop görüntülerinde karbon nanotüp katkısı yapılmış kompozit numunelerde daha düzgün kırık bölgesi gözlemlenmektedir. Karbon nanotüp katkısı yapılmamış numunelerin kırılma yüzeylerinde, elyaf kırılmaları ve tabakalar arası ayrılmalar ile karbon elyaf/KNT/epoksi kompozit numunelerinde ise kopmalar ve ayrılmalar yerine kırılma yüzeyinde çok sayıda mikro çatlaklar gözlenmiştir.

Siromani ve diğ. (2014) farklı dizilim açılarındaki cam/epoksi ve karbon/epoksi kompozit kare tüpler üzerinde üç farklı boyut üretiminde incelemeler yapmıştır. 300 gr/m² ve 320 gr/m² yoğunluğunda sırasıyla tek yönlü cam ve karbon fiber kumaşların (-45°/+45°) ile (0°/90°) tabaka açılarındaki kumaşların kesim işlemi yapılmıştır. Matris malzemesi olarak epoksi reçine ve sertleştirici karışımı uygun oranlarda hazırlanarak, el yatırma yöntemi ile kompozit malzeme üretimi yapılmıştır. Kesilen kumaşlar daha önce hazırlanmış olan metal kalıpların üzerinde sekiz tabaka şeklinde serim işlemi yapılmış ve el yatırma yöntemi ile kompozitler üretilmiştir.

48 saat boyunca oda sıcaklığında kütleme işleminden sonra kompozit tüpler kalıptan çıkartılmıştır. Cam ve karbon/epoksi numunelerin içi bal peteği ile beton dolgulu yapıda olması numunelerin bası direncini arttırdığı sonucuna varılmıştır.

Murugan ve diğ. (2014) farklı dizilimlerde karbon ve cam elyafı kullanımı ile kompozit malzeme üretimi gerçekleştirmiştir. Kompozit tabakalar cam/cam/cam, karbon/karbon/karbon/karbon ile cam/karbon/karbon/cam, karbon/cam/cam/karbon olarak hazırlanmıştır. Çekme testi sonuçları değerlendirildiğinde, karbon elyaf takviyeli kompozitlerin çekme dayanım değerleri cam elyaf takviyeli kompozitlere göre daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Darbe dayanımlarının da daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Hibrit yapıları kompozitlerin çekme ve darbe dayanımlarının benzer değerlere sahip olduğu saptanmıştır.

Korkmaz (2014) karbon elyaf takviyeli dokuma kumaş tipinde kompozit malzemelerin elle yatırma yöntemi ile üretimini gerçekleştirmiş ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Farklı lineer yoğunluk, çözgü ile atkı sıklığı, dokuma kumaş yapısına sahip karbon elyaf takviyeli karbon nanotüp takviyesinde epoksi kompozitlerin mekanik ve termal özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, dik yöndeki çekme mukavemeti değerlerinde iyileşmeler saptanmıştır. Daha sonra kırılma yüzeyleri incelenerek, TG-DTG analizi yapılmıştır ve katmanlı karbon nanotüp takviyesinde dokuma karbon takviyeli epoksi kompozitlerin termal kararlılıklarına etkisinin olumlu yönde olduğu değerlendirilmiştir.

Elanchezhian ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada farklı elyaflar ile epoksi reçine kullanılarak üretilmiş olan kompozit malzemelerin farklı sıcaklık parametrelerinde ve çekme hızlarında incelemeler yapılmıştır. Cam ve karbon elyaf kullanımı ile üretilen kompozit numunelerin çekme testi sonuçları değerlendirildiğinde, çekme dayanım değerinin karbon elyaf takviyeli kompozitlerde, çekme yükleri altında uzama değerinin ise cam elyaf takviyeli numunelerde daha yüksek olduğu saptanmıştır. Eğme testi sonuçlarına göre karbon elyaf takviyeli kompozitlerin dayanımları daha yüksektir. SEM ile yapılan mikroskobik incelemeler sonucunda ise fiber yönelmelerinin mekanik değerler üzerinde etkisi olduğu saptanmıştır.

Turhan (2011) yaptığı çalışmada 200 tex karbon lifi kullanarak iki farklı sıklık olarak 1x1 rib örgü yapısında kumaşlar, elle yatırma yöntemi ile kompozit plakalar haline getirilmiştir. Çekme testi sonucunda, düşük sıklıktaki karbon kompozit numunenin çubuk yönü incelendiğinde, en yüksek kopma mukavemeti

değerine ulaşılmıştır. Sıklık ve yön faktörü kompozit malzemenin kopma mukavemetini etkilediği sonucuna varılmıştır. İlmek yapısı ile yönlendirilmiş lifler doğrultusunda, yanal doğrultuda olan mukavemeti daha yüksek değerdedir.

Arola ve Ramulu (1994) yaptıkları çalışmada çok yönlü grafit/epoksi kompozit malzemenin farklı işleme yöntemleri ile işlenebilirlik özelliklerini incelemişlerdir. Belli kalınlığa sahip kompozit malzemenin (4 mm) farklı işleme yöntemleri ile işlenmesi sonucunda oluşan yüzey özelliği incelenmiştir. Yüzey dokusunun malzemenin eğme dayanımına olan etkisi yorumlanmıştır. Çalışma esnasında elmas testere, ASJ ve PCD kesici takım ile kenar kesme işlemi gerçekleştirilmiştir. Eğme testi sonuçları değerlendirildiğinde, her üç işleme alanına sahip numunelerin eğme dayanımları 704 MPa ile 717 MPa değer aralıklarında değişim gösterdiği sonucuna varılmıştır. Buna bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğünün bir etkisinin olmadığı değerlendirilmiştir.

Bingöl (2008) karbon kompozit bisiklet kadrosunun tasarım ve üretimi üzerine çalışmıştır. Tasarımda kullanılan malzemeler incelenmiş ve karbon kompozit olarak üretilmiş kadrolar ile karşılaştırılmıştır. Deneylerde el yatırması yöntemi fiber sarması şeklinde uygulanmıştır. Kompozit malzeme üretiminde karbon fiberleri (tek eksenli 12K karbon fiber) hazır dokuma tipinde kullanılmıştır. Rulo halinde bulunan fiberlerde kesim işlemi yapılmış ve epoksi reçine kullanılarak el yatırması yöntemi ile üretim gerçekleştirilmiştir. Mekanik özelliklerinin incelenmesi için çekme ve üç nokta eğme deneyleri yapılmıştır. Çekme dayanım değerlerinin ortalaması 322 MPa değerinde elde edilmiştir. %30 cam ve karbon fiber kompozit malzemeler için iyi bir değer aralığına sahip olduğu yorumlanmıştır. Işık mikroskobu görüntü analizlerinin sonucunda fiberlere paralel yönde yapılmış olan incelemelerde fiberlerin sürekli ve eş yönlü dizildiği sonucuna varılmıştır. Fiber kesitlerine dik yönde deneyin yapılması ve altıgen formuna uygun dizilmesi, üretim metodu olarak el yatırması yönteminin tercih edilmesi doğrulanmıştır.

Hosur ve diğ. (2008) yaptıkları çalışmada örgü karbon fiber/epoksi kompozitlerin düşük hızlı darbe etkisi altındaki davranışını incelemişler. ± 45 , $0/\pm 45$, $0/\pm 60$ olarak üç tip örgü yapısına sahip kumaş kullanılmıştır. Dizilimleri açısından 7 tabakalı ± 45 , 4 tabakalı $0/\pm 45$ ve $0/\pm 60$ olan plakalar 2.25 mm ile 2.4 mm arasındaki değer aralıklarında olan kompozit numuneler vakum destekli reçine infüzyon

yöntemi ile üretilmiştir. Deney numuneleri 10x10 cm plakalar olarak halinde kesilmiş, numunelere farklı darbe enerjileri (10 J, 20 J, 30 J) uygulanmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde, 10 J seviyesinde herhangi bir zarar saptanmamıştır. 20 J seviyesinde az bir hasar meydana gelerek, 30 J’de daha fazla hasar olduğu sonucuna varılmıştır.

Ataş ve Liu (2008) çalışmada farklı dokuma açılarında örgü tipindeki kompozitler üzerine çalışarak darbe dayanımlarını ve karakteristik özelliklerini incelemişlerdir. Enerji emme kabiliyeti üzerine etkileri değerlendirilmiştir. Dokuma açısı küçüldüğünde enerji emme kabiliyeti artışına sebep olmuştur. [0/20] örgü kompozitlerin, [0/90] örgü kompozit malzemelerin delinme sınırından daha yüksek değerlerde olduğu saptanmıştır.

Sağdıç (2020) eş dağılım göstermeyen anizotropik yapıya sahip karbon fiber takviyeli polimerik kompozit malzemelere kesme hızı ve ilerleme miktarı gibi parametrelerde ve üç farklı seviye de kesme hızında frezeleme işlemi yapmıştır. Bu kompozit malzemelerin frezeleme işleminden sonra ortaya çıkan delaminasyon ve yüzey pürüzlülük kusurları için SEM görüntüleri incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ve delaminasyon büyüklüğü ilerleme hızı arttıkça artış göstermiş fakat kesme hızı arttıkça azalmıştır. Çekme testi sonucuna göre, ilerleme hızı arttıkça çekme mukavemeti azalmış, kesme hızı arttıkça artmıştır.

Mutlu (2019) yaptığı çalışmada, grafen tabanlı karbon fiber/epoksi ileri polimer kompozitlerin üretim yöntemleri üzerine çalışmıştır. Karbon fiber kumaş yüzeylerinde grafen film biriktirme işlemi ile karbon fiber hibrit kumaş üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen hibrit kumaşlara epoksi termoset polimer eklenmiştir. İnfüze edilen bu malzeme ile grafen ileri polimer kompozitler hazırlanmıştır. Üretim yöntemi olarak VARTM yöntemi tercih edilmiştir.

Karbon fiber kumaş yüzeyinde homojen dağılım tespit edilmiştir. Çekme testi sonuçları incelendiğinde, grafen kaplanmış ileri kompozitlerde kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında kopma dayanımında %38 artışı saptanmıştır. Grafen takviyesi ile kompozit malzemelere potansiyel mekanik özelliklerin kazanımı ile iyileştirme etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

Değirmen Biricik (2019) yaptığı çalışmada hammadde olarak keten lifi, matris malzemesi olarak da PA66 kullanmıştır. Keten lifi farklı sıcaklık parametrelerinde (400 °C, 500 °C, 700 °C) değerlerinde ve farklı bekleme (1 saat ve 3 saat) aralıklarında sabit yataklı reaktörde piroliz işlemi gerçekleştirilmiştir. Keten lifi piroliz katı ürünü ve PA66 ergiyik elde edilmiştir. Daha sonra karıştırma yöntemi ile ekstrüderden geçirilerek, enjeksiyon kalıpta şekillendirilmiştir. Deneysel çalışma sonuçlarına göre %10 katkı ile karbon fiber içeren kompozit malzemelerde çekme dayanımı 90.5 MPa değerine ulaşılırken, %50 karbon fiber ve %50 piroliz katı ürünü içeren kompozit malzemelerin çekme dayanımı 89 MPa olarak tespit edilmiştir.

Tüzemen ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada farklı oranlara sahip nanopartikül takviyesinde fiber, matris ve boşluk hacim oranlarına etkisi incelenmiştir. Üretim aşamasına geçmeden epoksi içerisine farklı oranlarda nanopartikül katkısı ile karbon fiber/epoksi nanokompozit plakalar vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Plakalara standarta uygun olarak yakma testi yapılmıştır. Buna bağlı olarak fiber, matris ve boşluk hacim oranları yorumlanmıştır. Nanopartikül katkısı ile artış meydana geldiği, fiber hacim oranının azaldığı ve boşluk hacim oranının ise artışı gibi sonuçlara varılmıştır. SEM incelemeleri sonucunda epoksi reçinenin viskozitesi, epoksi içerisinde nanopartikül kümelenmeleri ve boşlukları saptanmıştır.

Eryılmaz (2017) karbon kumaşı, reçineler ve takviye edilmiş malzeme arasındaki bağlanma kuvvet üzerinde incelemeler yapmıştır. Bağlanma kuvvetini arttırmak için bağlama ajanı olan 3-aminopropil-trieoksisilan ile farklı oranlarda (0.25, 0.5 ve 1 % e.a.ü.) kaplamıştır. Bu kaplama işlemi sonrası numuneler 100 °C'de 60 dakika kurutulmuştur. Kaplanmış karbon kumaşlar epoksi matrisi ile bezayağı ve dimi kumaşlarla takviye edilmiştir. Vakum infüzyon üretim yöntemi ile üretilen kompozit malzemelerde bağlama ajanı olarak kullanılan Silan ajanının kütlece % 0.5'ten fazla uygulanması ile çekme dayanımını olumsuz etkilediği yorumlanmıştır.

Öztürk (2015) yaptığı çalışmada kumaş kalınlığı ve kumaş türlerinin takviye malzemeleri üzerinde incelemeler yapmıştır. Cam elyaf kumaş, aramid (kevlar) elyaf kumaş, karbon elyaf kumaş takviye malzemeleri ve poliüre matris malzemesi kullanılarak kompozit malzemeler üretilmiştir. Hazırlanan numunelere 5 mm/dk hız da çekme testi yapılmıştır. En yüksek çekme mukavemeti ve kopma uzaması aramid

elyaf kumaş takviyeli kompozitlerde ulaşılmıştır. Karbon elyaf kumaş takviyeli numunelerde ise en yüksek elastik modülü elde edilmiştir. Karbon kompozitlerin çekme deneyi sonucunda, numunelerin ortalama elastik modülü 2375.03 N/mm^2 , çekme dayanımı 39.72 N/mm^2 değerlerine ulaşılmıştır. Kopma uzaması ise %1.17 değerindedir.

Ünal (2015) yaptığı çalışmada, takviye malzemesi olarak %25 oranında kırılmış cam elyafı ve matris malzemesi doymamış polyester tercihi ile kompozit plakaların üretimi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda global ekseninde “x” yönünü üretim yönü; “y” yönünü üretime dik yön, “z” yönünü ise eğme testi sonuçlarının tespiti hususunda baz alınmış ve elyaf yönlenmesinin etkisi incelenmiştir. Mekanik testlerin sonuçlarına göre, “x” ve “y” yönündeki çekme dayanımı ve elastisite modülü değerleri aynı değerlerde, “z” (eğme) yönünde dayanım yaklaşık 2 kat daha yüksek değerlerde ayrıca elastisite modülünün ise yaklaşık aynı değerlerde olduğu belirlenmiştir. Buna bağlı olarak malzemenin eğme koşulları altında daha yüksek yüklerde çalışabileceği sonucuna varılmıştır. Düz plaka numunelerde, elyaf yönlenmesinin üretim yönüne bağlı olmadığı ve çok etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

Örs (2014) farklı tekstil ve reçineler ile vakum infüzyon yönteminde karbon kompozitlerin üretimi üzerine çalışmıştır. Farklı ağırlıklara sahip karbon kumaşların kompozit özelliklerini ortaya koymak için 150 gr/m^2 ve 300 gr/m^2 kumaşlardan üretilmiş olan kompozit malzemelerin karakterizasyonu incelenmiştir. Ağırlıkça gramajı düşük olan kumaşın daha iyi çekme ve basma dayanımına sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Karbon kumaş tekstilinde yeni bir üretim tekniği olan yayılmış (spread) elyaf bu teknolojik gelişmeye sahip olmayan aynı gramajdaki karbon kumaşlarla karşılaştırma yapılmıştır. Vinilester ile üretilen kumaşlarda çekme mukavemeti yaklaşık eşit olarak bulunmuştur, epoksi reçine ile üretilen kompozitlerde spread edilmiş ürünün çekme mukavemetinin daha yüksek değerlerde ulaşılmıştır. Yayılmış elyaf yöntemi ile hazırlanmış olan kumaşlar daha kapalı bir yüzeye sahip olmasından dolayı kompozit malzemenin daha homojen bir elyaf-reçine dağılımı gösterdiği belirtilmiştir. Epoksi ve vinilester reçine kullanımında reçine içinde yayılmış elyaf ile üretilen kompozit malzemelerin daha iyi sonuçta olduğu saptanmıştır.

Durgun ve diğ. (2013) yaptıkları çalışmada takviye malzemesi karbon elyaf ve matris malzemesi olarak epoksi reçine kullanımı ile vakum torbalama ve vakum infüzyon üretim yöntemleri tercih edilerek kompozit malzemeler üretilmiştir. Kompozit numunelere çekme deneyi yapılmıştır. Vakum infüzyon yönteminde üretilen numunelerin en yüksek çekme dayanım değerlerine ulaşılmıştır. Elastisite modülü de vakum torbalama yöntemine göre daha yüksek değerlerde elde edilmiştir. Vakum infüzyon yönteminde daha az hava kabarcıkları kaldığı için üretilen ürün sıkı ve rijit özelliktedir.

Sevençan (2011) karbon ve cam elyafın rib yapısında farklı sıklıklarda kumaşlar üzerine çalışmalar yapmıştır. Üretimi gerçekleştirilen kumaşların farklı dizilimlerle birleştirilmesi sonucunda hibrit kompozit yapılar elde edilmiştir. Sıklık, kumaş dizilimleri ve kuvvet yönü etkisinin mekanik özellikler ile ilişkisi incelenmiştir. Karbon elyaf ile üretilen kumaşlar için sıklık parametreleri yüksek ve düşük, sıra sıklıkları 19 ve 26 sıra/10 cm ve çubuk sıklığı ise 38 çubuk/10 cm olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar cam elyaf ile üretilen kumaşlar ile karşılaştırılmıştır. Cam elyaftan üretilen kumaşların sıklık parametreleri ise yüksek, orta ve düşük olarak değerlendirilmiştir. Yön, sıklık ve kumaş dizilim özellikleri elastisite modülü, çekme dayanımı ve kayma uzaması üzerinde etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca kumaş yönünün çekme uzaması üzerinde etkisi olmadığı yorumlanmıştır.

Samirkumar ve diğ. (2008) yaptıkları çalışmada köpük çekirdekli karbon ve cam fiber takviyeli sandviç plakaların 22°C, 0°C, -30°C ve -60°C'deki eğme yorulma davranışını incelemişlerdir. Eğme testi sonuçlarına göre sıcaklık farklarının malzemenin hasar davranışına bir etkisi olmadığı gözlenmiştir. Eğme yorulma ömrünün karbon fiber takviyeli sandviç plakalarda -60°C'de oda sıcaklığına göre 100 kata kadar artışı, cam elyaf takviyeli panellerde ise 20-40 kat arttığı tespit edilmiştir. -60°C'de ise kırılmaların aniden gerçekleştiği gözlenmiştir.

Zhou ve diğ. (2008) karbon nano fiberlerin karbon elyaf/epoksi kompozitlerde mekanik özelliklere etkisini araştırmışlar. Deneysel çalışmada eğme ve çekme testleri yapılmıştır. Karbon nano fiberi ağırlıkça %1, %2 ve %3 oranlarında epoksi içine ilave edilmiştir. Ağırlıkça %2 oranında mukavemet özellikleri en yüksek değerlere ulaşmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda katkısız kompozit malzemeler

ile karşılaştırıldığında, çekme dayanımları %11 ve eğme dayanımları %22.3 oranında artışı saptanmıştır.

Gül (2018) yüksek eğme mukavemetine sahip olan havacılık ve uzay sektöründe yapı malzemesi olarak kullanılan sandviç kompozitler üzerine yaptığı çalışmada elle yatırma yöntemi ile karbon fiber yüzey plakaları üretilmiştir. Sandviç kompozitlerde, karbon fiber termoset kompozit plakalar yüzey malzemesi, alüminyum, polipropilen ve nomex petek yapılar ise çekirdek malzemesi olarak kullanılmıştır. Çekirdek 5 mm ve 20 mm kalınlıklarda üretilmiştir. Üç nokta eğme testleri oda sıcaklığında (23°C) ve bir şartlandırma kabininin içerisinde sıvı nitrojen sıcaklığında -40°C'de koşullarında gerçekleştirilmiştir. Etki eden parametreler doğrultusunda çekirdek malzeme cinsinin, kalınlığının ve ortam sıcaklığının eğme direnci üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Wonderly ve diğ. (2005) tarafından yapılan çalışmada karbon elyaf/vinilester kompozit ve cam elyaf vinilester kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiş olan karbon kompozit numunelerin çekme ve çentik test sonuçlarında üstün mekanik özellikleri saptanmıştır. Aynı kalınlığa sahip cam fiber kompozit malzemelerden daha iyi mekanik özelliklerde olduğu sonucuna varılmıştır.

Sugun ve Rao (2004) çalışmalarında cam, karbon ve kevlar takviyeli kompozitlere düşük hızda tekrarlı darbe testleri uygulamışlar. Sonuçlar incelendiğinde, her üç kompozit için de toplam enerji artış göstermiştir. Darbe sayısında ortaya çıkan artış, darbe yükünün de artışa bağlı olarak azaldığı belirtilmiştir. Deney süresinde delaminasyon alan haritaları ile tekrarlı darbe testleri incelenmiştir, polimer kompozit malzemelerin hasar tolerans etkisinin yorumuna katkı olmuştur.

1.2 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada örgü ve dokuma tipinde karbon fiber kumaşların kompozit haline getirildikten sonra mekanik davranışlarındaki değişimler incelenmiştir. Teknik tekstil ürünü olarak imalatı yapılan dokumanın yanında iplikten imal edilerek elde edilmiş olan örgü kumaşın kompozit halinde sergilediği farklılıklar çalışma alanları açısından öncü bir davranış sergileyebilmektedir.

ASTM D3039 ve ASTM D790 standartlarına uygun olarak sırasıyla çekme ve üç nokta eğme testleri yapılmıştır. Çekme testi sonrasında kompozit numunelerin kırılma yüzeyleri FESEM analizi ile incelenmiş ve literatür çalışmaları ile karşılaştırılmıştır.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

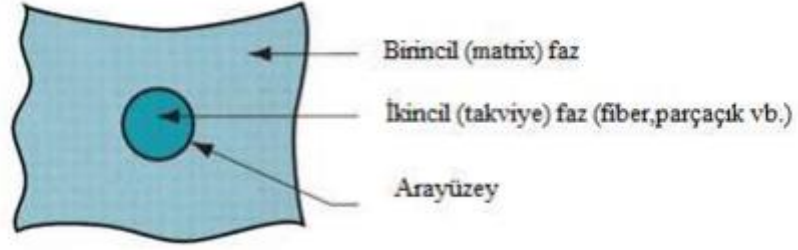
2.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla malzemenin bir araya gelerek üstün özelliklerini tek bir malzeme formunda toplamak amacı ile makro düzeyde birleştirilmesidir. Kompozit malzemelerin üretiminde, kullanılan malzemelerin birbirlerine göre zayıf kalan yönlerini iyileştirmek, talep ve isteklere bağlı olarak ihtiyaç doğrultusunda istenilen yönlerde daha üstün özellikleri sunan bir malzeme elde edilmesi amaçlanmaktadır. Alüminyumun sahip olduğu hafiflik özelliği ve çelik malzemenin daha mukavemetli yapısı doğrultusunda üretim yöntemleri sonucunda yepyeni bir malzeme yapısı kazanılmaktadır (Sayer 2009).

Kompozit malzemeler de, malzeme üzerinde ortaya çıkan gerilimi taşıyan, dayanım özelliklerinde kazanımı ile artışını sağlayan takviye elemanları ve malzemenin çevresinde hacimsel olarak geniş alana sahip bir ana malzeme bulunmaktadır. Takviye elemanları, kompozit yapının mukavemet, yük taşıma özelliği ile tokluğunu artırmak ve yüksek sıcaklık koşullarında çalışma özelliklerini iyileştirme amacındadır. Ana fazı oluşturan matris malzeme ise herhangi bir deformasyona uğradığında meydana gelebilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamaktadır. Yapıda oluşabilecek kırılma ve kopmalara karşı geciktirici etkisi bulunmaktadır (Bulut 2014). Kompozit parça tasarımında maliyet, hammadde özellikleri, çevre koşulları, imalat ve kalite kontrol yöntemleri gibi faktörler önemli husustadır. Tasarımda karşımıza çıkabilecek en büyük sorunlardan biri kompozit malzemelerin izotropik özellik sergilememesidir. Buradan parçaya her yönden ne kadar yük gelebileceği durumları, parça yüzeyinde hangi noktalarda ve dayanım değerlerinin tespiti ile takviye elemanlarının yerleşim açıları hesaplanmalıdır.

Birbirinden farklı malzemelerin birleşimi sonucunda oluşan kompozit malzemeler takviye ve matris fazı ile ara yüzeyden oluşmaktadır.

Kompozit malzeme bileşenleri Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Kompozit malzemenin bileşenleri (Bulut 2014)

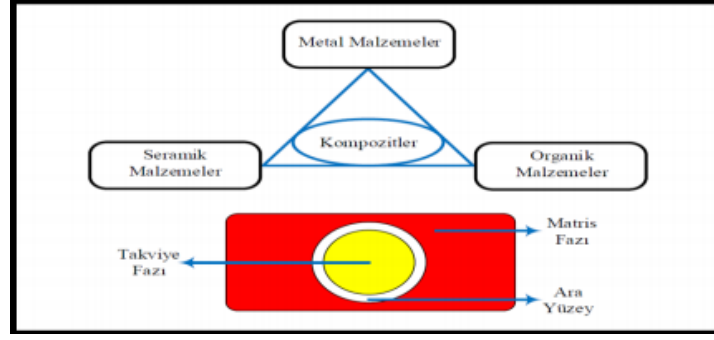
Takviye ve matris fazı ile üretim metodolojisi sonucu yepyeni özelliklere sahip bir malzeme ortaya çıkması amaçlanmaktadır. Ana bileşendeki yapıya matris adı verilmektedir (Arat 2017). Matrisin en önemli görevi, elyafı korumak, malzeme üzerindeki etkiyen yükü fiberlere dağıtmak ve malzemeyi çevresel etmenlerden korumaktır. Elyaf malzemenin yoğunluğu, mukavemeti ve rijitlik özellikleri matrise göre yüksektir. Bu yüzden matris elyaf birleşiminde, daha rijit ve daha sağlam bir malzeme oluşmaktadır. Matris malzemesi polimer, metal ve seramik malzemelerden oluşmaktadır. En yaygın kullanıma sahip olan polimer ise reçinelerdir.

Takviye fazı ise kompozit malzemelerde matris ana fazı içerisinde dağılmış olan takviye elemanlarından oluşmaktadır. Takviye elemanları fiberler, kısa fiberler, kılcal kristal (whiskers), ince plakalar, parçacık ve partikül formunda oluşmaktadır (Bulut 2014).

Takviye ve matris malzemeleri birbirleri ile uyumlu halde görevlerini tamamlamaktadır. Aralarında bağ oluşumu ve malzemenin bir arada tutunmasını sağlayan ara yüzey bağı bulunmaktadır. Ana matris fazına uygulanmış olan kuvvet bu ara yüzeyler sayesinde takviye elemanlarına iletilerek, dağıtım görevini sağlamaktadır.

Malzemeler genellikle yapısal olarak metal, organik ve seramik malzemeler olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılmaktadır.

Şekil 2.2’de kompozit malzemelerin oluşum yapıları gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Kompozit malzeme yapısı ve genel malzeme grupları (Gaga 2020)

2.2 Kompozit Malzemelerin Özellikleri

Kompozit malzemeler, üstün mekanik özelliklere sahiptir. Yüksek mukavemet, yorulma ve aşınmaya karşı yüksek direnç, yüksek elektrik yalıtımı, yüksek sıcaklık dayanımı ve mükemmel yapıda korozyon direnci en önemli özellikleridir. Estetik tasarım ve görünümleri önem kazanmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, iki veya daha fazla malzemeden oluşmaktadır. Düşük ağırlık ile yüksek mukavemet özellikleri üstün performans özelliklerine sahip üretim alanlarında tercih edilme unsuru oluşturmaktadır. Tasarım, kalıplama kolaylığı birçok yüzeye uygunluk sağlamaktadır. Şeffaflık özelliğindedir. Renklendirme özelliğine sahiptir ve bu sayede kalıplama işlemleri esnasında reçineye ilave edilen pigmentler tarafından istenen renk verilebilmektedir.

Özgül modül/dayanım açısından, ağırlıkların azaltılması ile verim artışı elde edilmektedir ve enerji tasarrufu sağlanmaktadır (Günaydın 2003).

2.3 Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Kompozit malzemelerin üretimi ya da kullanımında önemli avantaj sağlayan özellikleri ve bazı üretim sahasında dezavantaj unsuru olacak yönleri bulunmaktadır.

2.3.1 Kompozit Malzemelerin Avantajları

Kompozit malzemelerin üstün mekanik özellikleri diğer malzemeler ile karşılaştırıldığında kullanım alanında avantaj özellik sağlamaktadır. Çekme ve eğme mukavemeti genel olarak birçok malzemeye göre kıyaslandığında daha yüksektir. Özgül ağırlıklarının düşük olması hafif konstrüksiyonların kullanım alanında büyük avantaj sağlamaktadır. Korozyona, yorulma ve aşınma dayanımları yüksektir. Yüksek sıcaklıklarda dayanımları oldukça iyidir, çoğu kimyasal malzemeye karşı direnç göstermekte ve yüksek ısıda kullanılabilen malzemelerdir (Devaraju ve diğ. 2013).

Kolay şekillendirilebilmektedir. Karmaşık ve kompleks parçalar kolay elde edilebilmektedir (Sezen ve diğ. 2015). Boyutsal kararlıktadır. Mekanik ve çevresel etmenlere karşı termoset kompozit malzemeler şekil ve işlevselliklerini korumaktadır (Bulut 2014). Titreşim sönümleme özelliğine sahiptir. Sünek yapıdadır ve buna bağlı olarak doğal bir titreşim sönümleme ve şok yutabilme özelliğine sahip olmaktadır. Bu sayede çatlak ilerlemesi de engellenmektedir.

2.3.2 Kompozit Malzemelerin Dezavantajları

Kompozit malzemelerin oluşmasında etken olan matris fazı önemlidir. Kullanılan matris sistemi genellikle pahalıdır ve seri üretim hususunda önemli bir unsur oluşturmaktadır.

Kompozit malzemeler gevrek, kırılgan yapıya sahiptir. Malzeme yapı özelliği hasara uğradığında onarım maliyetleri açısından pahalıdır (Sezen ve diğ. 2015).

Aynı kompozit malzemedeki değişik doğrultularda farklı çekme, basma ve eğme değerleri meydana gelmektedir. Malzeme yüzeyinde oluşan hava kabarcıkları malzemenin özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir.

Malzeme ve üretim yönteminin kalitesi hususunda doğrusal ilişki bulunmaktadır. Buna bağlı olarak kompozit malzemelere uygun üretim yöntemi seçilerek, üretim aşamasına önem verilmelidir (Raju ve Kumarappa 2011).

2.4 Kompozit Malzemelerin Genel Kullanım Alanları

Kompozit malzemelerin tercihi ve kullanım alanları artan oranlarda bulunarak, yeni sektörlerde de kullanılmaya başlamıştır. Havacılık ve otomotiv gibi önde gelen sektörlerde uzun yıllardır kullanılsa bile son dönemde yeni birçok sektörde farklı amaçlar doğrultusunda kullanılmaktadır.

Denizcilik, spor araçları, makine ve imalat, korozyona dayanıklı ürünler, sağlık, ulaşım, müzik aletleri ve yapı sektörü vs. kullanım alanlarına sahiptir (Sezen ve diğ. 2015).

2.4.1 Havacılık Sanayi

İleri kompozit malzemelerin endüstriyel alanda tercih edilmektedir, havacılık sanayinde çok geniş uygulama alanlarına sahiptir. Üstün mekanik özellikleri ve hafiflik özelliklerinden dolayı uçaklarda ve helikopterlerde iç mekân tasarımı ile yapısal parçalarında da polimer esaslı kompozit malzemeler ile üretilmektedir.

Uçak ve uzay sanayisinde tercih edilen polimer matrisli kompozit malzemeler, frenlerde kullanılmaktadır. C-C kompozitler ile üretilen frenler sayesinde düşük termal genleşme, termal özelliklerinde iyileşme ile termal iletim ve sürtünme katsayıları ile yüksek performans özelliğine sahip olmaktadır. Bazı uçak gövde panelleri; karbon fiber+epoksi malzemeden, yolcu uçağı kanat panelleri ve flapler; karbon fiber+epoksi, A380 yolcu uçağı burun bölümü; CTP.

