



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK DARBE DAYANIMLI ARAMİD/CAM ELYAF HİBRİT KOMPOZİT
MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE MEKANİK PERFORMANSLARININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Büşra ARI

Polimer Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

AĞUSTOS 2023

T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK DARBE DAYANIMLI ARAMİD/CAM ELYAF HİBRİT
KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE MEKANİK
PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Büşra ARI
20234899010

Polimer Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ayşe ÇELİK BEDELOĞLU

AĞUSTOS 2023



20.04.2016 tarihli Resmî Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Büşra ARI

İmzası:

[Handwritten signature of Büşra ARI]



Eşime ve çocuklarıma,

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince bilgilerinden yararlandığım, çalışmamda her aşamasında bana desteklerini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ayşe Çelik BEDELOĞLU'na, deney numunelerinin oluşturulması aşamasında ve çalışmalar kapsamında laboratuvarında yardımcı olan çekme, üç nokta eğme ve darbe deneyi analizleri için bilgi ve tecrübelerinden yararlanmış olduğum, Bursa Teknik Üniversitesi Polimer Malzeme Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Ayten Nur Yüksel YILMAZ'a ve deneyde gerekli malzemelerin tedarikinde yardımcı olan DOST KİMYA Ltd. Şti. satış yetkilisine teşekkürü bir borç bilirim.

Ağustos 2023

Büşra ARI

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
KISALTMALAR.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiv
SUMMARY.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. NANOKOMPOZİT MALZEMELER.....	3
2.1 Kompozit Malzeme.....	3
2.2 Matris Türüne Göre Kompozit Malzemeler.....	6
2.2.1 Metal matrisli kompozitler.....	7
2.2.2 Seramik matrisli kompozitler.....	8
2.2.3 Polimer matrisli kompozitler.....	9
2.3 Takviye Edici Faza Göre Kompozit Malzemeler.....	14
2.3.1 Fiber esaslı kompozit malzemeler.....	14
2.3.2 Tabaka yapılı kompozit malzemeler.....	22
2.3.3 Parçacık takviyeli kompozit malzemeler.....	23
2.3.4 Lamel esaslı kompozit malzemeler.....	24
2.3.5 Dolgu/Katkı kompozit malzemeler.....	24
2.4 Nano Kompozit Malzeme Tanımı.....	28
2.5 Hibrit Kompozit Malzeme Tanımı.....	29
3. POLİMER NANOKOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	30
3.1 El Yatırması.....	31
3.2 Hibrit El Yatırma Yöntemi.....	32
3.3 Püskürtme Yöntemi.....	32
3.4 Elyaf Sarma Üretim Yöntemi.....	33
3.5 Reçine Transfer Kalıplama.....	34
3.6 Vakum İnfüzyon Yöntemi.....	35
3.7 Otoklavsız Prepreg.....	36
3.8 İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	36
4. LİTERATÜR TARAMASI.....	38
4.1 Aramid Elyaf ve Grafen Nanokompozit Malzeme Çalışmaları.....	38
4.2 Cam Elyaf ve Grafen Nanokompozit Malzeme Çalışmaları.....	42
4.3 Polimer-Grafen Nanokompozit Malzeme Çalışmaları.....	43
4.3.1 Polimer-grafen nanokompozitlerin mekaniksel özellikleri.....	43
5. MALZEME VE METHOD.....	45

5.1 Malzemeler	45
5.2 Hesaplamalar	48
5.2.1 Kompozit malzeme tasarımı ve plaka hesabı	48
5.2.2. Kompozit malzeme elyaf hesabı ve malzeme giderleri	48
5.2.3 Reçine hesabı	50
5.2.4 Grafen kütle hesabı	51
5.3 Nano Kompozit Üretim Yönteminin Aşamaları	52
5.3.1 Kompozit Plakaların üretiminde vakum infüzyon yönteminin kullanımı	52
5.3.2 Grafen- epoksi karıştırılması	57
5.3.3 Grafen ve epoksi karışımı elyaflara emilimi ve kürleşme işlemi	59
5.4 Mekanik Testler	60
5.4.1 Çekme deney testi	60
5.4.2 Üç nokta eğme testi	61
5.4.3 Darbe testi	63
6. DENEYSEL ÇALIŞMA	67
6.1 Çekme Deneyi Sonuçları	67
6.2 Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları	71
6.3 Charpy Darbe Deneyi Sonuçları	76
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	80
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	Error! Bookmark not defined.

KISALTMALAR

ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu
CCC	: Karbon-Karbon Kompozit
cm	: Santimetre
cm³	: Santimetreküp
°C	: Derece Santigrat
dk	: Dakika
g	: Gram
N	: Newton
MMC	: Metal Matrisli Kompozit
PMC	: Polimer Matrisli Kompozit
SMC	: Seramik Matrisli Kompozit
m	: Metre
mm	: Milimetre
µm	: Mikrometre
nm	: Nanometre
GPa	: Gigapascal
MPa	: Megapascal
TPa	: Terapascal
RTM	: Reçine Transfer Kalıplama
SMC	: Seramik Matrisli Kompozit
J	: Joule
VARTM	: Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Cam elyaf türlerinin karşılaştırılması.....	16
Çizelge 3.1 : Bazı kompozit üretim yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları.....	36
Çizelge 5.1 : Dost Kimyadan temin edilen takviye malzemeleri özellikleri	43
Çizelge 5.2 : Kullanılan Hexion L285 reçinenin özellikleri.....	45
Çizelge 5.3 : Kullanılan Hexion L287 sertleştiricinin özellikleri.....	45
Çizelge 5.4 : Endüstriyel nano plaka grafenin genel özellikleri (GRAFEN®-İGP2). 46	
Çizelge 5.5 : 2,3 ve 4 durumlar için vakum İnfüzyon yönteminde kullanılan malzemelerin kütlesi.....	48
Çizelge 5.6 : 1.Durum vakum infüzyon yönteminde kullanılan malzemelerin kütlesi.....	49
Çizelge 5.7 : 3 ve 4 durumlar için kullanılan grafenin ağırlığı.....	50
Çizelge 6.1 : Çekme deneyi sonuçları.....	66
Çizelge 6.2 : Üç nokta eğme testinden elde edilen sonuçlar.....	70
Çizelge 6.3 : Nanokompozitlerin darbe deneyindeki darbe enerjisi değerleri.....	75

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Farklı kompozit malzeme türleri	3
Şekil 2.2 : Kompozit yapıdaki fazlar arasında kalan arayüzlerin gösterimi	5
Şekil 2.3 : Matris malzeme türlerine göre kompozit malzemeler	6
Şekil 2.4 : Bakır matrisli SiC takviyeli kompozit malzemelerin kırılma yüzeyinin mikroskop görüntüsü	7
Şekil 2.5 : Seramik matrisli kompozitten fren diski	8
Şekil 2.6 : Nanokompozit yayın sayıları ile ilgili basit istatistikler	11
Şekil 2.7: Epoksinin ideal kimyasal yapısı.....	12
Şekil 2.8 : a) Rastgele yönlenmiş süreksiz fiber, b) Yönlendirilmiş süreksiz fiber kompozit c) Tek yönlü pekiştirilmiş sürekli fiber kompozit d) Örgü formunda fiberlerle pekiştirilmiş kompozitler	14
Şekil 2.9 : Cam elyaf örneği	15
Şekil 2.10 : Aramid elyaf örneği	22
Şekil 2.11 : Tabaka diziliminin şematik gösterimi; (a) tek yönlü dizilim, (b) çapraz dizilim, (c) açılı dizilim, (ç) çok yönlü dizilim	23
Şekil 2.12 : SiO ₂ parçacık takviyeli Al matrisli kompozit malzemeye ait mikroyapı görüntüsü	23
Şekil 2.13 : Sandviç kompozitlerin uygulanması	24
Şekil 2.14 : Grafenin bağ yapısı ve şematik gösterimi	25
Şekil 2.15 : Nano seviyedeki ana karbon çeşitleri	26
Şekil 3.1 : El yatırması yöntemi	31
Şekil 3.2 : Püskürtme yöntemi	32
Şekil 3.3 : Sarma yöntemi	33
Şekil 3.4 : Reçine transfer kalıplama yöntemi	34
Şekil 3.5 : Vakum infüzyon yöntemi	35
Şekil 4.1 : AF'lerin yüzeyine hidrojen bağı ve π - π istifleme arayüzey etkileşimi yoluyla bağlanan ince bir grafen nano tabaka filmi gösterimi ve gerilme mukavemeti gösterimi	37
Şekil 4.2 : Elyaf lar üzerine plazma ko-polimerize fonksiyonel astar kaplamanın uygulandığı ve ardından GO elyaf ların işlevselleştirilmiş yüzeyine kimyasal olarak yapıştırıldığı bir teknik	38
Şekil 4.3 : Grafen oksit polidopamin ile muamele edilip aramid elyaf ın üzerine aş ılanm ıştır	39
Şekil 4.4 : Numunelerin maksimum eğme mukavemeti	41
Şekil 4.5 : Numunelerin kırılma tokluğu	41
Şekil 4.6 : Grafen, tek cidarlı ve çok cidarlı karbon nanotüpler ile takviye edilmiş epoksi reçinelerin mekaniksel özelliklerinin karşılaştırılması	42
Şekil 5.1 : Çalışma için temin edilen Aramid elyaf kumaş görüntüsü	43
Şekil 5.2 : Çalışma için temin edilen cam elyaf kumaş görüntüsü	44
Şekil 5.3 : Kullanılan Hexion L285 Reçine	44
Şekil 5.4 : Kullanılan Hexion L287 Sertleştirici	45
Şekil 5.5 : Hazırlanan Elyaf ların Boyutsal Tasarımı	46
Şekil 5.6 : Sızdırmaz bantların cam plaka üzerine yapıştırılması ve peel ply yerleştirilmesi.	51
Şekil 5.7 : Elyaf kumaş ların cam plaka üzerine serilmesi	52
Şekil 5.8 : Peel ply kumaş ve flow mesh yerleşimi.	53

Şekil 5.9 : Sisteme dahil edilen kulakçıkların yerleşimi.	54
Şekil 5.10 : Vakum naylonu ve hortumların yerleşimi.	54
Şekil 5.11 : Manyetik karıştırıcıda epoksi-grafen karışımı.	55
Şekil 5.12 : Ultra sonik cihazında grafen-epoksi karıştırılması.	56
Şekil 5.13 : Mekanik karıştırıcıda grafen-epoksi karıştırılması.	56
Şekil 5.14 : Nano grafen-reçine karışımın kalıp içine emdirilmesi..	57
Şekil 5.15 : ASTM D3039 Çekme testi numuneleri.	58
Şekil 5.16 : Çalışmada çekme deneyi uygulaması için tercih edilen Shimadzy test cihazı	59
Şekil 5.17 : ASTM D7264 Üç Nokta Eğme testi numuneleri..	60
Şekil 5.18 : Çalışmada 3 nokta eğme deneyi uygulaması için tercih edilen Shimadzu AGS-X test cihazı	61
Şekil 5.19 : Darbe deneyi cihazının çalışma prensibi ve standart numuneler.	62
Şekil 5.20: a) Charpy ve b) İzod darbe deneyinde numunenin cihaza yerleştirilme şekli.	63
Şekil 5.21 : Darbe test sonrası numuneler	64
Şekil 5.22 : Instron Ceast 9050 Darbe testi cihazı.	64
Şekil 6.1 : Çalışmada çekme deneyi uygulaması için tercih edilen Shimadzu AG-X Plus test cihazında yapılan deney esnasındaki bir numune.	65
Şekil 6.2 : Numunelerin çekme deneyi çekme mukavemeti grafiği	67
Şekil 6.3 : Çekme deneyi şekil değiştirme grafiği	68
Şekil 6.4 : Numunelerin çekme deneyi elastiklik modülü grafiği	69
Şekil 6.5: Çalışmada eğme deneyi uygulaması için tercih edilen Shimadzu test cihazında yapılan deney esnasındaki bir numune.	70
Şekil 6.6 : Numunelerin üç nokta deneyi eğme mukavemeti grafiği	72
Şekil 6.7 : Numunelerin üç nokta eğme deneyi şekil değiştirme grafiği	73
Şekil 6.8 : Numunelerin üç nokta eğme deneyi eğme elastiklik modülü.	73
Şekil 6.9: Nanokompozitlerin darbe deneyindeki darbe enerjisi grafiği.	75
Şekil 6.10: Çalışmada darbe deneyi uygulaması için tercih edilen Instron Ceast 9050 cihazında yapılan deney esnasındaki bir numune.	76

YÜKSEK DARBE DAYANIMLI ARAMİD/CAM ELYAF HİBRİT KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİMİ VE MEKANİK PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

ÖZET

Kompozit yapılar, darbeye maruz kaldığında, iç yapılarında hasar meydana gelmekte ve bu nedenle, mukavemetlerinde büyük oranda düşüş ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple günümüzde hem darbe yüklerine karşı dirençli hem de mukavemet açısından daha yüksek olan hibrit kompozit malzemeler tercih edilmeye başlanmıştır. Hibrit kompozit malzemeler yapılarında en az iki farklı fiber (elyaf) takviyesinin aynı matris içinde bulunduran yapılardır. Bu kompozitlerde, malzemenin darbe davranışını önemli ölçüde etkileyen istifleme dizilimi, kalınlık, hibrit kompozitlerin geometrisi, elyaf ve katkı seçimi gibi çok sayıda tasarım parametresi vardır.

Günümüzde yeni nesil malzemelerin üretiminde nano parçacıklar içeren hibrit kompozitler daha çok tercih edilmektedir. Düşük ağırlık ve yüksek mukavemet gibi avantajları nedeniyle, hibrit nano kompozit malzemelerin yeni üretim yöntemleriyle ilgilenilmesi araştırmacıları cezbetmektedir. Bu çalışmada, farklı ağırlık oranlarda (%0, %0,20 ve %0,25) nano grafen tozu epoksi reçine içerisine ilave edilerek vakum infüzyon yöntemi ile aramid/cam elyaf takviyeli tabakalı hibrit kompozit plakalar üretilmiştir. Literatür araştırmaları göz önünde bulundurularak epoksi reçine içerisine homojen karışımı sağlamak adına grafen katkı malzemesi ilave edildikten sonra sırasıyla manyetik, ultrasonik ve mekanik karıştırıcı ile karışımı desteklenmiştir. Farklı oranlarda nano grafen tozu katkısının, vakum infüzyon yöntemi ile üretilen malzemelerin CNC tezgahında standart ölçü boyutlarında kesilmesi ile hazırlanan kompozit test numunelerinin mekanik özellikleri (çekme, üç nokta eğme ve darbe deneyi) üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Benzer alan yoğunluğu ve aynı tip kumaş örgü yapısına sahip olan tabakalı aramid ve cam elyaf epoksi kompozitlere nano grafen tozunun eklenmesinin, malzemenin dayanımını artırmada etkili olduğu gözlenmiştir. En ideal değerlerde kullanılan nano grafen tozu katkısız cam ve aramid elyaf hibrit kompozit malzemeye göre, darbe dayanımında yaklaşık %19,1, çekmede %6,4 ve eğmede %20,4 artış göstermesi ile sonuçlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Grafen, aramid elyaf, cam elyaf, vakum infüzyon, hibrit kompozit.

PRODUCTION AND INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PERFORMANCE OF HIGH IMPACT RESISTANCE ARAMID/FIBERGLASS HYBRID COMPOSITE MATERIALS

SUMMARY

Composite structures experience damage within their internal components when subjected to impact, resulting in a significant reduction in their strength. Consequently, hybrid composite materials, which offer resistance against impact loads while maintaining higher strength properties, have gained preference in contemporary applications. Hybrid composite materials contain at least two different types of fiber reinforcement within the same matrix. Design parameters influencing the impact behavior of these composites encompass stacking sequence, thickness, geometry of hybrid composites, fiber and additive selection.

Currently, hybrid composites containing nano-particles are being favored for the production of next-generation materials. Researchers are drawn to exploring hybrid nano-composite materials due to their advantages such as low weight and high strength. In this study, aramid/glass fiber-reinforced layered hybrid composite plates were produced using the vacuum infusion method, incorporating nano graphene powder into epoxy resin at different weight ratios (%0, %0.20, and %0.25). To ensure a homogeneous mixture within the epoxy resin, graphene additive material was added and subsequently mixed using magnetic, ultrasonic, and mechanical stirrers based on insights from literature review. The effect of nano graphene powder content at different ratios on the mechanical properties (tensile, three-point bending, and impact tests) of the composite test specimens prepared by cutting the materials produced via the vacuum infusion method on a CNC machine was investigated.

Observations revealed that the addition of nano graphene powder to layered aramid and glass fiber epoxy composites, possessing similar areal density and the same fabric weave structure, effectively enhanced the material's strength. Compared to the hybrid composite material without nano graphene at the optimal values, the incorporation of nano graphene powder resulted in approximately 19.1% increase in impact strength, 6.4% increase in tensile strength, and 20.4% increase in bending strength.

Keywords: Graphene, aramid fiber, glass fiber, vacuum infusion, hybrid composite.

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte insan ihtiyaçlarının her geçen gün değişmesi sonucu daha fonksiyonel özelliklere sahip yeni malzemelere olan gereksinimde artmıştır. Hayatımızda kompozit malzemeler pek çok alanda özellikle de yapı malzemeleri başta olmak üzere sırasıyla inşaat, otomotiv, uzay ve havacılık gibi pek çok sektörde kullanımı hızla artmakta ve geliştirilmektedir. Bu sektörlerde malzemelerin mukavemeti, hafifliği, dayanıklılığı ve düşük maliyetleri açısından günümüzde büyük önem arz etmektedir. Bu tür malzemelerin özellik ve performanslarının geliştirilmesi son yıllarda bu malzemelere olan talebin hızlıca artması sebep olmuştur. Kompozitler uygulama alanlarındaki kullanımları esnasında istenmemede çeşitli darbelere maruz kalabilmekte ve kullanım ömürlerini sınırlandırmaktadır. Örneğin geminin su altında bir cisime çarpması ya da askeri bir helikopter veya uçak gövdesine çarpan bir mermi vb. Kompozit yapılar üzerine maruz kaldığı darbeler sonunda malzemenin yapısında iç hasara sebep olması neticesinde yapının mukavemetini düşürmektedir. Darbeye maruz kalan yapılarda oluşan hasar; yapı içerisinde kullanılan katkı/dolgu malzemesinin cinsi, oranları, darbenin uygulandığı yüzey ve darbe enerjisi gibi birçok faktöre bağlı olarak değişme göstermektedir. Böylelikle üretimleri gerçekleştirilen kompozit malzemelerin darbelere karşı göstermiş oldukları davranışlar oldukça önemlidir [1]. Günümüzde kendilerine has özellikleri nedeniyle nano parçacık teknolojisi araştırmacıların oldukça ilgisini çekmiştir. Ayrıca nanokompozitlerin farklı alanlarda kullanımı da söz konusudur. Nanokompozit yapılar, nano katkısı olmayan kompozit yapılarla kıyaslandığında daha üstün özelliklere sahiptirler. Özellikle son yirmi yılda çeşitli matris malzemeleri ve katkı malzemeleriyle farklı çeşitlerde nanokompozitlerin üretilmesi ve incelenmesi araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmektedir. Daha çok mühendislik alanlarında kullanımı tercih edilen epoksi reçineler herhangi bir dolgu maddesi olmaksızın tek başına çok fazla uygulamada uygun özellikler vermektedir [2]. Genellikle kompozitlerin üretiminde malzemenin mekanik özellikleri ve mukavemetini arttırmak için nano parçacıkların

kullanımı tercih edilir. Nano parçacıkların içerisinde en çok grafen ve türevleri genellikle araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Karbon atomundan meydana gelen ve iki boyutlu geometrik yapıya sahip olan grafen termal, elektriksel ve mekaniksel olarak mükemmel özelliklere sahip malzemelerdir. Grafen kullanılmış polimer nanokompozitlerin üretimi için günümüzde çeşitli yöntemler bulunmaktadır [3,4].

Literatür araştırmalarında, darbe uygulanan yüzeyde aramid tabakalar olursa hemen altındaki gevrek yapıdaki cam elyaf aramid elyaf tabakalar arasında yayılma eğiliminde olan deformasyonun yayılmasını engelleyici yapıda olduğu bildirilmiştir. Ayrıca bu tür aramid veya cam elyaf takviyeli kompozit yapılarda gerek elyaf yönelimi gerekse katman sayısı olsun büyük önem arz etmektedir [5,6].

Bu çalışmada kompozit üretiminde matris malzemesi epoksi reçine takviye eleman aramid/cam elyaf ve dolgu malzemesi olarak da grafen tozu kullanılmıştır. Literatür çalışmalarından yola çıkarak üreteceğimiz plakalarda istifleme dizilimi iki adet twill aramid elyaf ve hemen arkasında 1 adet twill cam elyaf (AAG) olarak ve toplamda 9 katmanlı olacak şekilde tasarlanıp vakum infüzyon yöntemiyle üretilmesi gerçekleştirilmiştir. Vakum infüzyon yöntemi kullanılarak farklı ağırlık yüzdelerinde grafen (%0, %0,20 ve %0,25) katkı malzemesi epoksi reçineye dahil edilip üretilmiştir. Hazırlanan her bir kompozit plakaya uygulanacak mekanik testin standart ölçülerinde kesilerek deney numuneleri hazırlanmıştır. Test numuneleri sırasıyla çekme testi, üç nokta eğme testi ve darbe deneyleri yapılmış test sonuçları katkısız numune ile karşılaştırılıp en yüksek değerdeki çekme, eğme ve darbe mukavemet sonuçları belirlenmiştir.

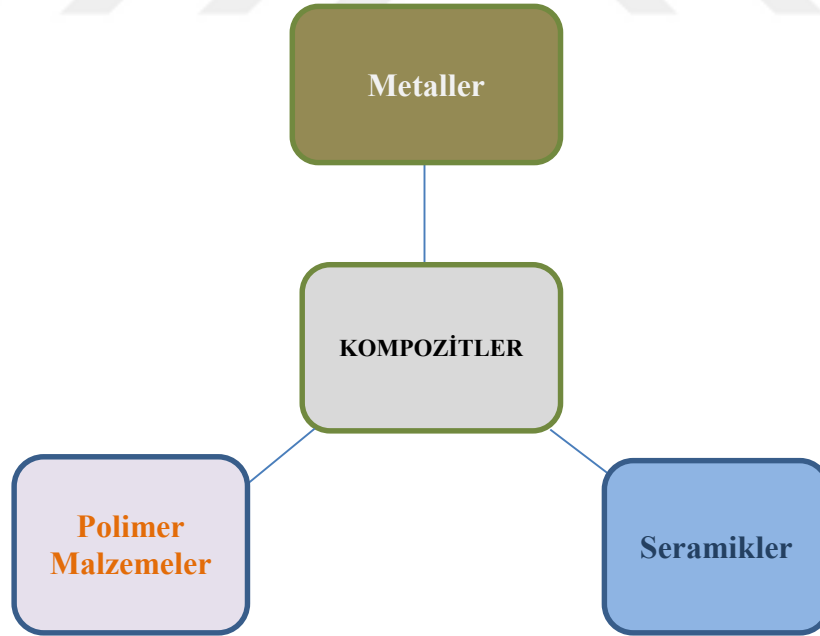
Son yıllarda yapılan araştırmalarda grafen malzemesinin güçlendirici katkı olarak mukavemeti arttırmada olumlu etkisi olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple bizde çalışmamızda nano grafen tozu kullanarak mukavemetin arttığını gözlemledik. Bu çalışmada, 9 katmanlı olan kompozit malzemelere katkı maddesi olarak nano grafen tozu ilave edilerek kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi incelenmesi hedeflenmiştir. İncelemelerin doğrultusunda kompozit tasarımında katkı/dolgu maddesi eklenmesiyle yapının mukavemetinin nasıl etkilendiği incelenerek daha yüksek mukavemetli nanokompozit yapıların sağlanması amaçlanmıştır.

2. NANOKOMPOZİT MALZEMELER

2.1 Kompozit Malzeme

20. yüzyıldan itibaren teknolojinin hız kazanmasıyla birlikte gelişen üretim teknikleriyle ve yeni malzemelerin üretime kazandırılması neticesinde birçok sanayi alanında uygulamaları artmıştır. Zamanla temel malzemelerin tükenmesiyle teknolojinin ilerlemesi olumsuz etkilenmiştir. Azalan ham maddeyle bu durum tüm dünyada bilim insanlarını yeni malzemeler bulmaya her zaman teşvik etmiştir. Havacılık, otomotiv, inşaat başta olmak üzere bu araçlarının yapımını gerçekleştirdiğimiz bu coğrafyada bilimin teknolojinin gelişmesiyle imalatı daha kolay ve yeni talep edilen özelliklere sahip yeni malzemeler tasarlanıp üretilmiştir.

Kompozit malzemeler en az iki ya da daha fazla sayıda farklı malzemenin en iyi özelliklerinin tek bir malzemede toplamak amacıyla makroskobik ölçekteki fiziki bir karışım ürünüdür. Yapıyı oluşturan bileşenler fiziksel ve kimyasal özelliklerini koruyup birleşenlerden daha iyi özelliklere sahip yeni malzeme oluşturur. Şekil 2.1’de birbirinin zayıf yönlerini geliştirerek üstün özellikler sağlamak adına farklı türde malzemeler gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Farklı kompozit malzeme türleri.

Genel olarak kompozit malzemeler matris faz ve takviye faz olarak iki bileşimden oluşur. Matris malzeme içerisinde yapıya göre polimer, metal ya da seramik esaslı olarak farklı birleşimlerden oluşur. Takviye ediciler ise, elyaf, parçacık, tabaka,

lamel veya dolgu maddeleri gibi birleşimlerden oluşur. Matrisin amacı takviye (elyaf) malzemelerini bir arada tutarak olumsuz dış etkilere karşı koruyup kollamaktır. Ayrıca sertlik ve tokluk gibi özelliklerin oluşmasında da matris malzemeleri önemlidir. Aynı zamanda takviye fazı matrisin genel mekanik özelliklerini geliştirmekte ve gelen yükü fiberlere dağıtma özelliğine de sahiptir [7-9].

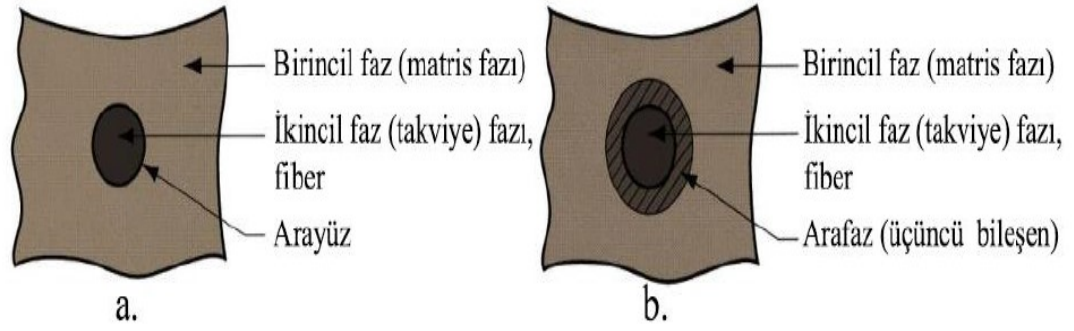
Matris Fazı

Matris fazı birinci faz olarak da adlandırılır. Bu faz sürekli ve esnektir. Matrisin temel amacı yukarıda bahsettiğimiz gibi takviye elemanlarını kimyasal ve fiziksel olumsuz dış etmenlere karşı koruyup kollamaktır. Ayrıca yapıya rijit yapısından dolayı şekil vererek yapıyı hem bir arada tutunmasını hem de istenilen formu almasını sağlar. Matris malzemeler özelliklerine göre olumsuz dış etkilere karşı hem malzemeyi korur hem de takviye elemanları üzerine etkiyen yük ve kuvvet aktarımında köprü görevi görmesini sağlar. Özellikle yapıda meydana gelen hasar sonucunda takviye elemanlarını birbirlerinden ayırarak bağımsız olarak davranmalarını ve böylece çatlak ilerlemesi gibi hasarların yavaşlatıp durdurarak hasar ilerlemesini önlemektedir. Yine liflerde hasar sonrası oluşan çatlama ve kopma gibi durumları önleyerek tok bir yapı sergiler. Şekillendirilebilme kolaylığı ve ıslatıcılık özelliğinden dolayı bu malzemeler sıvı halde kullanılır. Kompozit malzeme kullanılarak gerçekleştirilecek imalatla matrisin ısıl direnci, kimyasal özelliği, kütleme süresi ve ekonomik değeri gibi unsurlar matris seçimi için önemli belirleyicidir [10-13].