2.4.2 Denizcilik Sanayi

Tekne, yat, yelkenli ve deniz sanayinde birçok parçanın üretiminde kompozit malzeme kullanımı tercih edilmektedir. Kano, sörf ve yatlarda darbe dayanım özelliklerinden dolayı çok tercih edilmektedir.

2.4.3 Yenilebilir Enerji Sektörü

Temiz enerji kullanımının son dönemde önem kazanmıştır. Rüzgar enerjisi potansiyelinin yüksek olması, rüzgar türbinlerinin sayısı ve kapasitesinin doğrusal olarak artışına olanak sağlamaktadır. Rüzgar türbin kanatlarının üretiminde, 40-50 metre uzunluğuna kadar cam elyaf kullanılmakta fakat daha uzun kanat yapısında karbon elyaf kullanılmaktadır. Rüzgar türbin kanatlarının üretiminde amaçlanan durum uzun ömürlü ve bu süreçte dayanıklılığını koruması, aerodinamik açıdan rüzgar türbininin enerji verimliliğine katkısını ortaya koymaktadır.

2.4.4 Spor Malzemeleri

Kompozit malzemeler yeni sektörler arasında spor araç ve gereçlerin üretiminde kullanım alanı oluşturmaktadır. Üretim aşamasında ağırlık ve mekanik özellikler açısından önem kazanmaktadır. Ağırlığın azalması ile hareket kabiliyetinin ve dayanıklılığın artışı kolaylaştırmaktadır. Takviye malzemesi olarak cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

Golf sopası, tenis raketi gibi spor ürünlerin üretiminde ağırlığı düşürmek için karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerden üretimi gerçekleştirilmektedir. Dağ bisikletleri, düşük ağırlık özelliklerinden dolayı karbon elyafı ile üretilmektedir. Su kayakları; termoplastik prepreg, kar kayağı; ahşap üzerine sarılmış karbon, aramid, cam elyafı karışımı+epoksi, su kaydırakları; CTP, sörf Tahtaları; CTP ve golf sopası; karbon fiber+Epoksi ve tenis raketi; aramid (Kevlar)+epoksi malzemelerden üretilmektedir.

2.4.5 Otomotiv

Son dönem teknolojik üretimler kapsamında otomotiv sektöründe sürekli yenilikler ortaya çıkmaktadır. Daha hafif otomobillerin üretimi gerçekleştirilmektedir. Daha çabuk hızlanabilme, durabilme ve ilerlemek için daha küçük bir motora aynı zamanda daha az yakıtı ihtiyacı olacak araçlar tasarlanmaktadır.

Lif takviyeli kompozitler otomotiv sektöründe araç gövdesi, şasi ve motor bileşenleri olarak uygulama alanlarına sahiptir. Yüksek sertlik ve dayanım özellikleri beklenen kaporta ve kapı panellerinde kullanılmaktadır. Baskı kalıplama yöntemlerinden hazırlama kalıplama (SMC) ile üretim kolaylığı sunan dış gövde panellerinde, motor valf kapakları, kaporta, tampon kirişleri, tavan ve kapı çerçeveleri ile karter ve dişli kapakları, bagaj kapakları, radyatör destekleri, çamurluk ve rüzgârlık gibi aracın önemli kısımlarında kullanım alanlarına sahiptir.

Otomotiv sektöründe gövde panellerinde lif takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılan bir diğer üretim yöntemi ise yapısal reaksiyon enjeksiyon kalıplamadır. Bu yöntem akışında rastgele yönlenmiş, kesikli E-cam lifleri ve poliüretan matris malzemeleri kullanılmaktadır. Şasi bileşenlerinde uygulama alanları olarak yapraklı yay ve kullanımı kısıtlı olsa da laboratuvar ve tatbikat denemeleri başarılı sonuçlanan kardan milleri örnek verilebilmektedir. Motor bileşenlerinin kullanımında ise gövde ve şasi kısmında olduğu kadar başarılı sonuçlara varılamamıştır. Yüksek sıcaklıklardaki yorulma yükleri açısından değerlendirildiğinde bu kompozit malzemelerin kullanım alanında dezavantaj olmuştur (Mallick 2007).

2.4.6 Sağlık

Sağlık sektörü pahalı bir çalışma sahasına sahiptir. Tekerlekli sandalye üretiminde tercih edilmektedir. Cam veya karbon elyaf takviyeli polyester malzeme kullanılmaktadır. Tıbbi tetkik cihazları dış koruyucu ekipmanlarında da karbon takviyeli kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

2.4.7 Müzik aletleri

Literatür incelemesi yapıldığında, ileri kompozit malzemelerin kullanımı ile bazı müzikal enstrümanlar da kullanılmaya başlanmıştır. İleri kompozit malzemelerle yaylı sazlar yapılmaktadır. Belli zaman sonra boyun kısmında tellerin gerilmesi ile deformasyona uğramaktadır. Teknolojik gelişmeler ve yeni malzemelerin ortaya çıkışı ile bu sorunlar ortadan kaldırılmaktadır.

Keman üretiminde karbon fiber ve epoksi, gitar da karbon lamine tabakalar arası polimer köpük malzeme, akustik gitar üretiminde grafit ve epoksi ve çello da ise karbon ve epoksi kullanılmaktadır.

2.4.8 Yapı sektörü

İnşaat ve yapı alanında son dönemde çok kullanılmaktadır. Köprü tabanı, trabzanlar, yürüme yolları, bina balkon korkulukları, kapı ve bina kaplama panellerin de kullanım alanlarına sahiptir.

2.4.9 Şehircilik

Bu alanda kompozit yapılar, toplu konut yapımında, saha ve çevre çalışmalarında heykel, bank yapımında kullanılmaktadır. Standart ürünlerin kısa sürede imalatının gerçekleştirilmesi, montajdan tasarruf edilmesi ve maliyet açısından ucuz olması önem kazanmaktadır. Yüksek izolasyon, hafiflik ve mekanik dayanım özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir.

2.4.10 Ev Aletleri

Günlük yaşam kolaylığı sunan masa, sandalye, televizyon kabinleri, saç kurutma makinesi gibi ev aletleri ve dekoratif ev eşyalarında kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

Karmaşık parçaların üretiminde montaj kolaylığı, elektriksel etkilerden koruma ve hafiflik özellikleri tercih edilmesinde büyük rol oynamaktadır.

Dondurucular, mikro dalga fırınlar, fırınlı ocaklar, hesap makineleri, bilgisayarlar, fotokopi makineleri, masa lambaları, servis tepsileri, abajurlar, mutfak tezgâhları gibi uygulama alanları ile kullanım alanı genişlemektedir.

2.4.11 Elektrik/Elektronik Sanayi

Elektriksel yalıtım etkisi ile elektrik ve elektronik malzemelerin yapımında kullanılmaktadır. İzolatörler, antenler, sigorta, panel kutuları, aydınlatma gövdeleri, yalıtkan, elektrik ve aydınlatma direkleri, rüzgâr jeneratörleri, kablo taşıyıcıları, kablo kanalları, doğal gaz kutuları, sokak lamba gövdeleri, sayaç panoları ve projektörler gibi uygulama alanlarına sahiptir.

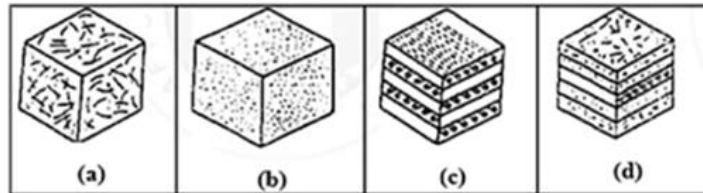
2.5 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, matris ve dolgu maddesi türüne göre sınıflandırılmaktadır. Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerden en önemlisi matris sistemidir. Matris malzemesi, dolgu malzemelerini fiziksel ve kimyasal dış etkilerden korumakta ve bir arada tutup dolgu maddesine yük aktarımını sağlamaktadır.

Ayrıca matris kompozit malzemede kırıkların oluşmasını ve çatlakların ilerlemesini önlemektedir (Gu ve diğ. 2015). Dolgu maddesi türüne göre ise lif ve tanecik yapılı olarak sınıflandırılmaktadır.

2.5.1 Takviye Türüne Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

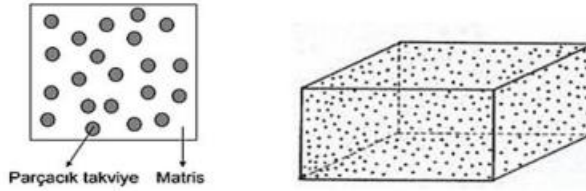
Takviye elemanının şekli ve yerleşimine göre kompozit malzemeler elyafı, parçacıklı, tabakalı ve karma kompozitler olarak sınıflandırılmaktadır. Şekil 2.3'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Takviye yapısına göre kompozitler a) elyafı, b) parçacıklı, c) tabakalı ve d) karma kompozitler (Okta 2017).

2.5.1.1 Partikül Takviyeli Kompozitler

Bir veya daha fazla malzemenin taneciklerinin başka bir matris malzeme ile birleştirilmesi sonucu tanecikli kompozitler meydana gelmektedir. Matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde yer alması ile elde edilen izotrop yapılardır. Takviye elemanları mikron seviyeden, nanometreye kadar değişen boyutlarda parçacık ve partiküller bulunmaktadır. Parçacık ya da partikül ile takviyeli kompozitlerde ana malzeme içerisinde bulunan takviye fazının homojen dağılım sergilemesi ile yapının mekanik özelliklerine katkı sağlamaktadır. Partiküller sayesinde dağılım sertleşmesi sonucu mekanik özelliklerinde iyileşmeler söz konusudur. Ayrıca tane sınırlarında meydana gelen kaymaları engellemektedir. Şekil 2.4'te parçacık takviyeli kompozit malzeme yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Parçacık takviyeli kompozit (Cabiroğlu 2012)

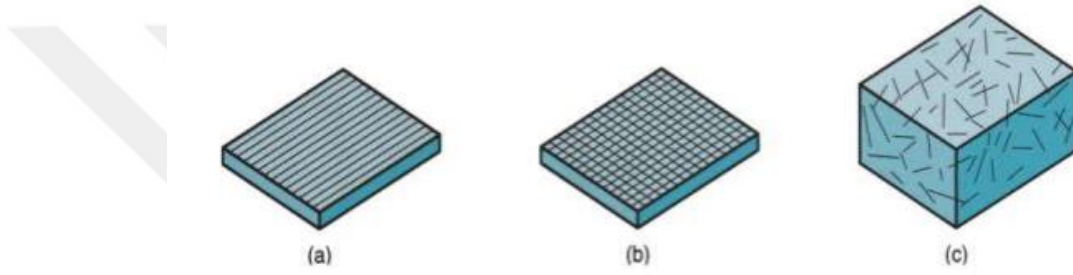
2.5.1.2 Fiber Takviyeli Kompozitler

Yüksek mukavemet ve elastik modüle sahip olan fiber ile düşük mukavemete sahip matrisin birleşiminden fiber takviyeli kompozitler meydana gelmektedir (Jones 1975). Matris yapısında ince elyaflar yer almaktadır.

Elyafların matris içerisindeki yerleşimi, mukavemeti, uzunluk/çap oranı ve elyaf-matris arasında bulunan bağ yapısı kompozit yapının mukavemetini etkileyen faktörlerdir (Şahin 2000). Hafif yapıdadır, düşük yoğunluğa ve yüksek elastik modül değerine sahiptir. Fiberlerin elastisite modülü genellikle matris malzemelerinin elastisite modül değerinden yüksektir. Buna bağlı olarak fiberler rijit yapıda görünüme sahiptir (Abrate 1998).

Korozif ortamlarda yüksek korozyon dirençleri sayesinde kullanım alanında tercih edilme unsuru oluşturmaktadır (Sayer 2009). Sertlik, dayanım ve elastiklik açısından yüksektir ve bu sebeple elyaf lar mekanik özelliklerin iyileşmesini sağlamaktadırlar (Şahin 2000).

Fiber takviyeli kompozit malzemeler diğer kompozit malzemeler ile karşılaştırıldığında daha mukavemetli ve sert bir yapıdadır. Fiber eksenine doğru dizilim göstermeleri ve içyapı hatalarının az olmasına bağlanmaktadır. Fiber takviyeli kompozitler tek yönlü sürekli elyaf lı, kırpılmış elyaf, ortogonal elyaf lı, vb. çeşitlerinde bulunmaktadır. Şekil 2.5'te çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Kompozit malzemelerde elyaf ın yönlenmesi a) tek boyutlu sürekli elyaf, b) dokunmuş bir kumaş şeklindeki düzlemsel sürekli elyaf, c) rastgele süreksiz elyaf (Şahin 2011).

Fiber takviyeli kompozit malzemelerde bileşen yapı malzemeleri, moleküler boyutta birbirinden farklıdır. Takviye lifleri, uzun lif, dokuma kumaş veya kısa kesilmiş lif gib farklı formlar da bulunmaktadır.

Kompozit malzeme özellikleri, liflerin kompozit yapı içerisinde nasıl uzanımına sahip olduğuna bağlıdır (Vasiliev ve Morozov 2001).

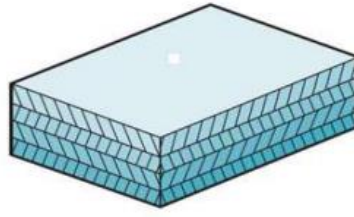
2.5.1.3 Tabakalı Kompozitler

Malzemelerin eksen ve değişik yönelimleri doğrultusunda katman halinde üst üste konularak bir araya getirilmesi sonucu oluşan kompozitlerdir.

Farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların bileşimi ile yüksek mukavemet değerlerine ulaşılmaktadır. Isı ve neme karşı dayanıklı yapılardır. Metallere göre önemlisi hafif ve dayanıklı malzeme yapısına sahip olmalarıdır (Şahin 2015).

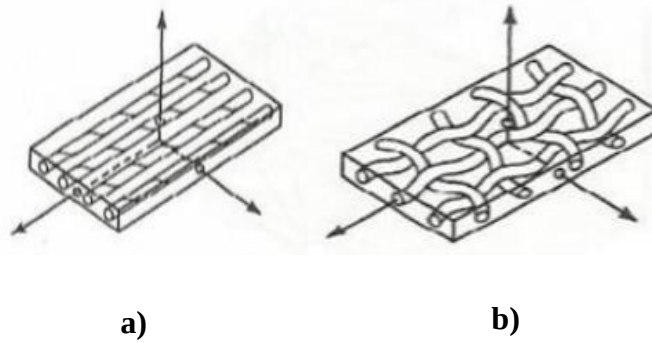
Düşük maliyet, yüksek dayanım veya hafiflik özelliklerinin yanı sıra aşınma direnci, estetik görünüm ve mükemmel ısıl genleşme özellikleri de önemlidir.

Şekil 2.6’da tabakalı kompozit yapı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Tabakalı yapı (Koruvatan 2008).

Fiberlerin kompozit yapı içinde dizilişleri farklılık gösterebilmektedir. Şekil 2.7’de tabakalı kompozit bir yapıda tek kata sahip fiberlerin matris içerisinde tek yönde ve örgü tipinde dizilimi gösterilmiştir.



Şekil 2.7: Tabakalı kompozitlerde yön dizilimi a) tek katmanlı kompozit yapıda tek yönlü fiber dizilimi, b) tek katmanlı kompozit yapıda örgü fiber dizilimi (Okta 2017).

2.5.1.4 Karma (Hibrit) Kompozitler

İki veya daha fazla takviye elemanının matris ile birleşmesinden daha iyi özelliklere sahip yeni bir malzeme oluşumuna hibrit kompozit malzemeler denir (Sayer ve Bektaş 2009).

Aynı matris yapı içerisinde kevlar ve grafit elyafın dağılımı ile oluşan kompozit malzeme karma kompozit malzemedir. Kevlar, ucuz ve tok bir elyaf türüdür, basma kuvveti düşüktür. Grafit ise düşük toklukta, pahalı, fakat yüksek basma kuvvetine sahip elyaf çeşididir. İki elyafın kompozit yapıda bir arada bulunması sonucunda yeni özelliklerin birleşimi mevcuttur. Tokluğu grafit yapıdan daha iyi, maliyeti düşük ve basma kuvveti kevlara göre daha yüksek olan karma kompozit yapısı ortaya çıkmaktadır (Şahin 2015).

Medikal ve ortopedik ürünlerde, diş implant ürünleri, rüzgar türbin kanatları ve gövde parçaları, uçak gövde ve motorlarında kullanılmaktadır.

2.6 Kompozit Malzemelerin Matris Türüne Göre Sınıflandırılması

Kompozit malzemeleri oluşturan ana faz malzemeleri polimerik, metalik ve seramik olmak üzere üç ana sınıftan oluşmaktadır. Tablo 2.1’de matris-takviye elemanı malzeme cinsine göre kompozitler örneklendirilmiştir.

Tablo 2.1: Matris-takviye elemanı malzeme cinsine göre kompozitler

(Ulçay ve diğ. 2002).

Matris malzemeleri	Takviye elemanları	Kompozit yapının şekli
Polimerler	Elyaf/Lifler	Tabakalar
Metaller	Granül	Kaplamalar
Seramikler	Whiskers Pudra Yonga	Film-Boya Bal peteği (Honey-Comb) Filaman Sarılmış Yapılar

2.6.1 Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozit malzemeler de, matris yapı metal veya metal alaşımları olan kompozitlerdir.

Genellikle de takviye elemanı olarak seramiklerin kullanıldığı bir yapı oluşturulmaktadır (Gaga 2020). Metal matrisli malzemeler, takviye malzeme özelliklerine göre üstün özelliklere sahip olabilmektedir. Seramik malzemelerin yüksek elastiklik modül değeri ve metallerin plastik şekil değiştirme özellikleri ile birleşerek aşınmaya dayanıklı, gerilme mukavemeti yüksek malzemeler meydana gelmektedir (Kaya 2016).

Yüksek yorulma ve aşınma direnci (Chatterjee ve diğ. 2015), yüksek sıcaklıklardaki dayanım özellikleri ile havacılık ve otomotiv endüstrisinde kullanılmaktadır (Xu ve Qu 2015). Elektriksel ve termal iletkenlik, süneklik ve yüksek tokluk ile manyetik özellikleri sayesinde avantaj sağlamaktadır

Yoğunluk, sürünme ve korozyon direnci özelliklerinden dolayı dezavantaj durumdadırlar (Karadurmuş 2017). Savunma sanayi, otomotiv ve havacılık sektörlerinde genel kullanım alanlarına sahiptir (Kaya 2016). Al ve Al/Mg, Al/Si alaşımları, Ti alaşımları, Cu/Mo, Cu/W ve Zn alaşımlarının kullanımı tercih edilmektedir. Şekil 2.8’de sektör bazında kullanılan metal matrisli kompozit malzemelere örnekler gösterilmiştir.



Şekil 2.8: Metal matrisli kompozitler (Okta 2017).

2.6.2 Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik matrisli kompozit malzemeler hafif, yalıtkan, yüksek sıcaklığa dayanıklı ve hafif ($d= 1.5-3.0 \text{ gr/cm}^3$) malzemelerdir (Kaya 2016).

Seramik-seramik, seramik-cam ve seramik-metal kompozitler olarak sınıflandırılmaktadır. Al_2O_3 , ZrO_2 , Si_3N_4 ve SiC bileşikleri halinde kullanılmaktadır.

Uzay sanayisinde, türbin motor parçalarında, roket motorlarında, zırhlarda, ısıtım fırınlarında, otomotiv sektöründe önemli bir kullanım alanına sahiptir.

Şekil 2.9’da uzay araçları için üretimi gerçekleştirilmiş olan seramik matrisli kompozit malzeme örneği şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.9: Seramik matrisli kompozit (Güzel 2016).

Sert ve kırılgan yapıya sahip olduklarından düşük süneklik ve tokluk özelliğine sahiptir. Düşük yoğunluk özellikleri, aşınma ve korozyon dirençlerinin yüksek olması avantaj durumdadır (Karadurmuş 2017).

Termal şoklara karşı dayanımları düşüktür. Yüksek elastiklik modülü ve elektriksel olarak yalıtkanlık özellikleri iyidir, yüksek sıcaklıklara karşı dayanım özelliklerinden dolayı rijit ve gevrek bir yapıya sahip olmaktadır (Seydibeyoğlu 2012).

Dayanım özellikleri yüksek olması beklenen sektörlerde seramik malzemeler çeşitli dolgu maddeleri ile birlikte kullanım kolaylığı sağlamaktadır (Güzel 2016).

2.6.3 Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer matrisli kompozitler, organik yapıdadır. Hidrojen, karbon ve diğer metalik olmayan elementlerin birleşmesi sonucu meydana gelmektedir.

Kompozitler içerisinde çeşitli fonksiyonları sayesinde en yaygın uygulama alanına sahiptir. Hammaddelerin maliyet unsuru, kompleks yapıdaki büyük parçaların üretim kolaylığı sağlaması açısından tercih edilmektedir (Sönmez 2009). Genellikle petrokimya esaslı ürünlerdir. Son dönemde en yaygın kullanım alanındadır. Malzeme üretimi açısından ekonomik, hafif, yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve çelik kadar dayanımı yüksek yapıda malzeme yapısı amaçlanmaktadır.

Yüksek süneklik ve korozyon direncine sahiptir. Düşük sertlik ve dayanım ile yüksek sıcaklıklarda dezavantaj sağlamaktadır (Karadurmuş 2017).

Uzun ömürlü, kullanıma uygun, şekillendirme kabiliyeti ile birim kütle başına düşen yük kapasitesi yüksek malzemelerdir (Vasiliev ve Morozov 2001).

Polimer matrisli kompozitler otomotiv, uzay sanayi, denizcilik, ulaşım, sağlık, inşaat endüstrisi, enerji depolama, spor araçları ve müzik aletlerinde yaygın kullanım alanına sahiptir. Şekil 2.10'da kullanılan alanlar gösterilmiştir.



Şekil 2.10: Polimer matrisli kompozitler (Karadurmuş 2017)

Tablo 2.2'de endüstriyel açıdan farklı alanlarda yaygın olarak kullanılan termoplastik ve termoset polimer matrislere örnekler verilmiştir.

Tablo 2.2: Yaygın kullanılan polimer matrisler

Termoplastikler	Termosetler
Polietilen	Doymamış poliestерler
Polipropilen	Alkit reçineler
Polistren	Epoksi reçineler
Poli(vinil klorür)	Fenolik reçineler
Polikarbonat	Melamin-formaldehit reçineler
Poli(metil metakrilat)	Üre-formaldehit reçineler

2.7 Polimer Matris Çeşitleri

Polimer matrisler, ısı davranışlarına göre termoplastik ve termoset matris olarak iki sınıfa ayrılmaktadır.

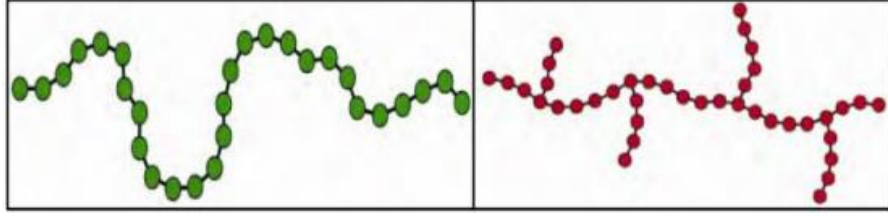
2.7.1 Termoplastik Matrisler

Termoplastik matrisler, çapraz bağ içermemekte düz zincirli veya dallanmış yapıya sahip polimerlerdir.

Düşük sıcaklıkta katı hal formunda, ısıtıldıklarında yumuşayan ve viskozitesi azalmakta olan malzemelerdir. Termoplastikler, ısı ile eritilip daha sonra soğutulduklarında katılaşmaktadır. Bu yüzden tekrar şekil verilebilme kabiliyetine sahiptir (Ebewe 2000). Yüksek kırılma tokluğu, geri dönüşüm kapasitesi, uzun raf ömrü ve kürleme işlemi sürecinde organik çözücülere ihtiyaç duyulmaması avantajıdır (Gu ve diğ. 2015).

Üretim esnasında karşılaşılan zorluklar, maliyet, oda sıcaklığındaki düşük işleme kalitesi ve mekanik dayanım özelliklerinden dolayı termoset malzemelere göre daha az tercih edilmektedir.

Termoplastikler, uzun polimer zincirlerine sahiptir. Bu yüzden yüksek moleküler ağırlık yapısında ve akışkanlık direnci yüksek reçinelerdir. Doğrusal veya dal gibi görünümüne sahip zincir şeklinde bulunmaktadır. Şekil 2.11’de termoplastik yapılar gösterilmiştir.



Şekil 2.11: Termoplastik yapılar a) doğrusal ve b) dallı zincir termoplastik yapılar (Morillas 2015).

Termosetlere göre üretimleri daha zordur. Bu durumun, termoset reçinelerin sıvı halde bulunduğu sıcaklık parametrelerinde termoplastik reçinelerin viskozitelerinin hala yüksek olmasından kaynaklandığı ifade edilmektedir. Matris-elyaf yapısı daha zor gerçekleştirilmektedir (Arat 1990).

2.7.2 Termoset Matrisler

Termosetler, makro molekülleri birbirleriyle ağlaştırmış yapıdadır ve aralarında kovalent bağlar bulunmaktadır.

Bu bağ oluşumları sayesinde malzemenin dayanım özelliklerinde ve ısı direncinde yüksek değerlere ulaşılmasına katkı sağlamaktadır.

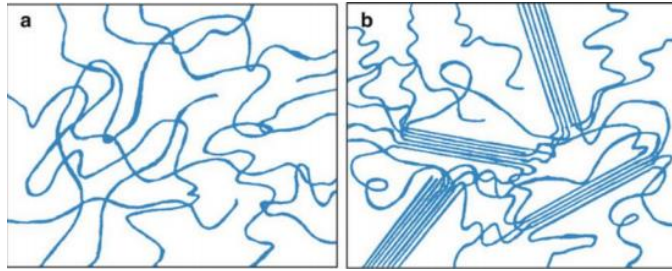
Geri dönüşümleri yoktur. Sert ve kırılgan içyapıya sahiptirler, kopma gerçekleşen durumlarda düşük uzama değerleri ve kütleme işlemi sonrası sertleşme sürelerinin uzun olması uygulama alanlarının potansiyelini etkilemektedir (Ding ve diğ. 2013). Isı etkisi ile sertleştirildikten sonra tekrar eritilerek dönüşüm sağlanamamaktadır. Düşük yoğunluk, yüksek termal dayanım ve kimyasal direnç gibi özellikler tercih edilme durumu sağlamaktadır.

Boyutsal kararlılıkları iyidir, üstün elektrik ve ses yalıtım özelliklerine sahiptir (Saçak 2005).

Lif takviyeli kompozitlerin yapımında daha çok kullanılmakta, sıvı halde bulunmaktadır. Öncelikle katılaştırıcı ilave edilmesi ile jel haline gelir ve daha sonra da katılaşmaktadır (Itoh ve diğ. 2002). Düşük ya da yüksek viskoziteli sıvı veya katı halde olabilmektedir.

Düşük viskoziteli reçinelerde, yüksek basınç veya yüksek sıcaklık etkisi düşünülmeden fiberlerin reçine tarafından iyi ıslatabilme özelliği sağlaması kolaylık sunmaktadır. Bu yüzden malzemelerde herhangi bir sorun ile karşılaşılmamaktadır. Fakat bu durum yüksek viskoziteli reçineler için geçerli değildir, fiberlere emdirilebilmesi için yüksek sıcaklık ve basınç kullanılmaktadır. Üretim esnasında elyaf-reçine dağılımı önemlidir, homojen dağılım olması söz konusudur. Malzeme yüzeyinde kuruluk olmaması istenmektedir.

Termosetler, çapraz bağlı polimerlerdir. Bu yüzden ısıtıldıklarında termosetlerin yapıları bozunmaktadır. Çapraz bağlar moleküllerin birbiri üzerinde hareketleri zorlaştırmakta ve kısıtlamaktadır, bu yüzden polimer yapısı güçlü ve rijit hale dönüşüm göstermektedir.



Şekil 2.12: Polimer moleküllerin düzenleri a) amorf, b) yarı kristal (Chawla 2012).

Polimer molekül düzeninde amorf bir yapıya sahip olan moleküller arasında bir düzen bulunmaz. Ayrıca zincirler rastgele bir dağılım sergilemektedirler. Kompozit malzeme üretiminde en çok kullanılan termoset çeşitleri epoksi, vinilester, doymamış polyester ve fenoliklerdir (Baydar 2011).

2.7.3 Polyester Reçineler

Polyester reçineler, kolay kürlenme ve kolay kalıplanabilme özelliklerine sahiptir (Strong 2008).

Talep ve istek doğrultusunda istenen özelliklere değiştirebilme kolaylığına ve düşük maliyet unsuruna sahiptir.

Bazı durumlarda üretim açısından düşük dayanım, gevreklik ve hava kirliliğine sebep oldukları için dezavantaj durumundadır (Baydar 2011). Genellikle kullanımları kolaydır, dik yüzeylerde iyi yapışma özelliği göstermekte ve bu sayede reçine parça ya da kalıpların hazırlık aşamasında sıyrılma meydana gelmemektedir.

Kumaş yüzeyleri hızlı ve kolay bir şekilde ıslatılabilmektedir. Hızlı kürlenebilen ve sertleşebilen bir yapıya sahiptir. Sıcaklığa, UV ışınlarına dayanıklıdır (Tursun 2019). Genellikle denizcilik endüstrisinde tekne gövdeleri, otomotiv uygulamaları ve düşük maliyetli kalıpların üretimi için kullanılmaktadır.

2.7.4 Vinilester Reçineler

Vinilester reçineler, bisfenol-A gibi bir epoksi reçine ile doymamış karboksilik asitlerin (özellikle metakrilik asit) reaksiyonu sonucunda oluşan doymamış reçinedir. Zincir yapılarında yüksek molekül ağırlıklı epoksi reçinenin varlığı önem kazanmaktadır (Crawford 2002) bu sayede tokluk ve esneklik özelliği sağlayarak, mekanik özellikleri iyileştirmektedir. Kimyasal dayanımları oldukça iyidir.

2.7.5 Fenolik Reçineler

Fenol ve formaldehit birleşerek kondensasyon ürünlerini (fenolformaldehit+su) oluşturmaktadır. Formaldehit en reaktif bileşendir, çok az kullanım alanına sahiptir. Kullanım alanları kısıtlı olsa da kalıplama da kullanılmaktadır. Tahta yapıştırıcısı, fren balataları ve kompozit malzeme üretimi gibi alanlarda tercih edilebilmektedir (Harper 2004).

Genellikle ticari uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Kimyasal dayanımları iyidir ve boyutsal kararlılığa sahiptirler; fakat gevrek yapıdadır.

2.7.6 Epoksi Reçineler

Kompozit endüstrisinde yaygın olarak kullanım alanına sahip olan reçine tiplerinden epoksi reçine en yüksek mukavemet özelliklerini karşılamaktadır. Epoksi reçine polyester ve vinilesterden farklı yapıdadır. Bu sebeple sertleşmesi için katalizör yerine sertleştirici kullanılması gerekmektedir. Elyaf katkılı kompozit malzemelerin üretimi haricinde genellikle kaplama ve yapıştırıcı görevinde kullanılmaktadırlar (Tursun 2019). Termoset reçinelere göre mekanik özellikleri daha yüksektir (Ömerciklioğlu 2009).

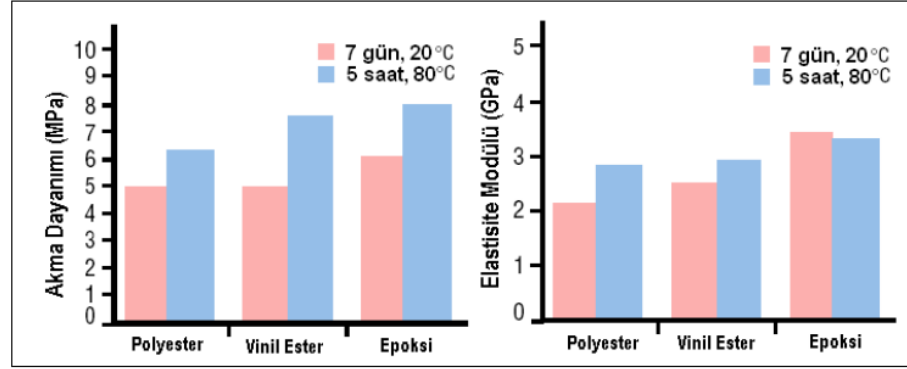
Epoksi reçineler vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretimi gerçekleştirilen kompozit malzemelerde en çok tercih edilen reçine türüdür. Şekil 2.13’ te reçine örneği gösterilmiştir.



Şekil 2.13: Polimerik reçine

Kürlenme sırasında düşük bir büzülme eğilimi göstermektedir. Bu bağlamda yapıda iç gerilme oluşumu düşük seviyededir (Eskizeybek 2012).

Polyester, vinilester ve epoksi reçinelerin farklı kürleme sıcaklık ve sürelerinde akma dayanımı ve elastisite modülü gibi mekanik özelliklerinin karşılaştırılması Şekil 2.14’te gösterilmiştir.



Şekil 2.14.: Termoset reçinelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması (Ömerciklioğlu 2009).

Genellikle yaygın kullanıma sahiptir. Maliyet açısından diğer reçine türlerine göre pahalıdır. Mekanik özelliklerinin daha üstün özelliklere sahip olması havacılık, otomotiv, savunma, ulaşım, rüzgâr türbin kanat üretiminde, takım ve kalıp yapımında, döküm ve inşaat alanında tercih edilerek, en sık kullanılan termoset reçine çeşididir.

Tez çalışmasında, dokuma ve örgü tipinde karbon kompozit numunelerin vakum pres üretim metodolojisine göre üretiminde üstün mekanik özelliklerinden dolayı epoksi reçine tercih edilmiştir.

2.7.6.1 Epoksi Reçinelerin Özellikleri

Epoksi reçineler, düşük molekül ağırlığına sahiptir (Crawford 2002). Vizkoziteleri yüksektir. Yüksek kürleme sıcaklıklarında dayanıklıdır. Polyester reçinelere oranla daha pahalıdır.

Çekme ve basma dayanımları yüksektir (Deveci 2013). Çeşitli kimyasallara dayanımları yüksektir. Elektriksel özellikleri açısından yalıtkanlığı iyi olan polimerlerdir ve işleme prosesi kolaydır (Zhang ve Qi 2014). Korozyona ve korozif ortamlara dayanımları yüksektir (Mavani ve diğ. 2007). Termal ve boyutsal kararlılıkları oldukça iyidir (Soroush ve diğ. 2014). Yüzey özellikleri açısından yapışma kabiliyeti değerlendirildiğinde, birçok termoset polimere göre daha iyidir (Reis ve diğ. 2015).

Çeşitli fiber takviyeli epoksi reçinelerin bazı fiziksel ve mekanik özellikleri karşılaştırılması Tablo 2.3' te gösterilmiştir.

Tablo 2.3: Çeşitli fiberler ile takviyelendirilmiş epoksilerin karşılaştırılması (0°-90°) (Crawford 2002).

Malzeme	Hacim Oranı (V_f)	Yoğunluk (kg/m^3)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
Epoksi	-	1200	70	6
Epoksi-ECamı	0.57	1970	570	22
Epoksi-Kevlar	0.60	1400	650	40
Epoksi-Karbon	0.60	2000	380	106
Epoksi-Bor	0.58	1540	380	80

2.8 Elyaf Takviye Malzemeleri

Kompozit malzemeler içerisinde, elyaf takviyeli malzemeler en fazla kullanım alanına sahiptir. Elyaf takviye malzemeleri ise cam, grafit ve karbon takviyeli olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır.

2.8.1 Karbon Elyaf

Karbon elyafı, siyah renkte, organik açıdan karbon bakımından zengin malzemelerin yanması ile karbonizasyon işlemi sonucunda elde edilmektedir. Farklı sıcaklık parametrelerinde ısıtılma işlemi uygulanması farklı mekanik özelliklerde karbon elyafların üretimini kolaylaştırmaktadır.

Yüksek çekme dayanımı ve elastisite modülü değerlerine sahiptir. Çekme dayanım değerleri 2000 MPa ile 5500 MPa arasında, elastisite modülü ise 160 GPa ile 440 GPa arasında değişim göstermektedir. Cam ve aramid elyaflar ile karşılaştırıldığında, korozyon ve yorulma dayanımı bakımından yüksektir, darbe dayanımı oldukça düşüktür (Ömerciklioğlu 2009).

Düşük yoğunluğa sahip olmakla birlikte Elastisite Modülü yüksektir. Yüksek çekme ve basma mukavemetine sahiptir, ağırlıkları ile doğru orantıda dayanım özellikleri kazandırmaktadır. Yüksek aşınma ve yorulma mukavemetleri ile düşük ısı genleşme katsayısı karbon elyafın tercih edilme sebebini arttırmaktadır. Maliyetinin yüksek olması, yüksek elektrik iletkenliği, düşük darbe direnci ve gevrek yapıya bağlı olarak düşük tokluğa sahip olması karbon elyafının dezavantajlarıdır (Sayer 2009).

2.8.2 Cam Elyaf

Temel kullanım alanları cam takviyeli plastik (CTP) endüstrisidir. Cam takviyeli kompozit malzemelerin üretiminde cam elyafın sahip olduğu kimyasal bileşimi, elyaf çapının seçimi, kullanılan takviye malzemesinin geometrisi önemlidir.

Cam elyafı keçe, kumaş, büzülmüş veya düz sürekli elyaf ve kırılmış olarak (3-5 mm) gibi farklı tiplerde üretilmektedir (Akdemir 1992). Yüksek çekme, darbe ve yüksek kimyasal dayanıma sahiptir (Kılıç 2006). Düşük maliyet, elektriği iletmemesi özelliği ve ısı dirençlerinin düşük olması avantaj durumdadır. Düşük elastisite modülüne sahiptir (Kılıç 2006). Fiberlerin sürtünme etkisi ile aşındırma sorunları meydana gelmektedir. Düşük yorulma direnci ile düşük esneklik katsayısına sahiptirler (Sayer 2009). Keçe, dokuma, kırılmış elyaf veya sürekli boy tipinde kullanılmaktadır. Cam fiber takviyeli kompozit malzemeler takviye malzeme olarak üç çeşit cam kompozisyonuna sahiptir. Bunlar E, S ve C camıdır.

2.8.2.1 E Camı

En çok kullanılan cam fiberdir. Bu durum E camının iyi elektriksel yalıtkanlık, iyi dayanım, rijitlik ve düşük aşınma özelliklerine sahip olması ile açıklanmaktadır. Filaman sarma yönteminde en fazla tercih edilen takviye malzemesi E-Cam elyaf malzemesidir.

2.8.2.2 C Camı

C camı, E camına göre daha yüksek kimyasal dirence sahiptir. Ancak dayanım özelliği düşüktür ve pahalıdır.

2.8.2.3 S Camı

S camı yüksek dayanım özelliklerine, yüksek elastiklik modülü ve ısı dayanımına sahiptir. E camına göre sağlam ve daha pahalıdır. Bu sebeple S camı uçak sanayi gibi yüksek dayanım istenen alanlarda tercih edilmektedir (Şahin 2011). Her iki cam elyafıta filaman sarma yöntemine uygun ve yüksek çekme mukavemetine sahiptir.

2.8.3 Kevlar (Aramid) Elyaf

Aramid elyaf, aromatik polyamid olarak adlandırılmaktadır. Kevlar 29 ve Kevlar 49 olarak iki farklı tipte aramid bulunmaktadır. Camdan daha hafif ve rijit bir malzemedir. Maliyet açısından daha ucuzdur. Yüksek sıcaklığa ve korozyona karşı dayanımları iyidir. Yüksek çekme mukavemeti ve darbe direncine sahiptir.

Fiber doğrultusunda düşük ısı genleşme katsayısı özelliği, yüksek tokluk ve esnek bir yapıya sahiptir (Sayer 2009). Düşük basma mukavemetine sahip olmaları ve zor kesilmeleri dezavantaj durum sağlamaktadır. Aramid, Kevlar49 ve Grafit gibi elyafların kullanımı yüksek Elastik Modülü ve özgül mukavemet özelliklerinden dolayı uzay veya havacılık gibi alanlarda tercih edilmektedir.

Çalışmalarda takviye malzemesi aramid olarak tercih edilmesi sonucu üretim yöntemine bağlı olarak epoksi, vinilester ve polyester reçine türleri kullanılmaktadır.

2.9 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzeme üretim yöntemleri, mekanik ve fiziksel özellikleri açısından takviye malzeme ve matris malzemesine, parça şekli, maliyetine bağlı olarak değişim göstermektedir.

Matris ve fiber en küçük yapıda mikro ölçekte birleşerek, tek tabakalı bir lamine oluşturmaktadır. Tek tabaka lamineler üretilecek parça kalınlıklarına bağlı olarak bir araya getirilerek makro boyutlarda laminantı oluşturmaktadır.

2.9.1 El Yatırma Yöntemi

El yatırma yöntemi, kompozit malzeme üretiminde kolaylıkla gerçekleşen bir işlemdir. Takviye malzemesi olarak elyaflar (cam, karbon, aramid elyaf) kullanılmaktadır. Öncelikle kalıp temizlenir ve istenen çalışmalar da jelkot sürülür. Bu sayede parça pürüzsüz ve parlak yüzeye sahip olmaktadır. Kalıp ayırıcı vaks ya da jelkot gibi kullanılan kimyasal ürünler sayesinde kompozit malzemenin kalıptan ayrılmasını kolaylaştırmaktadır. Jelkot sertleşince elyaf katmanları yatırılmaktadır. Jelkot işlemi uygulanmayan üretim aşamasında yine parça yüzeyi temizlenerek, seçilen elyafların serim işlemi yapılmaktadır. Bir kalıp içerisine yerleştirilmiş olan kırpılmış veya dokuma kumaşlara laminasyon işlemi esnasında bir rulo veya fırça ile reçinenin emdirilmesi işlem esasına dayanmaktadır. Reçinenin elyaf kumaşına iyi nüfuz etmesi ve homojen dağılımı sağlanmaktadır.

Yüzeyde fazla reçine dağılımı ile zengin reçine oluşumu veya homojen dağılım sağlanmadığında meydana gelecek kuruluk olayı istenmeyen durumdur. Reçine emilimi sağlanmış kumaşlar genellikle oda sıcaklığı ve atmosferik basınç altında kürlenme işlemine bırakılmaktadır. Elyaf-reçine emilimi işlem esnasında iyi gözlenmelidir. İstenen kumaş özellikleri ve kat sayısında kumaş serim işlemi sonrası reçine kumaşların katmanına bağlı olarak yüzeyine emdirilmektedir.

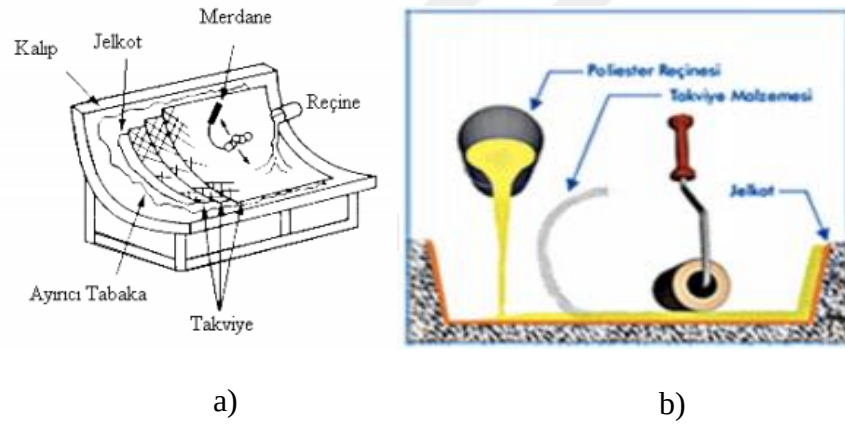
Önemli olan bir diğer husus ise kullanılan kumaşın özelliklerine bağlı olarak çok katmanlı yapıya aynı anda da reçine sürülebilmektedir, dağılımına dikkat edilmelidir.

Elle yatırma yönteminde tercih edilen elyaflar ile işlem esnasında herhangi bir termoset reçine (epoksi, poliestere, vinilester, fenolik) kullanım kolaylığı sağlamaktadır.

Reçine ve sertleştiriciler, özelliklerine bağlı olarak kumaşa uygun olacak şekilde seçilmeli ve belli oranlarda hazırlanmalıdır.

Yüzey işlemi talimatlara uygun bir şekilde yapılmalıdır ve belli sıcaklık parametrelerinde bekleme süresinde kürleme işlemi kontrol edilmelidir. Gözlem önemli bir husustur. Bu süreçte kumaş yüzeyinde meydana gelebilecek olan kuruluk ya da zengin reçine gibi durumlar gözlenmelidir.

Şekil 2.15'te yapılan uygulama şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.15: El yatırma yöntemi a) kalıp yüzeyi, b) işlemin şematik gösterimi (Olgun 2020).

Kolay üretim prosesi tercih edilme unsurudur. Rulo işlemi sayesinde tek veya çok katmanlı elyafların kompozit malzeme üretiminde kolaylık sağlamaktadır.

Tez çalışmasında rulo halinde hazır alınan dokuma karbon fiber kumaşlar ve 3K karbon fiber ip ile örme işlemine sahip örgü karbon fiber numuneler belirlenen ölçüler doğrultusunda kesim işlemi yapılarak, ilk önce el yatırması yöntemi ile üretimi gerçekleştirilmiştir.

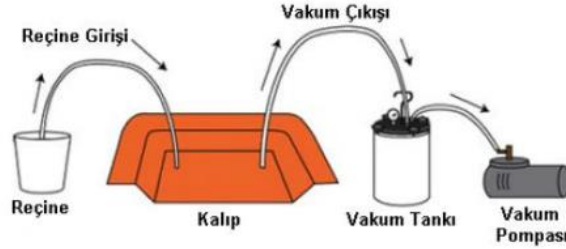
2.9.2 Vakum İnfüzyon Yöntemi

Vakum infüzyon yöntemi, kompozit malzemelerin üretiminde en çok tercih edilen yöntemdir. Takviye malzemesi olarak karbon, cam fiber, aramid (keklar) kumaşları kullanılmaktadır ve matris malzemesi olarak ise termoset reçine kullanımı tercih edilmektedir. Genellikle epoksi, polyester ve vinilester reçineler kullanılmaktadır. Önemli olan tercih edilen kumaş yapısı ve özelliklerine bağlı olarak uygun reçine seçilmesidir. Reçine ve sertleştiricinin de uygun karışım oranlarında hazırlanması gerekmektedir. Karmaşık geometrili yapılara sahip parçaların üretimine kolaylık sağlamaktadır. Üretilecek parça özelliği ve ortam koşullarına göre uygun viskoziteye sahip reçineler tercih edilmelidir. Üstün mekanik özelliklere sahiptir ve bu sebeple birçok sektörde kullanım alanı oluşturmaktadır.

Vakum infüzyon yönteminde işlem prosesi, vakum pompası, vakum tankı (reçine toplama tankı), kalıp ve reçine kovası kullanılarak 4 kısımdan oluşmaktadır. Çalışma prensibi olarak vakumlanmış ortam içerisinde reçinenin vakum deliğine doğru ilerlemesi amaçlanan bir yöntemdir. Vakum infüzyon yöntemi, işlem akışında öncelikle kalıp temizliği ve kullanılacak kimyasal malzemeler (jelkot veya vakslar) ile yüzey işlemleri yapılmalıdır. Kalıp yüzeyi; toz ve yağ gibi yabancı maddeler ile daha önce kullanılmış ise yüzey ayrıştırma işlemi yapılmalıdır. Bazı istenen durumlarda kalıp yüzeyinde oluşan sıkıntılı alanları, çiziklerin bulunduğu kısımları kapatmak ve üretilecek parçanın kalıptan kolaylıkla ayrılabilmesi için yüzeye kalıp ayırıcı uygulanmaktadır. Elyafın kesim işlemi gerçekleştirilmektedir. Tercih edilen reçine ve sertleştiriciler kumaşa uygun olacak şekilde hazırlanmalıdır. Öncelikle hazırlanan kumaşlar bir kalıp içerisine malzemenin kalınlığını oluşturacak şekilde üst üste kumaş serimi yapılarak dizilmektedir.

Serim işlemi ile üst üste dizilmiş olan kumaşlar üzerine bir ayırıcı film tabakası kullanılmaktadır. Vakum filmi ya da vakum folyosu malzeme yüzeyine serilmektedir. Tüm kalıp boyunca kenarlara çift taraflı yapışkan sızdırmazlık macunları (sarı macun) kullanımı ile sızdırmaz bir yapı elde edilmektedir. Vakum yardımı ile reçinenin kuru olarak serilmiş kumaşlara reçineyi emdirilmesi işlemi sağlanmaktadır. Dikkat edilmesi gereken durum reçinenin homojen dağılım gerçekleştirmesidir.

Ayrıca kumaş yüzeylerinde kuruluk gözlenmemesi önemli bir husustur. Şekil 2.16’da vakum pompası, vakum tankı (reçine akış tankı), kalıp ve reçine kovası olmak üzere dört ana bölümden oluşan vakum infüzyon yönteminin çalışma prensibi gösterilmiştir.

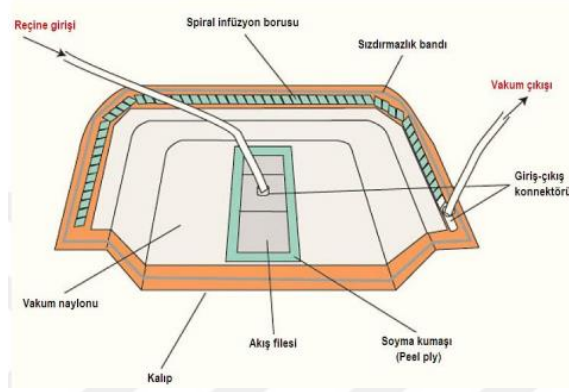


Şekil 2.16: Vakum infüzyon yöntemi (Durgun 2014).

Şekil 2.16’da görüldüğü gibi kalıbın çevresine spiral infüzyon boruları yerleştirilmektedir. Reçinenin kalıba girişini ve fazla reçinenin de çıkışı sağlayacak olan konnektörler yerleştirilmektedir. Konnektörler, vakum infüzyon tekniğinde matrisi oluşturan reçineyi, vakum basıncıyla kalıp içerisindeki lamine yapının içine aktarımını sağlayan sisteme verilen addır. Bu süreçte iyi gözlem yapılmalıdır. Sızdırmazlık bandı olan sarı macun bant kalıp etrafını çevreleyecek şekilde yapıştırılır. Vakum naylonu kalıp üzerine yeterli seviyede baskı uygulayabilmesi için kalıbın şekline uygun olarak kesildikten sonra sızdırmazlık bandı kalıp etrafına yapıştırılır. Naylonun yapıştırılmasından sonra, reçinenin girişini ve vakum çıkışı sağlayacak borular konnektörlere bağlanmaktadır. Vakum çıkış borusunun diğer ucu ise reçine akış tankına bağlanır. Akış tankının ucuna bağlı olan vakum pompası açılır, sistemde kaçak olup olmadığı basınç göstergesi ve kaçak detektörü ile kontrol edilmektedir.

Reçine tankından geçişi devam eden işlem de hortum içinde kalacak miktar da düşünülerek gerekli reçine ve sertleştirici karışımı hazırlanarak karıştırılmalıdır. Hazırlanmış olan reçine ve sertleştirici karışımı, kalıbın tüm yüzeyini ıslatabilecek şekilde kalıba aktarılmaktadır. Kalıbın tüm yüzey alanı ıslandıktan sonra reçine besleme hatları clempl ile kapatılarak reçine verme işlemi sonlandırılmaktadır.

Kürleme işleminden sonra parçada tamamen sertleşme durumu gözlenmelidir ve parça yüzeyi kendini salma durumu gözönünde bulundurularak, katılaşma sürecinde vakum altında tutulur. En son sarf malzemeler kalıptan sökülür ve parça kalıptan çıkarılmaktadır.



Şekil 2.17: Vakum infüzyon yöntemi ile üretim sistemi (Esenkaya 2019).

Deneyisel çalışmada kullanılan kumaşlar öncelikle el yatırması yöntemine göre uygulanan işlem sonrasında sonra vakum infüzyon yöntemine benzer şekilde plaka üretimi gerçekleştirilmiştir.

2.9.2.1 Vakum İnfüzyon Yönteminin Avantajları

Kompozit malzeme üretiminde en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. El yatırması yönteminde yüksek reçine/elyaf oranı elde edilirken, vakum infüzyon yönteminde yüksek elyaf/reçine oranı elde edilmektedir. Buna bağlı olarak daha sağlam ve uzun ömürlü malzeme yapısına sahiptir. Vakum işlemi uygulanması ile reçinenin elyaf yüzeyine dağılımı ve emilimi homojen bir şekilde gerçekleşmektedir. Zengin reçine oluşumunu engellemektedir. Aynı zamanda elyaf katlanmalarının önlenmesine kolaylık sağlamaktadır. Üretim sonunda homojen ve mukavemet açısından değerlendirildiğinde dayanıklı bir parça elde edilmektedir. Reçine transfer kalıplama yönteminden farklı olarak bu üretim yönteminde tek taraflı bir kalıp kullanılmaktadır. Karmaşık ve kompleks, büyük parçaların üretimi bu yöntem sayesinde mümkün olmaktadır.

Üretim yöntemi esnasında kullanılan ekipman ve sarf malzemelerin sayısı fazla olduğundan dolayı yüksek maliyet ve iş gücü gerektirmektedir. Ayrıca iyi bir gözlem ve uzmanlık gerektiren bir uygulamaya sahiptir. Gözlem sayesinde parçanın vakum infüzyon işlemi aşamasında bölgelerin kontrol edilmesi ve reçine ile kumaşlara emilimi sağlanmalıdır.

Kumaş yüzeylerinin tam ıslanmaması sonucu kuruluk gözlenmektedir ve bu sayede pahalı atık malzemeler ortaya çıkabilir ya da bu durum ile birlikte bazen parçanın çöp olabilmesine kadar gidebilecek sorunlar ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden parçada reçinenin homojen bir dağılım göstermesi beklenmektedir.

2.9.3 Reçine Transfer Kalıplama (RTM)

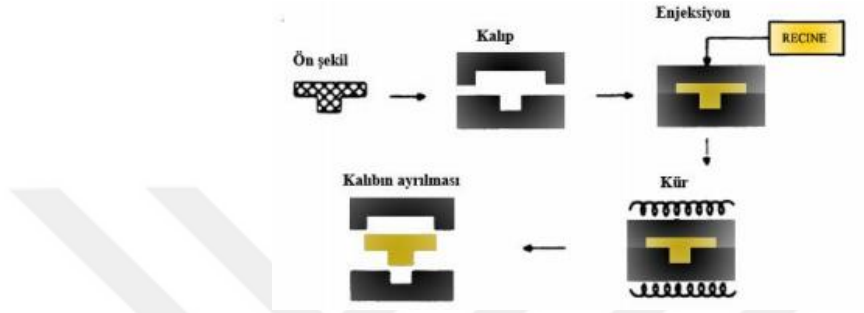
Vakum infüzyon yönteminden farklı olarak burada iki kalıp (dişi ve erkek) kullanılmaktadır. Reçine transfer yöntemi için özel olarak üretimi gerçekleştirilmiş takviye malzemeleri kalıp içine yerleştirilir ve kalıplar kapatılır. Malzeme yüzeyine basınçlı olarak yani vakum etkisi ile reçine enjekte edilir.

Genellikle 2-10 mm cidar kalınlığında ve %20- 30 fiber oranına sahip kompozit malzemeler elde edilmektedir (Örs 2014).

RTM yöntemi genellikle jelkotlu veya jelkotsuz olarak yapılmaktadır. Talep doğrultusunda her iki yüzeyin de düzgün olması istenen parçalarda jelkot kullanılmaktadır. Yüzey pürüzlülüğü söz konusu değildir, parlak bir görünüme sahip olmaktadır. Kuru keçe, kumaş ya da her ikisinin birleştirilmesi ile takviye malzemesi olarak kullanımı gerçekleştirilmektedir. Üretim aşamasında ilk önce kalıp boşluğu doldurulacak şekilde takviye malzemesi kalıba yerleştirilir ve ana kalıp kapatılır. Elyaf, matris içinde geç çözünme özelliğinde olan reçinelerle kaplanmaktadır. Çünkü burada kalıp içerisinde yer değişme durumu gözlenebilmektedir. Bu yüzden reçine basınç altında kalıba enjekte edilmektedir (Olgun 2020).

Matris enjeksiyonu soğuk, ılık veya en çok 80°C'ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilmektedir.

İçerideki havanın dışarı çıkarılması, reçinenin elyafı iyi ıslatabilmesi için vakum kullanılabilir. Kuruluk durumu iyi gözlenmelidir (Eker 2008). Üretim esnasında işçilik gerektiren bir yöntemdir. Çünkü elyafın kalıba serim işlemi önemli ve uzun süre gerektirmektedir. Karmaşık parçaların üretimi için tercih edilmektedir. Kapalı bir kalıpta gerçekleşen yöntem olmasından dolayı zararlı gazlar azalmaktadır, buna bağlı olarak gözeneksiz yapı elde edilmektedir. Şekil 2.18’de reçine transfer kalıplama yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.18: RTM kalıplama sistemi (Eker 2008).

2.9.4 Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama (VARTM)

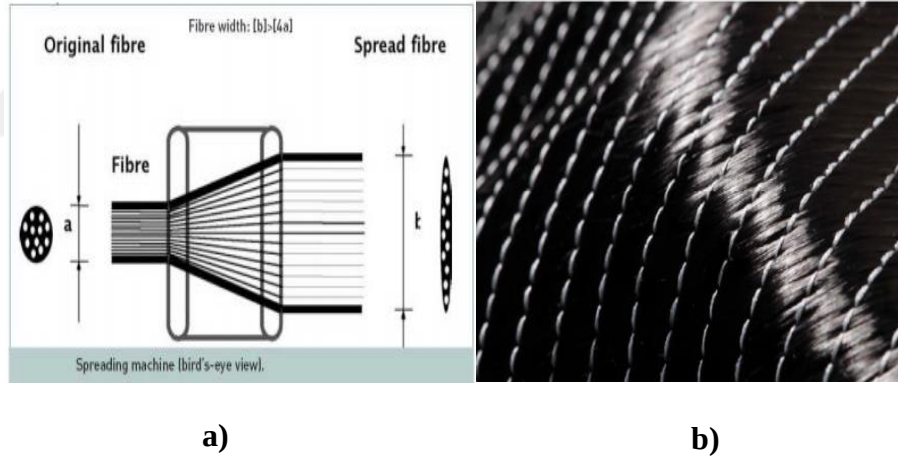
Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama (VARTM) yöntemi, karmaşık kompozit parçaların üretimi için kolaylık sunmaktadır. Kaliteli bir ürün üretimi ve düşük maliyet unsuru ile avantaj sağlamaktadır. Genellikle fiber takviyeli polimer (FRP) kompozit laminatların üretiminde kullanılan bir yöntemdir. İşlem akışı kapalı kalıp prosesinde gerçekleşmektedir. Tekrarlanabilir ve yüksek kalitede ürün üretim kolaylığı sağlamaktadır. Esnek kalıp tasarımıdır. Kalıp yapısına bağlı olarak, farklı parça geometrileri üretimi için kolaylıkla modifiye edilebilmektedir. El yatırması işleminin açık kalıp tipine karşılık gelmekte olan VARTM kalıbı, RTM kalıbından daha büyük boyutlarda yapılabilen ve üretim esnasında kullanılan reçine, katalizör ayrı ayrı saklanabilme kolaylığını sağlamaktadır.

İnfüzyon işleminde kullanılan şeffaf plastik vakum torbası kullanılarak reçine infüzyon işlem akışı gözlenmektedir. Herhangi gözle görünür kuruluk durumu tespit edilerek engellenmelidir.

Üretimde kullanılan ve tekrar kullanımı olmayan sarf malzemeler yani vakum torbası, akış dağıtım filesi, sök-at kumaşı, sızdırmazlık bandı ve reçine borularıdır. Her VARTM işlemi sırasında yeni malzeme kullanılarak hazırlanmaktadır.

2.9.5 Karbon Spreading (yayma) Teknolojisi

Karbon iplik tellerinin sahip olduğu her bir tel yapısı özel bir yöntem sayesinde yayılım sağlanması ile multiaxial karbon kumaşın ipliklerle üretilmesidir. Hafif, daha düzgün ve istenilen bir yapıda ve mekanik özellikleri bakımından iyileştirilerek, daha yüksek mukavemete sahip takviye elyafları elde edilmektedir. Spread karbon kumaşlarda, karbon iplikler basınç altında ısıtılarak yayvan bir hale getirilmektedir. Bu sayede kumaşlar ipliklerle üretilmektedir. Üretim yönteminin şematik gösterimi ve bu teknoloji yöntemi ile ipliklerle üretilmiş biaxial karbon fiber kumaş Şekil 2.19’da gösterilmiştir.



Şekil 2.19: Karbon spreading teknolojisi ve kumaş yapısı a) karbon spreading teknolojisi, b) psread edilmiş ipliklerle üretilmiş biaksial karbon kumaş

Karbon spread teknoloji yöntemine bağlı olarak üretilen kumaşlar, spread işleminden geçirilmeyen kumaşlara karşılık düz ve daha az boşluklu bir yapıdadır.

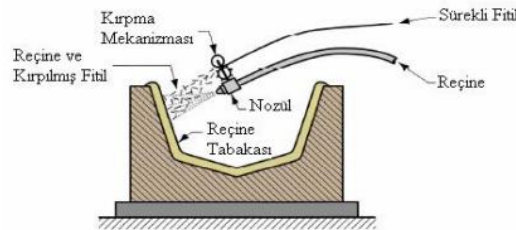
2.9.6 Püskürtme Yöntemi (Spray-up)

Püskürtme işlemi, kimyasal bir işlem olup gerçekleştirilen işlem esnasında tabancaya sürekli bir halde beslenen elyaf, kesici bıçak aracılığı ile geçerek kırılmaktadır. Elyaf bu tabanca üzerinde bulunan özel kırpıcı aparat ile püskürtme işleminden önce belirli oranlarda kırılmaktadır. Kalıp yüzey işlemi olarak ilk önce yüzeye kalıp ayırıcı bir kimyasal işlemi uygulanmaktadır. Bu kimyasal malzeme ile üretilen kompozit malzemenin kalıptan kolay ayrılması beklenmektedir. Her deneyde esnasında kullanılan elyaf türüne uygun olarak reçine ve sertleştirici belli oranlarda hazırlanmalıdır.

Püskürtme işlemi esnasında matris ve takviye malzemeleri olan reçine ve kırılmış elyaf belirli oranlarda karıştırılarak kalıp üzerine püskürtülür. Üretim prosesi olarak kolaydır ve el yatırma yöntemindeki işleme benzer uygulama yapılmaktadır. Laminasyon işleminde rulo ile reçine içinde kalan havayı çıkartma ve yüzeyi düzeltme işlemi uygulanmaktadır. Karmaşık yapıları parçaların üretiminde tercih edilmektedir.

Püskürtme yönteminde matris malzemesi olarak genellikle polyester reçine ve takviye malzemesi olarak da demet halindeki lifler kullanılmaktadır.

Dokuma kumaş kullanılarak yapılan el yatırmanın mekanize olarak yapılan işlem halidir. Kırılmış elyaflar ile uygulanabilir özelliğinden dolayı kompozit parçalarda düşük mekanik özellikler elde edilmektedir. Şekil 2.20’de jelkot uygulanmış kalıp yüzeyine püskürtme işlemi yapılmaktadır.