Takviye Fazı

Takviye fazı ikinci faz olarak da adlandırılır. Çoğunlukla matris faza göre daha rijit ve yük taşıma kapasitesi oldukça yüksek dayanıklı malzemedir. Böylelikle kompozit yapıya uygulanan yük matris fazı vasıtasıyla fiberlere aktarılır. Bu fazın temel amacı matris yapısına destek sağlayarak gelen kuvvetin yüksek oranda kendi üzerinde taşımaktır. Matris fazın içerisinde uygulamasına veya tercihe göre sürekli veya rastgele olarak bulunabilirler. Kompozit yapıda takviye fazın cinsi, oranı, yönü ve dağılımı yapının mukavemetini etkileyen parametrelerdir [14].

Kompozit bir malzemedeki gerilimi matristen takviye faza transfer eden, arayüz ve arafaz denilen yüzeyler arası bölüm bulunur. Şekil 2.2’de kompozit bir malzemedeki ki fazlar arasındaki arayüzler gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Kompozit yapıdaki fazlar arasında kalan arayüzlerin gösterimi [14].

Yukarıda verilen resimde kompozit yapının içerisindeki fazlar arasında kalan arayüzlerin gösterimi verilmektedir. a) matris ile takviye faz arasındaki doğrudan bağlanma, b) matris fazı bağlayabilmek için üçüncü bir birleşen ekleyerek ara fazın oluşturulması gerçekleştirilmiştir.

Arayüz

Malzemede matris ve takviye fazların arasındaki sınır arayüz olarak bilinmektedir. Birincil ve ikincil fazların arayüzlerinde fiziksel, kimyasal ve mekanik olarak etkileşim gerçekleşmektedir. Böylece arayüzde olumsuz dış etkilere karşı dirençli olmalıdır. Kompozit yapının etkin şekilde çalışması, fazların birleştiği arayüzde iyi bağlanmasına bağlıdır. Takviye fazı, matris fazında olan gerilmeyi alıp arayüz fazı boyunca aktararak yapının güçlenmesini sağlar. Gerilmelerin ne kadar çok etkili aktarılacağını belirleyen en önemli faktör arayüzdeki yapışmadır. [14].

Ara faz

Ara faz üçüncü bileşen olarak adlandırılır. Matris ve takviye faz arasında var olan bir yapıştırıcı tabaka gibi benzetilir. Birinci ve ikincil fazlar arasında yükün aktarımını gerçekleştirirken, yükün verimlice aktarılabilmesi için anafazın adezyonunun güçlü olması gerekmektedir. Eğer kuvvet uygulandığında ara faz bölgesi matris fazdan daha az dayanım verirse fiber faz ve matris faz ara yüz ayrılmasına ve delaminasyon hasarlarına sebep olur. Yapının elastisite modülü etkileyen en etken bölge ara fazdır. Ara faz bölgesi uzama, çekme, eğme, darbe, kırılma tokluk ve hasar mekanizması gibi kompozit malzemelerin mekanik özellikleri bakımından oldukça önem arz etmektedir [14].

Kompozit malzemelerde fazla sayıda malzeme kullanabilmesinden dolayı sınıflandırmada net sınırların çizilememesinden ötürü aşağıda temel birleşenlerine göre matris faz ve fiber fazı olarak sınıflandırma yapılmıştır.

Kompozit yapılar matris fazlarına göre Üç temel grupta sınıflandırılır. Bunlar;

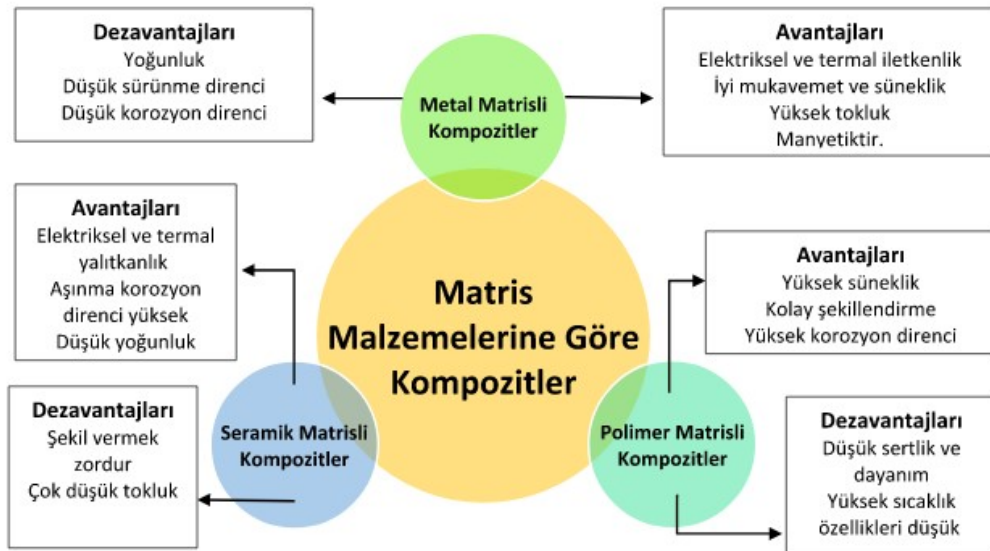
- PMC: Polimer Matrisli Kompozit malzemeler
- MMC: Metal Matrisli Kompozit malzemeler
- SMC: Seramik Matrisli Kompozit malzemeler

Kompozit yapının bileşenlerine göre sınıflandırma. Bunlar;

- Partikül Esaslı Kompozit Malzemeler
- Fiber Esaslı Kompozit Malzemeler
- Tabakalı Kompozit Malzemeler
- Lamel Takviyeli Kompozit Malzemeler
- Dolgu/Katkı Takviyeli Kompozit Malzemeler

2.2 Matris Türüne Göre Kompozit Malzemeler

Şekil 2.3’de matris malzeme türlerine göre kompozit malzemeler gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Matris malzeme türlerine göre kompozit malzemeler [15].

2.2.1 Metal matrisli kompozitler

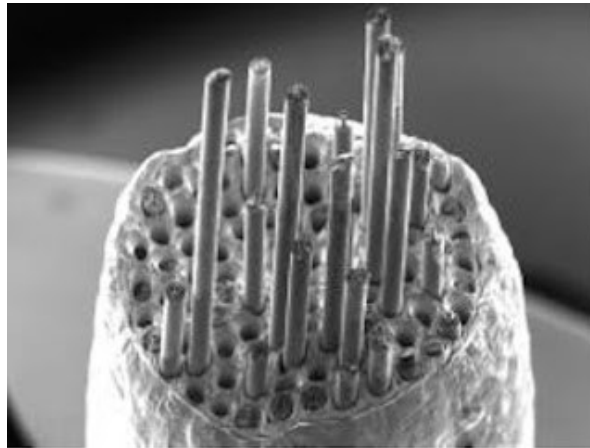
Metal matrisli kompozit yapılar arzu edilen mekanik özelliklerden en az bir tanesi metalik olması şartı ile iki veya daha fazla malzemenin bir araya gelmesiyle oluşturulur. Bu kompozit yapılarda malzemenin cinsi, ebatı, yüzey özellikleri, kimyasal yapısı gibi özellikler malzeme seçiminde önemlidir. Bu yapılarda matrisin görevi ise katkı fazına yükün aktarılmasıdır. Ağırlık olarak düşük yoğunluğa sahip metaller çoğunlukla metal matrisli kompozit yapılarda tercih edilir. Matris malzemesi olarak çoğunlukla demir, alüminyum, bakır ve çelik gibi malzemeler tercih edilmektedir. Daha çok tercih edilmeleri düşük yoğunluğa ve ergime sıcaklığına sahip oldukları içindir.

Metallerin matris malzeme olarak seçilmesinde birkaç sebep vardır. Bunlar tokluklarının iyi oluşu, yüksek sıcaklık da çalışabilmesi, yüksek dayanım, yorulma direnci ve termal genleşme olarak bilinmektedir. Bu özelliklere ek olarak elektrik ve termal iletimlerde iyi olması, nemden etkilenmemesi ve yanmazlık özelliği sergilemeleri etkili sebeplerdendir [16].

Metaller saf haldeyken yumuşaktırlar ve mukavemet özellikleriyle her zaman öne çıkarlar [17].

Genellikle metal matrisli kompozitler imalatın hem zor hem de maliyetli olmasına karşın uzay ve havacılık alanlarında, otomotiv, spor aletleri ve savunma sanayisi gibi birden fazla alanlarda kullanılmaktadırlar.

Şekil 2.4'te metal matrisli kompozite ait mikroskop görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.4: Bakır matrisli SiC takviyeli kompozit malzemenin kırılma yüzeyinden mikroskop görüntüsü [18].

2.2.2 Seramik matrisli kompozitler

Seramikler inorganik malzemelerdir. Seramik esaslı kompozit malzemeler hem hafif hem de yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir olmasından dolayı tercih edilen malzemelerdir. Özelliklerinden bazıları şunlardır: Düşük yoğunlukludur, serttirler, mukavimdirler, gevrekler, termal ve kimyasal dayanımları yüksek malzemelerdir. En büyük dezavantajları ise kırılgan ve gevrek olmaları seramiklerin güvensizleştirir. Sıklıkla yüksek sıcaklıkta çalışan makine parçalarında kullanılırlar. Ayrıyeten erime noktaları yüksek olması ve sert olmalarından dolayı da zor işlenmesi de bir başka dezavantajdır. Bu sebeple bu malzemeden yapılacak olan malzemelerin kaliteli ve doğru şekilde tasarımı gerekmektedir. Seramik kompozit malzemeler Li_2O_2 - Al_2O_3 - SiO_2 , SiO_2 ve BaO-SiO_2 - AlO_3 - Si_3N_4 gibi matris fazlardan hazırlanmaktadır. Takviye faz olarak en fazla Al_2O_3 , SiC , Si_3N_4 kullanılmaktadır. Günümüzde seramik esaslı kompozit malzemeler yaygın kullanılmaktadırlar. Seramik esaslı malzemeler metal ve polimerlere göre farklı özelliktedirler. Bu yapıların takviye elemanlarıyla güçlendirmek esastır. Metaller ve plastiklerin en önemli özeliği yüksek dayanıma sahip olmalarıdır. Seramik malzemelerin yüksek tokluk ve ısı dirence sahip olmaları en önemli özelliğidir. Al_2O_3 ve SiC gibi seramik esaslı malzemeler takviye elemanları olarak elyaf konumuna getirilip kullanılabilir. Bileşenleri kırılgan olmasına rağmen, seramik matrisli kompozit yapılar matristeki çatlakları durduran ve elyaf-matris arayüzünün etkili tasarımı sayesinde sağlamdır ve takviyenin bozulmasını önler [19].

Şekil 2.5'te seramik matrisli kompozitten tasarlanan fren diski gösterilmiştir.



Şekil 2.5: Seramik matrisli kompozitten fren diski [19].

Üç tipte seramik esaslı kompozit malzemeler bulunmaktadır. Bunlar;

- Sürekli fiber kompozit malzemeler
- Kesikli fiber kompozit malzemeler
- Partiküllü kompozit malzemeler

Sürekli fiber kompozit malzemeler: Yapı içerisinde birincil faz zayıf olsa bile elyaflar uygulanan yükü her zaman taşırlar. Ancak çatlak varsa seramik esaslı yapılar ciddi oranlarda hasar görmesiyle geri dönüşü zor yola gireceklerdir [20].

Kesikli fiber kompozit malzemeler: Süreksiz fiberler dayanımları oldukça yüksektir. Genellikle SiC, ZrO₂ ve TiC sıklıkla kullanılan süreksiz fiberlerden birkaçıdır [20].

Partiküller: Birincil faz olan matris faz içerisine partikül olarak eklenip kullanılırlar [20].

Seramik esaslı kompozit malzemeler sert malzemelerdir. Matris yapı mikro düzeyde çatlamaya başladığında kırılğan liflerin erken kırılmasını önlemek için, işlem sırasında lif/matris bağlanması kontrol edilmelidir. Seramik matrisli kompozitlerin imalatı özel işleme teknikleri gerektirir. Ara fazın ve matrisin, gazlı ya da sıvı öncüllerden liflerin etrafında oluşturulduğu gaz veya sıvı faz yolları (veya her ikisinin bir kombinasyonu) genellikle tercih edilir. Seramik matrisli kompozitler kullanımı, ağır hizmet koşullarında, örneğin yük altında yüksek sıcaklıklarda ve yanma gazları gibi korozif atmosferlerde termo yapısal malzemeler olarak kullanılır. En yaygın olarak kullanılan SMC, karbon/karbon (C/C), karbon/silisyum karbür (C/SiC) ve silikon karbür/silikon karbür (SiC/SiC) olarak adlandırılan, oksit olmayan seramik matrisli kompozitlerdir [20].

Seramik matris kompozitler (SMC), kullanım alanları zırhlar, askeri ve uzay araçları, havacılık sektöründe (gaz türbinleri, yapısal yeniden giriş termal koruma) ve enerji sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır [21].

2.2.3 Polimer matrisli kompozitler

Polimer esaslı nanokompozitler her zaman nanokompozitlerin arasında en çok ilgi çeken kompozit sınıfı olmuştur. Bu kompozitlerin yaygınlaşma sebebi, benzersiz mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleridir. Plastik malzemelerde bu sınıfın içerisine dahildir. Plastikler istenilen şekillerde biçimlendirilebilen veya kalıplanan

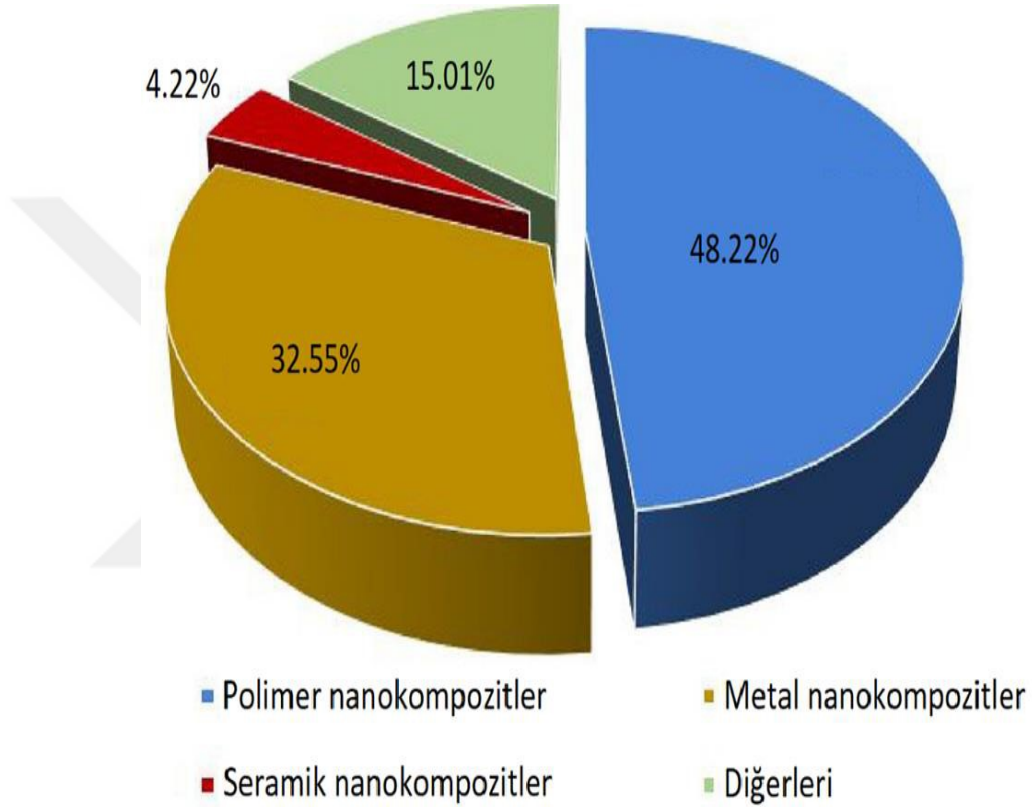
bir malzeme sınıfıdır. Plastik malzemelerin sağlamış olduğu özelliklerin birçoğuna başka bir malzeme sınıfını kullanarak ulaşması oldukça güçtür. Bu nedenle mühendislikte plastik malzemeler önem arz etmektedir. Plastik malzemelerin en fazla tercih edilmesinde az sayıda parça kullanılarak tasarımı sağlayabilmesi, basitleştirilmiş montaj yöntemleri, yüzey işleminin az olması ve hafif oluşudur. Ayrıca çok iyi yalıtım özelliği vermesi özellikle elektriksel tasarımlarda kullanılmaya elverişli kılar. Plastik malzemeler bir diğere avantajı da doğada bol olmasından kaynaklı ucuz olmasıdır. Plastik malzemeler yapılarında olan kimyasal bağların durumuna göre iki ana gruba ayrılmaktadırlar. Geri dönüşümlü ve geri dönüşümsüz olarak sırasıyla termoplastikler ve termoset plastiklerdir. Buna bağlı olarak polimer matris kompozit malzemeleri de matris faz olarak polimerine göre iki gruba termoplastik ve termoset esaslı kompozit malzemeler olarak ayrılır [22].

Polimerlerin, mineral ve organik maddeler ile güçlendirilmesi epey yaygındır. Saf bir polimer malzemeye düşük miktarlarda nanoparçacık yapılar eklenip çekme ve akma mukavemeti ve elastisite modülü gibi değerlerde artışlar görülmektedir. Mikron ölçeklerde bulunan güçlendiricilerin aksine nanokompozit malzemelerde güçlendirici yapılar nanometre boyutta parçacıklardır. [23].

- **Termoplastikler:** Termoplastik malzemeler ısıtılıp tekrar tekrar soğutulduğunda var olan şeklini koruyan geri dönüştürülebilen malzemelerdir. Bu ısıtılma ve soğutma işlemi şekillendirilme esnasında gerçekleşir. Böylelikle işlem birçok kez tekrarlanıp plastik malzemeler yeni istenilen formlara getirilebilirler. Isı ve basınç altında bu geri dönüştürülebilen plastikler yumuşar ve soğuduktan sonra tekrar sertleşebilirler, uygun çözücünde çözünür, birkaç kez kalıplanabilen yapılardır. Termoplastik malzeme grubunu oluşturan en önemli plastikler ise viniller, selülozikler, akrilikler, polietilen, naylon, polistiren vb. gibi malzemelerdir [24].
- **Termosetler:** Termoset plastik malzemeler ısıtılıp soğutuldukları zaman tekrar eski şeklini koruyamayan geri dönüştürülemeyen malzeme türüdür. Isıtılınca erimeyip aksine bozulurlar. Kimyasal tepkimeler sonucunda sertleşebilir ancak sonrasında ısıtıldıklarında tekrar yumuşamazlar. Bundan dolayı termoset plastik malzemeleri tekrardan imalata giremezler. Ayrıyeten termoplastikler gibi çözücülerde çözünemezler. Bu termoset malzemelerin mühendislik tasarımlarında tercih edilmesinin sebebi şunlardır; yüksek sertlik,

hafiflik, yük altında sürünmesi, biçim değiştirmeye karşı dayanım direnci, yüksek elektriksel ve ısı yalıtım özellikleri ve yüksek ısı ve boyutsal kararlı olmasıdır. Termoset plastıklara örnek olarak reçineler poliüretan, poliimid, polibütadien ve vulkanize kauçukları verebiliriz [24].

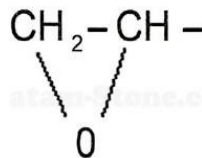
Diğer nanokompozitlere göre polimer nanokompozitler araştırmacıların daha fazla dikkatini çekmiş ve bu durum yayın sayılarına yansımıştır. Şekil 2.6'da yayın sayıları dağılım grafiği olarak gösterilmiştir [25].



Şekil 2.6: Nanokompozit yayın sayıları ile ilgili basit istatistikler [25].

2.2.3.1 Epoksi reçine

Epoksi, içinde birbiriyle birleşen iki karbon atomuna bağlanan bir oksijen atomuna bağlan kimyasal grubuna verilen addır. En basitçe epoksinin yapısında, üç üyeli halkalı yapısı bulunmakta olup "Epoksi 1 ve 2" ya da "Alfa epoksi" olarak isimlendirilir. Aşağıda resimde gösterilen basit bir epoksinin kimyasal yapısı verilmiştir (Etilen Oksit- Ethylene Oxide) [26].



Şekil 2.7: Epoksinin ideal kimyasal yapısı [26].

Genel olarak epoksi reçinelerin çoğunluğu Epiklorohidrin (Epichlorohydrin) ve Bisfenol A (Bisphenol A) arasındaki reaksiyondan elde edilmektedir. Genellikle kahverengi, sarı veya renksiz olarak üretimi yapılmaktadır [26].

Genel olarak epoksi reçinelerin birkaç özelliği aşağıda verilmiştir:

- Elektriksel olarak yalıtımlı,
- Kimyasal malzemelere (asitlere, alkalilere, yağlara) karşı yüksek dayanımlı
- Su, neme karşı oldukça fazla dayanımlı,
- Polyester reçinelerle kıyaslandığında pişirme sırasında daha az şekilde hacimsel büzülme,
- Pişirme sırasında çevre sıcaklık etkilerine göre düşük hassasiyetli (Epoksi reçineler 5 ile 150 °C arasında kürleşmekte),
- Epoksi reçinelerin moleküler yapısından dolayı termal gerilmelere karşı dayanıklı

Günümüzde özellikle de sanayide kullanılan reçineler arasında, en çok epoksi reçinelerin kullanımına rastlanılmaktadır [26].

2.2.3.2 Poliester reçine

Polyester reçineler organik asitler ile alkollerin reaksiyonu sonucu üretilen reçine türüdür. Polyester reçine grubu içerisinde doymuş ve doymamış olarak iki gruba ayrılmaktadır. Doymuş polyester reçineler ısıtıldığında erir sonra tekrar şekillendirilebilir. Doymamış polyester reçineler ise diğerinin aksine ısıtılıp sertleştirildikten sonra tekrar şekillendirilmezler. Polyester reçinelerin başlıca avantajları düşük viskozite, ucuz, kolay imal edilebilir olmalarıdır. Başlıca dezavantajları gevrekleşme eğilimli olmaları ve zayıf kimyasal dirençlerin olması gösterilebilir. Ayrıca insanın sağlığına ciddi derece zarar verebilecek olan stiren gazı soluduğumuz ortama çıkarmaktadırlar [27].

Polyester reçineler organik asitler ile alkollerin reaksiyonu sonucu üretilen reçine türüdür. Polyester reçine grubu içerisinde doymuş ve doymamış olarak iki gruba ayrılmaktadır. Doymuş polyester reçineler ısıtıldığında erir sonra tekrar

şekillendirilebilir. Doymamış polyester reçineler ise diğerinin aksine ısıtılıp sertleştirildikten sonra tekrar şekillendirilmezler. Polyester reçinelerin başlıca avantajları düşük viskozite, ucuz, kolay imal edilebilir olmalarıdır. Başlıca dezavantajları gevrekleşme eğilimli olmaları ve zayıf kimyasal dirençlerin olması gösterilebilir. Ayrıca insanın sağlığına ciddi derece zarar verebilecek olan stiren gazı soluduğumuz ortama çıkarmaktadırlar [27].

Çoğunlukla inşaat ve denizcilik uygulama alanında kullanılmaktadırlar. İki çeşit polyester reçine vardır. İsoftalik polyesterler bu polyester reçineler suya karşı dayanıklı olduklarından denizcilik alanlarında daha çok kullanılmaktadır. Ortoftalik polyester reçineler ise isoftalike göre maliyet olarak daha uygun malzemelerdir

2.2.3.3 Vinilester reçine

Vinilester reçineler epoksi reçineler ile akrilik ya da meta akrilik asidin reaksiyona girmesiyle gerçekleşirler. Bu reçine türü hızlı sertleşme ve kolay işlenme gibi özelliklerinden dolayı ön plana çıkan bir reçine çeşididir. Polyester reçineye göre maliyet bakımından daha pahalı ve daha yüksek mekanik özellikler göstermektedir. Bu malzemelerin avantajları ise yüksek mekanik dayanımları ve iyi korozyon dayanımı diyebiliriz [27].

2.2.3.4 Fenolik reçine

Fenolik reçineler, fenol ve formaldehitin tepkimeye girmesiyle üretilirler. Isı ve basınç altında gerçekleştirildiklerinde iyi elektriksel kuvvet, iyi ısı ve kimyasal dirence sahip olurlar. Genellikle uçakların iç bölümü, demiryolları, deniz araçlarının motor aksamında kullanılır. Yaş hali oldukça zararlı olup kırılğan ve yüzey kalitesi çok düşük malzemedir. Bu malzemeler oksijen ve ışığın bulunduğu ortamlarda uzun süre bırakıldığında mekanik özelliklerinde sıkıntı olmaz ancak renklerini kaybedebilirler. Başlıca avantajları maliyetlerinin düşük olması ve yüksek sıcaklıkta dirençli olmaları iken dezavantajları ise mekanik özelliklerinin düşük olmasıdır [27].

Renkleri kırmızı, siyah ve kahverengi olarak bilinir. Çoğunlukla uygulamalarda kullanılan üretim yöntemleri el yatırması, püskürtme, pultrüzyon ve elyaf sarma yöntemleridir.

2.3 Takviye Edici Faza Göre Kompozit Malzemeler

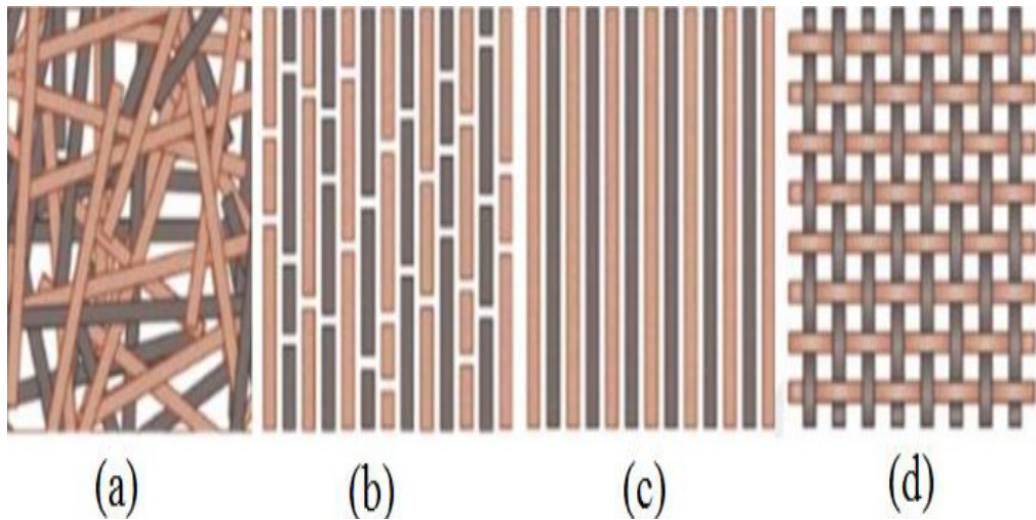
2.3.1 Fiber esaslı kompozit malzemeler

Geçmişte yapılan çalışmalara baktığımızda elyaf ve reçinenin yapı içinde birlikte uyumunun çok iyi olduğu bilinmektedir. Günümüzde çeşitli amaçlar için elyaf takviyeli polimer kompozitler çok yaygın olarak kullanılan mühendislik malzemelerin başında yer almıştır. Literatürde “Fiber reinforced polymer” ifadesi ile elyaf takviyeli polimer kompozitler için kullanılmaktadır.