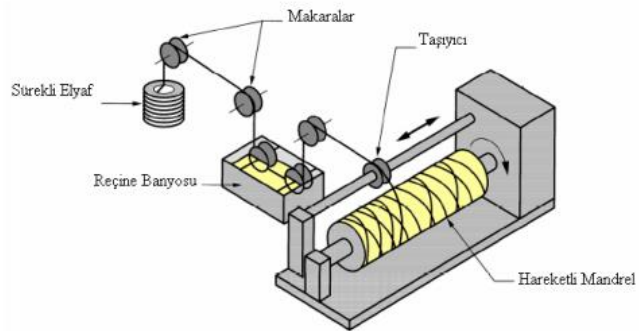
Şekil 2.20: Püskürtme yöntemi (Ataş).

2.9.7 İplik Sarma

İplik sarma yönteminde, sürekli fiberler kendi eksenini etrafında dönen mandrel etrafına belirli hız ve açıda sarılmaktadır. Sarma işlemi esnasında takviye elyaf malzemesine kuvvet uygulanmaktadır. Sürekli elyaf liflerine reçine emdirilmesi ile bir makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılması işlemidir.

Sürekli lifler farklı açılarla kalıba sarılma işlemidir. Sarma işlemi sırasında elyafa bir gergi kuvveti uygulanmaktadır. Farklı mekanik özelliklere sahip ürünler elde edilebilmektedir. İstenen yapıda elyaf katının sarılmasıyla ürün sertleşir ve döner kalıp ayrılmaktadır (Eker 2008).

İplik sarma yöntemi ile roket gövdeleri, depo, boru ve basınçlı kap gibi silindirik parçaların üretimi gerçekleştirilmektedir. Silindirik parçaların üretiminde, termoset reçineler kullanılmaktadır. Genellikle epoksi ve polyester reçine tercih edilmektedir. Üretimde takviye malzemesi olarak kumaş şeklindeki elyaflar kullanılmamaktadır. Bu üretim yönteminin aşamalarında farklı olarak sürekli lifler kullanılmaktadır. Sürekli lifler, iki şekilde kullanıma sahiptir. Elyaf sarım işlemi yapılmadan önce reçineye daldırılır ve serim işlemi gerçekleştirilmektedir. Diğer yöntem kapsamında ise daha önceden reçine emdirilmiş prepreg malzeme kullanımı sağlanmaktadır. Elyaf sarma yöntemi ile karmaşık şekilli ürünlerin üretimine kolay ve seri üretime uygundur.

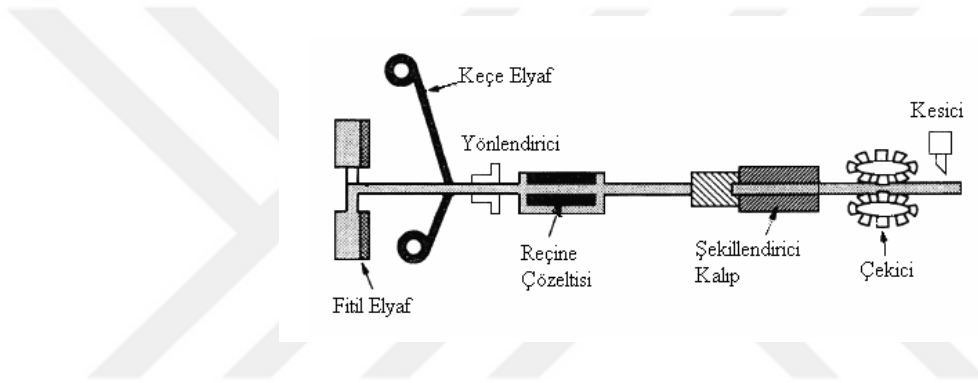


Şekil 2.21: İplik sarma yöntemi (Eker 2008).

2.9.8 Pultrüzyon (Profil Çekme)

Sabit kesitli kompozit profil ürünlerin üretiminin gerçekleştiği düşük maliyetli üretim yöntemidir. Seri üretime uygundur. Sürekli takviye malzemesi reçine banyosundan geçirilmektedir, daha sonra 120-150 °C'ye ısıtılmış şekillendirici kalıptan geçirilir ve sertleştirilir. Üretimde aşamasında kullanılan kalıplar genellikle krom kaplı parlak çelikten yapılmaktadır.

Sürekli elyaflar sayesinde takviye yönü boyunca yüksek mekanik dayanım elde edilmektedir. Enine yükleri karşılayabilmek için özel dokumalar kullanılmaktadır (Olgun 2020).



Şekil 2.22: Profil çekme yöntemi (Olgun 2020).

2.9.9 Karbon Prepreg

Prepreg, önceden reçine emdirilmiş ve basınçlı bir üretim yöntemine bağlı olarak üretilmiş lifli bir polimer takviye malzemesidir.

Prepregler belirli bir sıcaklık ve basınç altında kürlenmektedirler. Kürlenme işlemi ile kumaşlara emdirilmiş olan bu reçine sertleşerek kimyasal ve ısıl dayanımı yüksek, dayanıklı ve hafif bir kompozit yapı elde edilmektedir. Havacılık alanında üstün mekanik özellikler, üstün direnç, süper hafiflik, tokluk ve ısıl direnç özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir. Uzay, ulaşım, denizcilik, enerji, savunma ve inşaat alanlarında kullanılmaktadır. Bir diğer önemli sektör ise rüzgâr türbin kanat üretim alanında hazır prepreg kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Tercih edilme hususunda elle yatırma yöntemine göre avantaj durumlar sağlamaktadır.

Üretim prosesleri kolaydır. Prepreglerin üretim sürecinde en önemli dikkat edilmesi gereken kesit maksimum kazanıma ulaştıkları özellikleri açısından prepregler ile üretilen kompozit yapının sahip olduğu ağırlığın % 50 kumaş ve % 50 reçinenin oluşturulması sağlanmaktadır. Zengin reçine ile genel özellikleri azaltır ancak kırılmalık özelliğini arttırmaktadır.

Karbon prepreg kompozitler termoset ve termoplastik olarak iki sınıfa ayrılmaktadırlar. Prepregler genellikle yaklaşık olarak %35 civarında reçine içermektedirler. Bu durum malzemenin maksimum sertleşme özellikleri için idealdir. Parça yüzeyi elle yatırma yöntemine göre düzgün yapıdadır. Atık malzeme seviyesi daha azdır ve düşük karışıklık avantajındadır. Bu üretim yöntemin de daha düşük kürlenme süresine sahiptir.

Kürleme işleminde malzeme içerisine nüfuz etmemiş ve homojen dağılım göstermeyen reçine durumu ile kuruluk sorunu yaşanmaktadır. Cam prepregler de hava kabarcıkları oluşmamaktadır. Parlak, pürüzsüz bir yüzey elde edilebilmektedir. Yüzeyleri daha iyi ve daha estetik görünüme sahiptir.

Maliyet etkisi dezavantaj durum oluşturmaktadır. Pahalı bir yöntemdir ve reçine, kür, elyaf maliyetleri azaltılsa bile prepregler daha maliyetlidir.

2.9.10 Otoklav

Otoklav yöntemi; iç basınç, sıcaklık ve emiş gibi değerlerin kontrol edilebildiği bir basınçlı kap içerisinde gerçekleştirilen bir üretim yöntemidir. Üretim yönteminde fırın yerine bir otoklav kullanılmaktadır.

Otoklav işleminde en önemli husus bünyesinde ihtiyacı olan basınç, vakum torbalama işlemindeki gibi torbalanmış malzemeye iç vakum uygulaması veya otoklav içerisine dışarıdan basılan bir hava ya da azot gazı ile gerçekleştirilen dış basınç sayesinde elde edilebilmektedir. Azot gazı kullanımı daha çok tercih edilmektedir. Önemli olan bir diğer durum ise yüksek pişme sıcaklıklarında gerçekleşme ihtimali olan tutuşma ve yanma olaylarının göz önünde bulunması gerekmektedir.

Üretimi gerçekleşecek parçanın laminasyon işlemine göre genellikle hazır olan prepreg kullanılarak tabakalama işlemi ve vakum torbalama işlemi yapılmaktadır. Basınç ve sıcaklık altında kontrol edilerek pışme ve katılaşma işlemleri için otoklav fırınının içine yerleştirilmektedir. Reçine ve sertleştirici, üretilecek malzeme kalınlığı ve geometrisine bağılı olarak pışme ve katılaşma işlemleri değişim göstermektedir. Şekil 2.23'te üretim yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



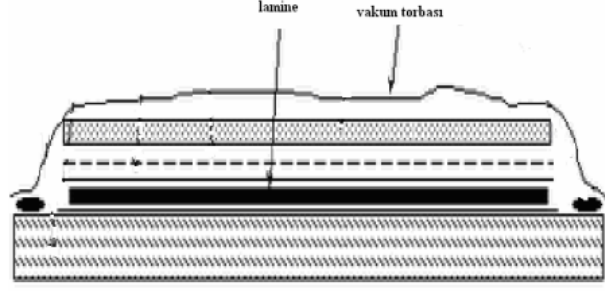
Şekil 2.23: Otoklav üretim yöntemi (Esenkaya 2019).

2.9.11 Vakum Torbalama Yöntemi

İşlem proses akışında kompozit malzeme bir kalıba yerleştirilmekte ve yüzeydeki ilk katmanda üzerine bir vakum torbası serilir ve hava emilimi sağlanmaktadır. İçerideki hava emiliminden sonra vakum torbası, malzemenin üzerine 1 atmosferlik basınç uygulayarak aşağıya çekilmektedir. Hazırlanan düzenek bir fırına yerleştirilir ve reçinenin kürleme işlemi için ısıtılma işlemi gerçekleştirilir. Genellikle elyaf sarma ve el yatırma teknikleri ile bağlaşıık olarak uygulanır.

Bazı hasar gözlenen kompozit malzemelerin tamir edilmesinde bu yöntem kullanımı kolaylık sağlamaktadır.

Şekil 2.24'te vakum torba yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 2.24: Vakum torbalama yöntemi (Eker 2008).

2.9.12 Ekstrüzyon Yöntemi

Ekstrüzyon yöntemi takviyeli termoplastik malzemelerde belirli sayıda, sınırlı bir oranda uygulamaya sahiptir. Sürekli bir üretim yöntemidir. Buna bağlı olarak yüksek tonajlı ürünlerde maliyet açısından avantaj sağlamaktadır. Bu yöntem genellikle tüp, boru veya karmaşık şekilli profillerin üretiminde tercih edilmektedir (Olgun 2020).

2.9.13 Basınçlı Kalıplama

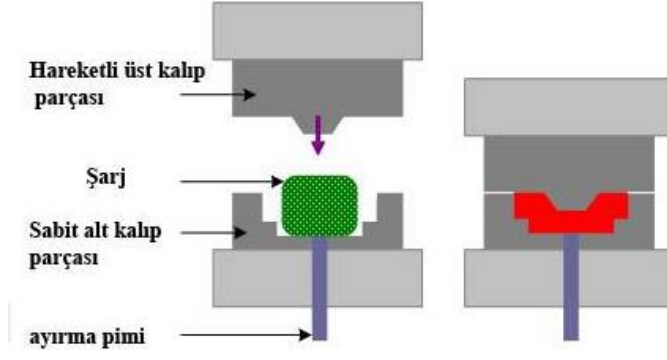
Basınçlı kalıplama, genellikle daha önceden ısıtılmış olan kalıplama malzemelerinin ilk önce açık, ısıtılmış bir kalıp boşluğu olan (dişi) ya da iki parçalı kalıp sistemi (erkek) yerleştirilen bir kalıplama yöntemidir (Bhatnagar 2016).

Önceden hazırlanan, pestil veya hamur halinde olan cam elyaf, polyester, dolgu ve katkı malzemeleri karışımlarının 150-170 °C sıcaklık parametrelerinde belli bir basınç altında çelik kalıplarda şekillendirilmesi ile gerçekleştirilen bir üretim metodudur.

Seri üretime uygun bir kalıplama metodudur.

Talep ve istek doğrultusunda ürün boyutlarına göre üretim işlemi gerçekleştirilmektedir.

3-6 dakikalık bir kalıplama süresine sahiptir. Basınçlı kalıplama yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.25’te verilmiştir.

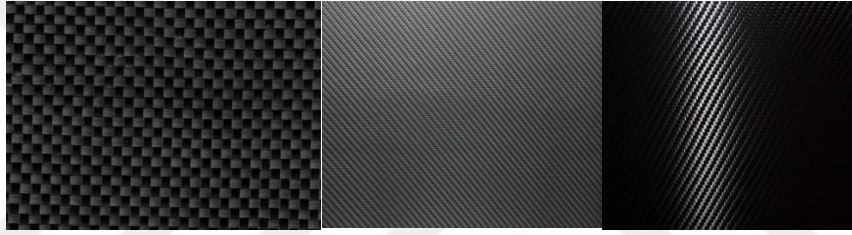


Şekil 2.25: Basınçlı kalıplama yöntemi

3. DOKUMA VE ÖRGÜ KARBON FİBER KUMAŞLAR

Dokuma işlemi, atkı ve çözgü iplik dizisinin birbiri ile dik yönde kesişerek, doku oluşturacak şekilde birbirleriyle bağlanmaları sonucu elde edilen bir yüzey oluşturma işlemidir (Şentürk 2014).

Dokuma örgüler, 0° ve 90° yönünde olan ipliklerin birbirleri üzerinden geçirilmesi ile üçüncü bir komponent olmadan birbirlerine tutunması ile üretilen örgülerdir. İpliklerin 0° yönü atkı, 90° yönü çözgü olarak isimlendirilmektedir. Kompozit malzemelerin üretiminde en çok bezayağı, dimi ve satin dokuma tipleri kullanılmaktadır (METYX Composites 2014).



Şekil 3.1: Karbon elyaf dokuma örnekleri

Yalçın (2012), dokuma cam elyaf kumaş takviyeli kompozitler üzerine gerçekleştirmiş olduğu çalışmada, $0^\circ/90^\circ$ yönlü olarak cam elyaf dokuma kumaş kullanımı ile kompozit malzeme üretimi gerçekleştirmiştir. İncelemeler sonucunda kumaşın kıvrım etkisi ile reçine birikmesi sonucu boşluklar meydana gelmiştir.



Şekil 3.2: $0^\circ/90^\circ$ yönlü iki eksenli cam elyaf dokuma kumaş (Yalçın 2012).

3.1 Dokuma Kumaş Takviyeler

Dokuma, dik açılarda iki iplik takımının birbirlerini geçmesi ile ortaya çıkan kumaşların üretim halidir. Dokumada uzunlamasına bulunan ipliklere atkı, çapraz halde bulunan iplikler çözgü olarak adlandırılmaktadır (Long 2005).

Dokuma kumaşlar güçlendirilmiş kompozit yapıda şekillendirilme kabiliyeti, sertlik ve dayanım açısından karakteristik özelliklerinden dolayı havacılık ve uzay sanayisinde kullanım potansiyeli oluşturmaktadır (Lee ve diğ.).

Dokuma kumaş örgü geometrileri yapılarına göre sınıflandırılmaktadırlar. İpliklerin boyutları üzerine farklılıklar göstermektedir. Düzenli ve düzensiz yapılara sahiptirler. Bezayağı, dimi, satin örgüler olarak tasarımları birbirlerinden farklı ve kullanım alanlarına göre çeşitlenmektedirler (Avanaki ve Jeddi Asgharian 2015).

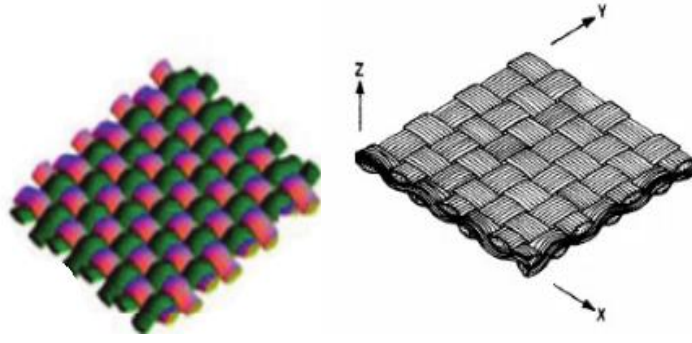
3.1.1 Bezayağı (Plain)

Düz örgü yapısı, üç çeşit bulunan dokuma tipinden en temelidir. Düz örgü dokuma işleminde, çözgü ve atkı hizalanmaktadır, bu sayede basit bir çapraz desen ortaya çıkmaktadır.

Her bir atkı ipliğinin çözgü ipliklerinden bir tane alt kısmından bir tane üst kısmından olacak şekilde geçirilmesi sonucu oluşturulan dokuma tipidir.

Düz örgüler dokusal kararlılık açısından incelendiğinde, bir dokuma yapının sıklığı, çözgü ve atkı iplikleri arasında geçiş sıklığına bağlıdır ve kesişim sayısı ne kadar fazla ise kumaşın sıklığı da o kadar iyi olması beklenmektedir (Taylor 1999). İplikler yoğun temas alanındadır ve iplik yapıları temas halinde en mukavemetli dokuma şeklidir. Aralarında dağılım gösteren, ayrışan, yüzen iplikler bulunmamaktadır (Yakartepe 1993).

Mekanik dayanım özelliklerini etkileyen en önemli faktördür. Şekil 3.3'te düz dokuma örneği gösterilmiştir.

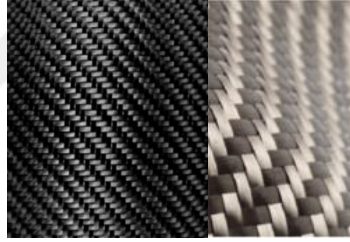


a)

b)

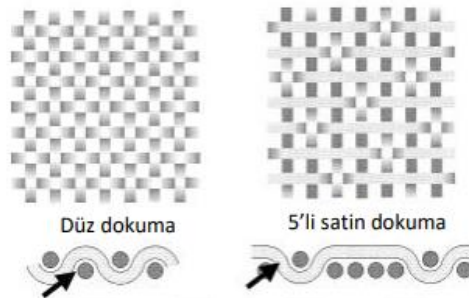
Şekil 3.3: Bezayağı dokuma kumaş yapısı a) bezayağı dokuma şematik gösterimi (Derakhshan ve Pourfakharan), b) düzlemsel gösterimi (Naik ve Ganesh 1992).

Çalışmada, 3K (3000 filament) 200 gr/m² bezayağı dokuma karbon fiber kumaş kullanılmıştır.



Şekil 3.4: 200 g/m² bezayağı dokuma karbon fiber kumaş

Düz dokuma şeklindeki elyaflar, birleşme noktalarının daha fazla olmasından 5’li satin dokuma şeklindeki elyaflardan daha hızlı ısınmaktadırlar (Yarlagadda ve diğ. 2012).

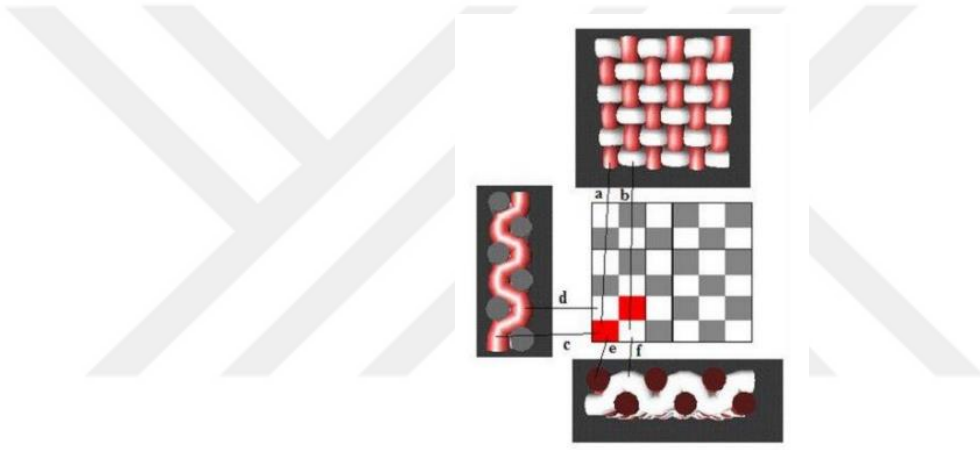


Şekil 3.5: Elyaf dokuma tipleri

3.1.1.1 Bezayağı Örgü Özellikleri

Bezayağı örgüsü, en küçük raporlu dokuma örgü tipidir. Bezayağı örgü raporunda iki çözgü ile iki atkı ipliği yer almaktadır. Atkı ve çözgü bağlantılarının en sık yapıya sahip olduğu dokuma şeklidir. Bu sebeple dayanıklıdır. En basit ve en dayanıklı dokuma örgüsü olduğu için pamuk, yün, ipek ve sentetik ipliklerle yapılan dokumaların kullanımına uygundur.

Bezayağı örgülü kumaşın sahip olduğu her iki yüzü de aynıdır. Kumaş yüzeyine herhangi bir desen oluşturma işlemi uygulanmamış ise bezayağı örgünün desen etkisi yoktur. Şekil 3.6’da bezayağı dokuma yapısı gösterilmiştir.

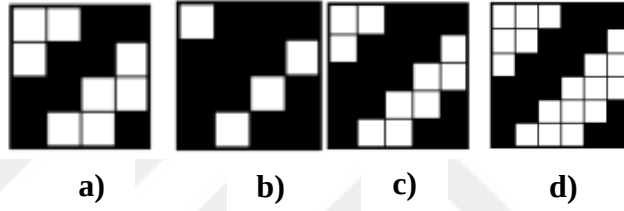


Şekil 3.6: Bezayağı dokuma

Bezayağı dokuma kumaşlar, dimi ve saten dokulu kumaşlara göre daha kısa atkı ve çözgü atlamalarına sahiptir, bu yüzden maksimum sayıda iplik kesişmesi meydana gelmektedir. Buna bağlı olarak bezayağı dokulu kumaşların aşınma mukavemetleri, aynı sıklık ve gramajdaki diğer dokulu kumaşlara göre, daha fazla olmaktadır. Ayrıca çok sık dokunabilen bir yapıya sahip olduklarından diğer kumaşlara göre daha sert ve mat görüme sahiptir (Şentürk 2014).

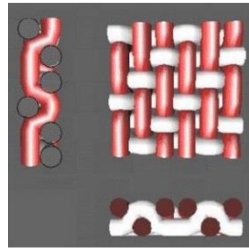
3.1.2 Dimi Dokuma

Standart üretim yapısında her bir atkı ipliğinin çözgü ipliklerinden 2 tanesinin alt kısmından 2 tanesinin de üst kısmından geçişi olacak şekilde dokunduğu örgü tipidir.



Şekil 3.7: Dimi dokuma örgü raporu a) 2/2 dimi dokuma, b) 3/1 dimi dokuma, c) 3/2 dimi dokuma, d) 3/3 dimi dokuma (Özdemir ve diğ. 2018).

Dimi örgüde, her çözgü kendi atkısı ve birbirlerinin ardı sıra bağlanmaktadır. Buna bağlı olarak birinci çözgü birinci atkı ile ikinci çözgü ikinci atkı ile bağlanmış olmaktadır. Bu nedenle de bağlantı noktaları sağa veya sola doğru alana sahip olup, bir yol oluşturmaktadır. Kumaşta diyagonal bir çizgi halinde meydana gelen görünüme dimi yolu denilmektedir. Şekil 3.8’de dimi dokuma tipi gösterilmiştir.



Şekil 3.8: Dimi dokuma (Çeken 2008)

Çalışma kapsamında, 200 ve 245 gr/ m² 3K dimi dokuma yapısına sahip karbon fiber kullanılmıştır.

Şekil 3.9’da dimi dokuma tipinde örnek kumaşlar verilmiştir.



Şekil 3.9: 200 g/m² dimi dokuma kumaş yapısı

3.1.2.1 Dimi Dokuma Özellikleri

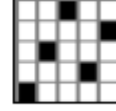
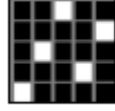
En küçük dimi örgü, üç çözgü ve üç atkıdan meydana gelmektedir. Dimi örgü raporlarında çözgü ile atkı sayıları birbirlerine eşittir. Her iki yüzü de birbirinden farklıdır. Kumaşın ön yüzeyinde, dimi diyagonali sol yollu ise, tersinde sağ yollu görünüme sahiptir. Ayrıca ön yüzünde atkı ipliği var ise arka yüzünde çözgü ipliği bulunmaktadır.

Bezayağı örgü ile karşılaştırıldığında iplik sıklıklarının artışına daha uygun bir yapıya sahiptir. Bu yüzden bu dokuma örgü tipinde daha ağır, kalın ve dayanıklı kumaş dokuma işlemi uygundur. Estetik görünüme sahiptir. Genellikle dış görünüm açısından önem verilen kompozit parçaların en dış yüzeyinde kullanılmaktadır.

3.1.3 Saten Dokuma Kumaş

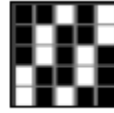
Saten örgü, ipliklerin atlama sayısına bağlı olarak isimlendirilmektedir. Kumaşın bir yüzüne parlaklık etkisi yaratmaktadır. Düşük bükümlü çözgü ipliklerinin 4 ya da daha fazla atkı ipliğinin üzerinden atlaması işlemidir. Ayrıca iplik bileşenlerinin etkisi sonucu parlak görünümlü dokular oluşturulmaktadır. Çözgü ve atkı ipliklerinin kesişim noktalarının homojen olarak dağıtılması sonucunda bütün diyagonal efektler ortadan kaldırılmaktadır.

Saten örgüler; örgü tekrarı, kumaşın ön yüzünde ortaya çıkacak efektte ve atlama sayısı gibi etmenlere bağlı olarak dizayn edilmektedirler. Çözüğü etkisi olan saten örgülerde, atlama sayısı çözgü yönünde uygulanırken atkı etkili saten örgülerde atlama sayısı atkı yönünde uygulanmaktadır (Çetin 2007).



Şekil 3.10: Saten örgü örnekleri a) 5'li saten, çözgü etkili, atlama sayısı=2, b) 5'li saten, atkı etkili, atlama sayısı=3 (Çetin 2007).

Tekrarlı saten örgü yapısı saten örgüden türetilmiştir. Atlama yönü saten efektine bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 3.11: Tekrarlı saten örgü örnekleri a) 4'lü tekrarlı saten, b) 5'li tekrarlı saten, atlama sayısı 2, c) 5'li tekrarlı saten atlama sayısı 3 (Çetin 2007).

Saten örgüler, örgü raporu içerisinde bağlantı noktalarının birbirleri ile hiç temas etmemektedir, bu sebeple dağınık olarak yerleştirilmekte olan temel dokuma örgülerinden biridir.

Saten örgü de her çözgü ve atkı birbirini bir kez bağlamaktadır fakat dimi örgüsünde olduğu gibi sıralı değildir çünkü bu örgü tipindeki bağlantı da temas etkisi olmadığı için yol görünümüne sahip değildir.

3.1.3.1 Saten Örgülerin Özellikleri

En küçük saten örgüsü 5' li satendir ve bu örgü raporu 5 çözgü ve 5 atkıdan oluşmaktadır. En büyük saten örgü raporu ise 20 çözgü ve 20 atkıdan oluşmaktadır. Bağlantı noktaları rapor içerisinde birbirleriyle temas etmemektedir. Bu sebeple saten örgü ile dokunan kumaşta iplik yüzmeleri görülmektedir.

Dayanımını etkileyen unsur olması sebebiyle bu yapı kumaşın sağlam olmasını engelleyerek kullanım sırasında kumaşta dışa doğru iplik çekilmeleri ve kaymaları gibi sorunlarla karşılaşlabilmektedir.

Bir yüzeyi parlak, diğer yüzeyi ise mat görünümlüdür. Genellikle kumaşın ön yüzeyinde çözgü iplikleri, arka yüzeyinde ise atkı iplikleri bulunmaktadır. Saten örgü raporunda çözgü ve atkı sayıları birbirine eşittir. 5'li ve 8'li saten örgüleri en sık kullanım alanındadır.

3.2 Örgü Karbon Fiber

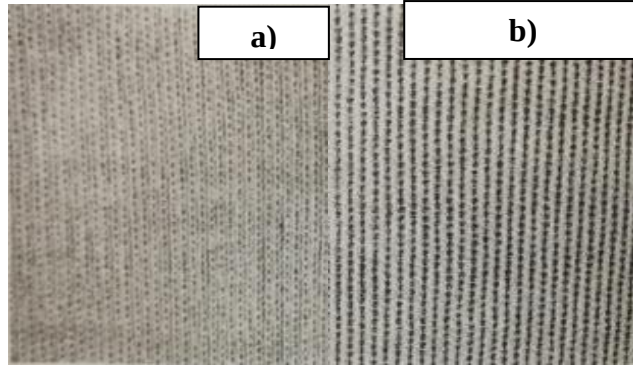
Tekstil teknolojilerinde üç farklı temel yüzey oluşturma yöntemi bulunmaktadır. Bunlar dokuma, örme ve dokusuz yüzeylerdir.

Bu yöntemler içerisinde örme tekniği, değişik şekillerde oluşturulan ilmeklerin birbiriyle bağlanması olarak adlandırılmaktadır (Çeken 2008).

Tez çalışmasında 3 K karbon fiber ip ile 1x1, 2x1 ve 3x1 interlok örgü tipine uygun örme işlemi yapılmıştır.

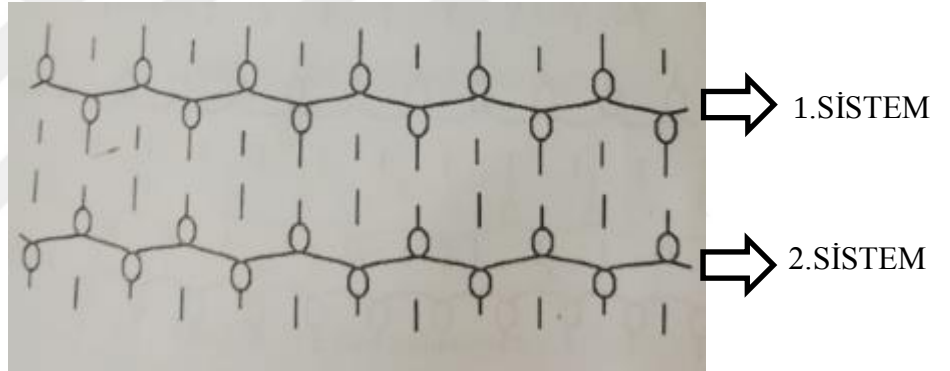
3.2.1 İnterlok Örgü

İnterlok örgüler, çift yataklı yuvarlak örme makinelerinde üretimi gerçekleştirilmektedir. İki ayrı 1x1 rib yapısının birbirleri ile iç içe geçmesi sonucu elde edilmektedir. Kumaşlardan birinin sahip olduğu düz ilmek çubuğu, diğer kumaşın ters ilmek çubuğu ile tam karşılıklı olarak bulunmaktadır. Bu yüzden interlock örgünün ön ve arka yüzlerinde ilmek formları belirgin şekilde görülmektedir (Marmaralı Bayazıt 2004). Şekil 3.12'de ön ve arka yüz görüntüleri verilmiştir.

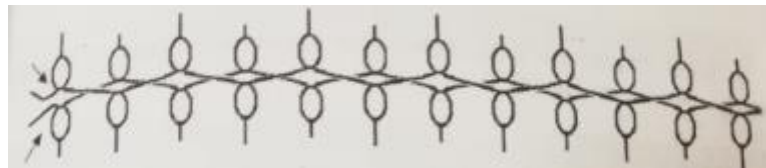


Şekil 3.12: İnterlok örgü a) ön yüz, b) arka yüz (Çeken 2008).

İnterlok örgü raporu iki sıralıdır. İç içe geçmiş iki rib sıralamasından oluşmaktadırlar. İki rib sırasında illmekler karşılıklı olarak birbirlerine ters yönde oluşmaktadır ve buna bağlı olarak örgü yapısındaki esneklik özelliği yoktur. Sıkı bir yapıdadır (Çeken 2008). Şekil 3.13’te interlok örgü raporu gösterilmiştir.



Şekil 3.13: İnterlok örgü raporu (Çeken 2008).



Şekil 3.14: İki sıranın iç içe geçmiş hali (Çeken 2008).

3.2.2 Dikişli-Çok Eksenli Elyaf Kumaş Takviyeli Kompozitler

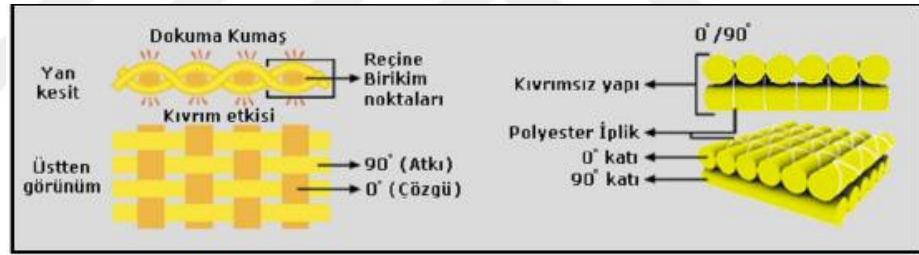
Dikişli, çok eksenli elyaf kumaşlar, elyafların dokunması veya dikişle bir araya getirilmesi sonucu üretimi gerçekleştirilmektedir.

Farklı açı yönlerinde olan elyafların üst üste getirilerek serim işlemi yapılmaktadır ve dikişle birleştirilerek elde edilmektedir. Genel olarak 0° , 45° , -45° , 90° gibi açılarda elyaf yönleri kullanılmaktadır. Ayrıca $\pm 30^\circ$ ve $\pm 60^\circ$ gibi açı yönleri de tercihe göre kullanım göstermektedir (Yalçın 2012).

Genel olarak çok eksenli kumaşlar, tek eksenli, iki eksenli (biaxial), üç eksenli (triaxial) ve dört eksenli (quadraxial) olarak dikiş halinde birleştirilerek üretilmektedir.

Dikişli ve çok eksenli kumaş yapılarında kıvrımlı yapı özelliği ile karşılaşmamaktadır. Kıvrımlı yapı olmadığı için reçinenin birikebileceği boşluklar oluşmamaktadır. Fakat kıvrımlı yapılarda bu durum söz konusu değildir, reçinelerin birikmesi ile boşluklar meydana gelmektedir.

Şekil 3.15'te $0^\circ/90^\circ$ yönlü dokuma ve iki eksenli dikişli kumaş yapısına ait yapısal özelliklerinin karşılaştırması şematik olarak gösterilmiştir (Yalçın 2012).



Şekil 3.15: Dokuma kumaş ve iki eksenli dikişli kumaş ($0^\circ/90^\circ$ yönlü) karşılaştırılması (Yalçın 2012).

3.2.3 Çok yönlü (multiaxial) örgüler

Kompozit malzeme üretiminde son dönemde tercih edilen çok yönlü örgülerde kullanılan malzemeye ait iplikler ince yapılı dikişler yardımı ile birbirine tutturularak tek veya çok katmanlı örgüler elde edilmektedir. Dokuma yapısının aksine yalnızca 0° ve 90° yönlerinde iki yönlü değil, üretilecek parçanın kullanım ihtiyacına bağlı olarak farklı yön ve açılarda temin edilebilmektedir. Mekanik özellik bakımından buna bağlı olarak daha yüksek değerlere ulaşılmaktadır. Tek yönlü, çift yönlü, üç yönlü dört yönlü olabilmektedir.

3.2.4 Tek yönlü (unidirectional) örgüler

Tek eksenli örgü yapısında, elyaf yoğunluğu ağırlıklı olan kesitte veya tamamen bir eksen üzerinde toplanmış yapıdadır. Şekil 3.16'da tek eksenli kumaş yapısı gösterilmiştir (METYX Kompozit 2012).



Şekil 3.16: Tek eksenli (0° yönlü) kumaş yapısı (METYX Kompozit 2012).

Yalnızca 0° veya yalnızca 90° yönlerinde uzanan ipliklerin birbirlerine dikiş ipliği ile tutturulması sonucu meydana gelen tek katmanlı yapıya sahip bir örgü türüdür. Şekil 3.17'de tek yönlü yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.17: Tek yönlü örgü yapısı

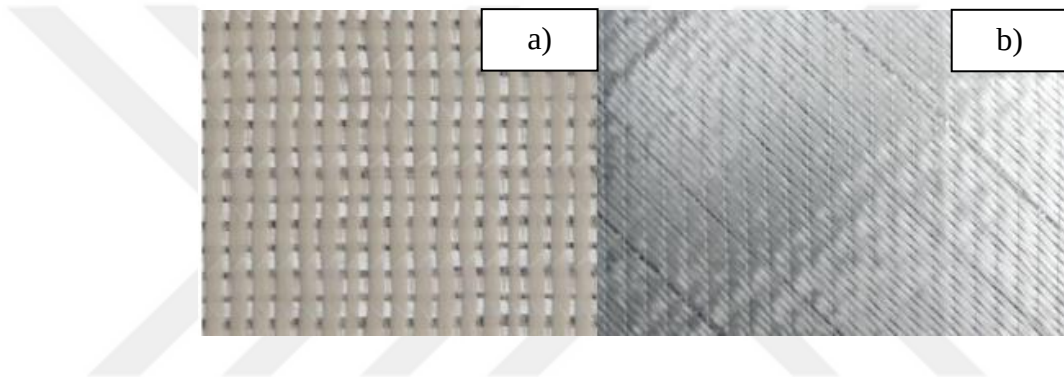
3.2.5 Çift yönlü (biaxial) örgüler (İki eksenli örgülü kumaşlar)

İki eksenli örgüler iki tip kullanıma sahiptir. 0° ve 90° doğrultularında, $+45^\circ$ ve -45° yönlü elyaf dizilimine sahiptirler, iki katlı yapıdan oluşmaktadır. Şekil 3.18'de iki eksenli kumaş şematik olarak gösterilmiştir (METYX Kompozit 2012).



Şekil 3.18: İki eksenli ($0^\circ/90^\circ$) kumaş (METYX Kompozit 2012).

Kullanım ihtiyacı ve talep doğrultusunda $+45^\circ/-45^\circ$ yerine farklı açı oryantasyonları da kullanılmaktadır ($+30^\circ/-30^\circ$ açı yapısı gibi).

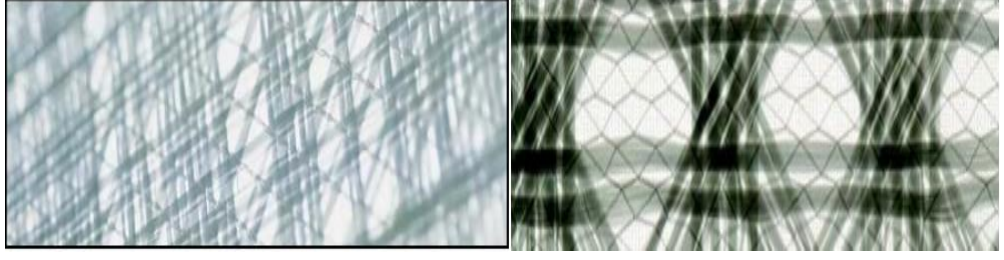


Şekil 3.19: Biaxial cam elyaf örgü yapıları a) $0^\circ/90^\circ$, b) $+45^\circ/-45^\circ$ açılı

3.2.6 Üç yönlü (triaxial) örgüler (Üç Eksenli Örgülü Kumaşlar)

Üç eksenli örgü kumaşlar $+45^\circ$, 90° , -45° ve $+45^\circ$, -45° , 0° açı yönlerine sahiptir. Bu açı yönlerine sahip elyaf dizilimi ile üç katlı yapıdan oluşmaktadır.

Genellikle ipliklerin $0^\circ/+45^\circ/-45^\circ$ açılarında veya Şekil 3.20' de üç eksenli $45^\circ/-45^\circ/90^\circ$ açıları ile birbirlerine paralel doğrultuda dikilerek üretimi gerçekleştirilen multiaxial kumaş tipleridir (Yalçın 2012). Şekil 3.20'de üç eksenli kumaş yapılarına örnekler gösterilmiştir.



Şekil 3.20: Üç eksenli kumaş yapısı a) $(45^\circ/90^\circ/-45^\circ)$ açı diziliminde (Metyx Kompozit 2012), b) $0^\circ/+45^\circ/-45^\circ$ açı diziliminde bir triaxial kumaş yapısı (Yalçın 2012).

3.2.7 Dört yönlü (quadraxial) örgüler

$+45^\circ$, 0° , 90° , -45° açı dizilimine sahiptirler. Bu açı dizimleri ile iplikler paralel olarak birbirine dikilerek üretilen 4 katmanlı multiaxial kumaş tipidir.

Şekil 3.21’de $0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ$ açı dizilimine sahip dört eksenli kumaş yapısı gösterilmiştir (Yalçın 2012).



Şekil 3.21: Dört eksenli $(0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ)$ kumaş (Yalçın 2012).

4. MATERİYAL VE METOT

4.1 Materyal

Tez çalışmasında kompozit numunelerin üretiminde 3K (3000 filament) lineer yoğunluk-tel sayısındaki karbon elyaf takviye malzemesi ve matris malzemesi olarak epoksi reçine kullanılmıştır.

3K ve 12K (3000 ve 12000 filament) karbon ipliklerdeki K ifadesi, ipliğin içinde bulunan bin adet karbon lifini ifade etmektedir. 3K karbonda üç bin adet karbon lifi vardır. 12K karbon ise on iki bin adet karbon lifi içerir. Dolayısıyla 12K karbon ipliği 3K karbon ipliğinden daha kalın bir yapıya sahiptir.

200 bezayağı, dimi ve 245 dimi dokuma karbon fiber kumaşlar tercih edilmiştir. Ayrıca 1x1, 2x1 ve 3x1 interlok karbon fiber örgü kumaş numuneler kullanılmıştır.

Çalışma esnasında; 3K Karbon fiber ip DowAksa Turkey (DowAksa İleri Kompozit Malzemeler San. Ltd. Şti., İstanbul, Türkiye) firmasından tedarik edilmiştir. Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: 3K karbon fiber ip (DowAksa 2021).

Kumaş üretiminde kullanılan karbon elyaflarına ilişkin bilgiler Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Çalışmada kullanılan 3K karbon elyafına ait teknik bilgiler.

	3K	Standart Test Method(ISO)
Çekme dayanımı(MPa)	3800	10618
Elastisite modülü(GPa)	240	10618
Kopma uzunluğu(%)	1.6	10618
Yoğunluk(g/cm³)	1.78	10119
Lineer kütle yoğunluğu(Tex)	197 g/1000 m 200	1889

3K karbon fiber ile örme kumaşlar Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Tekstil Mühendisliği Bölümü İplik ve Örme Laboratuvarında, Şekil 4.2’de gösterilen, 6 gauge makine inceliğindeki Passap Duomatic 80 örme makinesinde üretilmiştir.

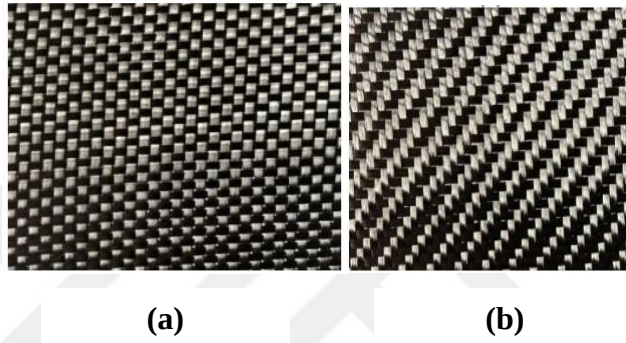


Şekil 4.2: Passap Duomatic 80 örme makinesi

Dokuma kumaşlar ise Spinteks Tekstil San. ve Tic. A.Ş., (Denizli, Türkiye) firmasından tedarik edilmiştir. Çalışma kapsamında 200 bezayağı ve dimi, 245 dimi karbon fiber dokuma kumaşların kompozit malzeme üretimi yapılarak, mekanik özellikleri deneysel çalışmalar ile incelenmiştir. Karbon elyaf, dayanıklı, sert ve hafif bir malzemedir. Dayanım açısından metal malzemelere göre daha üstündür. Yüksek çekme mukavemeti ve kimyasal direnç, yüksek sıcaklık dayanım gibi özelliklere sahiptir. Çok ince bir yapıya sahip karbon tellerinden oluşmaktadır. Teller, iplik gibi birlikte bükülebilme özelliğine sahiptir.

Tablo 4.2: Çalışmada kullanılan dokuma kumaşların teknik bilgileri

	200P	200T	245 T	3K
Kumaş konstrüksiyonu	Bezayağı	2/2 Dimi	2/2 Dimi	İnterlok (1x1,2x1,3x1)
Gram ($\pm$ %10) (gr/m²)	200	200	245	3000
İplik lineer kütle yoğunluğu (Tex)	200	200	200	3000
Filament içerisindeki tel sayısı	3000	3000	3000	3000



Şekil 4.3: Karbon fiber kumaşların ön yüz görünümleri (a) bezayağı konstrüksiyonundaki kumaş, (b) 200 g/m² gramajındaki 2/2 dimi konstrüksiyonundaki kumaş

4.2 Kompozit Plakaların Üretimi

Kompozit malzemelerin üretiminde takviye malzemesi olarak karbon elyaf ve matris malzemesi olarak epoksi reçine tercih edilmiştir. Üretim yöntemi olarak öncelikle el yatırması yöntemi daha sonra vakum pres yöntemi kullanılmıştır.

Deneyisel çalışmalar esnasında matris malzemesi olarak kullanılan epoksi reçine Epakem Kimya ve İnşaat San. TİC. LTD. ŞTİ., (İstanbul,Türkiye)'den tedarik edilmiştir. Şekil 4.4'te kullanımı tercih edilen Epakem EPX 200 Reçine + 385 H Sertleştirici gösterilmiştir.



Şekil 4.4: Deneysel çalışmada kullanılan epoksi reçine ve sertleştirici
a) EPX 200 epoksi reçine, b) 385 H sertleştirici (Epakem 2019).

EPX 200 epoksi reçine özellikleri, yoğun bal kıvamına sahip özel bir reçine türüdür. Yüksek kimyasal ve elektriksel dayanıma sahiptir. 120 °C'ye kadar olan sıcaklık değerine dayanıklıdır. Bu sebeple yüksek sıcaklığa maruz kalan yüzeyler için de kolaylıkla kullanılabilir. Sıcaklık etkisi ile ergime yapmamaktadır. EPX 200 kodlu reçine 385 H sertleştirici ile kullanılmaktadır. Torna ve zımpara işlemleri ile kolaylıkla işlenebilmektedir.

Reçine yoğun kıvamına sahiptir bu sebeple hava kabarcıkları meydana gelmektedir. Sorun yaşanmaması için vakum tankı kullanılması gerekmektedir (Epakem 2019).

Laminasyon, kalem gövdesi, bıçak sapı, tesbih, elektrik devre izolasyonu ve güneş paneli gibi kullanım alanlarında tercih edilmektedir (Epakem 2019). Tablo 4.3'te EPX 200 reçine özellikleri verilmiştir (Epakem 2019).

Tablo 4.3: EPX 200 epoksi reçine özellikleri (Epakem 2019)

Özellikler	Kimyasal görünüm ve değerleri
Sertlik	90
Görünüm	Transparan
Vizkozite	11000
Flash Point	>200 C
EEW	180-192
Renk Alpha	<200
Yoğunluk	115 gr/cm ³

385 H sertleştirici ise genel amaçlı standart sertleştiricidir. Solventsiz epoksi reçineler ile birlikte kullanılmaktadır. Max UV dayanımına sahiptir. Renksizdir, tamamen şeffaf yapıdadır ve yüksek kalitededir. 8 °C'den yüksek sıcaklıklarda kürleşebilmektedir. Kürleşme süreleri ortam sıcaklıklarına bağlıdır. Normal oda sıcaklığında 23 ° C' de 2-3 saat süre de reaksiyona girmektedir ve maximum sertliğe ise 24 saat sonra ulaşılmaktadır. Önemli olan husus, sertleştirici oranını ayarlayabilmektedir. Karışımda eksik ya da fazla sertleştirici etkisi doğru sonuçlar vermemektedir. Ürün kullanım talimatında belirtilen oranlarda hazırlanmalıdır. Oranı dışında kullanılması sonucu tam sertlik sağlanamamaktadır. Çalışma esnasında epoksi reçine ve sertleştirici kullanımına uygun olarak belli oranlarda hazırlanmıştır. Tablo 4.4' te kullanım oranları verilmiştir.

Tablo 4.4: Deneysel çalışmada kullanılan kumaş ve reçine özellikleri

Deney Numuneleri	Numune Yapısı	Kumaş Ağırlığı (gr)	Kumaş Kat Sayısı	Kullanılan Epoksi Reçine Miktarı (gr)
200 bezayağı	Dokuma Karbon Fiber Kumaş	73	3 kat	77
200 dimi		73		52
245 dimi		85		63
1x1 interlok	Örgü Karbon Fiber Kumaş	48	1 kat	50
2x1 interlok		44		51
3x1 interlok		44		52

Çalışma da kullanılan kumaşlar öncelikle kesilmiştir. Önemli olan belli tolerans aralığı bırakılarak kumaşlar hazırlanıp öyle serilmelidir. Buna bağlı olarak üretim aşamasında yaşanabilecek herhangi bir aksaklık kumaş formuna zarar verebilmektedir. Bu sebeple ölçüler de tolerans aralıkları düşünülmelidir.

Vakum pres yönteminin proses akışında vakum infüzyon yönteminde kullanılan malzemelere benzer sarf malzemelerin kullanımı gerçekleştirilmiştir. Vakum masasında belli kullanım alanı hazırlanmıştır ve işlem yüzeyi kalıp yüzey temizleyicisi ile temizlenmiştir.

Dokuma karbon fiber kumaşlar 3 kat ve örgü karbon fiber kumaşlar ise tek kat olacak şekilde serim işlemi yapılmıştır.

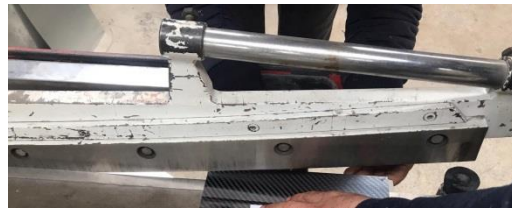
Serim işlemi yapılan kumaşlara epoksi reçine ve sertleştirici karışımı talimatta belirtilen 2:1 karışım oranında sürülerek reçine ile emdirme sağlanmış olup, her bir kumaş katı seriminde işlem tekrarlanmıştır.

Kompozit malzeme üretim yöntemlerinden el yatırması yöntemi tercih edilmiştir. Kumaş yüzeylerinde kuru yer kalmayacak şekilde bir rulo yardımı ile bu karışım sürülmüştür. Burada önemli olan reçinenin kumaş yüzeyine homojen dağılımı ve tüm yüzeyin ıslak olduğu gözlenmelidir. Kumaş yüzeylerinde meydana gelen herhangi bir kuruluk olayının gözlenmesi parçanın belli bölgelerinde hasara yol açabilmektedir. Daha sonra kumaş yüzeyine mavi vakum folyosu serilmiştir. Tüm kenarlar sarı macun bant ile sıkıştırılarak hava kabarcıklarının oluşması önlenmektedir.

Parça yüzeyi aralıklarla kontrol edilmelidir, gözle görünür hava kabarcıkları oluşmaması için iki kat mavi folyo serilebilmektedir. En üst yüzeye ısının korunması için vakum battaniyesi kullanılmıştır. Vakum işlemi ile basınç uygulanarak malzeme kürlenmeye bırakılmıştır.

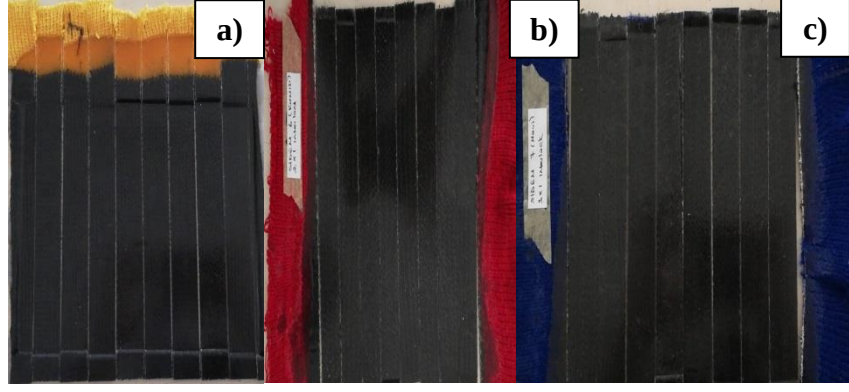
Kürleme işlemi sonrası vakum masasından alınan kompozit parça kalıptan ayrılarak, yüzeyi incelenmiştir. Herhangi bir kuruluk gözlenmemiştir. Üretim aşamasından bazı kesitler verilmiştir.

Üretimi gerçekleştirilen kompozit plakaların 25mmx250mm boyutlarında karbon kompozit plakalar trim işleminde testere ile belirlenen ölçülerde kesilmiştir.

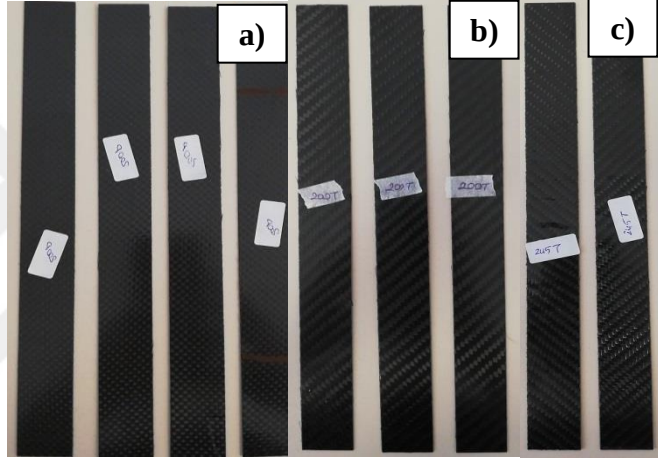


Şekil 4.5: Kompozit plakaların testere ile kesilmesi

Elde edilen kompozit plakadan çekme testi numune örnekleri Şekil 4.6'da ve Şekil 4.7'de verilmiştir.

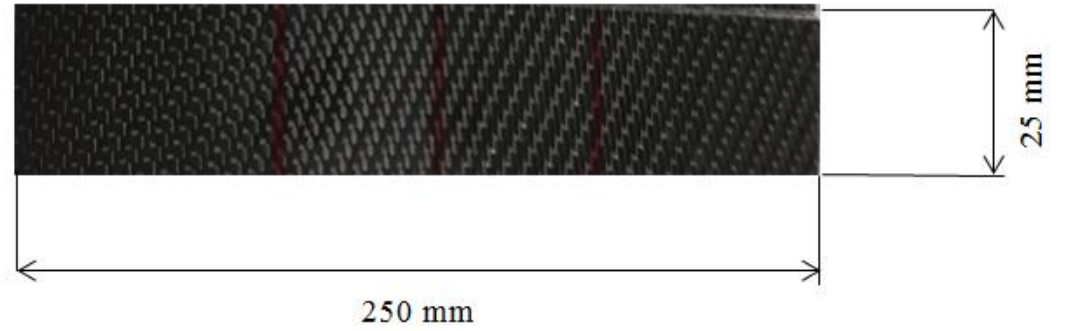


Şekil 4.6: Örgü karbon fiber kumaşların kesim işlemi a) 1x1 interlok örgü, b) 2x1 interlok örgü, c) 3x1 interlok örgü.



Şekil 4.7: Dokuma karbon kompozit plakalar a) 200 bezayağı dokuma, b) 200 dimi dokuma, c) 245 dimi dokuma.

Numuneler ASTM D3039 standartına uygun olarak 25x250x0,2 mm ölçülerinde özenle kesilmiştir.



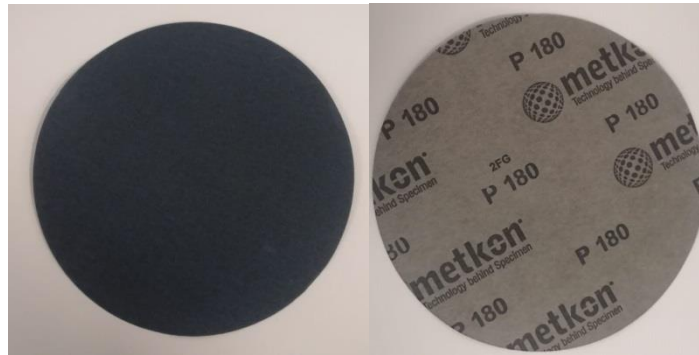
Şekil 4.8: Hazırlanan çekme numunelerinin kesitleri (ASTM D 3039)

İlk denemeler yapıldığı zaman diliminde, cihazın numune yerleşimi olan çene kısımlarından kayma meydana geldiği gözlenmiştir. Bu sebeple çenelere bazı malzemeler kesilerek denemeler yapılmıştır, fakat malzemelerde kayma meydana geldiğinden olumlu bir sonuç alınamamıştır. En son olarak karbon fiber malzemeden üretilmiş olan kompozit plakalar 25mm x 50 mm boyutlarında giyotin makas ile kesilmiştir.



Şekil 4.9: Numunelerin giyotin makas ile kesilmesi

Çekme testi için kesilen numunelerin her iki yüzeyindeki tepe noktalarına ayak görevini sağlayacak kesilen numuneler ve yapıştırılacak kompozit plakaların her iki yüzeyine de yapıştırılması uygun olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Yapıştırma işleminin yapılması için öncelikle yapıştırılacak tüm yüzeyler 180 meshlik zımpara ile zımparalanmıştır.



Şekil 4.10: 180 mesh zımpara kağıdı

Yapışma özelliğinin sağlanması ve her iki yüzeye de yapışmanın artması için yapılan zımparalama işleminden sonraki yüzeyler Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.11: Örgü ve dokuma karbon fiber numunelerinin yüzeylerinin zımpara işlemi

Kompozit plakaların yapıştırma işleminde Araldite 2015-1 kimyasal yapıştırıcısı kullanılmıştır. Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12: Araldite 2015-1 kimyasal yapıştırıcı

Kimyasal yapıştırıcı, kompozit yapıştırıcı tabancasına takılarak sahip olduğu iki uç ile reçine ve sertleştirici eşit oranda birleşerek yapıştırma yüzeyine enjekte edilmektedir.

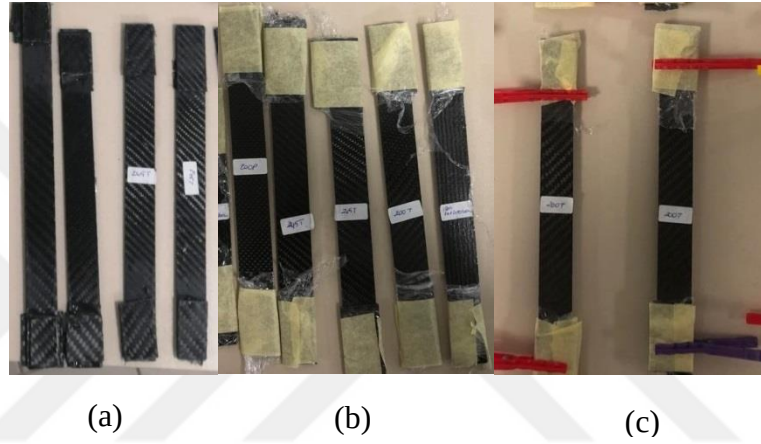


Şekil 4.13: Araldite 2015-1 kimyasal yapıştırıcı tabancası

Alt ve üst çenelere tutunmasını sağlayıp kaymasını önlemesi beklenen bu parçalar plakaların her iki yüzeyine toplamda 4 tane olacak şekilde yapıştırılmıştır.



Şekil 4.14: Araldite 2015-1 kimyasal yapıştırıcının plaka yüzeylerine yapıştırma işlemi



Şekil 4.15: Numunelerin hazırlık aşaması a) Kesilmiş numunelerin plaka yüzeyine yapıştırma işlemi, b)Stretch film ile sarılan numunelerin bantlama işlemi, c)Mandal ile tutturulması.

Yapıştırılan plakalar 6 saat bekleme süresinden sonra daha iyi sabitlenme sağlamak amacıyla bir bant ile tüm yüzey sarılmıştır ve daha sonra sıkıştırma işlemi için mandal takılarak 24 saat bir kürlenme sürecine bırakılmıştır. Kürlenen plakalar çekme testine tabi tutulmuştur.

4.3 Mekanik Test

Kompozit plakaların mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla ASTM D 3039 ve ASTM D790 standartlarına uygun olarak Çekme ve Üç Nokta Eğme testleri yapılmıştır.

4.3.1 Çekme Testi

Çekme deneyi, malzemelerin statik yük altındaki davranışının belirlenmesi ve mekanik özelliklerinin tespit edilmesi için yapılmaktadır.

Numunelere ASTM D 3039 standardına göre çekme deneyi uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar, Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Bilimi Mühendisliği Bölümü, Malzeme Analiz Laboratuvarı'nda Universal Çekme cihazında yapılmıştır. Hazırlanmış olan 25 mm x 250 mm boyutlarındaki numunelerin çekme yükü altındaki davranışları 100 mm çeneler arası mesafesinde 2 mm/dk çene hızında 4 N ön yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

23 °C oda sıcaklığında ve 2 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Kompozit plakaların mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla HARDWAY marka cihaz kullanılarak çekme deneyi yapılmıştır. Maksimum 100 kN'luk çekme kapasitesine sahip bu cihazın çekme hızı dakikada 2 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Malzemeleri test etmek için uygun sistem mekanik kamalı çeneler veya pnömatik yandan hareketli çeneler içeren bir elektromekanik test cihazıdır. Çene adaptörü yüzey seçimi test edilecek numunelere göre değişim göstermektedir. Genellikle tırtıklı yüzeyler kullanılmaktadır.

Çalışma kapsamında her materyal tipinden 4 tane test numunesi hazırlanmıştır. Çekme testleri Şekil 4.16'da gösterilmiş olan HARDWAY marka cihazda gerçekleştirilmiştir.



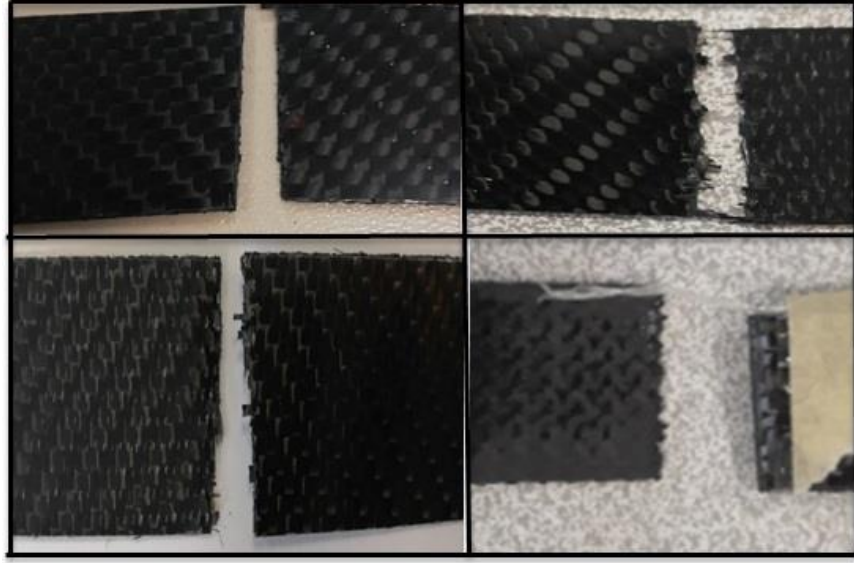
Şekil 4.16: Çekme deneyi cihazı

Tüm numune yüzeyleri üretim aşamasından sonra incelenmiş olup, hatalı sonuçlara ve yorumlara sebep olabileceğini düşündüğümüz bazı gözlenen pürüzlü ve hasarlı numune yüzeyleri testte kullanılmamıştır.



Şekil 4.17: 245 dimi dokuma tipinde çekme numunesinin cihazına bağlanması

Maksimum kuvvete ulaştığı anda meydana gelen kopmada kırılma yüzeylerinin görüntüsü Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.18: Kompozit plakaların kırılma yüzeyleri a) 245 dimi dokuma tipinde kırılma yüzeyi, b) dokuma tipinde karbon fiber lif ayrılması, c) dokuma tipinde karbon fiber lif ayrılması, d) 200 bezayağı dokuma tipinde kırılma yüzeyi

4.3.2 Üç Nokta Eğme Testi

Üç nokta eğme testi, malzemelerin eğme dayanımlarının ve şekil değiştirme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılmaktadır. İki destek üzerinde serbest biçimde- daire veya dikdörtgen kesitli bir deney numunesi yerleştirilmektedir. Orta kısmından başlayarak kuvvet uygulanması sonucu numunede meydana gelen şekil değişimi olarak tanımlanmaktadır.