Elyaf takviyeli kompozit yapılar, mukavemet ve elastik modülü yüksek olan elyafların matris malzemesi sünek olan yapılarla bir araya getirilmesi sonucu elde edilirler. Elyaf (fiber) takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri malzemelerin tipine, miktarına, lif dağılımına ve yönlenmesine bağlı olarak değişim gösterirler. Bunlarla birlikte hem arayüzdeki bağlarının yapısı olsun hem de ara yüzde gerçekleşen yük aktarım mekanizmaları olsun yapının özelliklerinin belirlenmesinde önem arz etmektedir [28].

Elyaf takviyeli kompozit yapılarda yük taşıma bakımından oldukça önemli yapılardır. Böylelikle malzemeye uygulanan yükün matris fazıyla elyaf yapılara aktarır. Kompozitlerde uygulanacak yüke göre genelde elyaflar yerleştirilirler. Piyasada daha çok yönlendirilmiş fiberlerin aksine örgü formunda olan fiberler daha çok bulunmaktadır [14].

Şekil 2.8’de farklı morfolojik yapılara sahip kompozit malzemeler resimlerle ayrıntılı gösterilmiştir.



Şekil 2.8: a) Rastgele yönlenmiş süreksiz elyaf, b) Yönlendirilmiş süreksiz elyaf kompozit yapısı c) Tek yönlü pekiştirilmiş sürekli elyaf kompozit yapısı d) Örgü formunda elyaflarla pekiştirilmiş kompozit yapılar [14].

2.3.1.1 Cam elyaf

Günümüzde en yaygın ve en çok kullanılan liflerin başında gelir. Kullanımı genellikle uçak sanayisinden otomotiv sanayisine kadar büyük bir alana yayılmış olup kompozit sektöründe çok tercih edilmektedir. Cam elyaf piyasada hem maliyetli olması hem de dayanımı açısından son yıllarda takviye malzemesi olarak kullanımı artmaktadır. Şekil 2.9'da çalışmamızda kullandığımız cam elyaf numunesine ait örnek görüntü sunulmuştur.



Şekil 2.9: Cam elyaf örneği.

Bu elyaflar yapı içinde kullanan malzemelere göre çeşitlere ayrılmaktadır. Cam elyaf türleri [29];

a. E-Camı: Piyasada sıklıkla bulunabilen yaygın ve tercih edilen çeşididir. Cam takviye esaslı polimer matris esaslı kompozitlerin üretimi yaklaşık olarak yüzde 80'leri oluşturmaktadırlar. Bu elyaflar, yapıların güçlendirmesinde ve özellikle yüksek elektrik direncinden dolayı elektrik sektöründe de sıklıkla tercih edilmektedir.

E cam elyafların fiyatı diğer türlere göre uygun olup satışı da oldukça yüksek oranlardadır [29].

b. C-Camı: Bu türdeki cam elyaflar ise kireç, silikat ve bor içermektedir ve özellikle korozyon olduğu ortamlarda kullanımı elverişlidir. Aynı zamanında betonarme yapıların içinde tercih edilmektedir. Ayrıca bu yapılar asit korozyonu durumlarına karşı oldukça iyi bir direnç sağlamaktadırlar. En temel kullanımının ise boru hatları ve tanklarda yüzey kaplamasında tercih edilmektedir [29].

c. A-Camı: Yapı içinde alkalilerin daha fazla olmasından sebep bu elyafların türü imalat döngüsünden çıkmıştır [29].

d. S-Camı: Bu cam elyaflar hem elastiklik modülü hem de dayanıklılıkları oldukça fazladır. En çok havacılıkta ve ısı performansa sahip olup üretim esnasında özel olarak kalite kontrole tabi tutulmalıdır. Bu elyafların satış fiyatları oldukça yüksektir ve cam elyafların içerisinde en pahalı olan elyaf çeşididir. Dolayısıyla S-Cam satışı ise maliyetinden ötürü düşüktür [29].

Aşağıda çizelge 2.1 'de cam elyaf türlerinin karşılaştırılması gösterilmiştir.

Çizelge 2.1: Cam elyaf türlerinin karşılaştırılması [29].

Cam Elyafın Türü	Yoğunluk	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastikiyet Modülü (GPa)	% Uzama
E-Camı	2,6	3445	72,4	4,8
S-Camı	2,49	4558	86,9	5,4
C-Camı	2,56	3310	68,9	4,8
AR-Camı	2,7	3241	73,1	4,4

Piyasada Birçok farklı kompozisyonu kullanımı söz konusudur, Piyasada en eski kullanılan ve çoğu kompozit yapımında uygun özelliklerin bir kombinasyonuna sahip olan, E-cam tercih edilmektedir. Yukarıdaki tablodan istenilen özelliklerde cam elyafların seçimi yapılabilmektedir. Yüksek mukavemet talebinde S camı ilk olarak tercih edilebilir. Cam elyafları, hammaddelerin bir rezervuarda eritilmesi ve her birinin tabanında birkaç yüz delik bulunan bir dizi platin burcun beslenmesi ile üretilir. Cam yerçekimi altında akar ve ince filamentler mekanik olarak aşağı doğru çekilerek deliklerden akışkan cam çıkar. Elyaflar, dakikada birkaç bin metrelik hızlarda tambura sarılır. Elyaf çapının kontrolü, tanktaki camın kafası, camın

viskozitesi (bileşime ve sıcaklığa bağlı olarak), deliklerin çapı ve sarım hızı ayarlanarak sağlanır. E-camın çapı genellikle 8 ile 15 µm arasındadır [30].

Cam elyaf malzemeler yaklaşık olarak kalınlıkları 10 mikrondur. Cam elyaf sahip olduğu yüksek mukavemet ve kimyasal direnç değerlerinden ötürü havacılık, otomobil, mobilya teçhizatlarının imalatında ve inşaat sektörlerinde kullanılabilmesi günden güne daha çok yaygınlaşıp tercih edilmektedir. Cam elyafların özellikle de inşaat alanında çeşitli malzemelerin hem güçlendirilebilmesi hem de iyileştirilebilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzeme sahip olduğu üstün özellikler sayesinde farklı tipte parçaların kimyasal ve korozyon ortamlarından korunmak içinde oldukça tercih edildiği bilinmektedir [29].

Cam fiber kompozit yapılar normal bir çelikle kıyaslandığında 3 kat dahada dayanıklı ve çelikle kıyaslandığında ağırlıkları dahada hafif ve tokluğu daha yüksektir.

Kompozit malzeme üretiminde birçok parametre malzemenin son hal özelliklerini belirlemek için göz önünde bulunmaktadır. Bunlar; yapıdaki katmanın sayısı, matrisle elyaf oranı, matrisin cinsi, elyafın çeşidi ve elyafın kullanıldığı açılar kompozitlerin mukavemet özelliklerini direk olarak etkileyen parametrelerdir.

El yatırma yöntemi ile imal edilen dokumasız kompozitlerde dokuma cam elyaflardan imal edilen ürünlere kıyasla yaklaşık olarak %40 ile 50 oran aralığında daha az mukavemet sergilerler. Ayrıca elyaf dizilimlerine göre tasarlanan yapılar daha mükemmel özellikler vermektedirler [31].

Cam elyaf kompozit yapıların özellikleri aşağıda sıralanmıştır [31].

1- Yüksek özgül mukavemetli olması.

Bir malzemenin birim kütle başına düşen maksimum gerilmeyi ifade eder. Polimer malzemeler hafif olduklarından bazı uygulamalarda tercih edilebilirler. Ancak, polimerlerin özgül mukavemeti diğer malzeme türlerine kıyasla özellikle metaller ve seramiklere göre genellikle daha düşüktür. [31].

2- Hafif olması.

Temelde kompozitlerde plastiklere dayandığından metal malzemelere kıyasla hem daha mukavemetli hem de birim alan başına düşen ağırlık bakımından daha hafif olmasında ötürü avantaj sağlamaktadır [31].

3- Tasarım esnekliği.

Tasarım açısından büyük, küçük ve karmaşık yapıların modellemesinde tasarım esnekliğinden kaynaklı tasarımı çok kolay yapılardır [31].

4- Yüksek dielektrik dirençli olması.

Çarpan elektriksel yalıtımları sayesinde tercih edilebilmektedirler [31].

5- Korozyona dayanımlı olması.

Metallere göre nem almaya karşı dirençli yapısı sebebiyle korozyon dayanımları oldukça yüksek malzemelerdir [31].

6- Kalıplanma kolaylığının olması.

Eski yöntemlerde birden fazla malzemeyi birleştirerek bir araya getirilip oluşturulan parçalar bu sayede tek parça olarak tasarlanabilmektedir [31].

7- şeffaflık.

şeffaflık opaklık ve ışık geire bilirlik özelliğine sahip olmaları en önemli özelliklerdendir [31].

8- İnşaat sektöründe kaplama yapılması.

Normal şartlarda beton malzemesi yzeeye iyi seviyede yapışmakta ve beton malzemesinin içeriğinden dolayı gözenek bölgelerden içeriye yayılarak buralarda sertleşir. Bu sayede oldukça sağlam yapışma özelliğini sergilerler [31].

9- elik yüzeyinde uygulanabilmesi özelliği.

elik malzemesinin dış üzerinde var olan pas kalıntıları temizlenerek kaplama yapılacağı zaman çeliğin dış yüzeyi koroziif etkilere karşı korunması sağlanmış olur [31].

10- Kolayca kesilip delinebilmesi özelliği.

Kompozit yapılar ahşap malzemeler gibi kesilip ve delinerek işlenebilmektedirler [31].

Kompozitler yapıların avantajları kadar dezavantajları da olduğu bilinmektedir. Bunlardan bazıları [31];

1- Bazı süreçlerde ısıyla etkileşim gerektiren yerlerde kompozit yapılar elik malzemelere göre yetersiz kalabilmektedir [31].

2- Kompozit teknolojisi yeni gelişen bir alan olduğundan matris ve elyaf türleri metal malzemeler kadar iyi bilinmemektedirler [31].

3- Her zaman için karmaşık kompleks yapılar üretimler uygun olarak gerçekleştirilmeyebilirler [31].

4- Kompozitler üretim esnasında dış ortama insan sağlığına zararlı olan stiren gazı gibi kimyasallar ortama vermektedir. Bu tehlikeli gazlar için önemli tedbirler ve önlemler alınması gerekmektedir [31].

5- Ağırlıkları kıyaslandığında kompozit yapılar metallere göre daha pahalıdır [31].

6- Üretim esnasında istenmeyen hava kabarcıkları yapı içerisinde oluşabilir. Bu hava tahliye edilmez ise yapının yorulma davranışını olumsuz yönde etkiler [31].

7- Doğrultusuna göre farklı mekanik özellikler verebilmektedir [31].

8- Üretim yöntemine göre malzemenin kalitesi oluşur. Örneğin en temel üretim yöntemi olan el yatırması yönteminde ürün kalitesi direkt olarak üretimi gerçekleştirenin elinin beceri yeteneğine bağlıdır [31].

Cam elyaf kompozitlerin uygulama alanlarından birkaçı [31];

1- Su ekipmanları: Teknenin gövdesi, yelkenin direkleri, dekoratif olarak iç tasarım vb. örnek verilebilir [31].

2- Su sporları ekipmanları: Aquapark su kaydırakları ve sörf tahtası vb. örnek verilebilir [31].

3- Hava araçları ve ekipmanları: Hava pervane sistemleri, koltuk ekipman araçları, uçak ve helikopter kanatları vb. örnek verilebilir [31].

4- Korozyona karşı dayanım: Özellikle sıvıyı depolayan tanklar, altyapı borular vb. örnek verilebilir [31].

5- Sağlık ekipmanları: Tıbbi cihazların dış koruyucu yapıları vb. başlıcalarıdır [31].

6- Ev takım aletler ve ekipmanları: Mikrodalga fırınlar, motorlu alet, servis tepsiler ve Soğuk hava dondurucusu vb. örnek verilebilir [31].

7- Otomotiv sanayisi: Özellikle araç tamponlar, spor araç gövdeler, motor şaftı, kaporta parçalar ve araç kapıları vb. başlıcalarıdır [31].

8- Gıda / tarım sektörü: Gıda depolayan tanklar, silolar, gıdayı taşıyan kaplar vb. örnek verilebilir [31].

2.3.1.2 Karbon elyaf

Karbon elyaflar grafit elyaflar olarak da adlandırılmaktadır. Mükemmel kimyasal dirence sahip hafif ve güçlü elyaflardır. Karbon elyaf malzemelerin yüksek mukavemetli oluşu, düşük yoğunluğa ve sürtünme gibi üstün özelliklere sahip olmasıyla başta havacılık ve uzay sanayisine hâkim elyaf çeşididir. Karbon elyafların mekanik özellikleri, karbon zincirlerinin atomik konfigürasyonu ve grafit kristal yapıya benzer olan bağlantıları ile belirlenir. Karbon elyafın gücü, karbon atomik yapıların karbon elyafı yönü boyunca en güçlü atomik bağlantılarıyla yönlendirilmesiyle kontrol edilir [32].

Karbon elyaflar çelik malzemelere göre hem 4/5 kat daha hafif hem de mukavemet açısından 3 kat dahada sağlam dayanıklı malzemeler olduğu bilinmektedir.

Karbon elyafları sürekli elyaflar ve kırılmış elyaflar olarak iki türde ayırmaktadırlar [31].

1-Sürekli karbon elyafları: Genellikle dokuma, örgü, tek yönlü bant ve prepreg uygulama alanında kullanımı tercih edilirler. En önemli avantajları tüm reçinelerle kolayca kombine edilebilirler [31].

2-Kırılmış karbon elyafları: Enjeksiyon ve basınçlı kalıplarda, tanklarda, makine parçalarında çoğunlukla kullanılmaktadır. Üretilen ürünler mükemmel seviyede korozyon ve yorulma dayanımına sahiptir. Ayrıca yüksek derecede sağlamlılık ve sertlik özelliklerinde göstermektedirler [31].

Karbon elyafı poliakrilonitrilden (PAN) üretimi gerçekleşir. PAN esaslı malzemeler güçlü ve hafif yapılardır. Poliakrilonitril'in karbon elyafına dönüşümünü dört işlemde gerçekleştirmektedir [31].

Karbon elyaf akrilik elyafın belirli proseslerden geçirilmesiyle elde edilir.

1- Oksidasyon aşaması.

Bu evrede elyaf yaklaşık olarak 300°C'lerde ısıtılarak hidrojenin elyaftan ayrılması ve yerine oksijenin yapıya eklenmesi gerçekleştirilir. Sonra elyaflar kesilerek grafit

haznesine yerleştirilir ve kararlı yapıya dönüştürülmesi sağlanır. İşlem öncesi beyaz olan elyaf kahverengiye dönüşür ve işlem tamamlandığında tamamıyla siyah rengine döner [31].

2- Karbonizasyon aşaması.

Elyaf malzemeler yanıcı olmayan atmosferin şartlarında yaklaşık olarak 3000°C'lere kadar ısıtılarak elyafların %100 karbonlaştırılması gerçekleştirilir [31].

3- Yüzey iyileştirmesi aşaması.

Burada elyaf yüzeyindeki karbonların temizlenerek reçineye daha iyi yapışması için elektrolitik olarak banyoya yatırılması sağlanır [31].

4- Kaplama: Bu son evre olan adımda aşınmayı önlemek esas alınır. Burada elyaf reçine ile kaplanmaktadır. Bu adımda en çok tercih edilen reçine epoksi reçinedir. Kompozitler üretilirken elyaf ve reçine arasında bir ara yüzey görevi sağlar [31].

Karbon elyafın başka elyaflardan ayıran en önemli özelliği yüksek modüllü ve sert malzeme olmasıdır. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda oksitlenmeye meyilli olması ve yüksek maliyetli oluşu en büyük dezavantajlarıdır.

2.3.1.3 Aramid elyaf

Aramid elyaflara aromatik poliamid elyaflar da deniliyor. Aramid kelime kökü bir çeşit naylon türü olan aromatik poliamid malzemesinden geldiği söylenmektedir. Elyafı oluşturan maddenin doğrudan iki aromatik halkaya bağlı en az %85 amid bağlantılarına (-CO-NH) sahip uzun zincirli sentetik bir poliamid olduğu, ısıya dayanıklı güçlü bir sentetik polimer elyaf sınıfıdır [32, 33].

Aramid elyafların ticari ismi kevlar olarak bilinmektedir. Bu elyafın diğer elyaflarla kıyasladığımızda en üstün özellikleri; hafiflik, yüksek çekme ve darbe dayanımı, aşınma, yüksek basınçlara ve kimyasal maddelere göre dayanımıdır. Aramid elyaf doğal halde sarı renk görünümündedir. Bu malzemeler ultraviyole ışınlara maruz kalması sonucunda bozulmalar gerçekleştirmektedir. Bu sebeple karanlık ortamda saklanması gerekmektedir.

Aramid elyaflar genel olarak polimer matrisli kompozitleri, kauçukları ve metalleri takviye etmek için kullanılırlar. Bu durum güçlendirme özelliklerinde önemli iyileştirmeler sağlar. Bu sebeple çoğunlukla uzay, havacılık, petrol, inşaat malzemeleri, ulaşım ve kamu güvenliği alanlarında kullanılırlar. Ayrıca katı roket motorlarının kabuklarında, lastiklerde, halatlarda askeri sanayi alanlarında özellikle de kurşun

geçirmez yeleklerde ince ve hafif oluşu sebebiyle tercih edilen kompozit yapılarıdır [34,35].

Aramid elyafı ile gerçekleştirilen kompozit malzemelerde imalat esnasında reçineyle aramid elyaf sağlam düzeyde bütünleşmelidir. Birleşmemesi durumunda çatlaklara sebebiyet verir ve bu çatlak yapılardan içeriye su geçiş gerçekleşirse malzemede yorulma çok hızlı olacak ve dayanımını olumsuz yönde etkiler. Ayrıca pahalı olmasından ötürü hassas ve titiz bir çalışma gerektiren bir malzemelerdir. Şekil 2.10'de çalışmamızda kullandığımız aramid elyaf görüntüsü gösterilmiştir.



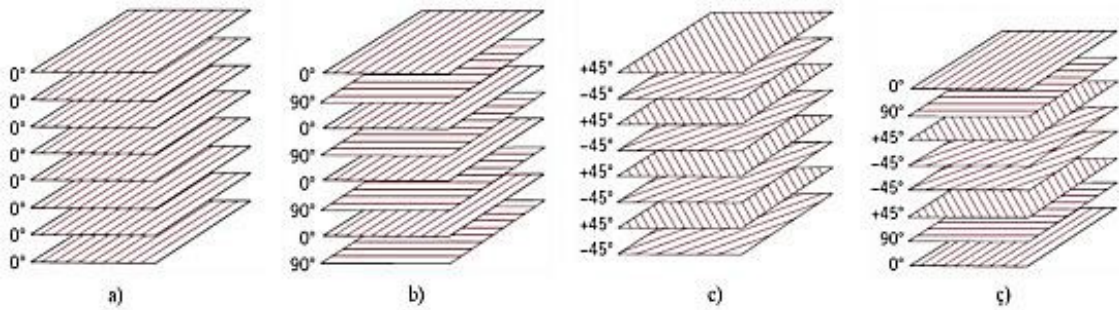
Şekil 2.10: Aramid elyaf örneği.

2.3.2 Tabaka yapılı kompozit malzemeler

Tabakalı kompozitler en az iki farklı malzeme tabakalarının aynı yahut farklı doğrultularda üst üste istiflenmesi ile gerçekleştirilmektedir. Bu tabakalar çoğunlukla peş peşe sıralanan polimerler, seramikler ve metallerden oluşturulmaktadır.

Tabakalı kompozitler kullanarak zayıf özelliklere sahip malzemenin sağlamlaştırılması ve geliştirilmesi gerçekleştirilir. Korozyon direnci zayıf metallerin yüzeyine daha yüksek korozyon direncine sahip plastiklerin ya da metallerin kaplanması ile korozyon özelliğinin sağlanması mümkündür. Ayrıca iki boyutlu düzlemde tabakalı kompozit malzemeler yüksek dayanımları nedeniyle karmaşık formdaki malzemeleri üretmeyi mümkün kılar [36,37].

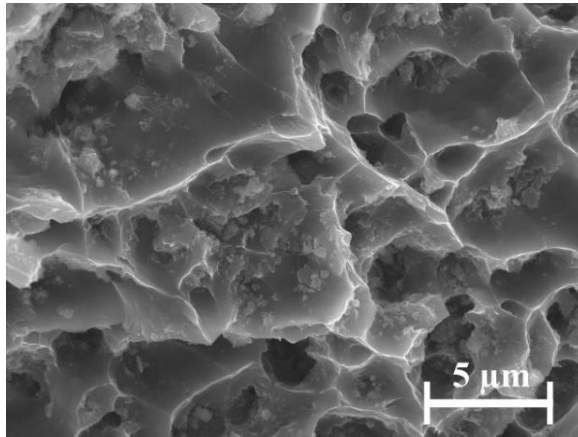
Bu yapılarda, laminant özellikleri ve yüksek mukavemetli yönün katmandan katmana nasıl değiştiği çeşitli faktörlere bağlıdır. Bu bağlamda, laminant kompozitler tabaka dizilimine göre; tek yönlü, çapraz, açılı ve çok yönlü olmak üzere dört gruba ayrılmaktadır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11: Tabaka diziliminin şematik gösterimi; (a) tek yönlü dizilim, (b) çapraz dizilim, (c) açılı dizilim, (ç) çok yönlü dizilim [37].

2.3.3 Parçacık takviyeli kompozit malzemeler

Matris yapı içerisine farklı özellikteki takviye elemanlarının küçük parçalar halinde eklenmesi ile parçacık takviyeli kompozitler oluşturulur (Şekil 2.12). Parçacıklar farklı geometrilerde olabilirler, ancak tüm yönlerde aynı malzeme özelliğinin (izotropik yapının) sağlanması için parçacıkların bütün yönlerde eşit boyutlara sahip olması gerekmektedir [38].



Şekil 2.12: SiO₂ parçacık takviyeli Al matrisli kompozit malzemeye ait mikroyapı görüntüsü [38].

Kompozit malzeme üretiminde kullanılmak için fazla sayılda parçacık malzeme bulunmaktadır. Fakat kompozit malzemelerde kullanılan parçacık yapıların çoğunluğu oksit olmayan özellikle Al₂O₃ olmak üzere oksit parçacıkları ve SiC, TiC, B gibi parçacıklardan oluşmaktadır. Bu parçacıklarda mukavemetleri parçacıkların

sertliğine bağlıdır. Elyaflardan ucuz ve yapının elastiklik modül ve mukavemet değerlerinin artmasına sebep olurlar. Bu yapıların polimer ve metal kompozitlerinde kullanılması, mukavemetlerin yükselmesine neden olmaktadır [36,37].

Kompozit yapı içindeki parçacıkların boyutları, takviye malzemesinin kompozit yapıya katkısını belirler. Örneğin parçacık boyutunun büyümesi üretimde kolaylık sağlarken; üretilen kompozitin kırılma tokluğunu ve dayanım özelliklerini değiştirir. Parçacıkların sertliği, kompozit yapının rijitliğini artırmada etkili olmasına rağmen dayanımını artırmadaki etkisi sınırlıdır. Birçok alanda kompozit malzeme üretirken maliyeti en aza indirmek amacıyla kullanılan parçacık takviye türlerinden en yaygın olanı polimer matris yapısında yer alan metal parçacıklardır [39].

2.3.4 Lamel esaslı kompozit malzemeler

Ağır yük taşıma gücüne sahip olan büyük uzunluk ve çap oranlarında katkı malzemesi eklenerek üretilirler. Matris malzeme içinde bulunan pulların konsantrasyonun az olabileceği gibi tam tersi yüksek değerlerde de olabilirler. Düzlemsel yapıdaki pulların sıkıca paketlenmesiyle sağlanırlar. Pul esaslı sistemler pahalı olsa da mukavemet özellikleri oldukça iyidir [36,37].

2.3.5 Dolgu/Katkı kompozit malzemeler

Üç boyutlu olan sürekli bir matris malzemesinde olan dolgu ya da katkı maddesi ile doldurulması ile oluşturulan yapılardır. Genellikle matris iskelet veya şebeke geometrik sel yapıdadır. Özellikle petek, hücre ya da süngere benzetilen gözenekli yapıların aralarına metalik, organik veya seramik esaslı dolgu maddelerinde yer alabilir. Kompozit malzemelerin imalatında birbiri içinde çözünemeyen, kimyasal olarak reaksiyon vermeyen bileşen gruplarının seçilmesi esastır [36,37].

Şekil 2.13'te katkılı kompozitlerin uygulanmasına örnek verilmiştir.

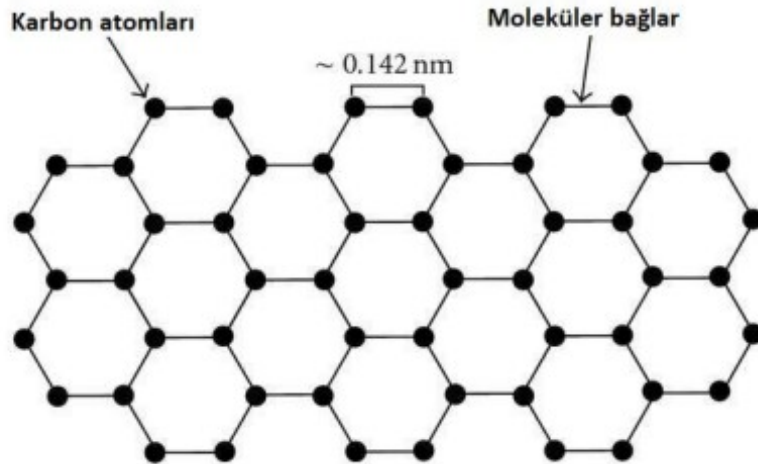


Şekil 2.13: Sandviç kompozitlerin uygulanması [36,37].

2.3.5.1 Grafen

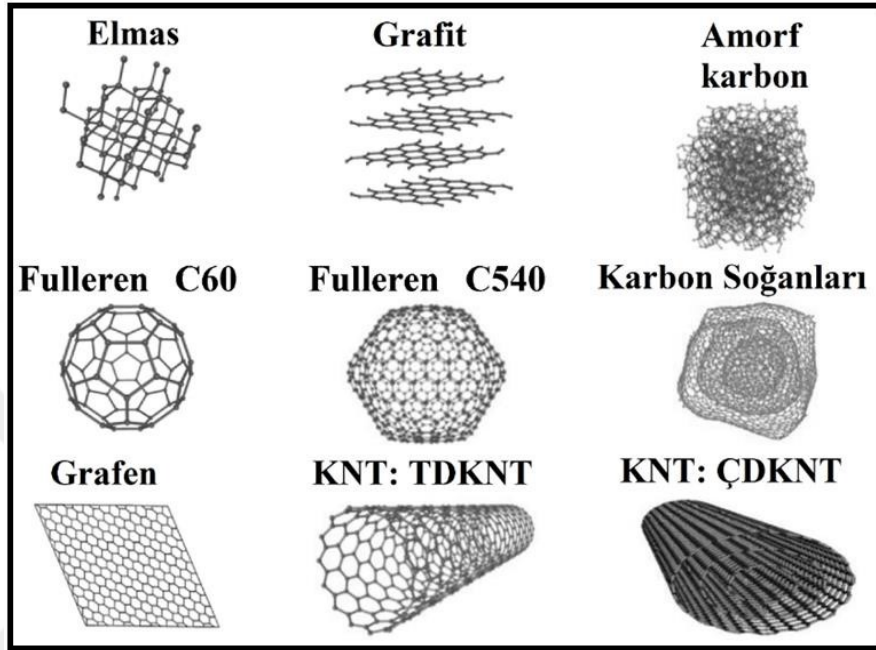
İki boyutlu grafen yapıları altıgen konfigürasyonlarda bulunan karbon atomlarından oluşmakta ve grafit ve türevlerinden üretilir. Bu karbon atomları sp^2 hibritle birbirine bağlanmıştır. [39,40]. Grafen plakaları, bu karbon atomlarının yan yana sıralanmasıyla oluşmaktadır. Grafen plakasına bakıldığında, her bir karbon atomunun kendi içinde diğer üç karbon atomuyla bağlanmıştır. Bu bağlantılar plaka içerisinde yer alarak ve aralarında eşit 120° açı olacak şekildedirler. Böylelikle karbon atomlarını düzenli altıgenlerden oluşan bir ağ yapısı oluşturur. Böylece grafen plakasının en ideal durumu olarak söylenmektedir. Karbon-karbon bağlantısının mesafesi yaklaşık 0,142 nanometre mesafelerde olduğu çalışmalarda gösterilmiştir [42,43].