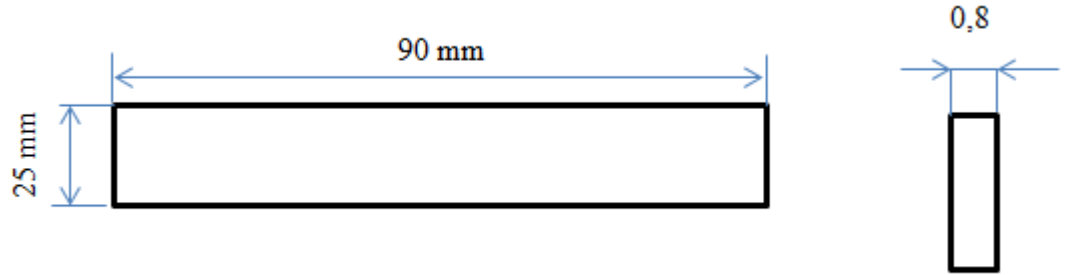
Çalışma prensibi olarak, numunenin kuvvet etkisi ile belirli bir çapta olan mandrel etrafında eğmesi esasına dayanmaktadır. Malzemelerin soğuk hal formunda çatlamadan katlanabilme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla bağlı olarak numunelerin alt ve üst katmanlarında maksimum zorlanma sonucunda üst katmanda basma, alt katmanda ise çekme gerilmelerinin maksimum oluşması beklenmektedir. Deney esnasında gerilme-uzama eğrileri çizilir, malzemelerin şekil değiştirme özellikleri belirlenerek, eğme dayanımı ve maksimum kuvvetteki uzama miktarı değerleri hesaplanmaktadır.

Eğme deneyleri Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Malzeme Muayene Laboratuvarı'nda SHIMADZU HARDWAY cihazında yapılmıştır. Cihaz görüntüsü Şekil 4.19'da verilmiştir.



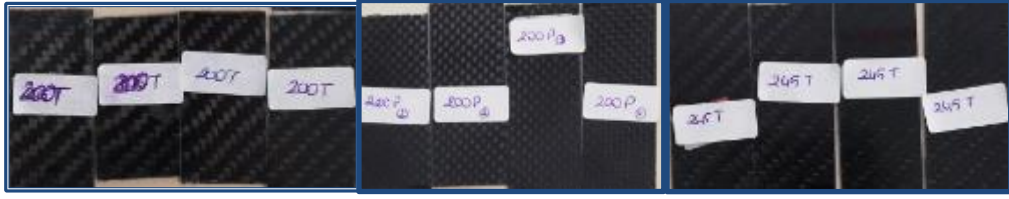
Şekil 4.19: Üç nokta eğme test cihazı ve numunenin cihaza yerleştirilmesi

ASTM D790 standartına uygun olarak numuneler 25x90x0,8 mm boyutlarında hassas kesme cihazı ile kesilmiştir. Şematik gösterimi Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.20: Kompozit numunelerin şematik gösterimi

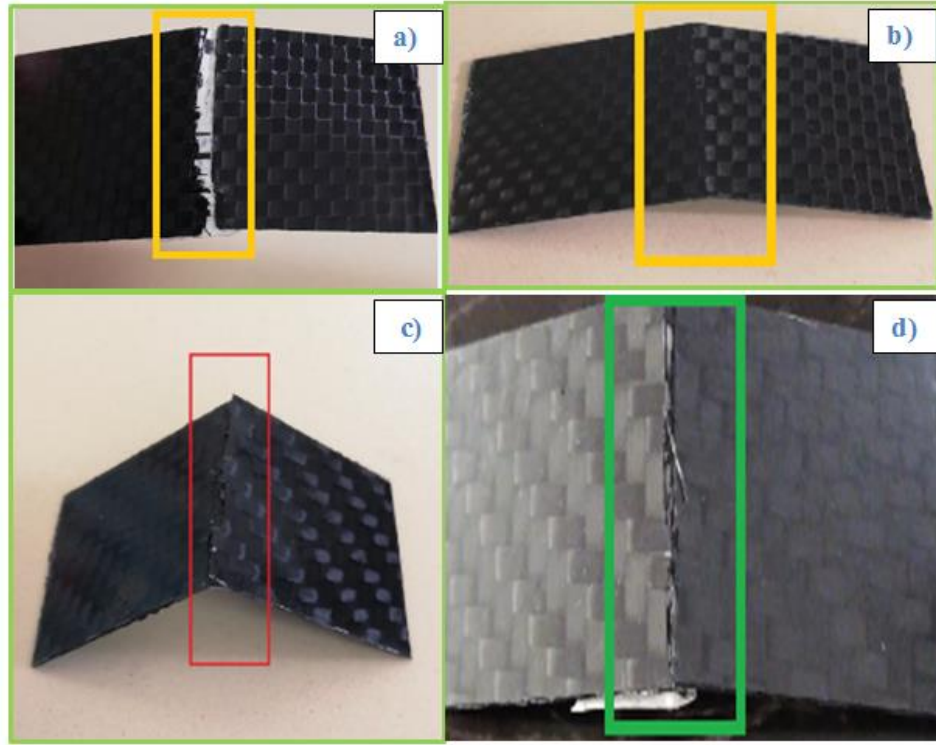
Deneyisel çalışmada 200 bezayağı, 200 ve 245 dimi dokuma tipinde; 1x1, 2x1 ve 3x1 örgü tipinde karbon kompozit plakaların her birinden 4'er tane numune kullanılmıştır. Numuneler Şekil 4.21 ve 4.22'de gösterilmiştir. Maximum kuvvet uygulandığında numune yüzeyleri 4.23'te gösterilmiştir.



Şekil 4.21: Dokuma tipinde eğme testi numuneleri a) 200T, b) 200P ve c) 245T



Şekil 4.22: Örgü tipinde eğme testi numuneleri a) 1x1, b) 2x1 ve c) 3x1 interlok



Şekil 4.23: Eğilme test yüzeyleri a)200P1, b)200P3, c)200T1 ve d)245T2

Hazırlanan deney numuneleri cihazdaki mesnetlerin üzerine numunenin orta noktası mesnetlerin alt kısmında yer alan cetvel üzerinde 0 noktasına gelecek şekilde ayarlanarak yerleştirilmiştir. Cihazın üst kısmından aşağıya doğru belli bir hızda ilerleyen basma çenesi ile numune eğmeye zorlanmaktadır.

Eğme etkisi ile numunenin iç kesiti basma gerilmesine, dış kesiti ise çekme gerilmesine maruz kalmaktadır. Eğme deneyi sonucunda maximum eğme dayanımı(MPa) değeri verilmiştir.



5. BULGULAR

5.1 Çekme Testi Sonuçları

Kompozit plakalara uygulanan çekme testi sonucunda, çekme dayanımı (MPa), elastisite modülü (GPa), en büyük kuvvetteki uzama (%) ve en yüksek uzama (%) Tablo 5.1’de verilmiştir.

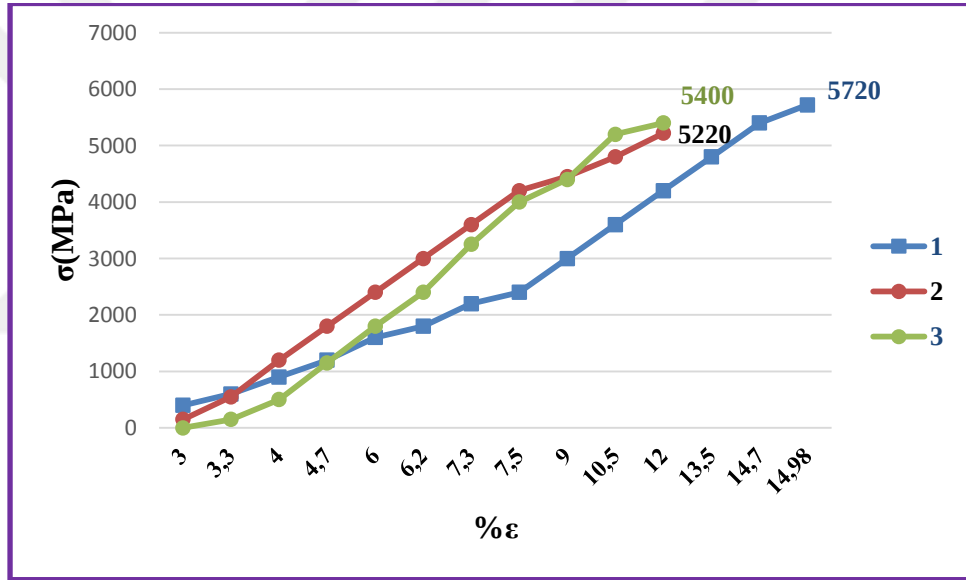
Deney sonuçlarına bağlı olarak maximum çekme kuvveti, çekme dayanımı, Elastisite Modülü değerleri elde edilmiştir.

Tablo 5.1: 200 bezayağı, 200 ve 245 dimi dokuma ve 1x1, 2x1, 3x1 interlok örgü tipinde karbon kompozit numunelerin çekme testi sonuçları

Dokuma tipi	Numuneler	σ_c (MPa)	F (kN)	ε %	E (GPa)
200 bezayağı	1.	4855	9.71	12.90	40
	2.	5220	10.44	12.80	46
	3.	5720	11.44	14.98	44
	4.	5175	10.35	13	48
200 dimi	1.	3705	7.41	10.45	44
	2.	5200	10.4	14.80	40
	3.	2962	5.925	11.98	28
	4.	5280	10.56	15.20	39
245 dimi	1.	5675	11.35	11.98	55
	2.	6210	12.42	14	51
	3.	6150	12.30	15	51
	4.	5195	10.39	13.5	46
Örgü tipi					
1x1 interlok	1.	220	1.1	5	11
	2.	242	1.21	4.90	11
	3.	413	2.065	5.50	26
	4.	334	1.67	5.40	16
2x1 interlok	1.	382	1.91	7.10	19
	2.	429	2.145	8.90	17
	3.	300	1.72	6	15
	4.	285	1.50	5.4	13
3x1 interlok	1.	1285	2.57	7.50	49
	2.	1315	2.63	8.00	43
	3.	1108	2.215	7.85	43
	4.	1142	2.285	6.50	50

200 bezayağı dokuma karbon fiber kumaşların çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, en yüksek çekme mukavemeti değeri 5720 MPa'dır. Mukavemet değeri arttıkça uzama miktarı doğrusal olarak artış göstermektedir. Ulaşılan bu maximum çekme mukavemeti değerinde en yüksek uzama değeri %14.98 olduğu saptanmıştır. Dayanım değerini takip eden yakın değerlerde yine uzama miktarının yüksek olduğu görülmektedir. En yüksek Elastisite Modülü 48 GPa ve çekme mukavemeti değeri 5175 MPa'dır.

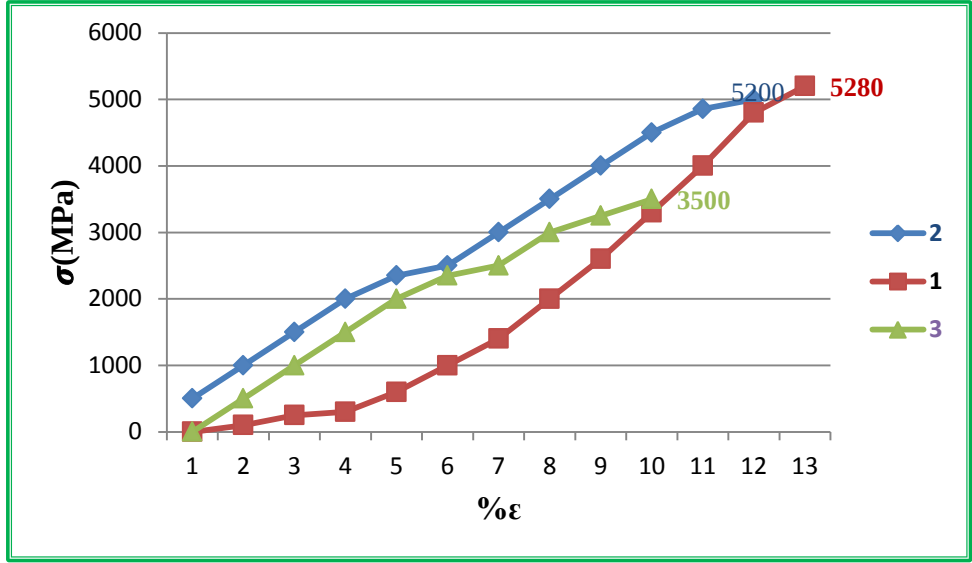
200 bezayağı dokuma karbon kompozit plakaların çekme testi sonucunda elde edilen gerilim-gerinim eğrileri Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1: 200 bezayağı dokuma tipinde karbon kompozit numunelerin gerilim-gerinim eğrileri

200 dimi dokuma karbon fiber kumaşların çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, en yüksek çekme mukavemeti değeri 5280 MPa'dır. Mukavemet değeri arttıkça uzama miktarı doğrusal olarak artış göstermektedir. Ulaşılan bu maximum çekme mukavemeti değerinde en yüksek uzama değeri %15.20 olduğu saptanmıştır. En yüksek Elastisite Modülü 44 GPa'dır.

Çekme testi sonuçlarına göre elde edilen gerilim-gerinim eğrilerinde en yüksek 3 değere ait grafik Şekil 5.2'de verilmiştir.

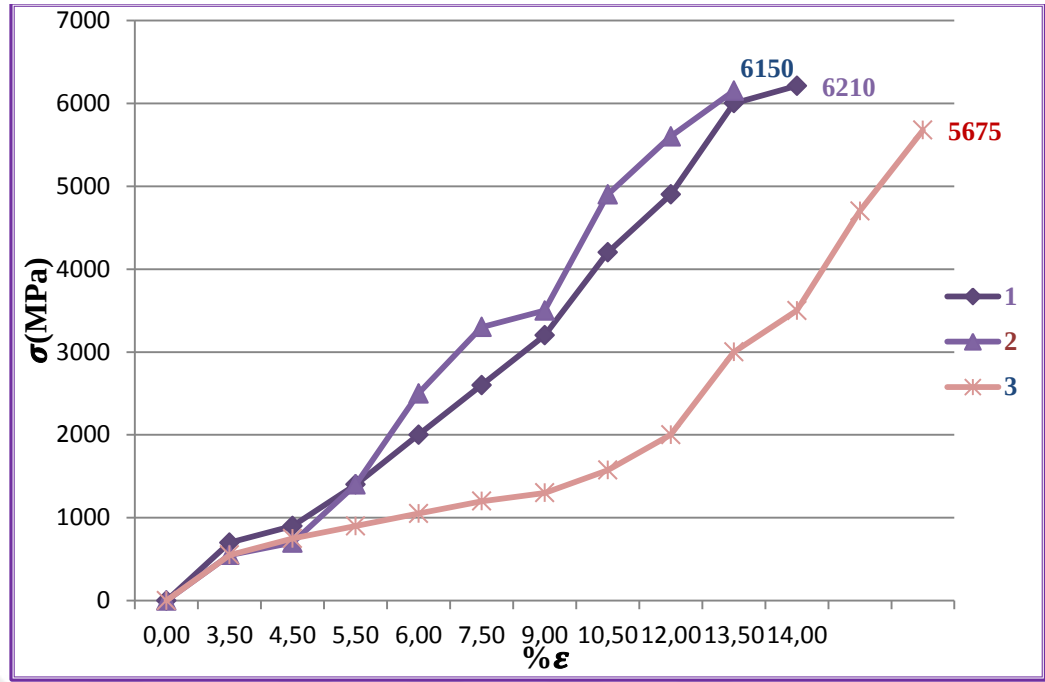


Şekil 5.2: 200 dimi dokuma tipinde karbon kompozit numunelerin gerilim-gerinim eğrileri

245 dimi dokuma karbon fiber kumaşların çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, en yüksek çekme mukavemeti değeri 6210 MPa'dır. Bu çekme mukavemetine yüksek değerde yakın olan 2. numune 6150 MPa değerindedir, sahip olduğu en yüksek uzama değerine ulaşmıştır.

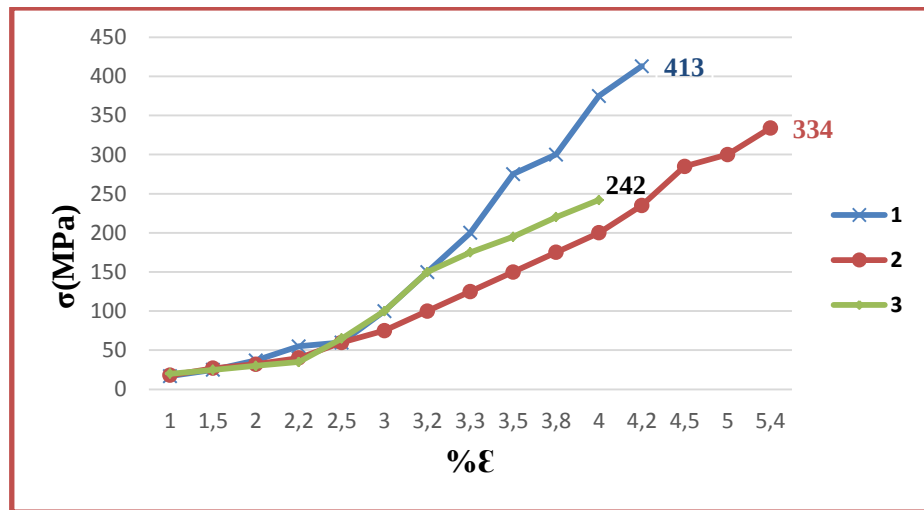
%15 uzama ile 51 GPa Elastisite Modülü değerindedir. Her iki numune de Elastisite Modülü aynı iken 5675 MPa çekme mukavemetinde 55 GPa değeri ile en yüksek elastiklik sınırına ulaşılmıştır. Ağırlıkça farklı, yapı olarak aynı olan dimi dokuma kumaşları karşılaştırıldığında, en yüksek mukavemet değeri 3 kat karbon fiber kompozit üretimi gerçekleştirilmiş 245 dimi dokuma yapısında 2. numune de 6210 MPa değerinde ulaşılmıştır. Buna bağlı olarak 3 kat kumaş ve üretim yöntemi aynı olan numunelerin ağırlık etkisinin olduğu saptanmıştır.

Bezayağı ve dimi dokuma karbon fiber yapısı karşılaştırıldığında ise yine dimi dokuma yapısında en yüksek değerlere ulaşıldığı sonucuna varılmıştır.



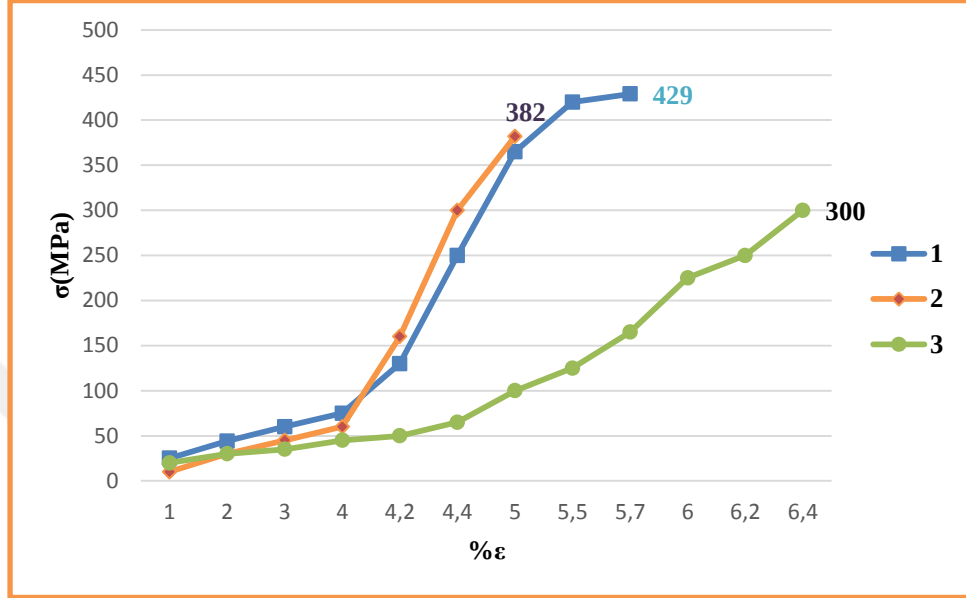
Şekil 5.3: 245 dimi dokuma tipinde karbon kompozit numunelerin gerilim-gerinim eğrileri

1x1 örgü karbon kompozit numunelerin elde edilen verilerine göre maximum çekme mukavemeti 413 MPa' dır. Bu değerde en yüksek Elastisite Modülü ve uzama miktarına sahiptir.



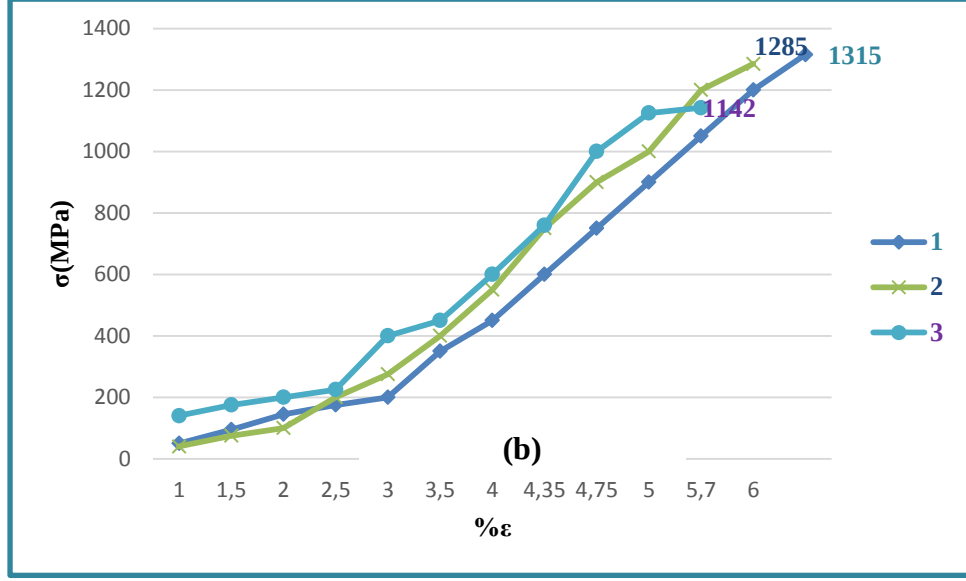
Şekil 5.4: 1x1 interlok örgü tipinde karbon kompozit numunelerin gerilim-gerinim eğrileri

2x1 örgü karbon kompozit numuneler de maximum çekme mukavemeti 429 MPa'dır. Bu değerde en yüksek uzama miktarına sahiptir. 382 MPa olan ikinci en yüksek çekme mukavemet değerinde 19 GPa ile en yüksek elastisite modülüne sahiptir. 2x1 örgü kumaş yapısına sahip en yüksek 3 numunenin çekme dayanım değerleri verilmiştir.



Şekil 5.5: 2x1 interlok örgü tipinde karbon kompozit numunelerin gerilim-gerinim eğrileri

3x1 örgü karbon kompozit numuneler de maximum çekme mukavemeti 1315 MPa'dır. Bu değerde en yüksek uzama miktarına sahiptir. 1108 ve 1315 MPa olan mukavemet değerlerinde 43 MPa ile en düşük Elastisite Modülüne sahiptirler. 1142 MPa olan çekme mukavemet değerinde 50 GPa ile en yüksek Elastisite Modülüne sahiptir.



(a)

Şekil 5.6: 3x1 interlok örgü tipinde karbon kompozit numunelerin gerilim-gerinim eğrileri

5.1.1 Çekme Dayanımı

Dokuma ve örgü karbon fiber kumaşlara uygulanan çekme testi sonucunda elde edilen verilere göre; dokuma kumaş yapısında en yüksek çekme dayanım değeri 245 gram Dimi dokuma numunesinde 6210 MPa'dır. Örgü numunelerde ise 2x1 interlok örgü yapısına sahip numunede 1315 MPa'dır. Kumaş yapısının ve katmanlarının önemli etken olduğu gözlenmiştir.

Tursun (2019) yaptığı çalışmada iki boyutlu ortogonal dimi dokuma kumaş yapısından elde edilen kompozit laminatın elastik analizi üzerine inceleme yapmıştır. 12 katmanlı cam ve karbon elyaf kumaş/epoksi kompozit malzemeler vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Çekme testi sonuçları karşılaştırıldığında, cam elyaf kumaş/epoksi numunelerin dayanım değerlerinin daha düşük olduğu sonucuna varılmıştır.

Gülcan (2019) farklı ağırlık ve örgü tiplerine sahip karbon dokuma kumaşların VARTM yöntemi ile tek ve çift katlı kompozit plakaların üretimini gerçekleştirmiştir. Çalışmasında 3K ve 12K karbon elyaf kullanımı ile 200 ve 600 g/m² kumaşlardan kompozit plakalar üretilmiştir. Numuneler dimi-dimi, bezayağı-bez ayağı ve dimi-bezayağı hibrit yapıda olacak şekilde yapılmıştır. Numunelere uygulanan çekme testi sonuçlarına göre, 200 g/m² kumaşlarda bezayağı kumaş ile üretilen kompozit plaka, dimi kumaş yapısına göre daha yüksek modül değerine sahiptir. Bu durum 600 g/m²'lik kumaşlar için de gözlemlenmiştir. Farklı ağırlıklara sahip olan kumaşlar karşılaştırıldığında ise 200 g/m²'lik kumaşların daha yüksek modül değerinde olduğu, kumaşa atkı ve çözgü iplikleri üzerinde 3000 filament yer değiştirmesi söz konusu iken 600 g/m²'lik kumaşa 12000 filament yer değiştirdiği etkisine bağlı olarak yorumlanmıştır. 12K (12000 filament) ipliklerin kullanıldığı 600 g/m²'lik kumaş kullanımı olan numunelerde tespit edilen uzama değerleri, 3K (3000 filamentli) ipliklerden dokunmuş kumaşlara göre daha yüksek uzama değerine ulaşılmıştır. Üretim esnasında kullanılan reçinenin filament içerisine tam olarak nüfuz etmemesi ve buna bağlı olarak filamentlerin daha serbest dağılım hareketi sonucu yapının uzama değerlerinin artışına sebep olmuştur. Genel olarak değerlendirildiğinde, en yüksek mukavemet değeri, en yüksek kalınlık ve ağırlığa sahip olan plakada olduğu sonucuna varılmıştır.

Kumaş ağırlığının ve karbon elyaf filament sayısının, kompozit yapının mekanik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Turhan (2011) yaptığı çalışmada 200 tex karbon lifi kullanarak iki farklı sıklıkta 1x1 rib örgü yapısında kumaşlar elle yatırma yöntemi ile kompozit plakaların üretimini gerçekleştirmiştir. Çekme testi sonucuna göre, düşük sıklıktaki kompozit malzemenin çubuk yönü incelendiğinde, en yüksek kopma mukavemeti değerine ulaşılmıştır. Buna bağlı olarak sıklık ve yön faktörü ile kompozit malzemenin kopma mukavemetini etkilediğini ifade etmiştir.

İlmeç yapısı ile yönlenmiş lifler doğrultusunda, yanal doğrultuda olan mukavemeti daha yüksek olarak ölçülmüştür. Öztürk (2015), kumaş kalınlığı ve kumaş türlerinin cam elyaf kumaş, aramid (kevlar) elyaf kumaş, karbon elyaf kumaş takviye malzemeleri ve poliüre matris malzemesi kullanarak kompozit malzeme üretimi gerçekleştirmiştir.

Çekme testi sonuçlarına göre en yüksek çekme mukavemeti ve kopma uzaması değerlerine aramid elyaf kumaş da ulaşmıştır. Karbon elyaf kumaş takviyeli numunelerde ise en yüksek Elastiklik Modülü elde edilmiştir.

Karbon elyaf kompozit malzemenin çekme deneyi sonucunda, ortalama Elastik Modülü 2375.03 N/mm^2 , çekme dayanımı 39.72 N/mm^2 değerlerine ulaşmıştır. Kopma uzaması ise %1.17 olarak bulunmuştur.

Sevencan (2011) yaptığı çalışmada, karbon ve cam elyafın rib yapısında farklı sıklıklarda kumaşların kullanımı ile hibrit kompozit yapılar elde etmiştir. Yön, sıklık ve kumaş dizilim özelliklerinin Elastisite Modülü, çekme dayanımı ve kayma uzaması üzerinde etkili olduğunu ifade etmiştir. Kumaş yönünün çekme uzaması üzerinde etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır.

Liu ve diğ. (2013) 13 katlı karbon dimi dokuma kompozitlerin deneysel analiz sonucunda elde edilen verilere göre Elastisite Modülü 53.69 GPa değerinde ulaşmıştır.

Zhang ve diğ. (2012) çalışmada, 8 katlı, 2/2 dimi karbon ve bezayağı cam fiber kumaşların tek tip halinde ve iki kumaş yapısında da farklı dizilim açılarında takviye olarak kullanmışlardır. Çekme testi sonucunda elde edilen verilere göre en yüksek çekme dayanımı ve Elastisite Modülü değeri sırasıyla 420 MPa ve 38.39 GPa değerinde 8 katlı 2/2 dimi karbon kumaşın kullanıldığı kompozit numunelerde ulaşmıştır.

Leong ve diğ. (2000), Ashraf ve diğ. (2017), Wu ve diğ. (1993) ve Padaki ve diğ. (2006) örme kumaş tipine sahip takviyeli kompozitlerin mukavemet ve sertlik gibi mekanik dayanım özelliklerinin dokuma ve UD(unidirectional) kumaş formunda endüstriyel alanda kullanılan kompozitlere göre daha zayıf olduğu sonucuna varılmıştır.

Çekme dayanımı düşük olan numunelerde ipliklerin kavisli bir ilmek yapısında bulunması, arayüzey bağlarının zayıflığı ve iplik-iplik sürtünmesinin düşük olmasına bağlanmaktadır.

İlmek formunun, homojen dağılım göstermeyen ve reçine yönünden zengin bölgelerin oluşumu ile kompozit malzeme yapısında elyaf hacim oranının düşük olması, örme kumaş takviyeli kompozitin çekme dayanımının düşük olması potansiyel sebepler oluşturduğu düşünülmektedir.

5.2 Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

Kompozit plakalara uygulanan üç noktalı eğme testi sonucunda tek yönde elde edilen verilere göre; eğme dayanımı (MPa) Tablo 5.2’de sonuçlar verilmiştir.

Tablo 5.2: Üç nokta eğme test sonucu mekanik dayanım değerleri

Numune tipi	Numune	Numune Kodu	Eğme dayanımı (MPa)
Dokuma	200 Bezayağı	1	12
		2	11
		3	10
		4	9
	200 Dimi	1	11
		2	12
		3	7
		4	7
	245 Dimi	1	12
		2	12
		3	13
		4	13
İnterlok örgü	1x1	S1	2.5
		S2	2.2
		S3	2.8
		S4	2.9
	2x1	K1	2.8
		K2	2.6
		K3	3
		K4	2.9
	3x1	M1	2.8
		M2	2.7
		M3	2.9
		M4	3

5.2.1 Eğilme Dayanımı

Dokuma tipinde karbon kompozit numunelerin eğme testi sonucunda elde edilen verilere göre en yüksek dayanım değeri 12 MPa'dır. Örgü tipindeki karbon kompozit numunelerde ise 1x1 interlok örgü için S4 kodlu, 2x1 örgü için K4 kodlu ve 3x1 örgü için M4 kodlu numunelerde en yüksek eğilme dayanımı sırasıyla 2.9; 2.9 ve 3 MPa değerlerinde ulaşılmıştır.

Dokuma tipindeki karbon kompozit numunelerin daha yüksek değerlerine ulaşılmıştır. Takviye ve matris fazının homojen formda olması ve ilmek yapısının sıkı halinin mekanik özelliklere etkisi olmuştur.

Tsesarsky ve diğ. (2013) çalışmada güçlendirilmiş betonarme elemanların statik ve darbeli yük altında mekanik davranışları incelenmiştir. Alkali dirençli cam (AR), polietilenden yapılmış tekstil betonarme (TRC) kabukları ve karbon kompozit kumaşların Üç Nokta Eğme testi sonucunda davranışları karşılaştırılmıştır. 7 MPa ve 10 MPa arasında değerlere ulaşılmıştır. AR cam sistemi, deformasyona karşılık diğer malzemelere oranla sert ve güçlü davranışlar sergilemiştir. Karbon kumaşlarla güçlendirme etkisi gözlenmiştir.

Houshyar ve diğ. (2005) göre, kıvrım etkisine bağlı olarak kıvrım yüzdesinin düşük ve uzunluk açısından yüksek olan kumaş takviyeli kompozit plakaların eğme dayanımı doğrultusunda farklı mekanik özelliklerine de etki etmektedir. İnterlok konstrüksiyonuna sahip örme kumaş takviyesindeki karbon kompozitlerin dokuma takviyeli alternatif numunelere göre daha düşük eğme dayanımına sahip olduğu saptanmıştır. Dokuma kumaş tipi daha sık ve yoğun bir bağ yapısında kumaş formuna sahiptir, birbirine paralel yönde çok sayıda iplik düzeninde oluşurken, örme kumaş yapısında tek bir iplik üzerinden oluşturulmaktadır.

Özdemir ve diğ. (2021) oda sıcaklığında gerçekleştirilen Üç Nokta Eğme testinde, xz ve yz olarak iki farklı düzlemlerinde iki farklı yapı formunda kompozitler tek yönlü elyaf dizilimine sahiptir. 0/90° de maximum kuvvete ulaştığında ani bir değer düşüşü gerçekleşmiştir. xz düzleminde sahip olduğu lif yoğunluğu yz düzleminden daha fazladır. Buna bağlı olarak sürekli fiber yönünde gerçekleşen çalışmalarda dayanım değerlerinin daha yüksek değerlerde ve zayıflayan

lif yönlerine doğru değerlerde düşme meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Eşit olmayan yoğunluklarda orantılı olarak dokunmuş olmasının mekanik incelemelerde etken olduğu gözlenmiştir.

Korkmaz(2014) çalışmada hem fibere dik yönde hem de fiber yönünde gerçekleştirilen üç nokta eğme testi sonuçlarına göre, karbon nano tüp ile matris malzemesi modifikasyonun kompozit performans özelliklerini iyileştirdiğini ifade etmektedir.

Cebe (2007), çalışmada farklı kompozit rotor pala malzemelerinin, tasarım ve imalat yöntemlerini araştırmıştır. Döner kanat yüzey kaplamalarında kullanılan $[(0/\pm 45/90)_2]_f$ yönlenmesinde izotropik özelliğe sahip dokunmuş karbon elyaf ve $[(\pm 45)_8]_f$ yönlenmesinde dokunmuş cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit levhaların çekme ve eğme yükleri altındaki davranışlarını incelemiştir. Karbon fiber kompozit numunelerin üç noktadan eğme deney grafikleri verilmiştir. $0(90)^\circ$ ve $\pm 45^\circ$ eksene sahip numunelerde kırılma etkisi ile delaminasyon içerdiği durumlarda eğimlerinde ve toplam şekil değişimlerinde meydana geldiği yorumlanmıştır. Deney sonucunda elde edilen verilere göre, Eğme Modül değerleri delaminasyon içerdiğinde %21–27 oranında ve eğme dayanımı değerleri ise %40 oranında azalmaktadır. En önemli husus ise 45° eksenindeki numunelerin Üç Nokta Eğme mekanik özellikleri 0° ve 90° eksenine sahip numunelerin mekanik özellik değerlerinden çok farklılık göstermemesidir. Yönlenme etkisine bağlı olarak elastiklik modülleri arasındaki fark karbon fiberlerde ortalama % 25’dir. Cam fiberlerde %10–15 kadardır. Bu durum, karbon numunelerin gevrek davranış gösterdiği, yapılarında bulunan herhangi bir kusur ya da hasara karşı çok hassas davranış gösterme durumuna bağlanmaktadır.

Şen (2020) cam elyaf, karbon elyaf, karbon+cam hibrit elyaf ve aramid+cam hibrit elyaf kullanılarak üretilen kompozitlerin birbirleri ile optimizasyon çalışması için tampondan alınan polipropilen ile karşılaştırıldığında; en yüksek eğme gerilmesine aramid+cam elyaf takviyeli kompozitlerde ulaşılmıştır. Elyaf çeşidi, elyaf dokuma yönü, elyaf katman sayısı ve reçine çeşidi değişimi doğrultusunda doğrusal olarak mekanik değerlerin de değişkenlik göstereceği görülmüştür.

Kichhannagari (2004) çalışmada soğuk ortamın cam elyaf ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. Çekme ve eğme gerilmelerinin birbirlerine yakın sonuçlarına ulaşılsa da karbonun cam elyafa göre çok daha dayanıklı olduğunu gözlemlemiştir.

Gülcan (2019) çalışmasında Üç Nokta Eğme testi sonuçlarına göre bazı plakalarda kırılmaların meydana gelmediğini gözlemlemiştir. En yüksek mukavemet değeri, en yüksek kalınlık ve ağırlığa sahip olan plakada olduğu sonucuna varılmıştır. Genel anlamda kumaş ağırlığı ve kumaşa kullanılan karbon elyafın filament sayısı, kompozit yapının mekanik özellikleri üzerinde doğrudan etkili olduğu saptanmıştır.

Zhou ve diğ. (2008) karbon nano fiberlerin karbon elyaf/epoksi kompozitlerde mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Karbon nano fiberi ağırlıkça %1, %2 ve %3 oranlarında epoksi içerisine ilave edilmiştir. Ağırlıkça %2 oranında mukavemet özellikleri en yüksek değere ulaşılmıştır. Katkısız kompozit malzeme ile karşılaştırıldığında eğme dayanımları %22.3 oranında artış göstermiştir.

Durgun ve diğ. (2013) epoksi reçine takviyesinde vakum torbalama ve vakum infüzyon üretim yöntemleri ile üretilen karbon kompozitlerin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Vakum infüzyon yönteminde üretilen numunelerin en yüksek çekme gerilme değeri ve Elastisite Modülü saptanmıştır. Vakum torbalama yönteminde daha az hava boşluğu kaldığı için üretilen ürün sıkı ve rijit özellikte olduğu yorumlanmaktadır. Vakum infüzyon yönteminde en önemli fark, reçine elyaf içine tam olarak nüfuz etmektedir. Buna bağlı olarak eğme testi sonuçlarının yüksek çıktığı sonucuna varılmıştır.

Mutlu (2019) grafen tabanlı karbon fiber/epoksi ileri polimerik kompozitlerin VARTM yönteminde hibrit kompozitler üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. Hibrit kumaşlara epoksi termoset polimer eklenmiştir, infüze edilen bu malzeme ile grafen ileri polimer kompozitler hazırlanmıştır. Eğme testleri sonucunda ise eğme gerilmesi ve Eğme Elastisite Modülü değerlerinde grafen kaplanmamış kompozite göre artış sağlanmıştır. Grafen takviyesi ile kompozit malzemelere üstün özellik kazandırdığı sonucuna varılmıştır.

Wang ve diğ. (1994) cam elyaf, aramid (kevlar) dokuma kumaş takviyeleri ve epoksi reçine matris malzeme kullanarak ürettikleri kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini tek eksenli çekme, eğme koşulları altında incelemiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda aramid fiberlerin cam elyaf kumaş takviyesindeki kompozitlere göre doğrusal olmayan çekme yükleri altında bozulmalar meydana gelmiştir. Eğme koşullarında da daha düşük mukavemet gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Murugan ve diğ. (2014) çalışmada karbon elyaf kumaş takviyeli kompozitlerin eğme mukavemetlerinin cam elyaf kumaş takviyeli kompozitlere göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Karbon/cam/cam/karbon elyaf kumaş sıralamasında üretilen tabakalı kompozitlerin, cam/karbon/karbon/cam elyaf kumaştan üretilen kompozit malzemelere göre daha yüksek eğme mukavemeti göstermiştir.

Margabandu ve Subramaniam (2019) yaptıkları çalışmada jüt ve karbon kumaş takviyeli 4 katmanlı hibrit kompozitlerin deneysel incelemeleri sonucunda 401.82 MPa olarak en yüksek eğme dayanım değerine ulaşılmıştır. Karbon elyaf kumaşların dış katmanda ve jüt kumaşların ise merkezde kullanımı gerçekleştirilen kompozit yapılarda sonuçlar elde edilmiştir. Zhang ve diğ. (2012) çalışmalarında 8 tabakalı, 2/2 dimi karbon ve bezayağı cam kumaşların sadece tek tipte ve bu iki kumaşın farklı dizilim formuna sahip kompozitler takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. 8 katlı 2/2 dimi karbon kumaşa ait kompozit plakada sırasıyla 455 MPa ve 29.03 ile en yüksek eğme dayanımı ve modül değerine ulaşılmıştır. Subagia ve diğ. (2014) 10 katlı karbon bezayağı dokuma, bu tip kumaşların çeşitli kombinasyonlarında kompozit plakalar elde edilmiştir. En yüksek eğme dayanımı 860 MPa ve modül değeri ise 54.172 GPa olarak tabakalı karbon bezayağı kumaşın kullanılmış olduğu kompozit plaka sonuçlarında elde edilmiştir. Tabakalı ve hibrit kompozitlerde elyaf türü, katman sayısı, oryantasyon açıları, üretim yöntemlerine bağlı olarak kullanılan reçine özellikleri mekanik değerlerinin artışına etken olduğu yorumlanmaktadır.

Wang ve diğ. (2017) dokuma kumaş takviyeli karbon ve cam elyaf termoplastik kompozitlerin farklı sıcaklıklarda eğme davranışını incelemişlerdir. Sıcaklık artışıyla bükülme sertliği karbon ve cam elyaf için sırasıyla %36 ve %34 civarında, eğme direnci ise % 68 ve %61 oranında düşmüştür.

Hasar tipi sıcaklık parametresinin ve plastikliğin artışında gevrek kırılmalardan sünek kırılmalara dönüşmüştür. Gül (2018) sandviç kompozit malzemelerde sıcaklık, çekirdek malzeme tipi ve kalınlığının eğme mukavemeti üzerinde büyük etkisi olduğunu gözlemlemiştir. Üç nokta eğme testlerine göre çekirdek kalınlığı arttıkça çekirdek kayma gerilmesinde ve yüzey plakalarının eğme gerilmesinde bir düşme meydana gelmiştir.

5.3 FESEM Analizi (Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu)

FESEM, yüksek voltaj sayesinde hızlandırılan elektronların, incelenecek numuneler üzerine odaklanması sonucunda, numune yüzeyi taratılarak gönderilen elektronlar ile numune atomlarının etkileşimi sağlanmaktadır. Bu etkileşimlerin uygun dedektörler yardımı ile toplanarak, sinyal güçlendiricilerden geçirilerek katot ışını tüpünün ekranına gönderilmesi sonucunda görüntü elde edilmektedir. Görüntüler ile numuneye ait olan tanecik boyutu ve tanecik yerleşimi hakkında bilgi edinilmektedir.

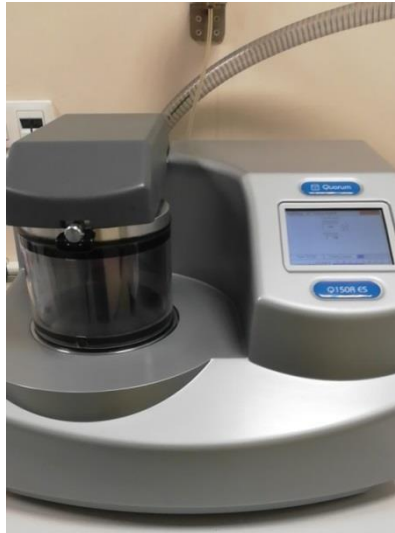
Karbon kompozit plakaların mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla yapılmış olan çekme testi sonuçlarındaki kırılma yüzeylerinin mikroyapı görüntüleri Pamukkale Üniversitesi PAUILTAM (İleri Teknoloji ve Araştırma Merkezi)'daki ZEISS SUPRA 40VP model FESEM mikroskobu ile alınmıştır. Şekil 5.7'de FESEM mikroskobunun genel görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.7: FESEM analiz cihazı

Hazırlanan test numunelerinin mekanik testleri yapıldıktan sonra çekme testi numunelerine ait en yüksek değere sahip 3 adet numune seçilmiştir. Bu test kuponlarının SEM cihazında yüzey karakterizasyonu yapılmıştır. Çalışmada 200 ve 245 g/m² dimi dokuma ile 3x1 interlok örgü karbon kompozit numunelerinin FESEM analiz görüntüleri gösterilmiştir.

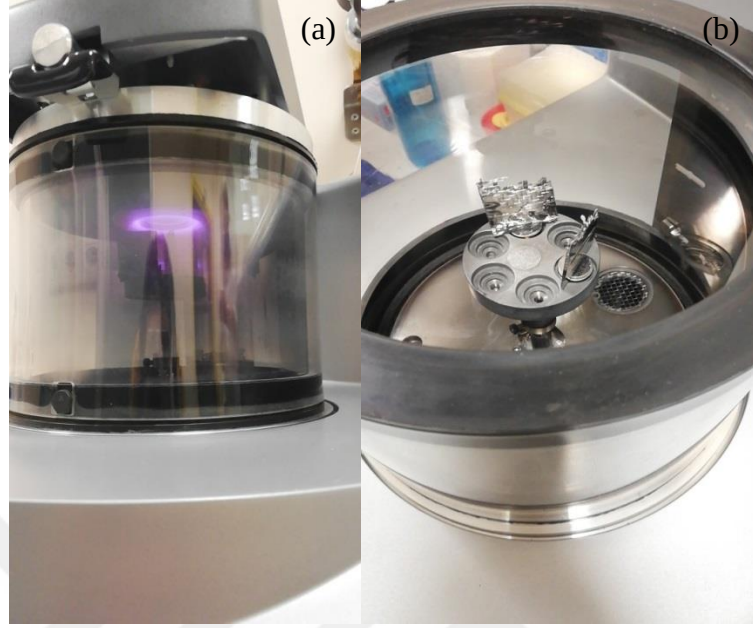
Quarum- Q150R ES model cihaz ile numunelere Au-Pd kaplama işlemi yapılmıştır. Şekil 5.8’de cihaz görüntüsü verilmiştir.



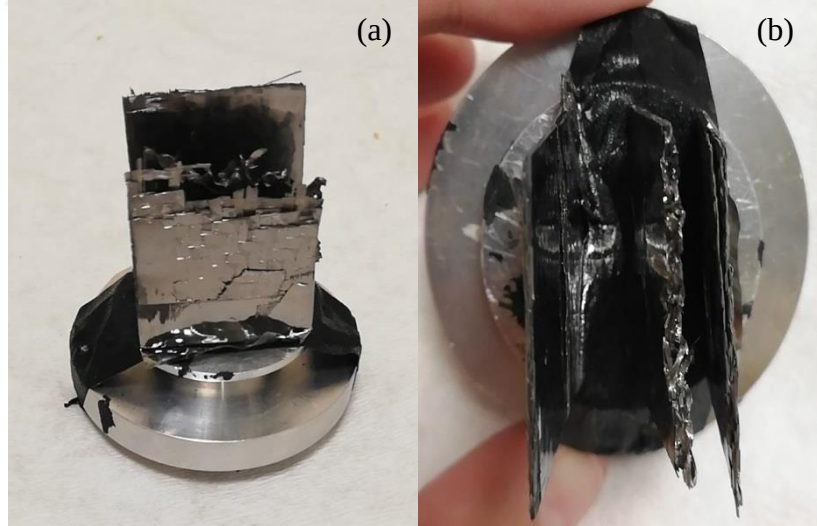
Şekil 5.8: Kaplama cihazı

Öncelikle 150x100 mm ölçülerinde hassas kesme cihazı ile numuneler kesilmiştir. Kesilen plakalar SEM cihazının holder kısmına yerleştirilmiştir. 15 dakika sürede numuneler Au-Pd ile kaplanmıştır (%80 Au-%20 Pd).

Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da kaplama işlemi ve kompozit plakalar gösterilmiştir.

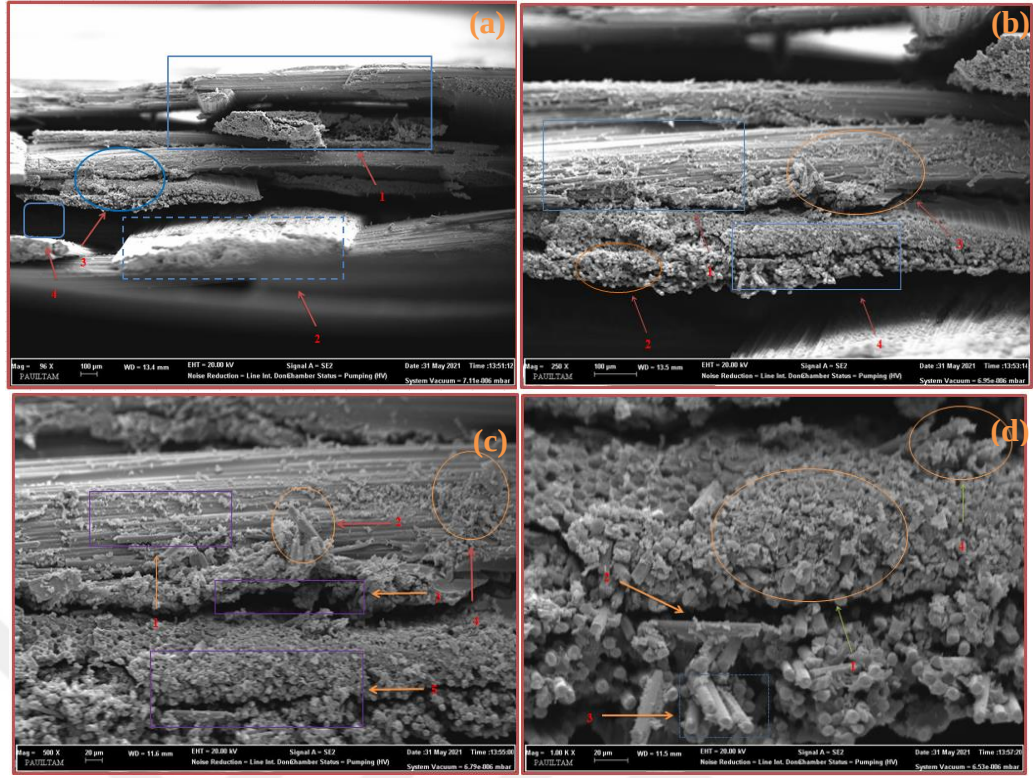


Şekil 5.9: SEM cihazı işlem aşamaları (a) Holdera yerleştirilen numunelerin Au-Pd kaplanması, (b) Kaplanan numunelerin görüntüsü.



Şekil 5.10: Kaplama işlemi yapılmış kompozit plakalar (a) Kaplanmış numuneler, (b) Numunelerin üstten kırılma yüzeylerinin görüntüsü.

245 dimi dokuma yapısına ait kompozit plaka kırık yüzeyinin mikroyapı incelemesi yapılmıştır. 100, 200, 500, 1000 büyütmelerde mikroyapı görüntüleri Şekil 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.11: 245 dimi dokuma kumaş yapısına sahip numunenin FESEM analizi görüntüleri a) 100X büyütme, b) 250X büyütme, c) 500X büyütme, d) 1000X büyütme.

Şekil 5.11’de kompozit plaka görüntülerine göre, 100X büyütme sahip plaka da 1 numaralı ok yönünde tabakalar arasında ayrılmalar meydana gelmiştir. 2 ve 3 numaralı ok yönlerinde tabakalar içindeki fiber oryantasyonu görülmektedir. Kırılmalar meydana gelmiştir. 4’te fiberler arasında boşluklar gözlenmektedir.

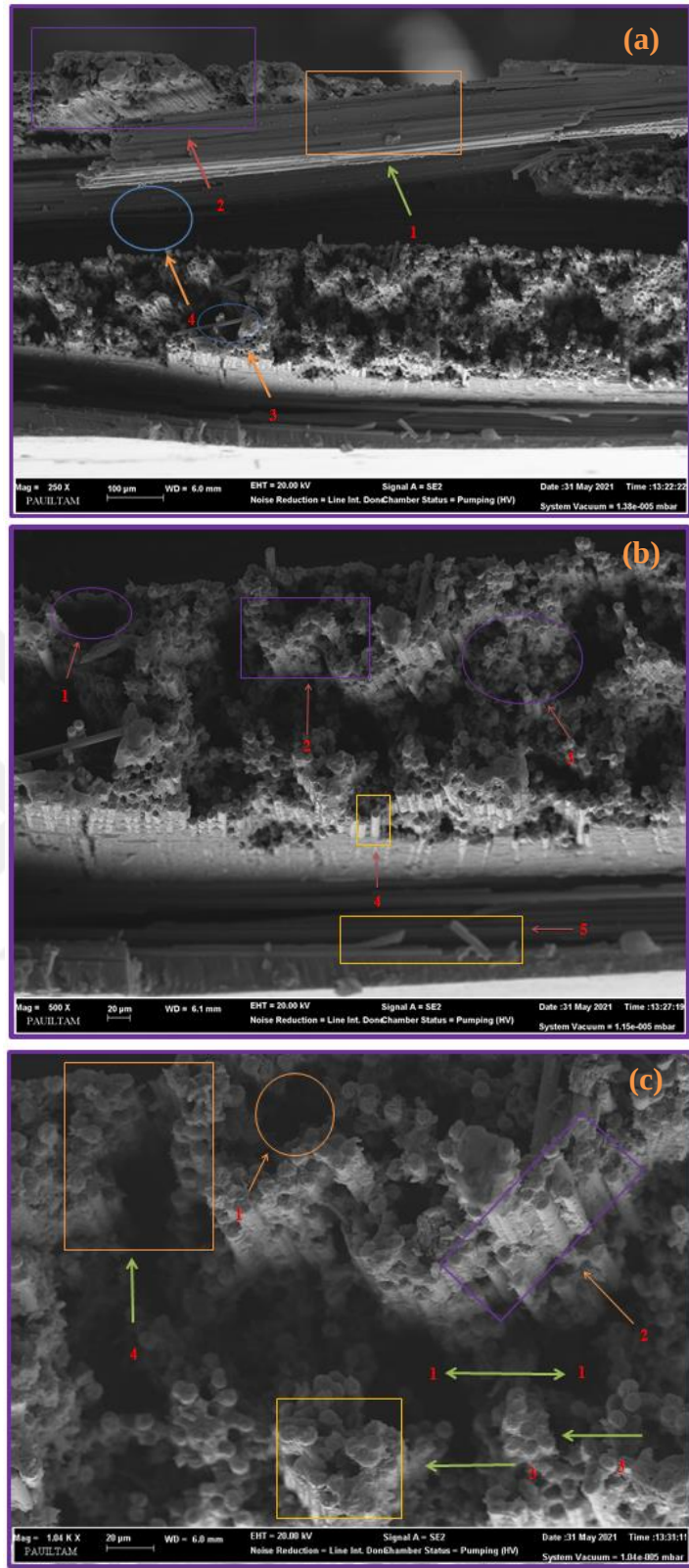
250X büyütme yapısında, fiberlerin enine tabaka bölgesinde kırılmalar gözlenmiştir. 2 numaralı kesitte fiberler sıkı yapıdadır. Takviye-matris malzeme etkisi dayanımı arttırmaktadır. 4’te ise delemantasyon görülmektedir.

500X büyütme yapısında, 1 ve 2 yönünde fiberlerin bozunmaya uğradığı görülmektedir. 3 ve 5 numaralı kesitte fiberler arası boşluk ve fiberlerin matris malzemeden ayrılması gözlenmiştir. 4 numaralı kesitte ise fiberlerde bozulmalar meydana gelmiştir.

1000X büyütme de ise fiber-matris malzeme yapısı sıkı haldedir. Çekme boyunca dayanımı arttıran bir özellik hususundadır. Fiberlerin matris malzemeden ayrılması gözlenmiştir.

200 dimi dokuma yapısına sahip kumaşların FESEM analizi görüntüleri Şekil 5.12’de verilmiştir.





Şekil 5.12: 200 dimi dokuma kumaş yapısına sahip numunenin FESEM analizi görüntüleri a) 250X büyütme, b) 500X büyütme, c) 1000X büyütme

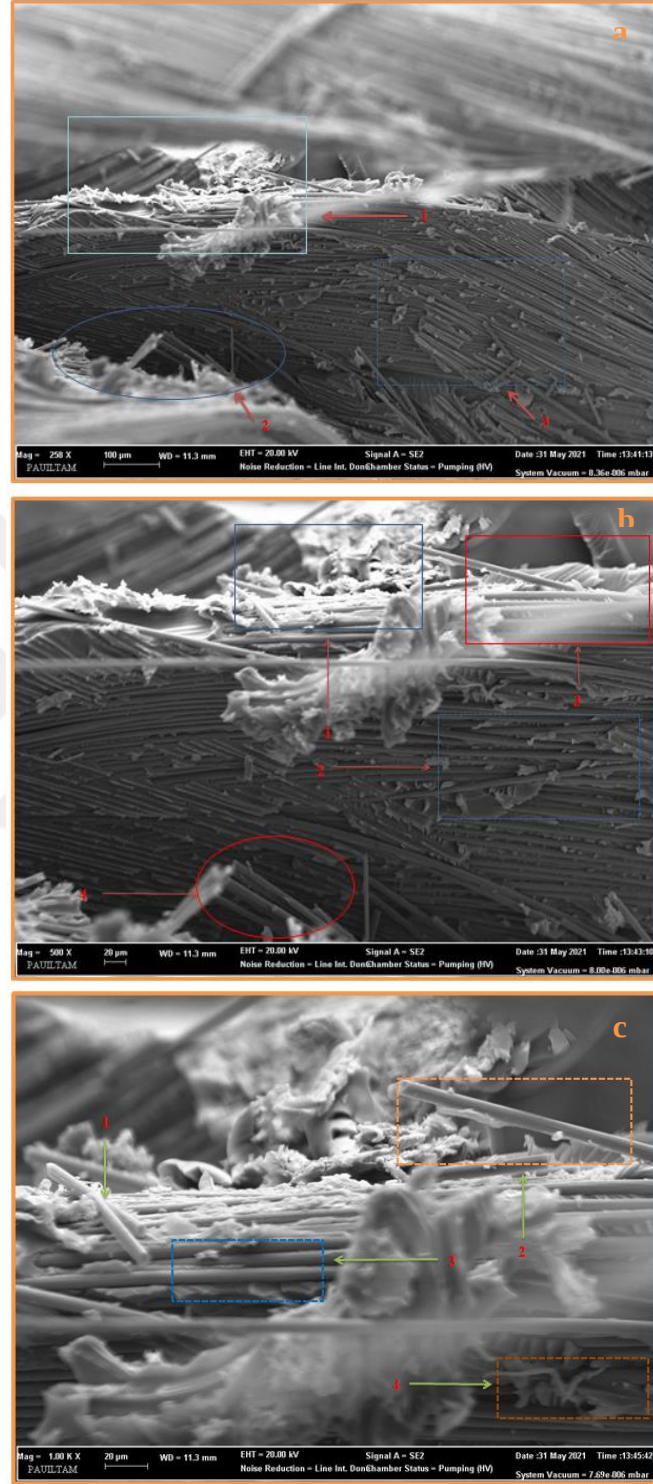
200 dimi karbon kompozit test numunesi incelendiğinde, genel değerlendirme açısından kompozit yapıda fiberlerin matristen sıyrılması (Pull out) ve Fiberler arası boşlukların (Interfacial Debonding) olduğu görülmüştür. 200X büyütme görüntüleri incelendiğinde, 1 numaralı yüzeyde tabakalı yapı enine kesit boyunca lifler arasında bozulmalar meydana gelmiştir. 2 numaralı ok yönünde fiber ve matris malzeme arasındaki arayüzey bağı çok güçlü yapıdadır bu sayede mukavet özellikleri artışı sağlamaktadır. 3 numaralı yapıda enine kesitte bulunan fiberler matris yapıdan ayrılmıştır. 4 numaralı alanda fiber matris arasında boşluklar gözlenmiştir. 500X büyütme de ise yine aynı yapı özellikleri gözlenerek, daha yakın kesit 1000X büyütmede (c), 1 ve 4 numaralı ok yönlerinde karbon fiberlerin matris malzemeden ayrılması ile fiberler arası boşluk gözlenmiştir. 2 ve 3 numaralı yapıda fiber ve matris malzeme arasındaki arayüzey bağı çok güçlü yapıdadır bu sayede mukavet özellikleri artışı sağlamaktadır. 4 numaralı alanda boşluklar bulunmaktadır.

Kompozit yapıda serbest halde görünümü olan fiberlerin epoksi ve karbon lif arayüzey birleşmesi zayıf görünmektedir. Diğer görüntü de ise fiber-epoksi arasındaki bağı arttığı, liflerin matris tarafından daha iyi örtüldüğü görülmektedir.

Çekme testlerinde saf epoksi reçine sistemi ile üretilmiş karbon kompozit numuneler birkaç bölgede hasar oluşmakla genellikle iki noktadan kırılmaktadır. Üretilmiş olan kompozit numunelerin kırılma bölgeleri incelendiğinde, çekme kuvvetinin etkisi sonucu tabakaların ayrılması ve hasarların ilerlemesi ile düz olmayan bir kırılma bölgesi olduğu gözlemlenmiştir. Numune kırılmalarının tek noktada oluşumunda kırılma yüzeyleri incelendiğinde tabaka ve elyaf ayrılmalarının oluşmadığı ve düz bir kırılma bölgesinin olduğu gözlemlenmiştir.

Karbon fiberlerin matris malzemeden ayrılması ile fiberler arası boşluk gözlenmiştir. Tabakalar halinde ayrılmalar olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum tabakaların ayrışması (Deflection of crack) hatası olarak adlandırılmaktadır. Enine kesitte bulunan fiberlerde yapı bozulmaları meydana gelmiştir.

3x1 örme kumaş yapısına sahip karbon kompozitlerin FESEM analizi görüntüleri Şekil 5.13'te verilmiştir.



Şekil 5.13: 3x1 örme kumaş yapısına sahip numunenin FESEM analizi görüntüleri
a)250X büyütme, b) 500X büyütme, c) 1000X büyütme.

250X ve 500X büyütmelelerde fiberlerin matristen sıyrılarak fiber ile matris arasında boşlukların olduğu gözlemlenmiştir. Bu hataların tespiti ile kompozit yapıların mekanik özelliklerinin değişim gösterdiği bilinmektedir. Yüzeylerin temizlik işlemi esnasında tam temizlenmeyişi, uygun yüzey işlemleri doğrultusunda hazırlanamaması ve yabancı maddelerden dolayı fiberler ile matris arasında boşluk oluşması gözlenmektedir. Yüzey temizliği hususunda özen gösterilmesi sonucu kompozit malzemede meydana gelebilecek bu tür hatalar önlenmesi beklenmektedir.

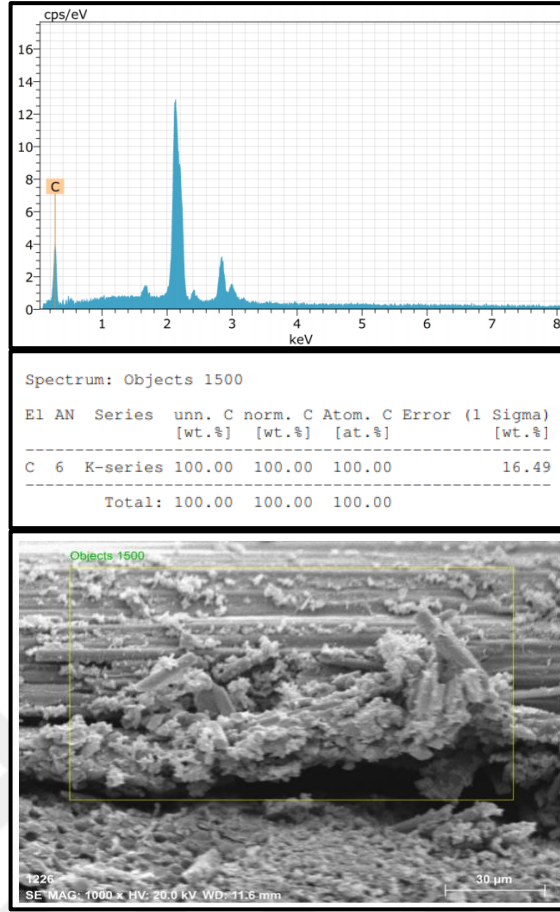
Kompozit yapıda fiber-matris arasındaki ara yüzey birleşmesi zayıf görünmektedir. Bu sebeple lifler de kopmalar, ayrılmalar meydana gelmektedir. Üretim esnasında ortaya çıkan hava kabarcıklarının ve boşlukların meydana gelmesi de önemli bir proses hatasıdır. Düzensiz halde veya eğilmiş yapıda bulunan fiberlerde delaminasyona neden olmaktadır. Bu yüzden fiberlerin kompozit yapıda düzenli yerleştirilmesi ve eğmelerin ortadan kaldırılması gerekmektedir.