Şekil 2.14 'de grafenin bağ yapısı ve şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.14: Grafenin bağ yapısı [41].

Sıfır boyuttan başlayarak bir iki ve üç boyutlu karbon nanomalzemeler Şekil 2.15'te verilmiştir [44].



Şekil 2.15: Nano seviyedeki ana karbon çeşitleri [44].

Geçmişten günümüze polimer malzeme özelliklerinin geliştirilmesi ve uygulanabilirliği için polimer nanokompozitlerin hem üretimi hem de uygulamalarına istinaden endüstriyel ve akademik olarak araştırmalar gerçekleştirilmiştir [45]. Sonuçta, karbon esaslı nano parçacık içeren malzemelerde karbon ve grafen gibi polimer nanokompozitlerin hazırlanmasında önem arz etmektedir [46-55]. Ayrıca bu nano malzemelerin kendilerine göre mekanik mukavemet, elektrik iletkenlik ve termal kararlı olması gibi özellikleri de vardır.

Karbon nanotüplerin kullanımında var olan birkaç dezavantajdan ötürü karbon nanotüpleri ile takviyen edilmiş polimer nanoyapıların üretimini olumsuz etkilemiştir. Bu dezavantajlardan birkaçı üretim esnasında nanotüplerin birbirleriyle yapışmaya eğiliminde olması, erişim kısıtlamaları ve maliyetli olmalarıdır. Bu nedenle grafen malzemesinin doğada çok bulunması sebebi ve sahip olduğu üstün mekanik ve termal özelliklerinde ötürü karbon nanotüplerin yerine tercih edilmektedir [56]. Malzemelerin sahip olduğu üstün özelliklerden ötürü başta sensörler, enerjiyi depolama kaynakları ve çeşitli alanlarda kullanımı ciddi oranlarda artmaktadır [56].

Grafen birkaç farklı yöntemle hazırlanmaktadır [60-63]. Bunlar;

1. Mekanik Peeling (Kimyasal olmayan yöntem): Yapışkan bant kullanımı ile grafit mikro mekanik bölünmesi soyma işlemi de denmektedir. Bu şekilde tek atom kalınlığına sahip grafen tabakaları elde edilmektedir. Genel olarak mikroskobik ölçekte üretim için yapılmaktadır.
2. Kimyasal buhar biriktirmesi yöntemi (Chemical Vapor Deposition – CVD): Bu yöntemle karbon atomlarının bir alt tabakaya kimyasal olarak çökeltilerek grafen tabakalarının büyütülmesi sağlanır. Büyük ölçekte grafen üretimi için kullanılan yaygın yöntemlerdendir.
3. Kimyasal Redüksiyon (Chemical Reduction): Grafen oksit veya grafen türevlerinden grafen üretimini sağlamak için kimyasal redüksiyon yöntemi kullanılır. Grafen oksitin kimyasal olarak azaltılmasıyla saf olarak grafenin elde edilmesinin sağlar.
4. Kimyasal Exfoliation (Kimyasal Soyma): Bu yöntemle grafit ,grafen oksit gibi malzemelerden kimyasal işlemlerle ayrılması sağlanır.
5. Elektrokimyasal Delaminasyon: Bir elektrik akımı vasıtasıyla grafen tabakaları ayrılır. Mikro ve nano ölçekteki grafen tabakalarının üretimi için tercih edilmektedir.

Genellikle yukarda bahsedilen bu yöntemlerle grafen üretimini sağlamak verimsizdir. Son zamanlarda grafen imalatı için uygun ve verimli yöntem olan Hummer yöntemi olarak bilinmektedir. Bu yöntem doğal grafit oksidasyonunu içermektedir [64,65].

Son yıllarda yapılan araştırmaların sonucuna göre grafenin üretiminde kullanılan hammaddeye göre değişmektedir. Bunlar;

1-Doğal grafitten grafenin üretimi

2-Grafit oksitten grafenin üretimi

Ayrıca araştırmacılar tarafından grafit oksit sıklıkla tercih edilmektedir. Grafit oksit plakalarının yüzeylerinde var olan polar gruplarının ultrason dalgalarıyla kolayca çözelti içerisinde dağıtılıyor olmasından tercih edilmektedir. Bilindiği gibi grafit oksit elektriksel olarak yalıtkan bir malzemedir. Bu durumda iletken malzeme eldesi için oranının düşürülmesi gerekmektedir [66- 68].

2.4 Nano Kompozit Malzeme Tanımı

Nanopartikül, 1 ile 100 nm arasında boyuta sahip partikülleri içerir. Bu atom düzeyinde parçacıklar boyutlarından dolayı farklı özelliklere sahiptir. Nanopartiküllerin özelliklerindeki bu değişiklik birçok alanda kullanıma elverişlidir [69].

Nanopartiküller, metal nanopartiküller, metal olmayan seramik nanopartiküller, yarı iletken nanopartiküller ve oldukça bilinen bir türü de karbon nanopartiküller olarak sınıflandırılabilir. Nanopartikülleri dökme malzemelerden çok farklı kılan kimyasal ve fiziksel özellikleri, küçük boyutları ve büyük yüzey/hacim oranlarıdır. Elektrik, optik, manyetizma, seramik ve kataliz gibi birçok alanda potansiyeli kullanımları sebebiyle oldukça ilgi görmektedirler [69].

Nanokompozitler farklı alan mühendislik malzemeleri sınırlamasının üstesinden gelmek için yararlı alternatifler sağlamak adına nanokompozit üretimi sağlamıştır. Bu kompozitler bir fazın nanopartiküller, nanotüpler veya katmanlı nanoyapı gibi nano ölçekli morfolojiye sahip olduğu kompozitlerdir. Çok fazlıdır, bu sebeple en azından fazların boyutları 10–100 nm aralığında olmalıdır. Nanokompozitler, dağılmış matriksleri ve dağılmış faz malzemeleri temelinde iki grupta sınıflandırılabilir. Hızla genişleyen bu alanın yardımıyla, yenilikçi sentetik yaklaşımlarla yeni özelliklere sahip birçok heyecan verici yeni malzeme üretmek mümkün olmuştur [69].

Nanokompozitler, nanometrik ölçekte inorganik katı maddelerle (kilden oksitlere) polimerlerin karışımları ile üretilen heterojen/hibrit malzemelerdir. Yapılarının mikro kompozitlerden daha karmaşık olduğu bulunmuştur. Bireysel özelliklerinin yapısı, bileşimi, arayüz etkileşimleri ve bileşenlerinden oldukça etkilenirler. En popüler olanı, nanokompozitler, biyopolimer ve inorganik matrisin in situ büyümesi ve polimerizasyonu içindeki süreçle hazırlanır. Bu çarpıcı potansiyel olarak gelişmiş malzemelerin hızlı tahmini talebi ile, onları küçük ölçekten büyüğe ve çok büyük üretim birimlerine kadar değişen çeşitli endüstrilerde çok kullanışlı hale getirir. Çevre dostu olan insanlık için büyük bir miktar olan bu ürünler, otomobil, inşaat, elektronik ve elektrik, gıda paketlenme ve teknoloji transferi gibi çeşitli endüstriyel sektörlere gelişmiş iş fırsatlarının yanı sıra gelişmiş teknolojiler sunar [69].

2.5 Hibrit Kompozit Malzeme Tanımı

Hibrit kompozit malzemeler, en az iki takviye elemanının bir matris içinde birleştirilmesiyle üretilen malzemelerdir. Araştırmacılar tarafından hibrit kompozitlerin farklı tanımları da vardır. Bir kısım araştırmacı hibrit kompozitleri farklı matrislerin karışımına dahil edilen bir takviye malzemesi olarak açıklamıştır. Öte yandan, diğer araştırmacılar, bu kompozitlerin tek bir matriste bulunan iki veya daha fazla takviye ve dolgu malzemesine dahil edilen bir takviye malzemesi olduğunu açıklamıştır. Hibrit kompozitler, diğer elyaf destekli kompozitlerden daha gelişmiştir ve daha geniş bir potansiyel uygulama yelpazesine sahiptir [70].

Kompozitin taleplere karşı tepki verme şeklini, bileşenlerin morfolojisi, doğası ve yönelimi, önemli ölçüde etkiler. Aslında, kompozitin özellikleri, kompozitin bileşen elemanlarının karakteristik özellikleri tarafından yönetilen iç yapılarıyla bağlantılıdır. Kompozit malzemelerin mikroskobik düzeyde heterojenlik sorunu, malzemenin davranışının ölçülebildiği homojen bir küresel düzeye doğru ilerlemeyi zorlaştırmaktadır [70].

Geleneksel kompozit malzemelere göre hibrit kompozitler gelişmiş özellik ve çeşitli avantajlar sundukları için birçok mühendislik uygulamasında giderek daha fazla kullanımı tercih edilmektedir. Hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri, çok önemli olan iki ve daha fazla fazın birlikte çalıştığı fazlardan oluşur. Bu sebeple hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin daha önce bahsedildiği gibi modellenmesi, sayısal simülasyon modellerinin doğrusal bir bağlantısı kullanılarak yapılır. Bununla birlikte, hibrit kompozitlerin mekanik davranışı, bir matrisin ve takviyelerin karakterine, aynı zamanda bu bileşenler ve matris arasındaki arayüzün özelliklerine de bağlıdır [70].

Havacılık endüstrisinde, hibrit kompozit malzemeler büyük yorulma ve korozyon direnci ve mükemmel darbe direnci gibi çok çeşitli faydalara sahiptir. En önemli avantajı %20-50 aralığında tasarruf sağlayabileceği ağırlık azaltmasıdır. Ayrıca, mekanik özellikler, takviye kumaşının kalınlıkları inceltirilerek ve yön değiştirilerek "yerleştirme" tasarımı ile özelleştirilebilir [71].

Genellikle havacılık, denizcilik ve rekreasyon yapılarındaki birincil yapılar için bir hibrit kompozit kullanılabilir.

3. POLİMER NANOKOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Son yıllarda çok sayıda kompozit üretim süreci geliştirilmiştir: vakumlu torba/otoklav kalıplama, rotasyonel kalıplama, reçine transfer kalıplama (RTM), temaslı kalıplama, sıkıştırılmalı kalıplama, bant sarma, filament sarma, pultrüzyon vb. Tüm bu süreçlerin birkaç ortak özelliği vardır; takviyeler bir alet veya kalıp içinde gerekli şekle getirilir, reçine ve lifler reçineyi sertleştirmek için muhtemelen yüksek sıcaklık ve basınç altında bir araya getirilir ve reçine sertleştikten sonra kalıp parçadan sıyrılır [72].

Farklı kompozit üretim teknikleri, kalıplama noktasında bir araya getirilen ayrı lifleri ve reçineyi kullanan doğrudan işlemler (ör. RTM, pultrüzyon, temaslı kalıplama) veya reçine ile önceden emdirilmiş lifleri kullanan dolaylı işlemler (ör. vakum torbası/otoklav kalıplama, sıkıştırılmalı kalıplama). İmalat işleminin seçimi, doğal olarak, bileşenin kalitesi, mekanik özellikleri ve üretim maliyeti üzerinde büyük bir etkiye sahip olacaktır [72].

Polimer kompozit üretiminde ideal bir süreç şu şekilde tanımlanabilir:

- Yüksek Verimlilik-kısa döngü süreleri, düşük işçilik içeriği,
- Minimum malzeme maliyeti-düşük katma değerli malzemeler,
- Düşük malzeme depolama ve işleme maliyeti,
- Maksimum geometrik esneklik-şekil karmaşıklığı ve bileşenin boyutu,
- Maksimum özellik esnekliği-matris aralığı,
- Takviye türleri aralığı,
- Mekanik özellikleri kontrol etme ve özelleştirme özellikleri,

- Minimum bitirme gereksinimleri-net şekil imalatı,
- Güvenilir ve yüksek kaliteli üretim-düşük ret oranları, düşük değişkenlik vb.

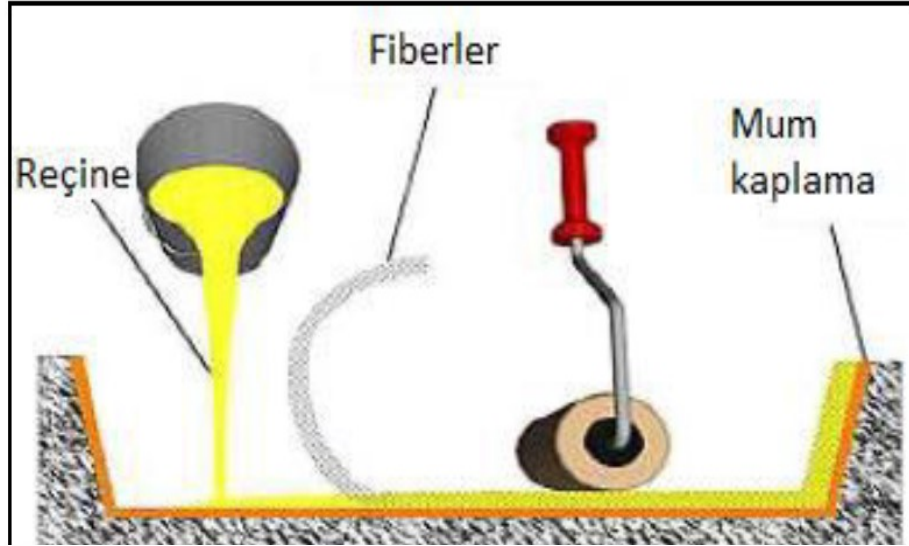
Bütün bu özellikler biranda sağlamak imkânsız olabilir fakat kullanım alanlarına göre ihtiyaç olan özelliklerin arttırılması yönündedir. Kompozitlerin en çok kullanılan üretim yöntemleri aşağıda verilenlerdir [72].

3.1 El Yatırması

Elle yatırma işlemi elyaf takviyeli termoset kompozitleri bir kalıp içinde el ile veya elle kullanılan aletlerle üretilen yöntemdir. En eski ve geleneksel yöntemdir. Aynı zamanda en basit ve en kolay yöntemdir diyebiliriz. Üretimde önce kalıbın iç yüzeyine jelkot sürülür. Ardından elyaflar kalıp içine elle yatırıldıktan sonra bir rulo yardımı ile reçine elyaflara emdirilir. Bu manuel yuvarlama hareketi hapsolan havayı çıkarıp kumaşın her yerinin ıslanmasını sağlar ve kompoziti yoğunlaştırır. Sisteminin sertleşmesini başlatmak için bir katalizör kullanıp ürün haricinde ısı olmadan kurutulabilir [72,73].

Bu yöntemde başlangıç için düşük maliyetli olması, kolay üretime elverişli olması ve büyük parçaların üretilmesini sağlaması sistemi tercih etmek için en önemli artılarıdır. Düşük tekrarlanabilirlik ve kimyasal reaksiyonların sonucunda ortama verilen zararlı gazlar insan sağlığına vermiş olduğu tehlikelerden dolayı sistemin dezavantajlarındandır. Yöntem başta denizcilik alanında olmak üzere daha büyük yapıların düşük hacimli üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [74].

Şekil 3.1 'de el yatırması üretim yönteminin uygulama aşaması resim üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.1: El yatırması üretim yöntemi [75].

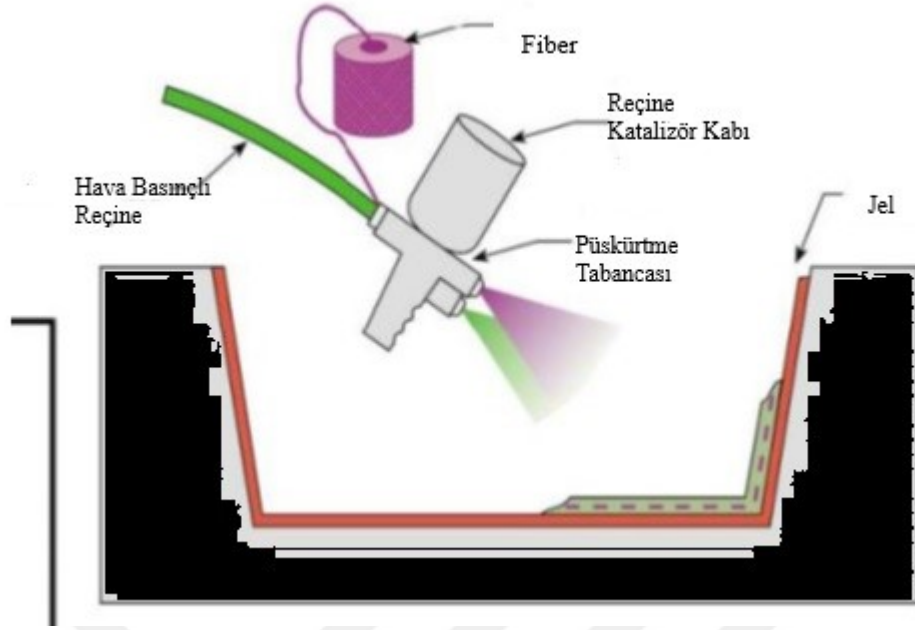
3.2 Hibrit El Yatırma Yöntemi

Yöntem el yatırması üretim yöntemlerine benzese de bazı farklı yanları mevcuttur. Ben büyük fark kalıbın üstüne geçirilen vakum torbası ve fazla olan reçinenin vakumlanması şeklindedir. Bu yöntemde üretilen kompozit yapıların diğer yönteme göre elyaf hacim oranları daha fazla olması ve boşluk oranının ise daha düşük olması diyebiliriz. Bu yöntemde iş gücü maliyeti dezavantaj olarak söylenebilir [75,76].

3.3 Püskürtme Yöntemi

Bu yöntem el yatırması yöntemine benzer el yatırma yönteminin makinalaşmış hali diyebiliriz. Doğranmış elyafları oda sıcaklığında kürleme reçinelerini düşük maliyetli bir açık kalıp üzerinde biriktirerek doğrayıcı tabancası kullanılmaktadır. Püskürtme (doğrayıcı) tabancası aracılığıyla hem elyaf hem de reçine karışımı kalıba püskürtülerek kalıbın şeklini alması sağlanarak gerçekleştirilir. Bu yöntemde malzeme israfını azaltmak için püskürtme işlemi dik olarak gerçekleştirilmelidir. Daha sonra, elle yerleştirmede yapıldığı gibi, sıkışan gazı uzaklaştırmak için manuel rulolama kullanılır. Bu yöntemle daha hızlı üretim sağlanır. Ayrıca daha fazla ürün elde edilir. Genel olarak kullanım alanları kayıklar, çeşitli küvetler ve yüzme havuzlarda iç yüzeyleri püskürtme yöntemle kaplanması gerçekleştirilir [75].

Şekil 3.2' de püskürtme yöntemin uygulama aşamasına ait görüntü verilmiştir.

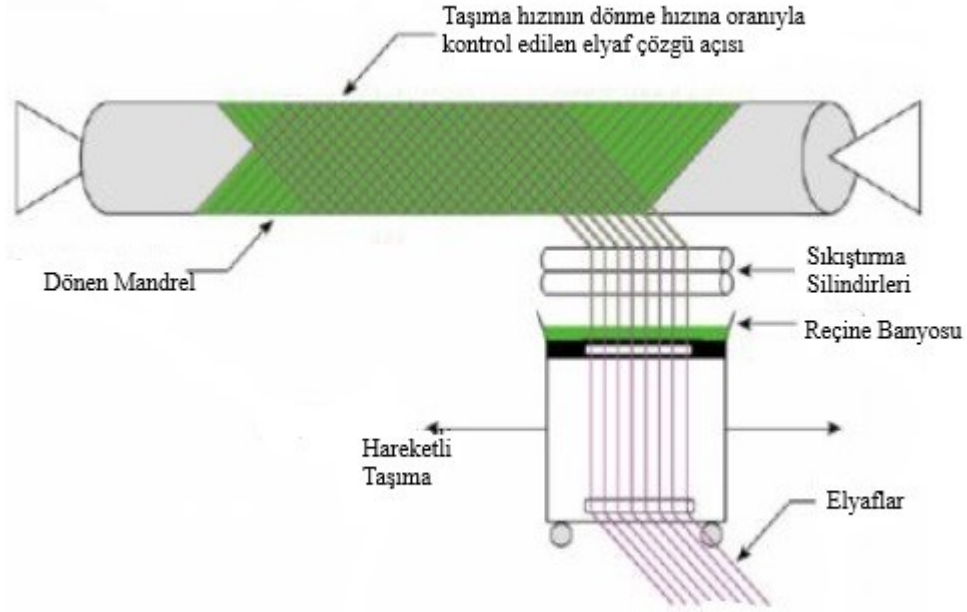


Şekil 3.2: Püskürtme yöntemi [75].

3.4 Elyaf Sarma Üretim Yöntemi

Bu yöntemle sürekli elyaf liflerinin reçine banyosunda ısıtıldıktan sonra reçine emdirilmiş lifler dönmekte olan bir makaradan geçirilerek bir kalıp üzerine belirlenmiş geometrik desenle sarılmasından ibarettir. Bu yöntemle genellikle; yüksek derecede yapısal bütünlüğe sahip silindirik ve basınçlı kaplar, tanklar, borular, güç iletim şaftları bu yöntemle üretilmeleri gerçekleştirilir. Yüksek kalitede ve mukavemette ürün elde etmek için bu metot tercih edilmektedir. Bu işlemde birçok elyaf/reçine sistemi kullanılabilir [75].

Şekil 3.3 'de elyaf sarma yöntemine ait uygulama aşaması gösterilmiştir.

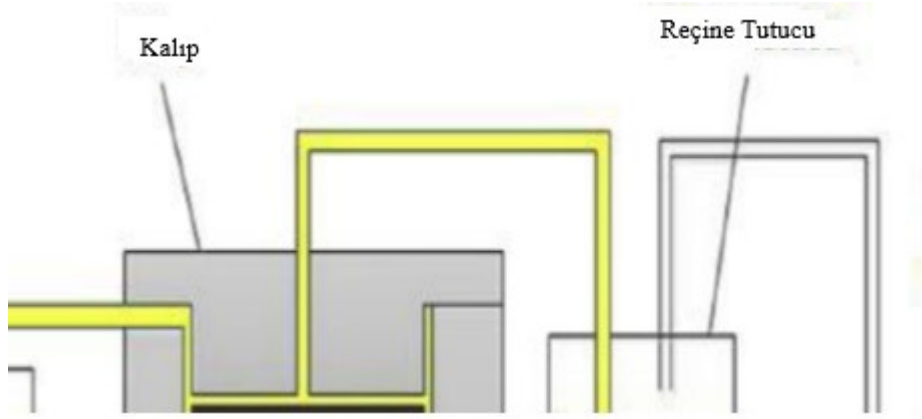


Şekil 3.3: Sarma yöntemi [74].

Yöntemin avantajları, çok hızlı bir yöntem olması, reçine içeriğinin kontrol edilmesi, mukavemetli tabakalara yüksek ağırlık vermesi, yüksek elyaf ağırlık yüzdeleri elde edebilmesi ve yönlü mukavemet özellikleri veren kontrollü elyaf oryantasyonu sağlayabilmesidir. Dezavantajları, şeklin dairesel ve oval ürünlerle sınırlı olması, mandrelin pahalı olabilmesi ve bazı uygulamalarda aerodinamiği etkileyebilecek zayıf dış yüzey kaplamasıdır (bu nedenle ekstra bir bitirme işlemi, dış yüzeyin işlenmesi/zımparalanması gerekir). Örnek olarak yelkenli tekne direkleri, uçak gövdeleri, tanklar, kimyasal depolama tankları, gaz ve basınç silindirleri verilebilir [73,75].

3.5 Reçine Transfer Kalıplama

Reçine transfer kalıplama üretim yöntemi kompozitlerin her iki tarafında da üstün yüzey pürüzlülüğü kalitesi sahip olması istenildiğinde kullanılır. Genellikle büyük çaptaki kompozit parçaları hızlı ve kısa sürede üretmek için uygun yöntemdir [77].



Şekil 3.4: Reçine transfer kalıplama üretim yöntemi [77].

Şekile gösterildiği gibi bu yöntemle erkek ve dişi olarak iki rijit kalıp kullanılır. Reçine transfer kalıplama yönteminde reçine enjeksiyon kanallarından uygulanan basınç sayesinde kalıp içerisine gönderilir. Bu yöntemde enjeksiyon kanallı yüksek basınçlı pres sistemine ve ısıtılmış iki ayrı kalıpla ihtiyaç vardır. Avantajları arasında, üstün yüzey kalitesi, yüksek boyut toleransları ve stabilite, yüksek üretim oranları, yüksek tekrarlanabilirlik ve parçadan parçaya en düşük değişkenlik bulunur. Dezavantajları ise, yöntem için boyutsal olarak hassas işleme takımları gerektiği için daha uzun süreleri ve daha yüksek takım maliyetleri içerir [76].

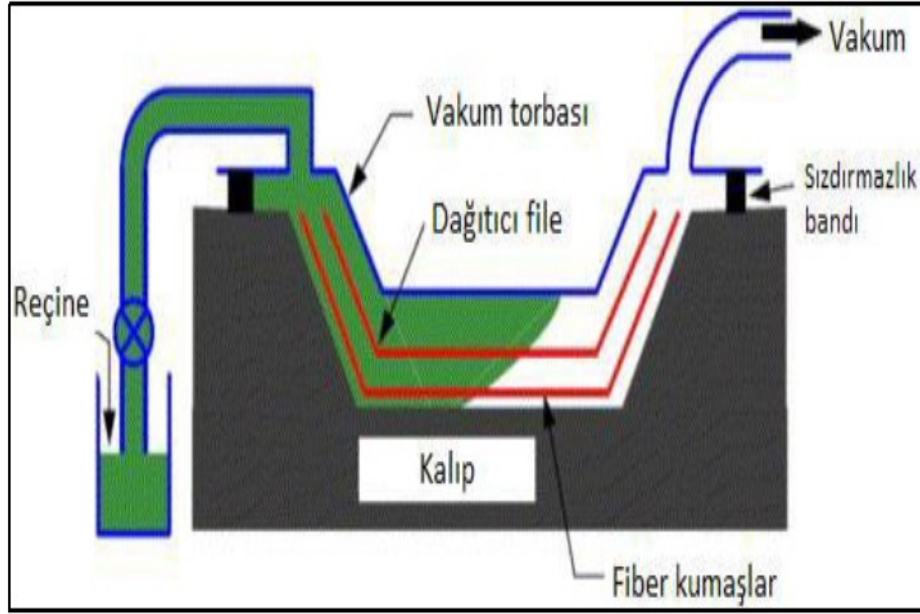
3.6 Vakum İnfüzyon Yöntemi

Vakumlu infüzyon işlemi, reçineyi bir tabakaya sürmek için vakum basıncını kullanan bir üretim yöntemidir. Vakum infüzyon yönteminden esinlenerek tasarlanmıştır [78].

Üretim yönteminde ilk olarak kuru malzemeler kalıbın içine yerleştirilir ve kuru takviye üzerine delikli bir ayırma filmi yerleştirilir. Reçine uygulanmadan önce vakum uygulanır ve kuru malzemeler sıkıştırılır. Tam bir vakum elde edildiğinde, reçine kuru malzemelere dikkatlice yerleştirilmiş tüpler aracılığıyla gönderilir. Reçine, kalıbı reçine tuzağına ve vakum pompasına bağlayan bir çıkış tüpünün bulunduğu açık kalıbın diğer ucundan akacaktır. Vakum infüzyonu, önemli emisyon azaltımları sunar. Vakum infüzyon, çok yüksek reçine-elyaf oranlarına olanak sağlar ve tabakaların mekanik özellikleri üstündür. Bu işlem, aşırı reçine kullanımı olmaksızın reçineyi eşit şekilde dağıtma kabiliyeti nedeniyle sıkça kullanılır. Bununla birlikte, bu işlemin dezavantajları, çok fazla alete ihtiyaç duyulmasıdır ve infüzyon basıncı üzerinde uygun bir kontrol

olmaksızın, azalan reçine akışı, elyaf yerleştirmenin orta kısmında reçine birikmesine neden olacaktır [79,80].

Şekil 3.5 'de vakum infüzyon yöntemi uygulama aşamasından görüntü verilmiştir.



Şekil 3.5: Vakum infüzyon yöntemi [71]

Yöntemin iki dezavantajı söz konusudur. Bunlar sıkıntılı infüzyon teknikleri sebebiyle yapıda oluşan boşluk ve ıslanamama en temel sorunudur. Avantajı ise üretimi gerçekleştirmek için az beceri gerektirmesi ve tekrarlanabilir olmasıdır [75].

3.7 Otoklavsız Prepreg

Otoklavsız prepreg üretim yöntemin en önemli avantajı üretim kullanım kolay ve tekrarlanabilir olmasıdır. Elyaf hacim oranı bakımından diğer yöntemlere göre oldukça yüksektir. Dezavantajı maliyet artışına sebep olan fırın ve buzdolabı gibi üretim ekipmanlarının olmasıdır. Bu yöntem diğer yöntemlere göre oldukça daha pahalı bir yöntemdir [75].

3.8 İmalat Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Farklı kompozit imalat yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları çizelge 3.1'de sunulmuştur [71].

Çizelge 3.1: Farklı kompozit imalat yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları [71].

Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar
El Yatırması	Basit Düşük sabit maliyetler Tek taraflı kalıp	Düşük tekrarlanabilirlik Zararlı emisyonlar Emek yoğun Kirlletici
Hibrit El Yatırması	El yatırmasına göre daha iyi fiber hacim oranı Düşürülmüş zararlı emisyonlar	Emek yoğun İlave malzeme insan gücü maliyeti
Reçine Transfer Kalıplama	Çift taraflı tolerans Hızlı üretim Tekrarlanabilirlik Boyutsal kararlılık	Yüksek yatırım giderleri Preform defarmasyonu Büyük ve karmaşık parçaların üretim zorluğu
Vakum İnfüzyon Yöntemi	Tek taraflı kalıp Tekrarlanabilirlik En iyi fiber hacim oranı	Akış öngörüsü Akış komplikasyonları, boşluklar ve ıslanmama
Otaklavsız Prepreg	İyi malzeme özelliği Tekrarlanabilirlik En iyi fiber hacim oranı	Malzeme maliyeti Sabit maliyetler Yüksek yatırım giderleri

İmalat yöntemleriyle ilgili yapılan çalışmalara bakıldığında üretim yöntemleri maliyet, üretim, malzeme ve sağlık güvenlik açısından incelendiğinde en başarılı yöntem sarasıyla Vakum infüzyon yöntemi ve hibrit el yatırması yöntemi olduğu gösterilmiştir [75].

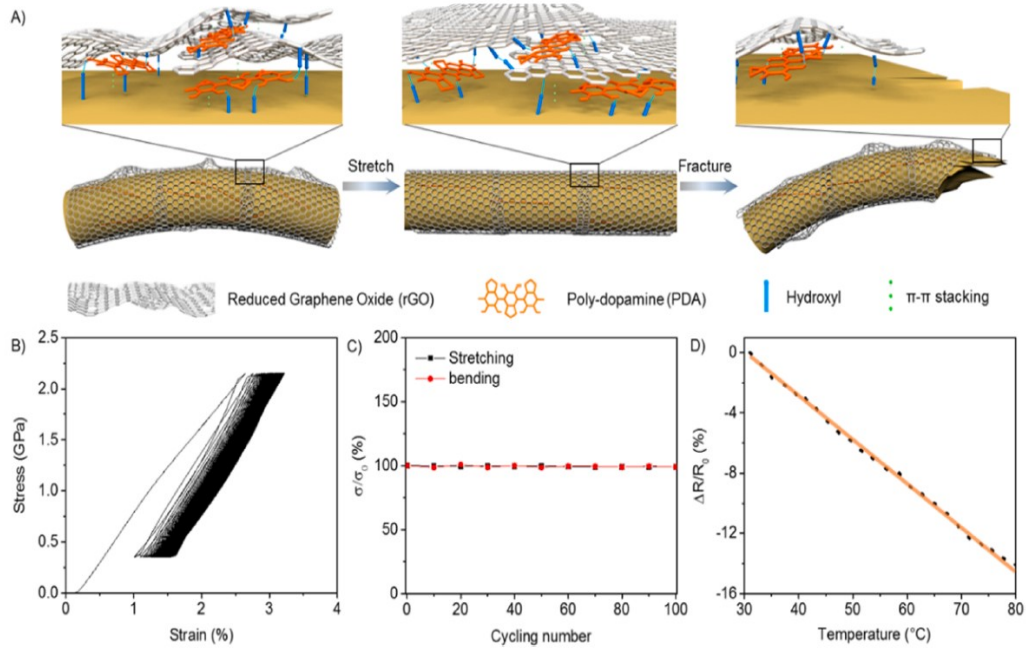
4. LİTERATÜR TARAMASI

4.1 Aramid Elyaf ve Grafen Nanokompozit Malzeme Çalışmaları

Aramid fiber ve grafen katkılı kompozit fiberlerin 'nin uygulamalarında AFRC'nin performansını iyileştirmek için çeşitli yaklaşımlar önerilmiştir. Literatüre bakıldığında yüzey plazma aşındırma, kimyasal işlemler ve grafen nanopartiküllerin EP veya PE sistemine veya AF'lerin yüzeyine yerleştirilmesi şeklindedir. EP veya PE sistemine grafen oksit (GO) ve nanoparçacıkların son derece küçük boyutu nedeniyle, EP sistemi üzerinde sertleştirme etkilerine veya takviye fazı arasında mekanik kilitlemelere neden olabildiğinden büyük ilgi görmüştür.

Literatür araştırmalarından birkaçını özetlersek;

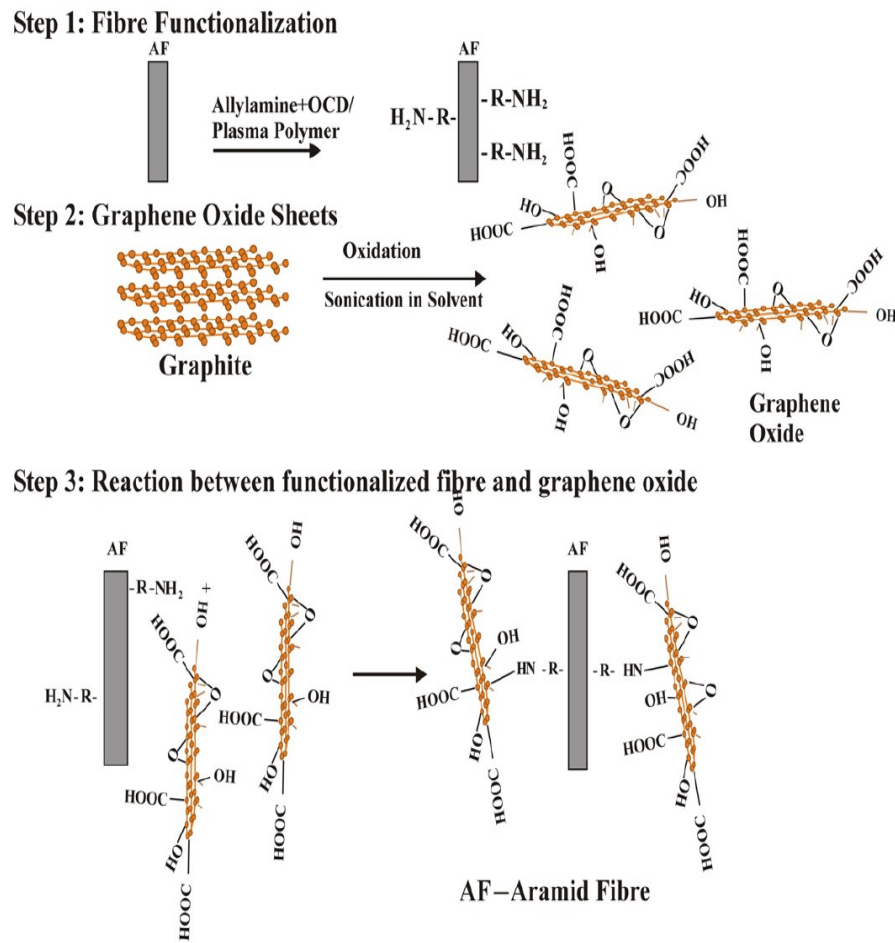
- Son yapılan araştırmalarda özellikle doğal koza ipeğin benzersiz bir kılıf yapısı sergilemesinden yola çıkarak AF'lerin yüzeyine hidrojen bağı ve π - π istifleme arayüzey etkileşimi yoluyla bağlanan ince bir grafen nano tabaka filmi ile AF'leri işlevselleştirmek için bir strateji geliştirilmiş ve etkili stres aktarımı nedeniyle içsel gerilme mukavemetlerini %20 oranında artırdığı belirtilmiştir. Bu grafen işlevli aramid elyafların gerilme mukavemeti ve tokluğu artırarak %29'luk bir gelişme göstermiştir.



Şekil 4.1: AF'lerin yüzeyine hidrojen bağı ve π - π istifleme arayüzey etkileşimi yoluyla bağlanan ince bir grafen nano tabaka filmi gösterimi ve gerilme mukavemeti gösterimi [81].

Sonuç olarak, aramid liflerinin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirildiği ve bu lifleri mükemmel elektriksel iletkenliğe sahip liflere dönüştürüldüğü görülmüştür [81].

- Baka bir çalışmada [82], elyaf yüzey iyileştirmesi olarak, aramid elyaf-grafen oksit (GO) çok ölçekli takviye elyafları, başlangıçta elyaflar üzerine bir plazmako-polimerize fonksiyonel astar kaplamanın uygulandığı ve ardından GO tek katmanlı levhaların elyafların işlevselleştirilmiş yüzeyine kimyasal olarak yapıştırıldığı bir teknikle hazırlanmıştır.



Şekil 4.2: Elyaflar üzerine plazmako-polimerize fonksiyonel astar kaplamanın uygulandığı ve ardından GO elyafların işlevselleştirilmiş yüzeyine kimyasal olarak yapıştırıldığı bir teknik [82].

Sonuç olarak, üretilen hibrit lifler, yüzey özellikleri, mukavemet ve yapışma özellikleri açısından karakterize edilmiştir. GO tek lamelli levhaların aramid elyaf

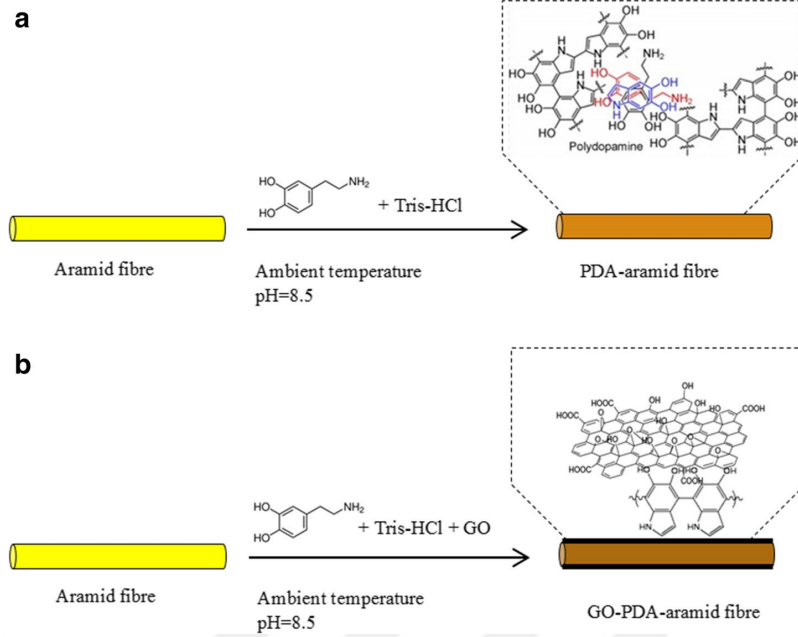
yüzeyine kimyasal olarak bağlanması, elyafın mukavemetini ve epoksi reçine ile yapışmasını arttırdığı bildirilmiştir [82].

- Bir başka çalışmada [84], grafen oksit (GO) aramid elyaf (AF)/epoksi kompozitlerin eğilme mukavemetini ve eğilme modülünü arttırmadaki takviye edici etkisi, %0,1-0,7 ağırlık fraksiyonunda GO-AF'ler ile araştırılmış.

Kompozitin eğilme mukavemeti ve eğilme modülü, sırasıyla saf epoksi reçineninkinden yaklaşık %21,19 ve %40,86 daha yüksek olan sırasıyla 87,16 MPa ve 1054,7 MPa'ya ulaşmış. Ek olarak, GO-AF'ler ile güçlendirilmiş kompozitin eğilme özellikleri ve arayüzey kesme mukavemeti (IFSS), AF'ler ile güçlendirilmiş kompozitlerden çok daha yüksek olduğu, böylelikle GO, takviye malzemesi ve matris arasındaki arayüzey bağına geliştirdiğini sonucuna varılmıştır [84].

- Başka bir çalışmada [85], kimyasal olarak inert yüksek performanslı liflerin hem yüzey modifikasyonu için hem de kompozitler için arayüz iyileştirmesi için faydalı olduğuna inanılan yeni bir yöntem sunmaktadır. Bir biyopolimer, polidopamin (PDA), pH ile indüklenen oksidatif kendi kendine polimerizasyon yoluyla fiberin yüzeyinde bir kaplama tabakası oluşturmak için uygulanmış ve fiber ile reçine arasındaki bağı güçlendirmek için karboksil, amin ve katekol gibi fonksiyonel grupları dahil eder.

Ardından, grafen oksit (GO), aramid elyafın mekanik özelliğini geliştirmek ve elyaf ile reçine arasındaki ara yüzey bağına geliştirmek için polidopamin ile muamele edilmiş ve aramid elyafın üzerine aşılacaktır.



Şekil 4.3: Grafen oksit polidopamin ile muamele edilip aramid elyafın üzerine aşılannmıştır [85].

İşlem sonrası SEM ve XPS, aramid liflerinin PDA ve GO-PDA ile başarılı bir şekilde kaplandığını fiber yüzeyinin pürüzlülüğünü arttırdı görülmüştür. XPS muamelelerden sonra, elyaf yüzey aktivasyonunu etkileyebilecek daha polar fonksiyonel grupların aramid elyafına dahil edildiğini göstermiştir.

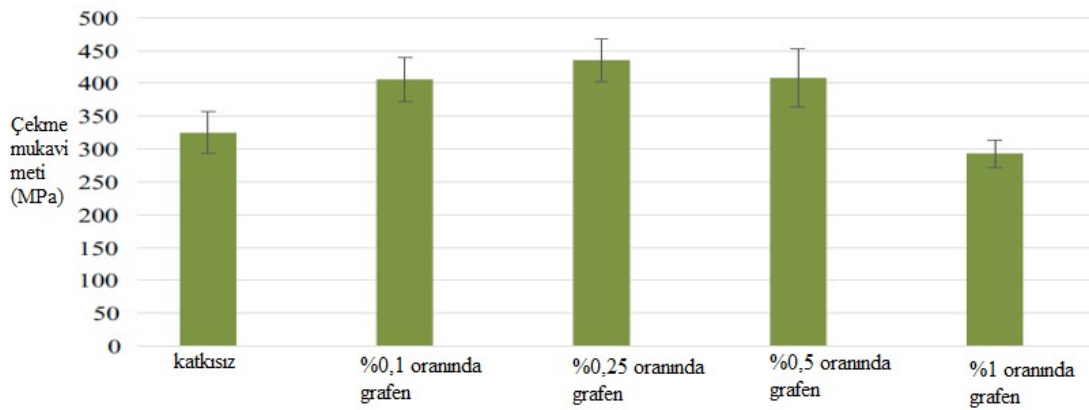
Sonuç olarak, GO-PDA-aramid elyaf kompozitlerinin arayüzey kesme mukavemeti %210 oranında iyileştirildi. GO-PDA kaplamanın kullanışlılığı, IFSS'de önemli bir artış gösterdiği bildirilmiştir [85].

- Bir başka çalışmada, grafen oksit ile grafen esaslı aramid kompozit yapıları sentezlenip mekanik ve termal özelliklerine bakılmıştır. Hazırlanan grafen oksit/aramid, indirgenmiş grafen oksit/ aramid yapıları SEM, FTIR, XRD gibi cihazlarla incelenmiştir. Uygulamada potasyum içerikli persülfat, dikromat ve permanganatın grafitin oksidasyonuna olan etkileri incelenmiştir. Grafitin oksidasyonunda en etkili potasyum permanganatın olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca grafen oksitin indirgenmesi işleminde termal yöntemin daha etkili olduğu gözlenmiş ve bildirilmiştir [86].

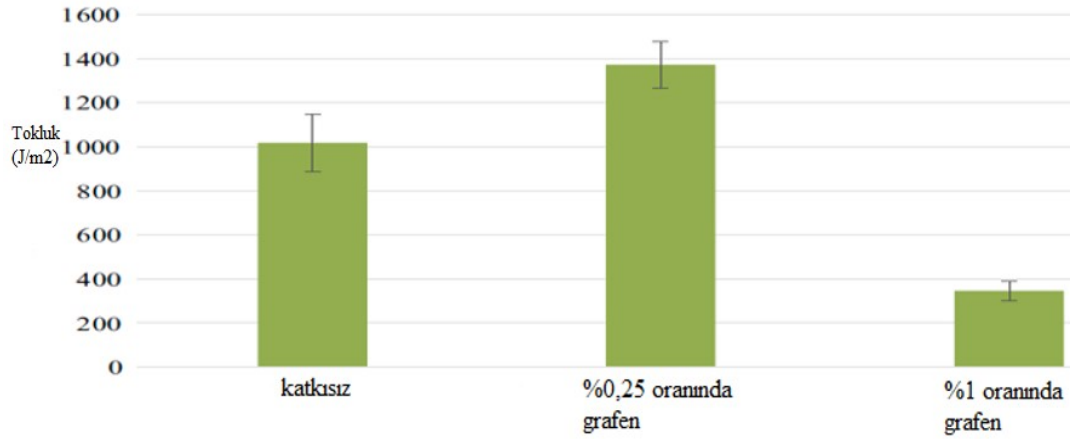
4.2 Cam Elyaf ve Grafen Nanokompozit Malzeme Çalışmaları

- Baby M ve diğerleri, Cam elyaf takviyeli kompozitlere grafen katkısı eklenerek kompozit malzemelerin hem mekanik hem de morfolojik özelliklerini incelemişlerdir. Yapılan araştırmalarda grafen eklenmesi ile mekanik özelliklerin oldukça iyileştirilebildiği ve SEM görüntüleri numune içerisinde grafenin homojen olarak dağıldığı gözlemlenmiştir [87].
- Wang X., Song, ve diğerleri grafenin cam elyaf takviyeli epoksi reçine içine ilave edilmesiyle nano yapıdaki kompozit malzemenin alevlenme ve mekanik özellikleri incelemişlerdir. Nano grafenin eklenmesiyle mekanik özelliklerin iyileştiği ve alevlenmeye dayanıklılığının arttığı görülmüştür [88].
- Nicholas.T ve diğerler çalışma arkadaşları, cam ve epoksi kompozit üzerinde nano grafenin etkisini incelemişlerdir. Vakum infüzyon yöntemiyle üretilen malzemenin farklı oranlarda %0,1 %0,25 %0,5 ve %1 ağırlık oranlarında grafenin katılmasıyla mekanik özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak grafenin %0,25 e kadar artmasıyla eğme mukavemeti ve tokluk değeri artmaktadır. Grafen oranı %0,25'ten daha fazla olduğunda bu değerlerde düzensiz olarak azalma görmüşlerdir. Bunun nedeni ise matriste boşlukların oluşması ve cam elyafın etrafında nano grafen yapının topaklanmasının sebep olabileceği belirtilmiştir. Aynı zamanda bu boşluklar elyaf ile matris arasında yapışkanlığı azalttığını ve bu durumdan kompozitin yapının olumsuz etkilendiği bildirmişlerdir.

Şekil 4.1 ve 4.2'de %0,25 oranının, katkısız numune göre kıyaslandığında eğme mukavemetinde %29 ve toklukta %25,5 artmakta olduğunu bildirmişlerdir [89].



Şekil 4.4: Numunelerin maksimum değerdeki çekme mukavemeti [89].



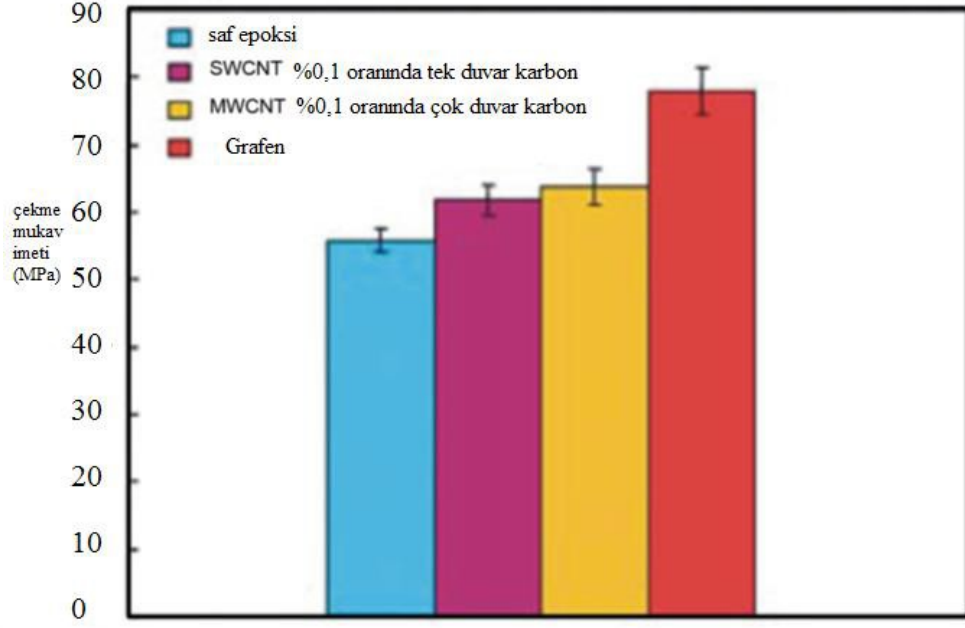
Şekil 4.5: Numunelerin kırılma tokluk değerleri [89].

4.3 Polimer-Grafen Nanokompozit Malzeme Çalışmaları

4.3.1 Polimer-grafen nanokompozitlerin mekaniksel özellikleri

- Grafen katkı malzemesiyle takviye edilmiş polimer kompozitlerin mekaniksel özellikleri üzerinde gerçekleştirilen çalışmalardan yola çıkarak grafen oranının %3'e kadar artmasıyla kompozitin özelliklerinin iyileştirdiği görülmüştür [90,91].
- Araştırmaların sonuçlarından yola çıkarak epoksi matris malzemesi içerisine grafen plakalar ve grafit nano plakalarının eklenmesiyle çatlakların ilerlemesinin önlendiği bildirilmiştir [88, 89].

Şekil 4.3'te grafen tek ve çok cidarlı karbon nanotüpler ile takviye edilmiş epoksi reçinelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Grafen tek ve çok cidarlı karbon nanotüpler ile takviye edilmiş epoksi reçinelerin mekaniksel özelliklerinin karşılaştırılması [94].

Rafıee, Steurer ve diğerleri

- Rafıee, Steurer araştırmalarında elde ettikleri sonuçları grafen yapıların karbon nanotüplerden göre daha çok temas yüzeyine bağlı olmasına bağlamışlardır [92-95]. Bu araştırmacılar termal yöntem ile üretilmiş grafen yapıların kırışık olmasının yapının mekanik özelliklerinde herhangi bir olumsuz etkisi olmadığı bildirilmiştir.

5. MALZEME VE METHOD

5.1 Malzemeler

Bu çalışma içerisinde matris malzeme olarak epoksi reçine takviye edici faz olarak aramid ve cam elyaf güçlendirici olarak ise grafen katkı tabakalı hibrit kompozit malzemeler üretilmiştir.

Bu tezde kullanılan aramid ve cam fiber kumaş Dost Kimya A.Ş. aracılığıyla twill 2/2 kumaş ve benzer g/m^2 özelliklerine sahip fiberler tercih edilmiştir. Çizelge 5.1’de aramid ve cam fiber kumaşa ait malzemelerin özellikleri verilmiştir.

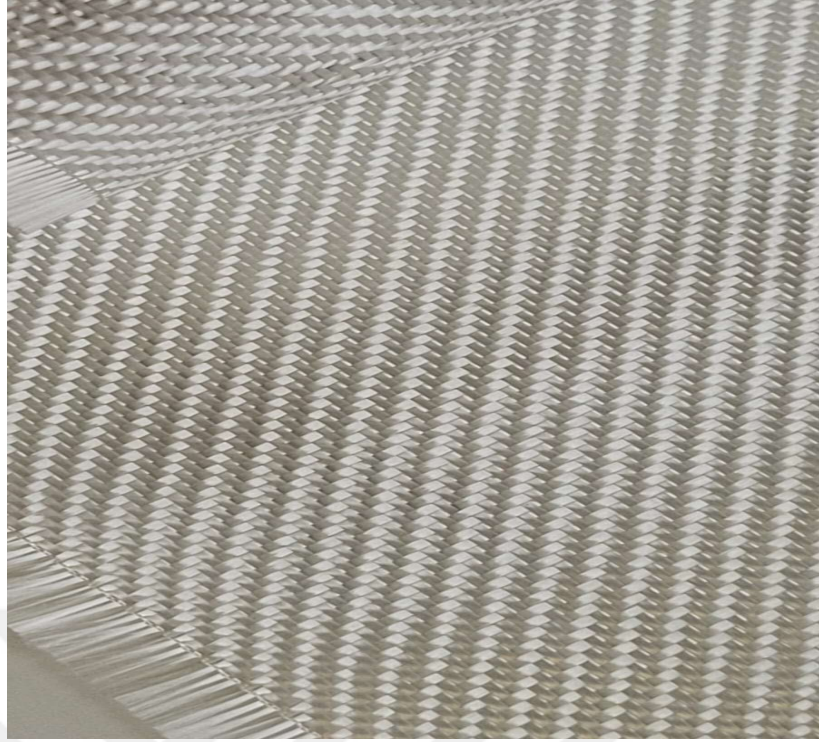
Çizelge 5.1: Dost Kimya A.Ş.’den temin edilen elyaf takviye malzemeleri özellikleri.