1000X büyütme de, enine kesitinden bakılan numunelerde, fiberlerin yandan kesitleri görülmektedir. Burada fiberlerin kuvvet altında kayma yapması ve tabakalar arası ayrılmaların meydana geldiği görülmektedir.

5.4 EDS Analizi

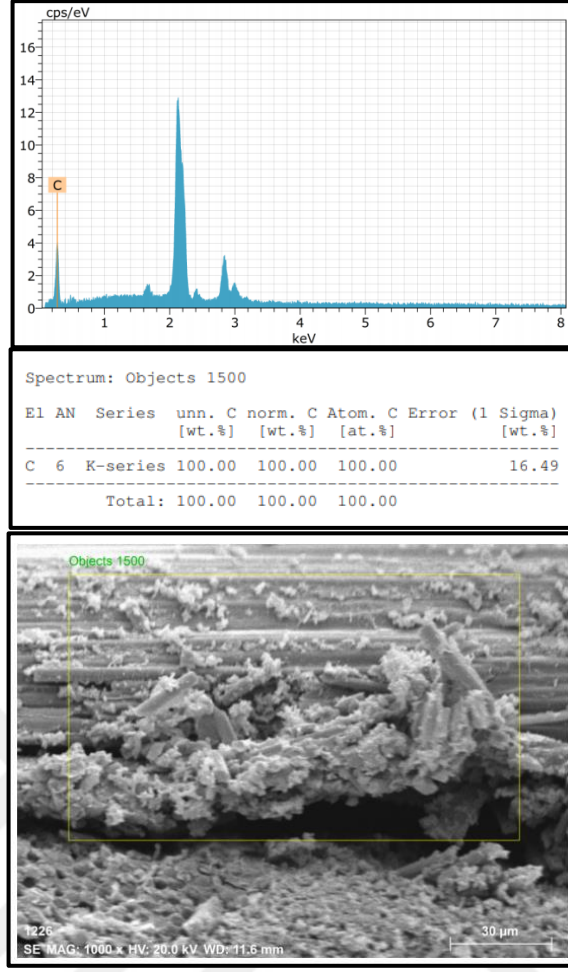
EDS dedektörü ile analizi gerçekleştirilecek numunelerin atom konsantrasyonları belirlenmektedir. Haritalama özelliği ile elde edilen görüntü üzerinde numunelerin içerisinde bulunmakta olan elementlerin dağılımı hakkında bilgi vermektedir.

245 dimi dokuma kumaş yapısına sahip kompozit numunenin EDS analizi çıktıları Şekil 5.14'te verilmiştir.



Şekil 5.14: 245 dimi dokuma karbon kompozit numunenin EDS analizi

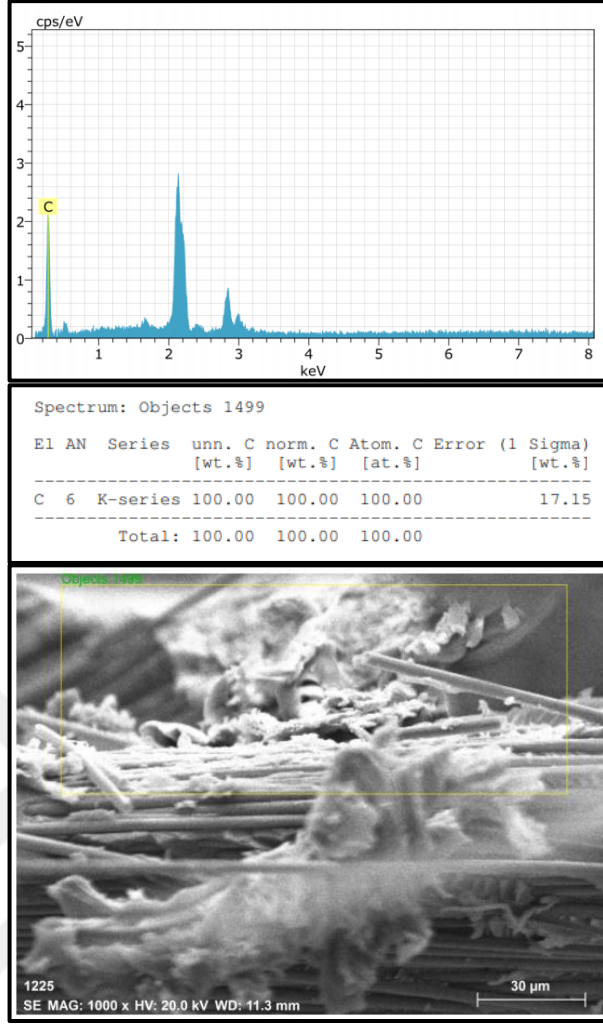
200 dimi dokuma kumaş yapısına sahip kompozit numunenin EDS analizi çıktıları Şekil 5.15'te verilmiştir.



Şekil 5.15: 200 dimi dokuma karbon kompozit numunenin EDS analizi

EDS analizi sonucunda tespit edilen Si miktarı ile malzemede gevreklik özelliği kazandırmıştır. Karbon fiber ana takviye malzeme oranını belirtmektedir.

3x1 interlok örme karbon kompozit numunesinin EDS analizi çıktıları Şekil 5.16'da verilmiştir.



Şekil 5.16: 3x1 interlok örme karbon kompozit numunenin EDS analizi

İçeriğinde sadece karbon oranı tespit edilmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kompozit malzemeler üstün mekanik özellikleri kapsamında geniş bir üretim sahasında kullanım alanındadır. Tekstil takviyeli kompozitler kendi bünyesinde yer alan materyallerle birçok yeni çalışmaya konu olmuştur. Dokuma kumaş takviyeli kompozitler, yüksek özgül mukavemet, sertlik ve şekillendirilebilir gibi özelliklerden dolayı endüstride geniş kullanım alanına sahiptir.

Teknolojik gelişmeler ile birlikte üstün mekanik özellikleri dolayısıyla yeni sektörlerde de tercih edilen kompozit malzemeler düşük ağırlık ve üstün performans gösteren özellikleri ile günümüzde birçok araştırma ve çalışma konusu ile yenilikler sunmaktadır.

Bu tez kapsamında, dokuma ve örme materyallerinde karbon kompozitler üzerine literatür çalışması gerçekleştirilmiş ve deneysel çalışmalar doğrultusunda sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karbon fiber kompozitlerin tekstil kombinasyonu ile çalışmaları az bulunmakla birlikte örme konstrüksiyonunda kaynaklar saptanmamıştır. Her iki tip arasında mekanik değerlendirilmeler yapılmıştır.

Dokuma tipinde bezayağı(plain), dimi(twill) ve örme tipinde 1x1, 2x1 ve 3x1 interlok örgü konstrüksiyonunda sırasıyla 3 ve tek kat karbon fiber olacak şekilde takviye kumaşlar ile matris malzemesi epoksi reçine tercihinde karbon kompozit malzemeler üretilmiştir.

Mekanik özelliklerinin incelenmesi amacıyla çekme ve üç nokta eğme testleri yapılmıştır. Elde edilen verilere göre en iyi dayanım özellikleri dokuma karbon fiber kumaşlar ile üretilen karbon kompozit numunelerde ulaşılmıştır. Dokuma kumaşlar sahip olduğu özellikler bakımından daha sık ve mukavim yapıdadır. Örme kumaşlar ise daha esnek yapı özelliğine sahiptir. Bundan dolayı her tip özellik kompozit plakaların mekanik davranışlarını etkilemiştir.

Deneysel çalışma kapsamında elde edilen verilere göre dokuma karbon fiber tipinde 245 dimi dokuma yapısına sahip karbon kompozit numunelerde en yüksek

çekme dayanıma sahiptir. En yüksek çekme dayanım değerleri 3x1 interlok örgüde ulaşılrken, 2x1 interlok örgüde ise en düşük dayanım değerleri sergilenmiştir.

Kompozit yönlenmesi açısından y yönünde bir çekme kuvveti uygulanmıştır. Plaka yüzeylerinde gevrek kırılma yüzeyine sahip bir kırılma gerçekleşmiştir. Kırılma yüzeyleri birleştirildiğinde yüzde uzama miktarı çok küçük değerlerde saptanmıştır. Fakat deneysel çalışmalar sonucunda %10-15 arasında ortaya çıkan yüzde uzama değerleri elde edilmiştir. Plakalar en yüksek çekme mukavemetine ulaştığında kırılma gerçekleşmektedir. Fiberler hala bir kırılma gerçekleştiriyor gibi davranış sergileyebilmektedirler, içindeki mikrofiberler kırılmaya devam ederek elastik davranış etkisi gösterebilmektedirler ve uzama miktarı artışına etki etmektedir. Yani kompozit yapıda az miktarda uzama saptanırken, mikroyapı içerisinde hala kırılma davranışı yüzde uzama seviyesinin arttığını göstermektedir. Ayrıca kırılma yüzeylerinin sahip olduğu mikroskobik görüntüler de fiber-matris arayüzeylerinde bağ yapısı güçlüdür. Sıkı ve bir arada bulunan takviye malzemeleri matris malzeme ile tutunarak mukavemet değerlerinin artışına sebep olmaktadır.

İnterlok örgü yapısında bağların etkisi ile meydana gelmesi beklenen lif saçaklanmaları gözlenmemiştir. Sadece yüzeylerde bazı lif ayrılmaları gözlenmiştir.

Örme tipinde karbon kumaşların mikroyapı incelemesi sonucunda liflerin sıyrılarak ayrılması, lifler de kopmalar ve fiber matris malzemesi arasında arayüzey bağlarında zayıflıklar gözlenmiştir.

Karbon lifleri arasında zayıf bağlar sayesinde mukavemet değerlerinin düştüğü sonucuna varılmıştır. Kumaş katsayılarının arttırılması ve farklı aç oryantasyonlarında deneysel çalışmalar yapılarak, mekanik davranışların iyileştirilmesi düşünülmektedir.

Eğme dayanım değerleri incelendiğinde, dokuma tipinde karbon kompozit numunelerin eğme testi sonucunda elde edilen verilere göre en yüksek dayanım değeri 12 MPa'dır.

Örgü tipindeki numunelerde ise 1x1 interlok örgü için S4 kodlu, 2x1 örgü için K4 kodlu ve 3x1 örgü için M4 kodlu numunelerde en yüksek eğme dayanımı 9 MPa değerinde ulaşılmıştır.

Üç Nokta Eğme testinde maksimum dayanım değerlerine ulaştığında malzemelerin dış kısmında iç kesite doğru eğme sonucunda kumaş formunda değişiklikler, kırık ve liflerde ayrılmalar meydana gelmiştir. Bazı numuneler de ise kırılmalar gözlenmiştir. Örgü tipindeki numunelerin kumaş formu ve birbirine sıkı bağ yapısında bulunmayan lifler mekanik dayanım değerlerini düşürmektedir. Dokuma da matris-takviye malzemesinin homojen dağılım göstererek, lifler arasında bağ yapısını kuvvetlendirmekte ve daha yüksek dayanım değerlerine ulaşılmaktadır.

Literatür çalışmaları incelendiğinde, dokuma tipinde karbon, cam elyaf kullanılarak üretilen kompozitlerde eğme dayanımı üzerine çalışmalar hibrit ve tabakalı kompozitler üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Karbon kompozitlerde yaklaşık aynı değerlerde olan az sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Atkı ve çözgü yönünde, kumaş kat sayısı artışı ile gelecekte yapılacak testlerde eğme dayanım değerlerinin artışı düşünülmektedir. K ifadesinin artışı ile mekanik değerlere etkisinin incelenmesi de diğer bir gelecekte çalışılması önem arz eden konudur. beklenmektedir. Buna bağlı olarak karbon kompozit numunelerin farklı sıcaklık parametrelerinde ve kumaş katsayısının arttırılarak mekanik dayanım değerlerinin iyileştirileceği düşünülmektedir.

7. KAYNAKLAR

Abrate, S., *Impact on composite structures*, 108, United Kingdom: Cambridge University Press, (1998).

Advani, S. G. and Hsiao, K., *Manufacturing techniques for polymer matrix composites*, USA: Woodhead Publishing Limited, 310-314, (2012).

Akdemir, A., “Yüzey çatlaklı cam takviyeli plastiklerde gerilmeli korozyon”, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Anabilim Dalı, Konya, (1992).

Arat, M., “Kriyojenik Ortam Şartlarında Filaman Sarım CTP Boruların Düşük Hızlı Darbe Sonrası Hasar Davranışının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, (2017).

Arola, D. and Ramula, M., “Machining-induced surface texture effects on the flexural properties of a graphite/epoxy laminate”, *Composites*, 25(8), 822-834, (1994).

Ashraf, W., Nawab, Y., Umair, M., Shaker, K. and Karahan, M., “Investigation of mechanical behavior of woven/knitted hybrid composites” *J. Text. Inst.*, 108 (9), 1510-1517, (2017).

ASTM D3039/D3039M-08 Standard Test Method For Tensile Properties Of Polymer Matrix Composite Materials

ASTM D790-17 Standard Test Methods For Flexural Properties Of Unreinforced And Reinforced Plastics And Electrical Insulating Materials

Ataş, C. and Liu, D., “Impact response of woven composites with small weaving angles”, *Int. J. Imp. En.*, 35(2), 80-97, (2008).

Avanaki, M.J and Jeddi Asgharian, A.A., “Mechanical behavior of regular dimi weawe structures; Part I: 3D meso-scale geometrical modelling”, *J.Eng.Fibers Fabr.*, 10(1), (2015).

Baydar, D.G., “Sürekli Cam Fiber Takviyeli Polipropilen Kompozitlerin Üretimi Ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2011).

Bayram, A., Yazıcı, M., “Partikül takviyeli polyester kompozitlerin eğme ve basma özellikleri”, *PAJES*, 1, (2-3), 153-159, (1995).

Bhatnagar, A., *Lightweight Ballistic Composites Military and Law-Enforcement Applications*, Duxford, UK: Woodhead Publishing, (2016).

Bingöl, Y. C., “Karbon-Fiber Takviyeli Polimer Matriksli Kompozit Bisiklet Kadrosu Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2008).

Bulut, M., “Türkiyede Kompozit Malzeme Üretimi Ve Kompozit Malzeme Sektörünün Genel Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Bitirme Projesi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, (2014).

Cabioğlu, A. M., “Farklı Sıcaklık Ortamlarında Pim Bağlantılı Kompozit Plakaların Yatak Dayanımlarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, (2002).

Chatterjee, S., Chabri, S., Chakraborty, H., Bhowmik, N. and Sinha, A., “Micromechanical and nanoscratch behavior of SiCp dispersed metal matrix composites”, *JMEP*, 24 (9), 3407- 3418, (2015).

Chawla, K. K., *Composite Materials: Science and Engineering*, New York : Springer, ABD, (2012).

Crawford, R. J., *Plastics Engineering*, London: ButterworthHeinmann, UK, 168-182, (2002).

Cebe, M., “Polimer Esaslı Helikopter Rotor Palası İmalatı Ve Mekanik Özelliklerinin Tespiti”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2007).

Çeken, F., *Örmecilik Esasları*, İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 80-81, (2008).

Çelik, M.E., “Karbon Kompozit Çarpışma Kutularında Metal Takviyesinin Çarpışma Performansına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, (2020).

Çetin, C., “Dokuma Kumaş Özelliklerinin Ve Görmüş Olduğu Mekanik Bitim İşlemlerinin Dokuma Kumaş Mukavemetine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2007).

Değirmen Biricik, G., “Polimer bazlı kompozit üretimi”, Doktora Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, (2019).

Demir, A, Günay, M. (Eds.), *Tekstil Teknolojisi*, İstanbul: Forbes Publications, 368, (1999).

Demirkaya, Ö., “Karbon Fiberlerin Asfalt Karışımlarda Kullanımının Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Isparta, (2016).

Derakhshan, D., Pourfakharan, F., “ Woven fabric composites and its behavior under anti-plane loading”, *Procedia Engineering*, 14, 2830-2838, (2011).

Doğan, S., “Balistik Uygulamalarda Kullanılan Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışına Değişik Formlardaki Vurucu Uçların Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, (2020).

Dokur, M.M., “Karbon Fiber Esaslı Polimerik Matrisli Kompozitlerin Üretimi Ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı, İstanbul, (2009).

Durgun, İ., Vatansever, O., Ertan, R., Yavuz, N., “Otomotiv sektöründe kullanılan kompozit parça imalat yöntemlerinin deneysel olarak karşılaştırılması”, *Mühendis ve Makine*, 55(649), 58-63, (2014).

Eker, A.A., *Plastik Matrisli Kompozitler*, Yıldız Teknik Üniversitesi Ders Notları, (2008).

Elanchezhian, C., Ramnath, B., and Hemalatha, J., “Mechanical behaviour of glass and carbon fibre reinforced composites at varying strain rates and temperatures”, *Procedia Materials Science*, 6, 1405-1418, (2014).

Eryılmaz, O., “Karbon Lif Takviyeli Kompozit Yapıların Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2017).

Esenkaya, B., “Karbon Fiber Kompozitlerin Vakum İnfüzyon Yöntemi İle Üretimi Ve Balistik Özelliklerinin Değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, (2019).

Gaga, L.A., “Havacılık Alanında Kullanılan Karbon Prepreg Kompozit Malzemelerin Talaşlı İmalatını Etkileyen Parametrelerin Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gedik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2020).

Gül, B., “Karbon Elyaf Takviyeli Petek Yapılı Sandviç Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Çekirdek Malzemenin Türü Ve Kalınlığının Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, (2018).

Gülcan, E., “Karbon Dokuma Kumaş Takviyeli Kompozit Malzemelerin Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa, (2019).

Günaydın, B., “Yüzey Çatlaklı Cam/Polyester Kompozit Malzemelerde Yorulma Çatlak İlerlemesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Anabilim Dalı, Konya, (2003).

Güzel, G., “Epoksi Reçinesi-Yüksek Fırın Cürufu/Yerfıstığı Kabuğu Tozu Kompozitlerinin Hazırlanması Ve Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, (2016).

FibreGlast, About Resin[online], (20 Mayıs 2021), Web adresi: <https://www.fibreglast.com/product/about-resins>, (2021).

Eskizeybek, V., “Yüzeylerine kimyasal olarak karbon nanotüpler bağlanmış örgü cam fiber/epoksi nanokompozitlerin üretimi ve tabakalar arası kırılma davranışının incelenmesi”, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, (2012).

Haldar, A.K., Guan, Z.W., Cantwell, W.J., Wang, Q.Y., “The compressive properties of sandwich structures based on an egg-box core design”, *Composites Part B: Engineering*, 144, 143-152, (2018).

Harper, C. A., *Handbok of Plastics, Elastomers and Composites*, McGraw-Hill, USA, 112-321, (2004).

Hosur, V. M., Islam, M. M., and Jeelani, S., “Low-velocity impact response of braided carbon/epoxy composites”, *International Conference on Communication and Electronics Systems*, 6, 81-89,(2008).

Im, K. H., Cha, C.S., Kim, S. K., and Yang, I. Y., “ Effects of temperature on impact damages in CFRP composite laminates”, *Science Direct*, 32(8), 669-682, (2001).

Itoh, M., Inoue, K., Hirayama, N., Sugimoto, M., and Seguchi, T., “Fiber reinforced plastics using a new heat-resistant silicon based polymer”, *Journal of Materials Science*, 37(17), 3795-3801, (2002).

Işık, A., “Kompozit Malzemeden İmal Edilmiş Bir Takviye Elemanının Eğme Ve Burulma Yüğü Altında Deneysel Ve Sayısal Olarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2008).

Jones, R. M., *Mechanics of Composite Materials*, Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, Virginia, (1975).

Leong, K. H., Ramakrishna, S., Huang, Z. M. and Bibo, G. A., “The potential of knitting for engineering composites—a review” *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 31(3), 197-220, (2000).

Karadurmuş, M., “Epoksi Reçine İle Hazırlanan Kompozit Malzemelerin Mekanik Ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Samsun, (2017).

Kaya A. İ., “Kompozit Malzemeler ve Özellikleri”, *Putech&Composites*, 38-45, (2016).

Kelly, A., Zweben, C. H., “*Comprehensive Composite Materials*”, Polymer Matrix Composites, Pergamon Press, London,(2000).

Keskin, H.İ., “Karbon Fiber Kompozit Kumaşların 30 Mhz - 1500 Mhz Frekans Aralığında Elektromanyetik Ekranlama Etkinliğinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya, (2020).

Kichhannagari, S., “Effects of Extreme Low Temperature on Composite Materials”, MSc Thesis, *The Department of Mechanical Engineering*, Jawaharlal Nehru Technological University, India, (2004).

Korkmaz, N., “Karbon Elyaf Takviyeli Dokuma Kumaş İçeren Kompozit Malzeme Üretimi Ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, (2014).

Korkmaz, N., Çakmak, E., Dayık, M., “Dokuma Karbon elyaf takviyeli karbon nano tüp-epoksi kompozit malzemelerin mekanik ve termal karakterizasyonu”, *SDU J Nat App Sci*, 20, 2, 338-353, (2016).

Koruvatan, A., “Farklı Kür Sıcaklığı Ve Sürelerinde Üretilen Tabakalı Kompozit Plakaların Pimli/Civatalı Bağlantılarının Hasar Analizinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, (2008).

Lee, W., Padvoiskis, J., Cao, J., De Luycker, E., Boisse, P., Morestin, F., “Bias-extension of woven composite fabrics”, *ESAFORM*, 1, 895-898, (2008).

Long, A.C., *Design and Manufacture of Textile Composites*, Cambridge: Wood head Publishing Limited, (2005).

Mallick, P. K., *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*, Boca Raton: CRC press, (2007).

Margabandu, S. and Subramaniam, S. “Experimental evaluation and numerical validation of bending and impact behaviours of hybrid composites with various stacking arrangements” *Materials Research Express*, 6(12), 125305, (2019).

Marmaralı Bayazıt, A., *Atkı Örmeciliğine Giriş*, İzmir: Ege Üniversitesi Tekstil ve Konfeksiyon Araştırma Uygulama Merkezi Yayını, (2004).

METYX Composites, Reinforcement Brochure [online], (20 Mayıs 2021), Web adresi: <http://www.metyx.com>, (2021).

Mitreviski, T., Marshall, I. H., Thomson, R., Jones, R., and Whittingham, B., “The effect of impactor shape on the impact response of composite laminates”, *Composite Structures*, 67, 139-148, (2005).

Morillas, M.N., “Hybrid Welding of Thermoset and Thermoplastic Composites: Adhesion Improvement”, Master Thesis, *Universidad Carlos III de Madrid*, Madrid, (2015).

Murugan, R., Ramesh, R., Padmanabhan, K., “Investigation on static and dynamic mechanical properties of epoxy based woven fabric glass/carbon hybrid composite laminates”, *Procedia Engineering*, 97: 459-468, (2014).

Mutlu, G., “Yüzeyine Grafen Film Kaplanmış Karbon Fiber Epoksi İleri Kompozitlerin Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Çanakkale, (2019).

Naik, N.K. and Ganesh, V.K., “ Prediction of on-axes elastic properties of bezayağı weave fabric composites”, *Composites Science and Technology*, 45, 135-152, (1992).

Okta, C., “Rüzgar Türbin Kanatlarında Kullanılan Malzemeler ve Titreşim Analizinin İncelenmesi”, Bitirme Projesi, *Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi*, Malzeme Bilimi Mühendisliği Bölümü, Denizli, (2017).

Olgun, Ö.H., “Termoplastik matrisli karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin üretim sürecinde indüksiyonla ısıtmanın etkileri”, Doktora Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, (2020).

Örs, S., “Farklı Karbon Tekstilleriyle Ve Reçinelerle Oluşturulan Karbon Kompozitlerin Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2014).

Özdemir, A., O., Menküç, R., Karataş, Ç., “Investigation on the effect of fiber reinforcement style on shear properties of polypropylene composites”, *PAJES*, 27(4), 478-483, (2018).

Özdemir, H., İçten, B.M., Doğan, A., “ Experimental investigation of the tensile and impact properties of dimi and dimi derivative woven fabric reinforced composites”, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 28(4), (2018).

Öztürk, Ö., “Poliüre Matris Malzemesi Ve Cam, Aramid, Karbon Elyaf Kumaş Takviyeleri Kullanılarak Üretilen Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekirdağ, (2015).

Padaki, N.V., Alagirusamy, R., Sugun, B.S., “Knitted preforms for composite applications” *J. Ind. Text.*, 35(4), 295-321, (2006).

Pham, M.Q., Wendt, E., Hantzsch, Gereke, T., Cherif, C., “Numerical modeling of the mechanical behavior of textile structures on the meso-scale for forming process simulations of composite 3D preforms”, *Wiley Online Library*, <https://doi.org/10.1002/eng2.12348>, (2020).

Sağdıç, E., “Karbon Fiber Takviyeli Polimer (KFTP) Kompozit Malzemelerin İşlenmesinde Oluşan Kusurlar Ve Malzemenin Mekanik Özelliklerine Etkilerinin Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Milli Savunma Üniversitesi Alparslan Savunma Bilimleri Enstitüsü*, Harp Silah Ve Araçları Anabilim Dalı, Ankara, (2020).

Salimi M. N., Merajin, M. T. and Givi, M. K. B., “Enhanced mechanical properties of multifunctional multiscale glass/carbon/ epoxy composite reinforced with carbon nanotubes and simultaneous carbon nanotubes/nanoclays”, *Journal of Composite Materials*, 51(6), 745-758, (2017).

Samirkumar, M.S., Ronald, F.G., Emmanuel, O.A., “The influence of subzero temperatures on fatigue behavior of composite sandwich structures”, *Composites Science and Technology*, 2009(69), 829-838, (2008).

Sayer, M., “Hibrit kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi”, Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, (2009).

Sayer, M., Bektaş N.B., “Darbe yükü altındaki hibrit kompozit plakalara sıcaklığın etkisi”, *PAJES*, 15(3), (2009).

Sevencan, G., “1x1 Örgü Yapısındaki Karbon ve Cam Elyafından Elde Edilen Hibrit Kompozit Yapıların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Uşak, (2011).

Sezen, S., Duman, S., Kaplan, O., Ünsan, Y., Korkut, E., “Deniz sektöründe kullanılan kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için basit bir deney düzeneği”, *GiDB Dergi*, 3, 41-62, (2015).

Sheffer, E., Dotan, A., and Yosef, M.B., “Impact resistance of knitted reinforced composite materials”, *5 th International Textile Conference*, (2005).

Siromani, D., Awerbuch, J. and Tan, T.M., “Finite element modeling of the crushing behavior of thin-walled CFRP tubes under axial compression”, *Composite Part B: Engineering*, 8, 50-64, (2014).

Sönmez, M., “Polimer Matrisli Kompozitlerin Endüstri Ürünleri Tasarımında Önemi ve Geleceği: Türkiye’den Dört Örnek Firma Üzerine Bir İnceleme”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Endüstri Ürünleri Tasarımı Anabilim Dalı, İstanbul, (2009).

Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composites D 3039-76, ASTM Standards and Literature Referances for Composite Materials, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, (1990).

Strong A.B., *Fundamentals of Composite Manufacturng Materials, Methods, and Applications*, *Society of Manufacturing Engineers*, Michigan, USA, (2008).

Subagia, I. A., Kim, Y., Tijing, L. D., Kim, C. S. and Shon, H. K., “Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fibers” *Composites Part B: Engineering*, 58, 251-258. (2014).

Sugun, B. S., Rao, RMVK., “Low velocity impact of glass, carbon and kevlar composites using repeated drop test”, *JRPC*, 23(15), 1583-1599, (2004).

Şahin, A., “Düşük Hızlı Darbe Görmüş Filaman Sarım E-Camı/Epoksi Boruların İç Basınç Altında Yorulma Davranışlarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, (2011).

Şahin, E., “Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Kalıplama Yöntemiyle Kompozit Malzeme Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Tunceli, (2015).

Şahin, Y., Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitap Evi, (2008).

Şen, T., “Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Otomotiv Sektöründe Kullanımı”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, (2020).

Şentürk Reyhan, Z., “Bilgisayar Destekli Nakış Uygulamalarında Kullanılan Tekniklerde Sıklık Derecesinin Bezayağı Dokuma Türündeki Kumaşlara Göre Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, El Sanatları Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, (2014).

Tugan, A., “Hibrit Dokuma Kumaşların Performans Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, (2021).

Turhan, E., “1x1 Örgü Yapısındaki Karbon Elyafından Elde Edilen Kompozit Yapıların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Uşak, (2011).

Tursun, H., “Fiber Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerin Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanmak Üzere Malzeme Modellerinin Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya, (2019).

Tüzemen, M.Ç., Salamcı, E., Avcı, A., “Karbon fiber/epoksi nanokompozit plakalarda nanopartikül katkısının fiber, matris ve boşluk hacim oranlarına etkisi”,

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 5(1), 11-19, (2017).

Tsesarsky, M., Peled, A., Katz, A., A, I., “Strengthening concrete elements by confinement within textile reinforced concrete (TRC) shells – Static and impact properties”, *Construction and Building Materials*, 44, 514-523, (2013).

Ulcay, Y., Akyol, M., Gemci, R., “Polimer esaslı lif takviyeli kompozit malzemelerin arabirim mukavemeti üzerine farklı kür metotlarının etkisinin incelenmesi”, *UÜMFD*, 7, 1, (2002).

Ünal, M.A., “Hazır Kalıplama Pestil Kompozitlerin Mekanik Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2015).

Vasiliev, V.V., Morozov, E., “Mechanics and analysis of composite materials”, *Elsevier Publication*, (2001).

Wang, S., Zhou, Z., Zhang, J., Fang, G., Wang, Y., “Effect of temperature on bending behavior of woven fabric-reinforced PPS-based composites”, *Journal of Material Science*, 2017(52), 13966–13976, (2017).

Whittingham, B., Marshall, I. H., Mitrevski, T. and Jones, R., “The response of composite structures with pre-stress subject to low velocity impact damage”, *Composite Structures*, 66(1-4), 685-698, (2004).

Wu, W. L., Kotaki, M., Fujita, A., Hamada, H., Inoda, M., Maekawa, Z. I., “Mechanical properties of warp-knitted, fabric-reinforced composites”, *JRPC*, 12(10), 1096-1110, (1993).

Xu, Q., Qu, S., “Irreversible deformation of metal matrix composites: A study via the mechanism-based cohesive zone model”, *Mechanics of Materials*, 89, 72-84, (2015).

Yakartepe M., Yakartepe Z., T.A.D.M. *Tekstil Ansiklopedisi*, 1, 114, (1993).

Yalçın, E.B., “Farklı kumaş ve farklı yöntemlerle üretilmiş ctp kompozitlerin balistik davranışlarının incelenmesi”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2012).

Yanen, C., Solmaz, M. Y., “Tabakalı hibrit kompozitlerin bireysel zırh malzemesi olarak üretimi ve balistik performanslarının incelenmesi”, *ECJSE*, (2016).

Yılmazer, U., “Tensile, flexural and impact properties of a thermoplastic matrix reinforced by glass fiber and glass bead hybrids”, *ComST*, 44(2), 119-125, (1992).

Zhang, J., Chaisombat, K., He, S. and Wang, C. H., “Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures” *Materials & Design*, 36, 75-80, (2012).

Zhou, Y., Pervin, F., Jeelani, S. and Mallick, P.K., “Improvement in mechanical properties of carbon fabric-epoxy composite using carbon nanofibers”, *JMPT*, 198, 445-453, (2008).