Kompozit Takviye Malzemesi	Tedarik Firma	Kumaş Örgü Tipi	Kütle (g/m^2)	Laminat Kalınlığı
Aramid Elyaf	Dost Kimya	twill 2/2	170	0,25
Cam Elyaf (E Glass)	Dost Kimya	twill 2/2	163	0,15

Şekil 5.1 ve şekil 5.2’de çalışma için temin edilen takviye aramid ve cam elyaf kumaş görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.1: Çalışma için temin edilen aramid elyaf kumaş görüntüsü.



Şekil 5.2: Çalışma için temin edilen cam elyaf kumaş görüntüsü.

Bu araştırmada kullanılan reçine Hexion L285 ve sertleştirici Hexion L287 Dost Kimya AŞ'den temin edilmiştir. Kullanılan epoksi malzemenin hem fiziksel hem de kimyasal özellikleri Çizelge 5.2'de, sertleştiricinin fiziksel ve kimyasal özellikleri çizelge 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3: Çalışmada Kullanılan Hexion L285 Reçine.



Şekil 5.4: Çalışmada Kullanılan Hexion L287 Sertleştirici.

Çizelge 5.2: Kullanılan Hexion L285 Reçinenin Özellikleri.

Hexion L285 Reçinenin Özellikleri	Birim Değerleri
Yoğunluk	1,18- 1,20 [g/cm ³]
Viskozite	600-900 [MPa s]
Epoksi indeksi	5,9 – 6,5 [Eq/kg]
Çekme mukavemeti	70-80 [MPa]
Elastiklik modülü	3,0-3,3 [GPa]
Eğme mukavemeti	110-120 [MPa]
Darbe mukavemeti	45-55 [kJ/m ²]

Çizelge 5.3: Kullanılan Hexion L287 Sertleştiricinin Özellikleri.

Hexion L287 Sertleştiricinin Özellikleri	Birim Değerleri
Görünüm	Berrak– sıvı
Renk	Açık mavi
Vizkozite	80-120 [MPa.s]
Yoğunluk [gr/cm ³]	0,93-0,96 [gr/cm ³]
Kürleme süresi	20-25 °C 5-6 saat
	40-45 °C 80-120 dakika

Bu çalışmada Grafen nano parçacıklar Grafen Chemical Industries Co. firmasından tedarik edilerek kullanılmıştır. Nano grafen malzemenin özellikleri çizelge 5.4'te verilmiştir.

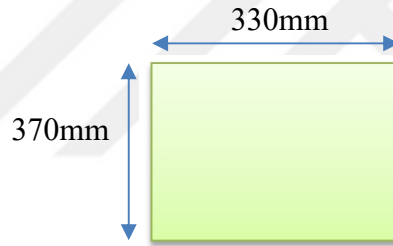
Çizelge 5.4: Endüstriyel nano plaka grafenin genel özellikleri (GRAFEN®-İGP2).

Grafenin Özellikleri	Birim Değerleri
Kalınlık [nm]	5-8---nm
Çap [μm]	5 μm
Safılık	> 99.9+%
Yüzey Alanı	120-150 m^2/g

5.2 Hesaplamalar

5.2.1 Kompozit malzeme tasarımı ve plaka hesabı

Kompozit üretiminde ilk önce 1000x1200mm boyutlarındaki aramid ve cam kumaşlardan istenilen boyutlarda elektrikli makas yardımıyla kesilerek (330x370mm) ebatlarında toplam 1 plakadan 9 eşit kare elyaf elde edilmiştir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5: Hazırlanan Elyafların Boyutsal Tasarımı (330x370mm).

Literatür araştırmalarından yola çıkarak tasarlayacağımız malzemenin üst yüzeyi 2 kat Aramid elyaf (AF) arkası Cam elyaf (GF) olacak şekilde 3 kez tekrarlanarak 9 katmanlı (AAGAAGAAG) olarak malzeme tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Toplamda çalışmada 4 farklı durumun kıyası söz konusudur. Bunlar,

1. Durum: GF/ Epoksi kompozit malzeme GGGGGGGGG 9 katmanlı %0 Grafen
2. Durum: AF/GF / Epoksi kompozit malz. AAGAAGAAG 9 katmanlı %0 Grafen
3. Durum: AF/GF / Epoksi kompozit malz. AAGAAGAAG 9 katmanlı %0,20 Grafen
4. Durum: AF/GF / Epoksi kompozit malz. AAGAAGAAG 9 katmanlı %0,25 Grafen

5.2.2. Kompozit malzeme elyaf hesabı ve malzeme hesabı

(A₁A₂G₁ A₃ A₄ G₂ A₅ A₆ G₃) şeklinde 9 katmanlı yapıyı oluşturmak için 6 adet Aramid Elyaf ve 3 Adet Cam Fiber ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum yukarıda verilen

2,3 ve 4. durum için geçerlidir. $6 \times 3 = 18$ ad. (330x370mm) AF ve $3 \times 3 = 9$ ad. GF gerekmektedir.

Ayrıca yukarda gösterilen 1. durum için de ($G_1 G_2 G_3 G_4 G_5 G_6 G_7 G_8 G_9$) 9 adet GF ihtiyaç vardır. Toplam 4 durum için GF adeti $9 + 9 = 18$ ad. (300x300mm) GF plaka ihtiyaç duyulmaktadır.

2,3 ve 4. durumlar için vakum infüzyon yöntemiyle malzeme hesabı;

- Aramid elyafın ağırlık hesaplaması; Aramid $\rightarrow 170 \text{ gr/m}^2$ kütleyle sahiptir.

Aramid elyaf malzemesi için: Alan = $0,370 \text{ m} \times 0,330 \text{ m} = 0,1221 \text{ m}^2$

$170 \text{ gr/m}^2 \times 0,1221 \text{ m}^2 = 20,75 \text{ gr} \rightarrow 1$ kat Aramid elyaf kütle miktarı

$20,75 \text{ gr} \times 6$ (6 kat aramid elyaf) = $124,54 \text{ gr} \rightarrow 6$ kat Aramid elyaf kütle miktarı

Aramid elyaf kütlesi yapılan kütle hesaplamasında 6 kat Aramid fiber kütlesi $124,54 \text{ gr}$ olarak hesaplanmıştır.

- Cam elyafın ağırlık hesaplaması; Cam $\rightarrow 163 \text{ g/m}^2$ kütleyle sahiptir.

Cam elyaf malzemesi için: Alan = $0,370 \text{ m} \times 0,330 \text{ m} = 0,1221 \text{ m}^2$

$163 \text{ gr/m}^2 \times 0,1221 \text{ m}^2 = 19,90 \text{ gr} \rightarrow 1$ kat cam elyaf kütle hesabı

$19,9 \text{ gr} \times 3$ (kat cam elyaf) = $59,70 \text{ gr} \rightarrow 3$ kat cam elyaf kütle hesabı

Cam elyaf kütlesi yapılan kütle hesap sonucunda 3 kat Cam elyaf kütlesi $59,70 \text{ gr}$ olarak hesaplanmıştır.

Σ_T Toplam Aramid Elyaf ve Cam Elyaf Kütlesi $124,54 + 59,70 = 184,24 \text{ gr}$ sadece bir vakum infüzyon yöntemi için hesaplanmıştır.

1 durum için vakum inf. Yöntemiyle elyaf malzeme hesabı;

- ($G_1 G_2 G_3 G_4 G_5 G_6 G_7 G_8 G_9$) 9 adet GF ihtiyaç söz konusudur.

Cam elyaf için: Alan = $0,370 \text{ m} \times 0,330 \text{ m} = 0,1221 \text{ m}^2$

$163 \text{ gr/m}^2 \times 0,1221 \text{ m}^2 = 19,90 \text{ gr} \rightarrow 1$ kat cam elyaf kütlesi

$19,90 \text{ gr} \times 9$ kat cam elyaf = $179,2 \text{ gr} \rightarrow 9$ kat cam elyaf kütlesi

5.2.3 Reçine hesabı

Reçine hesabında malzemenin datasheet verilerinde tavsiye edilen reçine içine eklenecek sertleştiricinin oranı belli bir orandır. Bizim malzememizde 100 gr reçineye 40 gr sertleştirici kullanılması gerektiği aldığımız malzemenin datasheet ve ürün teknik bilgisinde verilmiştir.

Çalışmamızda kullandığımız toplam reçine ve sertleştirici karışımının elyaf lar tarafından tamamen emilmesini sağlamak için toplam elyaf kütlesi kadar 50:50 alınarak hesaplanır.

Durum 2,3 ve 4 için reçine hesabı: Toplam Aramid elyaf ve cam elyaf kütlesi 184,24 gr sadece bir vakum infüzyon yöntemi için hesaplanmıştır.

Bu durumda 184,24 gr da epoksi + sertleştirici gerekmektedir. (50:50). Fakat üretim esnasında gerek vakum borusunda gerek besleme haznesinde ve kumaşlarda kalan sarf malzemeleri de göz önünde bulundurmamız gerekmektedir. Üretim esnasında herhangi bir sorunla karşılaşmamak için toplam reçine hesabımızı 1,6 ile çarparak işleme alınmıştır. $184,24 \times 1,6 = 294,78$ ortalama 300 gr reçine kullanılmıştır.

140gr	reçine ve sertleştirici 100 gr reçine
300gr	reçine ve sertleştirici X gr reçine

X= 214,28 gr reçine

140gr	reçine ve sertleştirici 40 gr sertleştirici
300gr	reçine ve sertleştirici x gr sertleştirici

X= 85,71gr sertleştirici

Üretimi gerçekleştirilen kompozit yapılarda kullanılan matris ve takviye edici fazın ağırlıkları çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.5: 2,3,4 Durum için Vakum İnfüzyon yöntemi.

2,3,4. Durum için Vakum İnfüzyon yöntemi malzeme gideri

Kullanılan Reçine Kütlesi	214,28 gr
Kullanılan Sertleştirici Kütlesi	85,71 gr

Durum 1 için reçine hesabı: Toplam 9 kat cam elyafın kütlesi 179,2 gr hesaplanmıştır.

Bu durumda 179,2 gr da epoksi + sertleştirici gerekmektedir. (50:50). Fakat üretim esnasında gerek vakum borusunda gerek besleme haznesinde ve kumaşlarda kalan sarf malzemeleri de göz önünde bulundurmamız gerekmektedir.

Üretim esnasında herhangi bir sorunla karşılaşmamak için toplam reçine hesabımızı 1,6 ile çarparak işleme alınmıştır. $179,2 \times 1,6 = 286,72$ ortalama 300 gr reçine kullanılmıştır.

140gr	reçine ve sertleştirici 100 gr reçine
300gr	reçine ve sertleştirici X gr reçine

X= 214,28 gr reçine

140gr	reçine ve sertleştirici 40 gr sertleştirici
300gr	reçine ve sertleştirici x gr sertleştirici

X= 85,71 gr sertleştirici

Üretilen gerçekleştirilen kompozit yapılarda matris ve takviye edici fazın ağırlıkları çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6: 1. Durum Vakum İnfüzyon yöntemi için.

1.Durum için Vakum İnfüzyon yöntemi malzeme gideri	
Kullanılan Reçine Kütlesi	214,28 gr
Kullanılan Sertleştirici Kütlesi	85,71 gr

5.2.4 Grafen kütle hesabı

Nanokompozitte kullanılan grafenin miktarı matris (reçine ve sertleştirici) yüzdesi olarak hesaba alınmıştır. Sadece 2 adet vakum infüzyon yönteminde grafen kullanılacaktır. Yüzdeleri %0,20 ve %0,25 şeklindedir.

%0,20 için: $1,6 \times 184,24 = 294,78$ gr ortalama 300 gr matris hesaba alınmıştır.

100gr	matris malzemedede	0,20 grafen
300gr	matris malzemedede	X gr grafen

0,60 gr grafen

%0,25 için: $1,6 \times 184,24 = 294,78$ gr ortalama 300 gr matris hesaba alınmıştır.

100gr matris malzemede 0,25 grafen

300gr matris malzemede X gr grafen

0,75gr grafen

$\Sigma_T = 1,35$ gr nano grafen toza ihtiyaç vardır.

Çizelge 5.7 ‘de grafen kullanılan 3. ve 4. Üretimler için kullanılacak olan grafen ağırlıkları verilmiştir.

Çizelge 5.7: 3 ve 4 durum için vakum infüzyon yönteminde kullanılan grafen ağırlıkları.

Numune Kodlanması	Nano grafenin ağırlıkça oranı (%)	İlave edilen grafenin ağırlığı (gr)
(AAG) + Gr20	0,20	0,60
(AAG) + Gr25	0,25	0,75

Belirlenen ebatlarda kompozit plaka üretmek için işlem öncesi elyafların ağırlığı hassas terazilerde tartılarak ne kadar epoksi reçinesi emdiği tespit edilmiştir. Vakum infüzyon yöntemi sonrası üretilen malzeme ağırlığı hassas terazide ölçülerek elyaflar tarafından ne kadar epoksi (reçine ve sertleştirici) çektiği deneysel olarak 50:50 olarak doğrulanmıştır.

5.3 Nano Kompozit Üretim Yönteminin Aşamaları

5.3.1 Kompozit Plakaların üretiminde vakum infüzyon yönteminin kullanımı

Çalışmamızda hibrit kompozit malzeme üretimini vakum infüzyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi. Bu yöntem hem daha olumlu özellikleri hem de kaliteli numuneler üretmesi sebebiyle tercih edilmiştir.

Aşağıda vakum infüzyon cihazının aşamalarını resimlerle ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

Vakum infüzyon yönteminde sistemi için 50x50 cm boyutlarda cam plaka kalıp olarak kullanılmıştır. İlk olarak cam yüzeyin aseton ile temizleme işlemi gerçekleştirilip toz kir gibi yabancı maddelerden arındırılması sağlanmıştır. Hemen arkasından malzemenin üretim sonrası yüzeyden kolay ayrılabilmesi için kalıp ayırıcı wax ile en az 3 kez olacak şekilde yüzey uygulaması yapılmıştır.

Üretilcek kompozit plaka ölçüsünden 5 cm büyük olacak şekilde cam yüzeyine sızdırmazlık bandı yerleştirilmiş ve üretim sonrası elyafların cam yüzeyinden kolay ayrılması için sızdırmazlık bandının içine peel ply kumaş ayırıcı filmi en altta yerleştirilmiştir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6: Sızdırmaz bantların cam plaka üzerine yapıştırılması ve peel ply yerleştirilmesi.

Daha sonra aramid ve cam kumaştan 370 x 330 mm boyutlarda elyaflar kesilip birbirinin üzerine yerleştirilip dokuz katmanlı olarak cam yüzey üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7: Elyaf kumaşların cam plaka üzerine serilmesi.

Elyaf lar yerleşildikten sonra peel ply kumaş ayırıcı filmi üst üste yerleştirilen 9 kat elyafın üzerine tekrardan yerleştirilmiştir. Bu kumaş serilmesindeki en temel amaç reçineyi geçirebiliyor olması ve peel ply kumaşın üzerinden kompozit plakanın kolay bir şekilde ayrılabiliyor olmasından dolayı kullanılmıştır (Şekil 5.7).

Peel ply kumaş elyaf ların hemen üzerine serilip kaymasını engellemek için bantlandıktan sonra flow mesh filesi serilmiştir. Flow mesh kullanılmasının amacı ise reçinenin daha hızlı ve kontrollü yayılmasını sağlamaktır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8: Peel ply kumaş ve flow mesh yerleşimi.

Bir sonraki işlem ise reçinenin sisteme verileceği ve geri çıkartılacağı vakum hortumları ve spiral hortumların yerleştirilmiştir. Bu hortumların sisteme giriş ve çıkışlarında etrafı hiçbir açıklık kalmayacak şekilde sızdırmazlık bandı ile bantlanmıştır (Şekil 5.8).

Tüm bu adımlar tamamlandıktan sonra tüm sistemin üzerine vakum naylonu serilmiştir. Burada reçine akışını vakum içinde daha sağlıklı gerçekleşmesi için sızdırmazlık bantlarının karşılıklı iki tarafına kulakçıklar atılıp iç hacim arttırılmıştır (Şekil 5.9). Daha sonra ise hem hortum çıkışlarının etrafı hem de kulakçıklarda sisteme dahil edilerek ilk başta peel ply kumaşın çevresinden çift taraflı olan sızdırmazlık bandı yerleştirilmiştir.



Şekil 5.9: Sisteme dahil edilen kulakçıkların yerleşimi.

Grafen katkılı matris malzemeyi sisteme aktaran hortumun bir ucu sistemin havayla temasını kesmek için hortum kelepçesi ile sıkıştırılmış diğer uç ise reçineyi sistemden çıkaracak vakum tezgahının vakum vanasına monte edilmiş ve reçinenin pompaya ulaşmasını engellemek için bir vana takılmıştır. En son olarak vakum işlemi gerçekleştirilip sistem içindeki var olan tüm havanın tamamı vakumlanmış ve sistemin düzgün çalışıp çalışmadığı kontrol edilerek test edilmiştir. Eğer sızdırma durumu varsa sızdırmanın olduğu yer belirlenerek sorun giderilip tekrar vakumlama işlemi yapılmıştır (Şekil 5.10).



Şekil 5.10: Vakum naylonu ve hortumların yerleşimi.

5.3.2 Grafen- epoksi karıştırılması

Kompozit malzemede kullanılan grafen miktarı sertleştiricisi daha sonra eklenmek üzere 214.28 gram epoksi reçineye belirlenen yüzdelerde sırası ile %0,20 ve %0,25 oranında karıştırılmıştır.

Nanografen parçacıklarını epoksi reçine içinde homojen şekilde karışımı gerçekleştirmek için ilk önce belirlenen yüzdelerde grafen reçine içerisine ilave edilip yaklaşık 30 dakika manyetik karıştırıcı ile (Şekil 5.11), hemen arkasından 30 dakika ultrasonik karıştırma cihazında karışımı gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde temel amaç grafen malzemenin topaklanmasını ve kümelenmesi gibi sorunları giderebilmek için yapılmıştır (Şekil 5.12).



Şekil 5.11: Manyetik karıştırıcıda epoksi-grafen karışımı.



Şekil 5.12: Ultra sonik karıştırma cihazında grafen-epoksi karıştırılması.

En son olarak üretim öncesi epoksi reçine ve grafen karışımı 45 dakika kadar mekanik karıştırma cihazında karıştırılmıştır (Şekil 5.13).



Şekil 5.13: Mekanik karıştırıcıda grafen-epoksi karıştırılması.

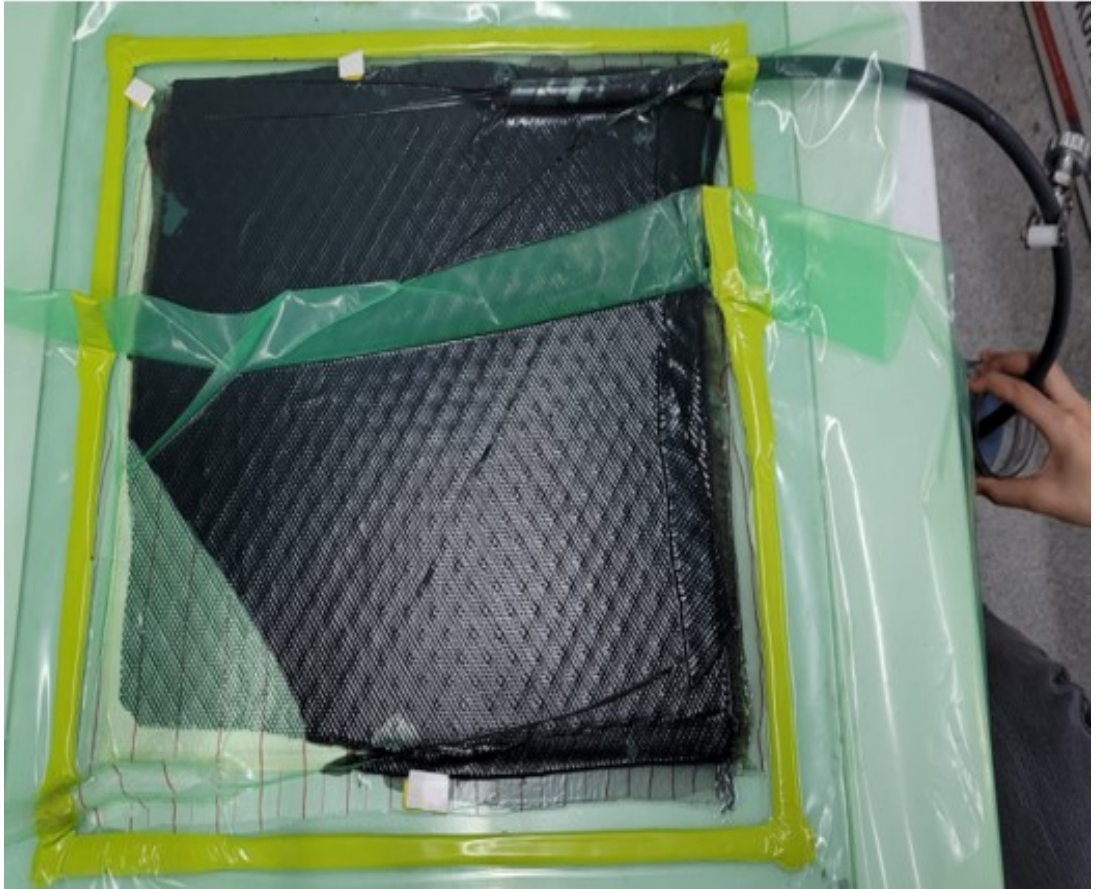
Üretime vermeden önce reçineye belirlenen oranlarda sertleştirici eklenmiştir. Reçineye sertleştiricide eklendikten sonra malzeme yaklaşık el yardımıyla 5 ila 10 dakika arasında karıştırılması gerçekleştirilmiştir.

5.3.3 Grafen ve epoksi karışımı elyaflara emilimi ve kürleşme işlemi

Vakum infüzyon üretim yönteminin sağlanmasından sonra elyaflarının, hazırlanan grafen ve epoksi reçineyle iyice doyurulması gerekmektedir. Böylelikle emme işlemi ve nano grafen reçine karışımının elyaflara tamamen nüfuz etmesi ve doyurma işlemleri yapıldıktan sonra reçinenin sertleştirici katalizörü ile kürleşmesi için reçine ve sertleştirici malzemenin üreticisinin önerdiği minimum kürleşme süresi dikkate alınıp gerçekleştirilmiştir.

Süre tamamlandıktan sonra üretilen plakaların üzerindeki ayırıcı kumaş, flow mesh ve diğer kullanılan vakum ekipman malzemeleri ayrılmıştır.

Emdirilme ve kürleşme aşamaları Şekil 5.14 'de gösterilmektedir.



Şekil 5.14: Nano grafen-reçine karışımının kalıp içine emdirilmesi.

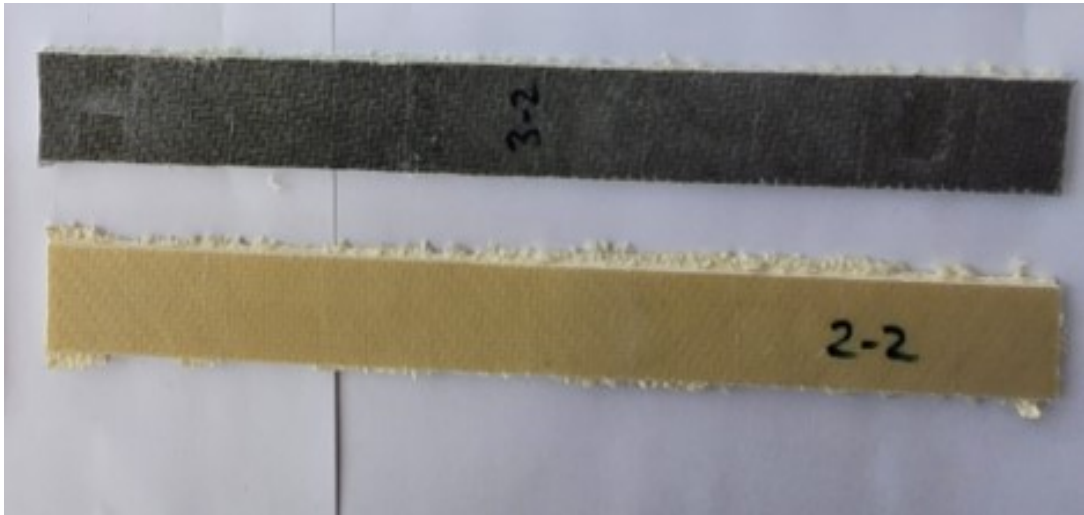
5.4 Mekanik Testler

5.4.1 Çekme deneyi

Çekme deneyi malzemelerin mukavemetini belirlemek amacıyla kullanılan deney numunelerinin tek ekseninde kopana dek çekme kuvvetlerine uğratıldığı bir malzeme testidir.

Bu test malzemeye kuvvet uygulayarak deney malzemesinin uygulanan bu kuvvete karşı göstermiş olduğu gerilme tepkisini ölçmeyi esas kılar. Malzemenin elastik/plastik şekil değişimi gösterdiği bölgelerdeki davranışları grafiksel olarak vermektedir. Genellikle bu test cihazında elastik modülü, çekme mukavemeti, çekme uzaması, kopma mukavemeti ve kopma uzaması gibi ölçümler yapılmaktadır. Çekme mukavemeti malzemenin çekme testi sırasında dayanabildiği maksimum gerilmedir. Malzemenin çekme testi sırasında ilk boyuna göre bağlı olarak uzamasına birim uzama diye adlandırılır. Sembolü “ ϵ ” ile gösterilir. Elastisite modülü (E) ise malzemenin kuvvet altında yapmış olduğu elastik şekil değiştirmesinin bir ölçüsüdür [96].

Genellikle bu testten elde edilen veriler herhangi bir uygulama için kalite kontrol, malzeme seçimi ve malzemenin diğer kuvvetler altında nasıl davranış sergileyeceği hakkında bilgi almak için kullanılır.



Şekil 5.15: ASTM D3039 çekme testi numuneleri.

Polimer matrisli kompozit malzemelerin çekme özellikleri için ASTM D3039 standart test yöntemi uygulanmıştır. Çekme cihazı çenesin numune çekme hızı ASTM D3039 için 2 mm/dakikadır. Numune eni ve boyu ise 25 mm x 250 mm'dir

(Şekil 5.15). Bursa teknik üniversitesi makine mühendisliği laboratuvarında Shimadzu AG-X Plus 250 kN universal test cihazı bulunmaktadır. Bu test cihazı 250 kN yükleme kapasitesine sahiptir. Çekme testinde kullanılacak universal test cihazının görseli şekil 5.16’ da verilmiştir.



Şekil 5.16: Çalışmada çekme deneyi uygulaması için tercih edilen Shimadzu AG-X Plus test cihazı.

5.4.2 Üç nokta eğme testi

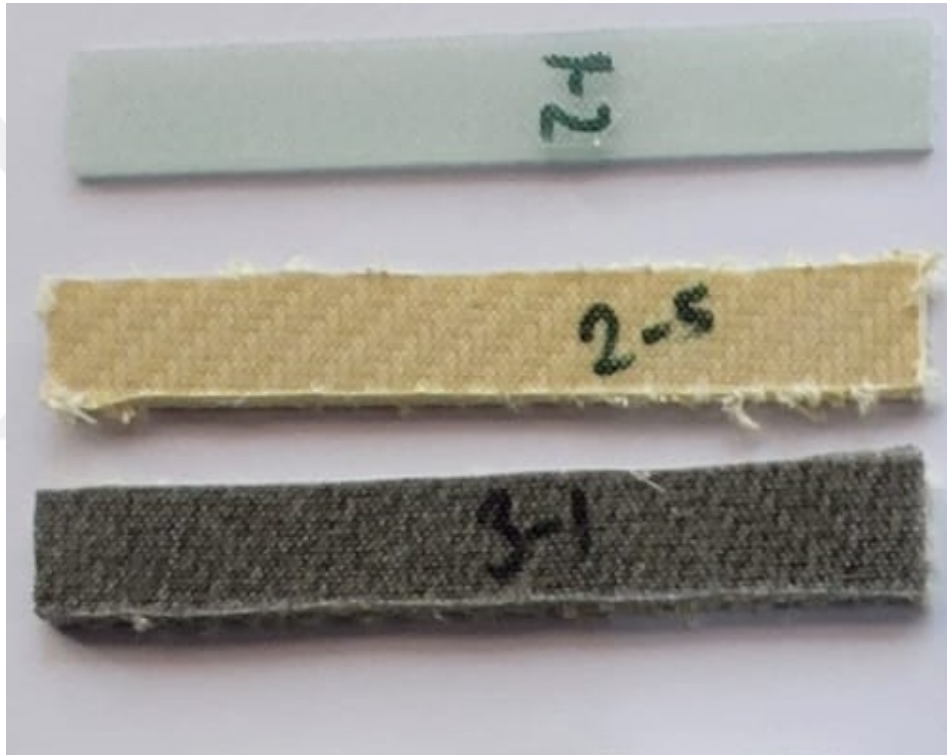
Üç nokta eğme deneyi malzemenin mukavemeti hakkında özellikle de malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini belirlemek amacı ile gerçekleştirilir. Enine yük taşıyan malzemeler eğilmelere maruz kalırlar [97].

Eğme deneyi TSE' nin TS 205 bakılacak olursa, iki desteğe serbest olarak oturtulan, genellikle daire ya da dikdörtgen kesitli düz bir deney parçasının yön

değiştirmeksizin ortasına bir kuvvet uygulandığında oluşan biçim değiştirmesi olarak tanımlanır [98].

Eğme deneyi sonucunda eğme momenti (M_e), eğilme gerilmesi (σ_e), elastisite modülü (E_e) ve sehim miktarı (δ) gibi değerler hesaplanır. Bu deney genellikle kırılğan ve gevrek malzemeler için yapılır [97].

Polimer matrisli kompozit malzemelerin eğilme özellikleri için ASTM D7264 standart test yöntemi uygulanmıştır. 3 nokta eğme cihazı problarında numune eğme hızı ASTM D7264 için 1 mm/dakikadır. Numune eni ve boyu ise 13 mm x 106 mm'dir (Şekil 5.17).



Şekil 5.17: ASTM D790 üç nokta eğme testi numuneleri.

Çalışmada 3 nokta eğme deneyi uygulaması için deney cihazı olarak bursa teknik üniversitesi polimer malzeme mühendisliği laboratuvarında ki Shimadzu test cihazı kullanılmıştır. Bu test cihazının görseli şekil 5.18' te verilmiştir.

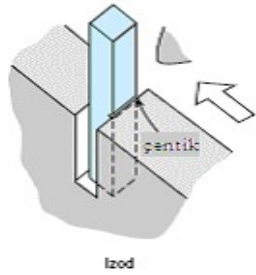


Şekil 5.18: Çalışmada 3 nokta eğme deneyi uygulaması için tercih edilen Shimadzu test cihazı.

5.4.3 Darbe testi

Malzemelerin sünek ve gevrek kırılmalarına göre uygun şartlardaki mekanik özellikleri hakkında bilgi toplamak ve numunenin kırılması için gerekli enerji miktarını belirlemek amacıyla darbe deneyi yapılır.

Charpy darbe testi kırılma sırasında bir malzeme tarafından emilen enerji miktarını belirlemek için gerçekleştirilen standartlaştırılmış bir testtir. Hazırlanması ve uygulanması kolay olduğundan ve sonuçlar hızlı elde edildiğinden sektörde yaygın olarak tercih edilmektedir. Darbe deneylerinden elde etmiş olduğumuz sonuçlar bize o numune için bir kıyaslama hükmündedir. Çekme deneyi sonuçları gibi mühendislik hesaplamalarında kullanımı söz konusu değildir [99].



Sarkacın numune ile temas haline geldiği andaki potansiyel enerji ile numune kırıldıktan sonra sarkaçta geriye kalan potansiyel enerji farkı bize o numunenin kırılması için gereken enerjii vermektedir. Birim olarak kgm ya da kgm/cm² cinsinden ifade edilmektedir. Darbe enerjisi aşağıdaki formülle belirlenmektedir [99].

$$\text{Kırılma enerjisi} = G \times (h-h_1) = G \times L \times (\cos \beta - \cos \alpha)$$

G = Sarkacın ağırlığı (kg),

L = Sarkacın ağırlık merkezinin sarkacın salınım merkezine uzaklığı (m),

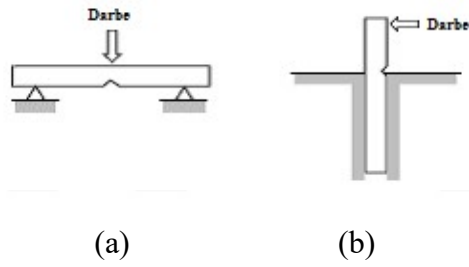
h = Sarkacın ağırlık merkezinin düşme yüksekliği (m),

h_1 = Sarkacın ağırlık merkezinin çıkış yüksekliği (m),

β = Yükseliş açısı (derece)

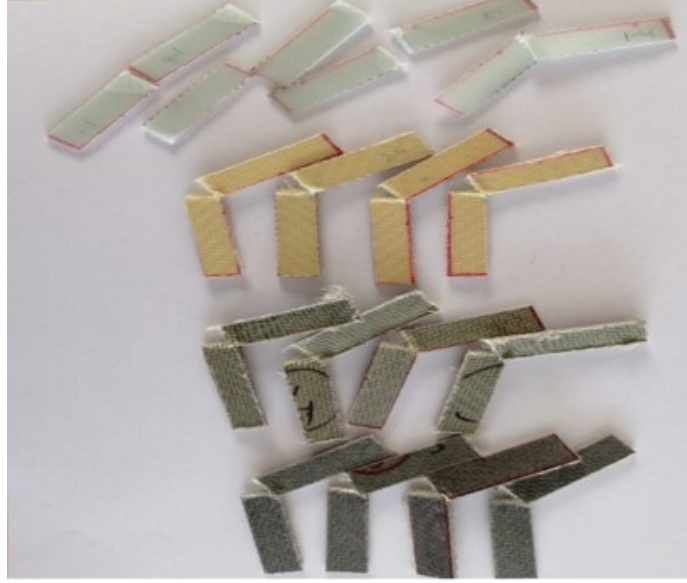
α = Çıkış açısı (derece)

Darbe testi charpy ve izod olarak iki tür yöntemi vardır (Şekil 5.19 ve Şekil 5.20). Her ikisinde de temel çalışma aynıdır. İzod ve Charpy deneyleri arasındaki fark, deney numunesinin boyutu, mesnetleniş ve yükleniş şeklidir. Charpy deney numunesi sisteme yatık olarak izod deney numunesi sisteme dik olarak darbe deney cihazına yerleştirilir [99].



Şekil 5.20: a) Charpy ve b) İzod darbe deneyinde numunenin cihaza yerleştirilme şekli.

Polimer matrisli kompozit malzemelerin darbe özellikleri için ISO 790 standart test yöntemi uygulanmıştır [100]. Numune eni ve boyu ise 10 mm x 80 mm'dir (Şekil 5.21).



Şekil 5.21: Darbe testi sonrası numuneler.

Çalışmada darbe deneyi uygulaması için deney cihazı olarak Instron CEAST 9050 test cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.22).



Şekil 5.22: Instron Ceast 9050 Darbe testi cihazı.

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1 Çekme Deneyi Sonuçları

Çekme deneyi ile hem elyaf çeşitliliğinin hem de grafen katkılı ve katkısız hibrit kompozit malzemelerin çekme davranışları incelenmiştir (Şekil 6.1). Elde edilen sonuçlar çizelge 6.1’de verilmiştir. Sonuçlara baktığımızda nano grafen katkısının artmasıyla çekme mukavemetinde artış görülmektedir fakat daha fazla nano grafenin yapıya ilave edilmesiyle çekme mukavemetinde düşüş olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.1: Çalışmada çekme deneyi uygulaması için tercih edilen Shimadzu AG-X Plus test cihazında yapılan deney esnasındaki bir numune.

Çizelge 6.1 : Çekme deneyi sonuçları.

Kompozit Tipi	Kütlece Grafen miktarı (%)	Numune Sayısı	Ortalama Çekme mukavemeti [MPa]	Ortalama Şekil değiştirme [%]	Ortalama Elastik Modülü [GPa]
G ₉	0	5	330±3	2,235±0,04	49±1,77
(AAG)x3	0	5	429±10,5	2,140±0,47	59±6,66
(AAG)x3	0,20	5	455±4,7	2,030±0,04	68±1,09
(AAG)x3	0,25	5	443±7,5	2,015±0,07	64±0,93

Bu çalışmada öncelikle 2 durumun kıyası söz konusudur. İlk durum iki farklı elyaf seçimi ve dizilimidir. İkinci durum ise grafen katkısının yapıya etkisi değerlendirilmiştir. Literatüre baktığımızda Aramid elyaf seçiminin mukavemete olumlu etkileri olmasından ötürü tercih sebebimiz olmuştur [101]. Ayrıca aramid elyafın maliyetli olmasından ötürü katmanlar arasına maliyeti daha uygun olan cam elyaf ekleyerek maliyet düşürmek esas alınmıştır.

Çekme deneyi sonuçlarına göre, 9 katmanlı cam elyaf ile 9 katmanlı aramid/cam arasındaki sonuçları karşılaştırıldığında, grafen katkısız (AAG)x3 numunesinin çekme mukavemeti, 9 kat cam elyaftan oluşan kompozit numunesinin çekme mukavemetine göre yaklaşık %30 artış göstermiştir. Kompozitte aramid katmanların varlığının şekil değiştirmede etkisi cam elyafa göre yaklaşık %4,2 azalma şeklinde olmuştur. Cam ve Aramid katmanlı kompozit numunenin elastik modülünün ise 9 kat cam elyaf kumaş kompozite göre yaklaşık %21 arttığı tespit edilmiştir.

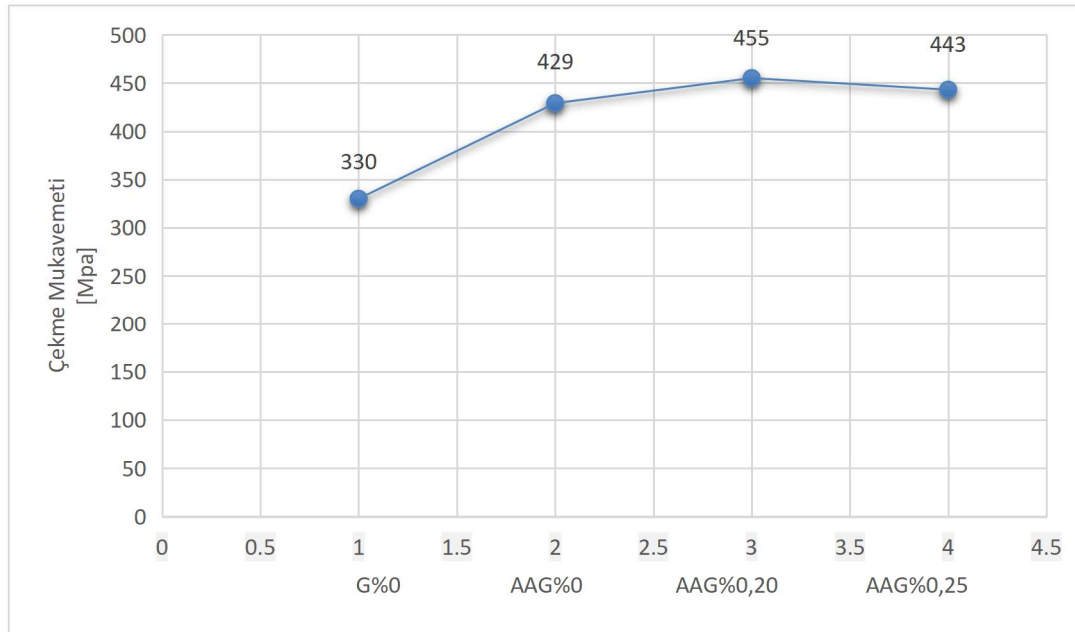
Çalışmamızda grafen kullanımı epoksi reçine ile etkileşime girerek yapışma özelliklerini artırmış ve çekme dayanımında olumlu sonuçlar göstermiştir [31]. %0,20 (AAG)x3 kompozit numunesinin çekme mukavemetinde, katkısız kompozit numunesine göre %6,1 artış görülmektedir. %0,25 nano grafen katkılı (AAG)x3 numunesinde çekme mukavemeti katkısız numuneye göre %3,3 artış göstermektedir. Grafenin miktarı %0,20'den %0,25'e artmasıyla numunelerin çekme mukavemet değerlerinde azalma görülmüştür. Bu durum literatürde bahsedildiği gibi boşluk hacim oranının artmasına bağlı olduğu düşünülmektedir. Kullanılan nano katkı grafen, matris yapı içerisinde çatlak davranış oluşumu sergileyerek hasar

oluşmasına sebep vermiş olduğu düşünülmektedir. Bunun yanında, yapı içerisinde topaklanma ve boşlukların oluşması durumunda cam elyafıla matris faz arasında yapışkanlığı düşürmekte ve bu da malzemenin mukavemetinin düşmesine sebebiyet verebilmektedir [90].

Grafenin %0,25 ağırlık oranına kadar eklenmesiyle şekil değiştirmenin oranının diğer değerlere göre sürekli bir azalış eğiliminde olduğu görülmüştür. Burada da en düşük şekil değiştirme ($2,015 \pm 0,07$) bu numunede tespit edilmiştir.

Elastiklik modülüne bakıldığında nano grafenin %0,20 ağırlık oranına kadar artmasıyla, elastik modül değerinin artırdığı görülmektedir. (AAG)x3 %0,20 grafen numunesinin elastiklik modülü katkısız numuneyle karşılaştırıldığında yaklaşık %15,5 artmıştır. (AAG)x3 %0,25 grafen katkılı numunede elastiklik modül değeri ise katkısız numuneye göre kıyaslandığında yaklaşık olarak %8,8 olarak arttığı görülmüştür. En yüksek elastiklik modülü (AAG)x3 %0,20 grafen numunesinde tespit edilmiştir.

Şekil 6.2’te numunelerin çekme deneyi çekme mukavemeti sonuçları grafik şeklinde gösterilmiştir.

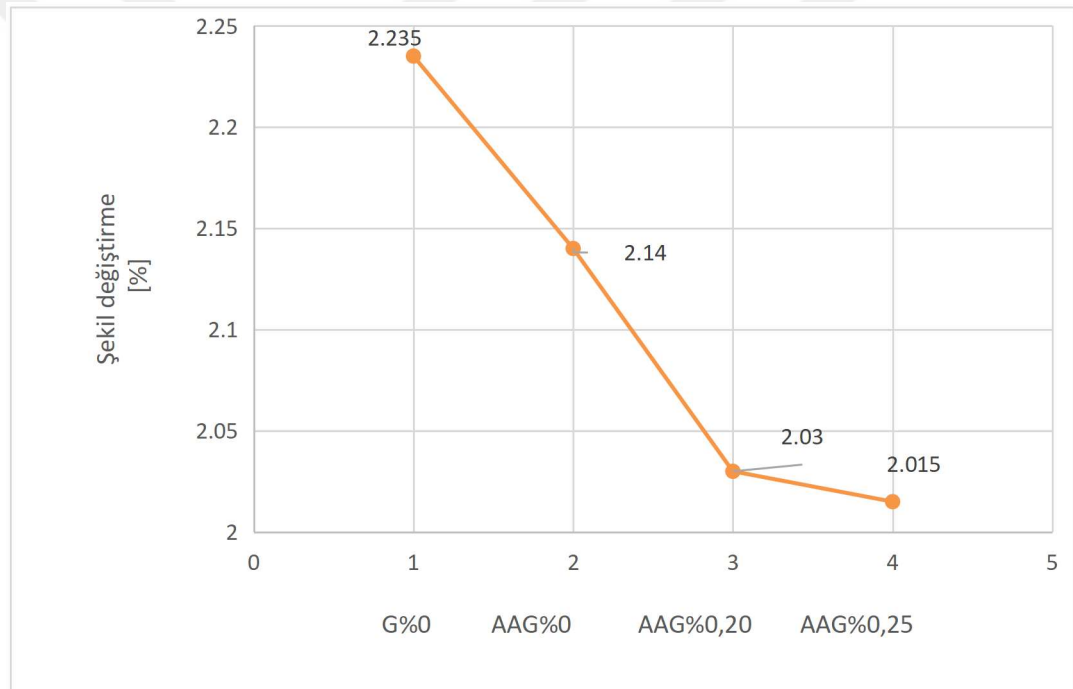


Şekil 6.2: Numunelerin çekme deneyi çekme mukavemeti grafiği.

(AAG)x3 katkısız grafen oranında farklı elyaf seçimiyle ilk durum olan 9 katmanlı cam elyafa göre çekme mukavemetinde %30 artışa sebep olmuştur. Şekilde 6.2’de görüldüğü gibi (AAG)x3 %0,20 grafen numunesinde en yüksek mukavemet değeri

(455 MPa) gözlemlenmiştir. Buradan numunede nano grafen ile matris/fiber arasında kuvvetli bağ oluşturduğu söylenebilir [31]. Mukavemetin düşüşü ise (AAG)x3 %0,25 nano grafen numunesinde grafenin artmasına bağlanmıştır. Bu durum şöyle açıklanabilir: Birinci olarak boşlukların artmasına bağlı olarak matris içinde var olan hava kabarcıklarının çatlak davranış sergilemesi ve elyaflar ile arasında olan yapışkanlığı düşürmesi mukavemetin azalma nedenlerinden biridir [90]. İkinci olarak da yüksek miktarlarda nano grafen ilavesinin yapıda topaklanma olasılığını artırmaktadır bu sebeple malzemenin mukavemetinde düşüşe sebep olduğu bilinmektedir [90].

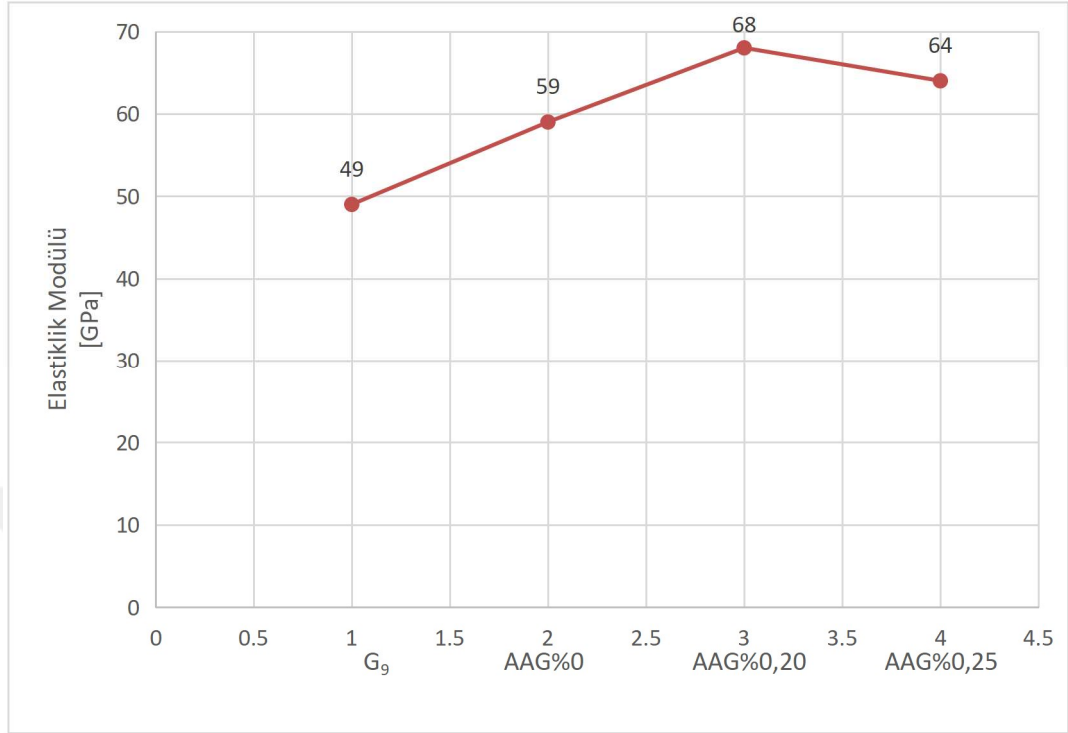
Şekil 6.3'te kompozit numunelerin çekme deneyinden elde edilen % şekil değiştirme sonuçları ve bunların grafik şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 6.3: Çekme deneyi şekil değiştirme grafiği.

Sonuçlara bakıldığında hem elyaf çeşitliği hem de nano grafen miktarının artması ile malzemede şekil değiştirme miktarının azaldığı görülmüştür. En yüksek şekil değiştirme değerleri açısından G₉ cam elyaf numunesinde ve hemen peşinden (AAG)x3 katkısız grafen numunesi gelmektedir. Fakat nanopartikülün daha fazla yapıya eklenmesiyle şekil değiştirme miktarının düştüğü görülmektedir. Bu durum malzemenin rijitliğiyle alakalı olmasıyla bağlanabilir.

Şekil 6.4'te kompozit numunelerin çekme deneyi sonrası elde edilen elastiklik modül sonuçları grafik şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 6.4: Numunelerin çekme deneyi sonrası elastiklik modülü grafiği.

Şekil 6.4'te cam elyaf numunesinin en düşük elastiklik modülüne sahip olduğu açıkça görülmektedir. Hem elyaf seçimi ve dizilimi hem de grafen ilavesiyle elastiklik modül değerlerinde artış görülmüştür. En yüksek elastiklik modül değeri (AAG)x3 %0.20 grafen numunesinde (68 GPa) görülmektedir. Diğer değerler gibi (AAG)x3 %0.25 grafen numunesinde elastiklik modül değerinde tekrar bir düşüş (64 GPa) tespit edilmiştir.

6.2 Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları

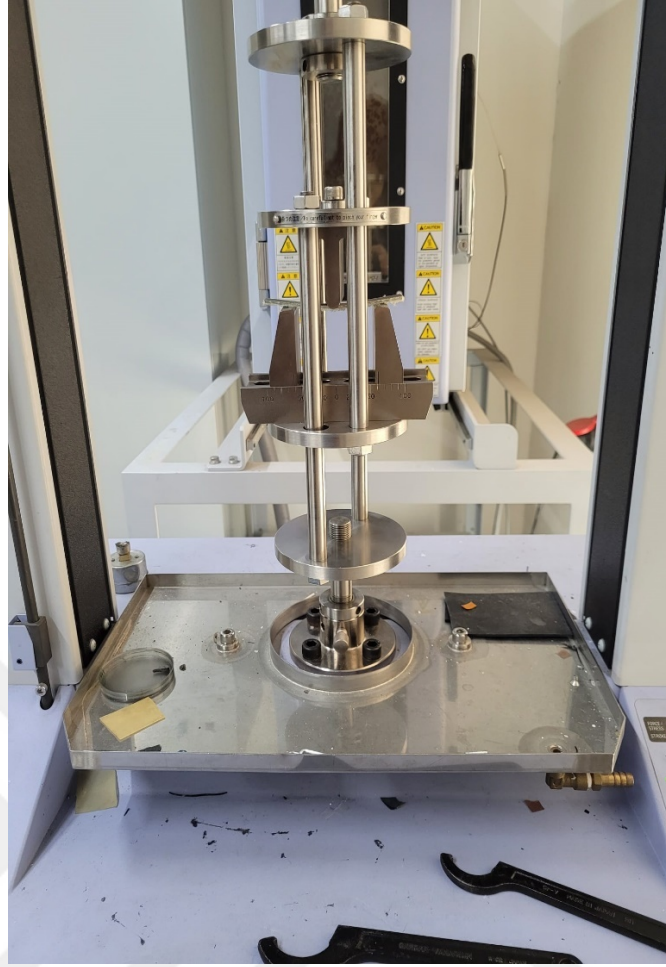
Çalışma sonucunda her bir grafen katkılı ve katkısız 4 farklı polimer matrisli kompozit plakaların 5 adet numuneleri üç nokta eğme yükü altında davranışları incelenmiştir. Çalışmanın bu aşamasında katmanlı farklı elyaf takviyelerinin kompozit yapının eğme kuvveti altında mekanik özelliklerinin grafen katkısı ile nasıl etkileneceği belirlenmeye çalışılmıştır.

Test sonuçları incelendiğinde (Çizelge 6.2) en yüksek eğme dayanımı 9 kat cam elyaf tan üretilen kompozitle en yüksek eğme mukavemeti (413 MPa) elde edilmiştir.

Daha sonra yapıya aramid elyaf dahil edilmesiyle eğme mukavemeti ve elastiklik modülünün düştüğü görülmüştür. Daha sonra ise, bu kompozit plaka yapılarına grafen katkısının ilave edilmesinden sonra mekanik özelliklerin arttığı tespit edilmiştir. Grafen katkısının ilavesi ile eğme mukavemeti ve elastiklik modül değerlerinde artış görülmüştür. Cam ve aramid elyaftan oluşan hibrit kompozitlerde en yüksek eğme dayanımı ise %0,20 grafen katkısı (296 MPa) ile elde edilmiştir. En düşük eğme dayanımının katkısız grafen hibrit yapıdaki (AAG)x3 numunesinde (246 MPa) olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.2: Üç nokta eğme deney testinden elde edilen sonuçlar.

Kompozit Tipi	Kütlece Grafen miktarı (%)	Numune Sayısı	Ortalama Eğme Mukavemeti [MPa]	Ortalama Şekil Değişirme [%]	Ortalama Eğme Elastiklik Modülü [GPa]
G ₉	0	5	413±9,00	3,94±0,06	10,77±0,10
(AAG) x3	0	5	246±9,60	3,73±0,25	5,59±0,54
(AAG) x3	0,20	5	296±11,93	2,58±0,12	13,86±0,41
(AAG) x3	0,25	5	289±1,73	2,16±0,21	12,26±1,01



Şekil 6.5: Çalışmada eğme deneyi uygulaması için tercih edilen Shimadzu test cihazında yapılan deney esnasındaki bir numune.

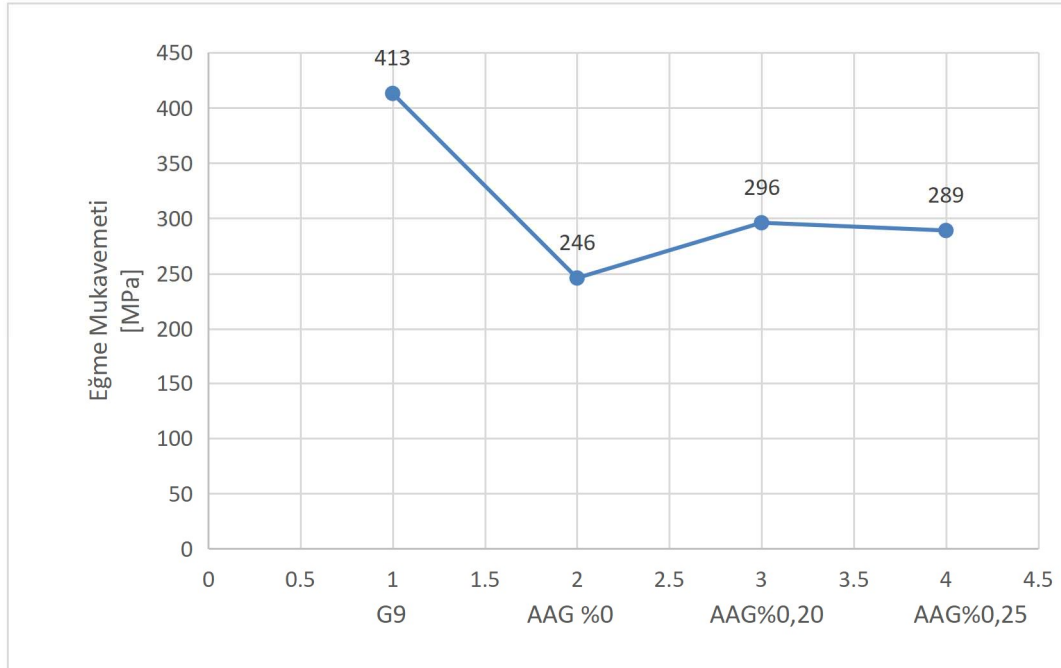
Daha önce de bahsettiğimiz üzere 2 durumun kıyası söz konusudur. İlk durum farklı elyaf seçimi ve dizilimidir. İkinci durum ise grafen katkısının hibrit yapıya etkisi değerlendirilmiştir.

Eğme mukavemeti test sonuçlarını incelediğimizde, ilk olarak cam ve aramid elyaf takviyeli hibrit kompozit malzemenin, 9 kat cam elyaf kompozit malzemeye göre eğme mukavemetinde %40,4 oranında azalış görülmektedir. Daha sonra grafen malzemenin ilavesiyle %0.20 katkılı (AAG) x3 numunesinde, eğme mukavemeti katkısız yapıya göre artmış (296 MPa), ancak 9 kat cam elyaf numuneye göre %28,3 lük bir azalış göstermiştir. Daha fazla grafen eklenmesiyle bu oran düşmeye başlamıştır (289 MPa'a). Sırasıyla eğme mukavemeti en yüksekten en düşüğe doğru, G₉ (cam elyaf), %0.20 katkılı (AAG) x3, %0.25 katkılı (AAG) x3 ve katkısız grafen (AAG) x3 numuneleri şeklinde sıralanmıştır.

Şekil değiştirme sonuçlarında en yüksek değer 9 kat cam elyaf (G₉) numunesine aittir. Yapıya aramid elyafın ilavesiyle %5,2'lik şekil değiştirme değerlerinde düşüş görülmüştür. Nano grafenin %0,20 oranında ilavesiyle şekil değiştirme değerlerinde %34,3'lük azalmaya neden olduğu görülmüştür. Nano grafen katkılı numuneler içinde en düşük şekil değiştirme oranı %0,25 katkılı (AAG)x3 numunesinde görülmektedir.

Eğme elastiklik modül değerlerinde eğme mukavemeti 9 kat cam elyaf malzemesinde 10,77 GPa değerinde görülmüştür. Yapıya aramid elyaf eklenmesiyle elastik modül değerinde %48,1 lik bir azalma görülmüştür. (AAG)x3 %0,20 ağırlık oranında nano grafenin ilave edilmesiyle eğme elastiklik modülünü katkısız (AAG)x3 katkısız grafen numunesine kıyasla %142 arttığı gözlemlenmiştir. Burada aramid elyaf/cam takviyeli numuneler içinde en yüksek elastiklik modülü değeri %0,20 katkılı (AAG)x3 numunesinde görülmüştür (13,56 GPa). Kompozitte nano grafenin artması kompoziti olumsuz yönde etkileyerek elastiklik modülünün düşmesine sebep olmuştur (12,26 GPa). %0,25 oranında grafen katkısı, elastiklik modülü %0,20 grafen katkılı malzemeye göre %9,6'lık bir oranda düşürmüştür.

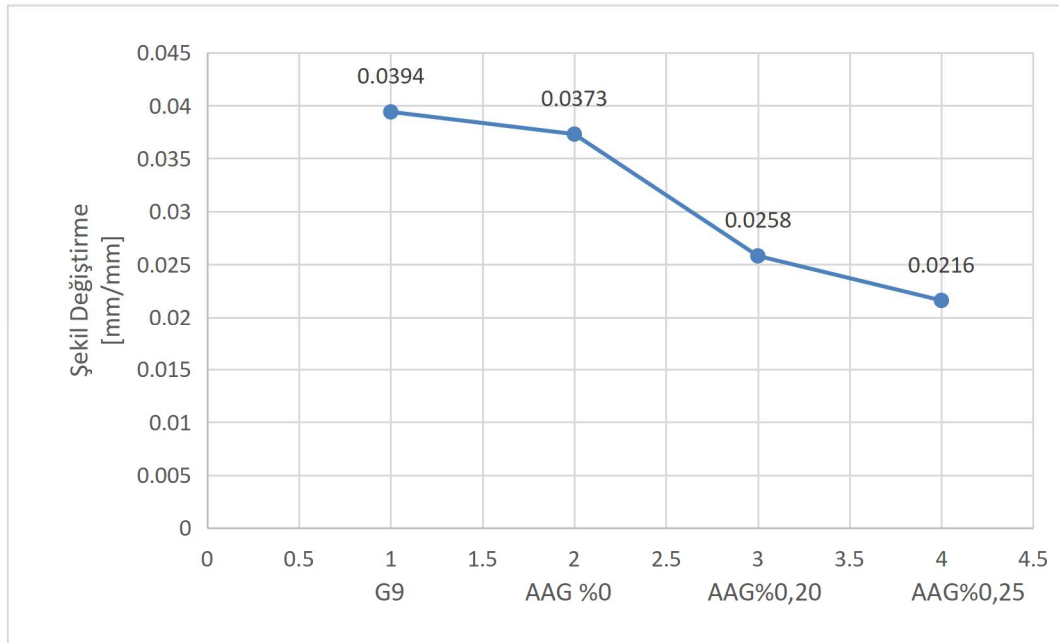
Şekil 6.6'de katkısız ve grafen katkılı numunelerin üç nokta eğme deneyi sonrası eğme mukavemet değerleri grafik şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 6.6: Numunelerin üç nokta eğme deneyi sonrası eğme mukavemeti.

Şekil 6.6 'da bakıldığında en yüksek eğme mukavemeti G₉ numunesinde görülmektedir. Katkısız numuneye grafenin eklenmesi eğme mukavemetini artmaktadır. Özellikle en yüksek maksimum mukavemet gösteren (AAG)x3 %0.20 numunesinde görülmüştür. Bu durum malzemelerin çatlak bölgelerinde köprüleme özelliği ve matris ile fiber arasında kuvvetli bağ oluşmasına bağlanabilir [102]. Daha sonra grafen ağırlık oranı %0,20'den %0,25'e artmasıyla nano grafen kompoziti olumsuz etkilemeye ve eğme mukavemetinin düşmesine sebep olduğu görülmüştür. Aslında grafenin belirli bir orandan sonra hem topaklanmaya hem de boşluk hacim oranının artmasına sebep vermesinden çatlak gibi davranması matrisin hasar görmesine neden olduğu bildirilmiştir [90].

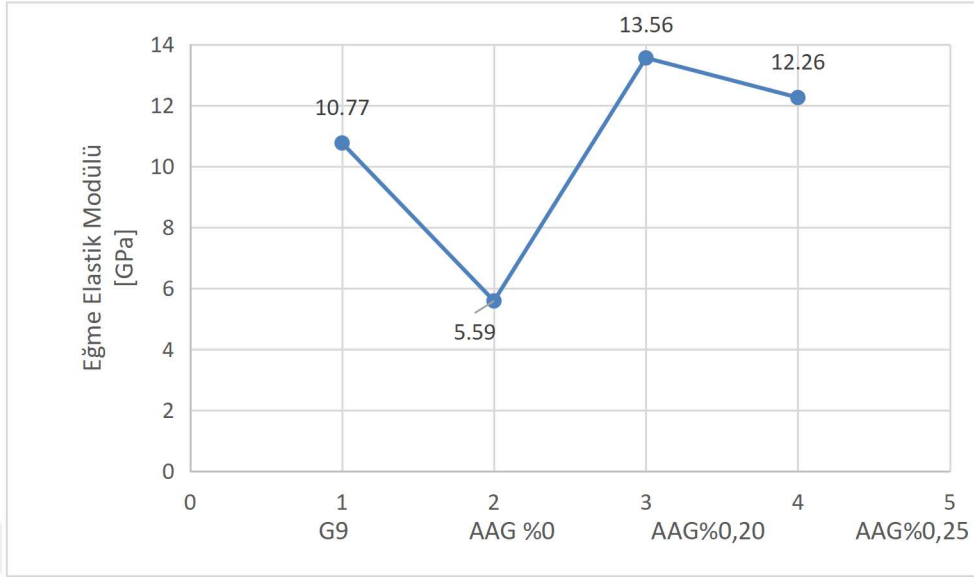
Şekil 6.7'de katkısız ve grafen katkılı numunelerin üç nokta eğme deneyi sonrası şekil değiştirme sonuçları grafik şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 6.7: Numunelerin üç nokta eğme deneyi sonrası şekil değiştirme grafiği.

Şekil 6.7'ye bakıldığında aramid elyafın eklenmesiyle şekil değiştirmede düşüş tespit edilmiştir. En çok da %0,25 ağırlık oranında nano grafenin ilavesiyle şekil değiştirme miktarlarında ciddi bir düşüş görülmüştür. En düşük şekil değiştirme ise (AAG)x3 %0,25 grafen numunesinde görülmektedir. (AAG)x3 %0,25 grafen numunesinde şekil değiştirme miktarı (AAG)x3 katkısız numuneye göre %42 azalmıştır.

Şekil 6.8’de katkısız ve grafen katkılı numunelerin üç nokta eğme deneyi sonrası eğme elastiklik modül sonuçları grafik şeklinde gösterilmiştir.



Şekil 6.8: Numunelerin üç nokta eğme deneyi eğme elastiklik modülü.

Şekil 6.8’de görüldüğü gibi, 9 kat cam elyaflı kompozite göre, cam ve aramid elyaf varlığında eğme elastiklik modülü ciddi bir oranda azalmaktadır. Ancak grafen eklenmesi, malzemeyi olumlu yönde etkilemiş ve eğme elastiklik modül değeri %0,20 grafen katkısında, katkısız grafen cam ve aramid elyaf kompozite göre %142 artmıştır. Daha fazla grafen ilavesiyle %0,25 oranında, %0,20 grafen oranına göre yaklaşık %9,6’lık bir düşüş görülmüştür.

Literatür araştırmalarına göre, grafen türevli yapılarla güçlendirilmiş aramid fiber kompozitin eğilme özellikleri (eğilme mukavemeti ve eğilme modülü) ve ara yüzey kesme mukavemeti (IFSS), AF’ler ile güçlendirilmiş kompozitlerden çok daha yüksek olduğunu bununla GO(grafen oksit), takviye malzemesi ve matris arasındaki arayüzey bağını geliştirdiğini bildirmişlerdir [103].

6.3 Charpy Darbe Deneyi Sonuçları

Charpy darbe testinde belirli bir kütleye sahip olan sarkaç belirli bir yükseklikten düşürülerek standartlara göre hazırlanmış olan test numunesinin kırılması gerçekleştirilir. Malzemeye aktarılan enerji malzeme kırılmadan önce ve sonra kırıcının yüksekliğindeki farkı karşılaştırılarak birbirinden çıkartılır. Elde edilen enerji malzemenin kesit alanına bölünerek darbe enerjisi hesaplanabilir [99].

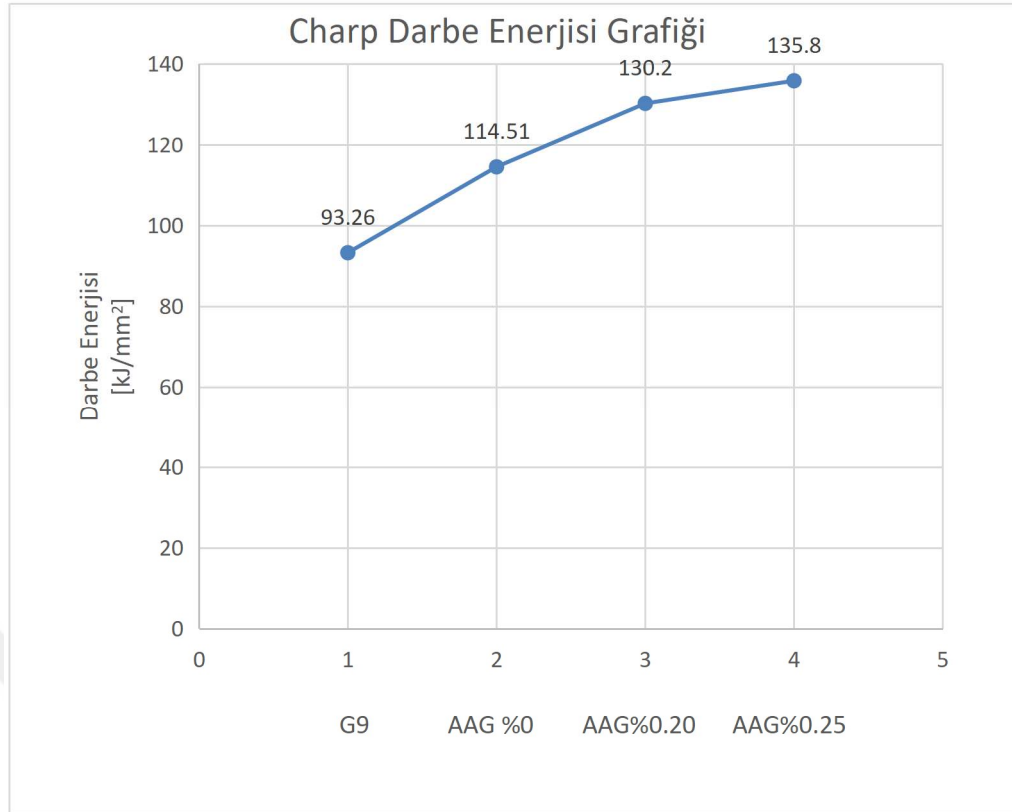
Çalışmada grafen katkılı ve katkısız 4 farklı polimer matrisli kompozit plakaların 5 adet numuneleri darbe yükü altında davranışları incelenmiştir. Çalışmanın bu aşamasında katmanlı farklı elyaf takviyelerinin kompozit yapının darbe kuvveti altında mekanik özelliklerinin grafen katkısı ile nasıl etkileneceğini belirlemek amaçlamıştır.

Charpy testi, ISO 179 standardına uygun olarak oda sıcaklığında (INSTRON Model CEAST 9050) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test başına beş örneğin ortalama sonuçları, düşen bir çekicin 15 Joule darbesi sırasında emilen enerji aracılığıyla analiz edilen malzemelerin mekanik davranışını belirlemek için kullanılmıştır. Darbe deneyi sonuçlarına bakılıp malzemelerin darbe enerjisine bakılmış ve sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Nanokompozitlerin darbe deneyindeki darbe enerjisi değerleri, Şekil 6.9.'da ve çizelge 6.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.3: Nanokompozitlerin darbe deneyindeki darbe enerjisi değerleri.

Kompozit Tipi	Kütlece Grafen miktarı (%)	Numune Sayısı	Darbe Enerjisi [kJ/mm ²]
G ₉	0	5	93,268±6,27
(AAG) x3	0	5	114,510±2,27
(AAG) x3	0,20	5	130,43±21,01
(AAG) x3	0,25	5	135,80±3,99



Şekil 6.9: Nanokompozitlerin darbe deneyindeki darbe enerjisi grafiği.

Grafiğe baktığımızda ilk durum olan sadece 9 kat cam elyaf (G₉) katkılı numunenin yapısına aramid elyaf eklendiğinde (AAG)x3 katkısız grafen yapıda yaklaşık %22,8 lük artış göstermektedir. Bu da bize aramid elyafın kullanımının kompozit malzemede darbe mukavemeti artışına sebep olduğunu göstermektedir. Daha sonra grafen varlığının yapının mukavemetine etkisine bakılmıştır. (AAG)x3 %0,20 grafen numunesinde, grafenin yapıya eklenmesiyle katkısız aramid/ cam elyaf (AAG)x3 katkısız grafen numunesine göre, darbe mukavemetinin %13,8 arttığı görülmüştür. Grafen yüzdesi %0,25 olduğunda, G₉ numunesine göre en yüksek artışın %45,7 değeri ile (AAG)x3 %0,25 grafen katkılı malzemede gerçekleştiği gözükmemektedir.

Valença vd. tarafından yapılan bir çalışmada cam ve cam/kevlar kompozit malzemelerin darbe davranışlarını incelemişler ve kevlar içeren kompozit yapılarda çekme mukavemeti, darbe enerjisi ve eğme mukavemetlerinin %20-30 oranında yüksek olduğunu tespit etmişlerdir [101].

Başka bir çalışmada ise, epoksi matrisinde grafen plakalar ve grafit nano plakalarının bulunması, çatlakların ilerlemesini önlediği bildirilmiştir [104, 105].

Bir başka araştırmada, EP sistemine uygun miktarda GO (grafen oksit) eklenmesinin, deneysel araştırma yoluyla AFRP'nin katmanlar arası dayanıklılığını etkili bir şekilde iyileştirebileceği bulunmuştur. GO-AFRC'ler, saf AFRC ile karşılaştırıldığında, GO iğeriği ađırlıkęa %0.3 olduğunda, AFRC'nin eğilme mukavemeti, bükölme modölü ve ILSS %67, %85 ,%29 arttığı bildirilmiştir [106].

Sonuç olarak hem elyaf seçiminin hem grafen nano toz paręacıkların yapıya darbe enerjisi açısından olumlu sonuç verdiğini göstermektedir.



şekil 6.10: Çalışmada darbe deneyi uygulaması için tercih edilen Instron Ceast 9050 cihazında yapılan deney esnasındaki bir numune.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans çalışmasında üretilen elyaf takviyeli dört farklı kompozit yapıda aramid elyafın ve grafen katkısının malzeme performansına etkisini analiz etmek için çekme, üç nokta eğme ve darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyi verileri incelendiğinde en iyi çekme dayanımı performansının %0,20 (AAG)x3 elyaf takviyeli kompozit yapıda sağlandığı görülmüştür. Üç nokta eğme deneyi verileri incelendiğinde en iyi eğme dayanımı performansının 9 katmanlı cam elyaf takviyeli kompozit yapıda sağlandığı görülmüştür. Daha sonra yapıya aramid elyaf eklenmesiyle eğme mukavemeti ve elastik modülün düştüğü görülmüştür. Bu kompozit yapıya grafen eklenmesiyle bir miktar eğme mukavemetinde artış olduğu tespit edilmiştir. Darbe deneyi verileri incelendiğinde en iyi darbe enerjisi sönümleme performansının %0,25 grafen katkılı aramid/cam elyaf takviyeli kompozit yapıda (135,80 kJ/mm²) sağlandığı görülmüştür.

Çekme, üç nokta eğme ve darbe deneyi verileri incelendiğinde her iki elyaf türüne göre grafen katkısının malzeme performansını arttırdığı gözlemlenmiştir. Hibrit yapıları elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzemesi üzerinde uygulanan mekanik deneylerin tamamında grafen katkısının malzeme performansını arttırdığı gözlemlenmiştir.

Buna rağmen, eğme deneyinde cam elyaf yapısına aramid elyafın dahil olmasıyla eğme mukavemetinde ciddi düşüş gözlenmiştir. Bu durum ise optimum değerde grafenin eklenmesiyle eğme mukavemetinde olumlu yönde artışa sebep olmuştur. Bu deneyler neticesinde hem aramid elyafın hem de grafen nano partiküllerinin mukavemete etkisinin olduğu belirlenmiştir.

Bu yüksek lisans çalışması kapsamında, polimer kompozitte grafen/elyaf çeşidi ilişkisi, zaman kısıtından dolayı, sadece mekanik deneylerle incelenmiştir. Grafenin kompozit yapıdaki morfolojik durumunun ve kompozitin iç yapısının analizinin bu çalışmadan sonra, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve/veya bilgisayarlı tomografi (CT) benzeri cihazlarla gerçekleştirilmesi ve analizi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **S. T. Jenq And J. J. Mo.** (1996). Ballistic Impact Response For Two-Step Braided Three Dimensional Textile Composites. American Institute Of Aeronautics And Astronautics, 34 (2), 375-384.
- [2] **Wetzela, B., Haupterta, F. And Zhang, M.Q.** (2003). Epoxy Nanocomposite With High Mechanical And Tirbological Performance. Compos Science Technology, 63(2), 2055-2067.
- [3] **Park, R., Jang, J.** (2001). Impact Behavior Of Aramid Fiber/Glass Fiber Hybrid Composites: The Effect Of Stacking Sequence. Polymer Composites, 22(1), 80-89.
- [4] **Park, R., Jang, J.** (2000). Effect Of Stackingsequence On The Compressive Performance Of Impacted Aramid Fiber-Glass Fiber Hybrid Composite. Polymercomposites, 21(2), 231-237.
- [5] **Zhang, X., Liu, M., Mao, Y., Xu, Y., And Niu, S.** (2014). Ultrasensitive Photoelectrochemical Immunoassay Of Antibody Against Tumor-Associated Carbohydrate Antigen Amplified By Functionalized Graphene Derivates And Enzymatic Biocatalytic Precipitation. Bioelec, 59(22), 21-27.
- [6] **Dao, T.D., Hong, J.E., Ryu, K.S., And Jeong, H.M.** (2014). Supertough Functionalized Graphene Paper As A High-Capacity Anode For Lithium Ion Batteries. Chem Engeland, 250(12), 257-266.
- [7] **Cardarelli, F.** (2008). Materials Handbook: A Concise Desktop Reference. Basım Yeri: Springer Sci Ence & Business Media.
- [8] **Kaw, A.K.** (2010). Mechanics Of Composite Materials. Basım Yeri: CRC Press.
- [9] **Harper, C.A.** (2002). Handbook Of Plastics, Elastomers, And Composites. Basım Yeri: Mcgraw-Hill New York.
- [10] **H.Y. Ersoy.**(2001). Kompozit Malzeme, Literatür Yayıncılık Dağıtım Pazarlama, San. Tic. Ltd. Şti. İstanbul.
- [11] **Y. Şahin,** (2000). Kompozit Malzemelere Giriş, GAZİ Kitabevi, ANKARA.
- [12] **M.Saçak,** (2002). Polimer Kimyası, GAZİ Kitabevi, Ankara.
- [13] **Y.Olcay, M.Akyol,R.Gemci,** (2002). Polimer Esaslı Lif Takviyeli Kompozit Malzemelerin Arabirim Mukavemeti Üzerine Farklı Kür Metodlarının İncelenmesi: Uludağ Üniversitesi Mühendislikmimarlık Fakültesi Dergisi, 7(1) 93.
- [14] **Url-1**<https://insapedia.com/kompozit-nedir-kompozit-malzemeler-ve-ozellikleri> >.
- [15] **Url-2** <http://kompozithayalleri.com/matris-nedir> .
- [16] **Şahin. Y.** (2006). Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitapevi, Ankara.
- [17] **Ersoy, H. Y.** (2001). Kompozit Malzeme, Literatür, İstanbul.
- [18] **Url-3** <<http://www.tdk.gov.tr/index>>, Alındığı Tarih: 01.12.2014.

- [19] **Zhang, C.** (2014). Understanding The Wear And Tribological Properties Of Ceramic Matrix Composites, *Advances In Ceramic Matrix Composites*, 312-339.
- [20] **Naslain, R. R. Ve Pomeroy M. R.** (2001). Ceramic Matrix Composites: Matrices And Processing, *Encyclopedia Of Materials: Science And Technology* (Second Edition), 1060-1066.
- [21] **Razzell, A.G., Venkata Siva, S.B., Rama Sreekanth, P.S.** (2000). Joining And Machining Of Ceramic Matrix Composites, *Comprehensive Composite Materials*, Volume 4, 689-697.
- [22] **Sönmez, M.** (2009). Polimer Matrisli Kompozitlerin Endüstri Ürünleri Tasarımında Önemi Ve Geleceği: Türkiye’den Dört Örnek Firma Üzerine Bir İnceleme. (Yüksek Lisans Tezi). ITU.
- [23] **Yiu-Wing Mai, Zhong-Zhen Yu.** (2006). Polymer Nanocomposites. Basım Yeri: Woodhead Publishing.
- [24] **Yalçın Ve Gürü,** (2002). Hayri **Yalçın-** Metin **Gürü** Kitapları Ve Palme Yayıncılık .
- [25] **Kumar, S., Sarita, Nehra, M., Dilbaghi, N., Tankeshwar, K. And Kim, K.,** (2018). Recent Advances And Remaining Challenges For Polymeric Nanocomposites In Healthcare Applications. *Progress In Polymer Science*, 80: 1 38.
- [26] **Ellis, B.** (1993). Chemistry And Technology Of Epoxy Resins. Basım Yeri: Springer Netherlands.
- [27] **Sönmez, M.** (2009). Polimer Matrisli Kompozitlerin Endüstri Ürünleri Tasarımında Önemi Ve Geleceği: Türkiye’den Dört Örnek Firma Üzerine Bir İnceleme. (Yüksek Lisans Tezi). ITU.
- [28] **Irving E.P., Soutis C.,** (2014). Polymer Composites In The Aerospace Industry, 1st Edition, Woodhead Publishing, ISBN 978-0-85709-523-7, UK .
- [29] **Bentur, A, And Kovler, K,** (1997). Durability Of Some Glass Fibre Reinforced Cementations Composites, *Fifth International Concrete On Structural Failure, Durability Retrofitting*. Singapore, 28(18), 190-199.
- [30] **Clyne, T. W. Ve Hull, D.** (2019). An Introduction To Composite Materials (Third Edition). Cambridge University Press.
- [31] **Can Tuncer** (2018) . Cac03, SiO2 Ve Grafen Nano Partikül Katkısının Tabakalı Cam Elyaf Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkisi Pamukkale Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi .
- [32] **Yi, X.-S., Du, S., Zhang, L.** (2008). Composite Materials Engineering, Volume 1 Fundamentals Of Composite Materials, Chemical Industry Press, 141-156, China.
- [33] **Kotek, R.** (2008). Recent Advances In Polymer Fibers, *Polym. Rev.*, 48(2):221-229.
- [34] **Wo, D. Z.** (2000). Comprehensive Composites, China Science Press, Beijing.

- [35] **Iijima, S. Ve Ichihashi, T.** (1993). Single-Shell Carbon Nanotubes Of 1-Nm Diameter. *Nature*, 363, (6430), 603-605.
- [36] **Cardarelli, F.** (2008). *Materials Handbook: A Concise Desktop Reference*. Basım Yeri: Springer Science & Business Media.
- [37] **Kaw, A.K.** (2010). *Mechanics Of Composite Materials*. Basım Yeri: CRC Press.
- [38] **Callister, W.D. And Rethwisch, D.G.** (2014). *Materials Science And Engineering: An İntroduction*: John Wiley.
- [39] **Şahin, Y.** (2000). Kompozit Malzemelere Giriş. Gazi Kitabevi, Ankara, 1-16, 37-41, 65-68, 79-88
- [40] **Geim, A.K.** (2009). Graphene: Status And Prospects. *Science*, 324(33), 1530–1534.
- [41] **M. W. Roberts, C. B. Clemons, J. P. Wilber, G. W. Young, A. Buldum ve D. D. Quinn,** (2010). Continuum Plate Theory and Atomistic Modeling to Find the Flexural Rigidity of a Graphene Sheet Interacting with a Substrate, cilt 2010, Article ID 868492, 8 pages.
- [42] **Rao, C.N.R., Biswas, K., Subrahmanyam, K. S. And Govindaraj, A.** (2009). Graphene, The New Nanocarbon. *Journal Mater Chem*, 19(5), 2457–2469.
- [43] **Heyrovska, R.** (2008). Atomic Structures Of Graphene, Benzene And Methane With Bond Lengths As Sums Of The Single. Double And Resonance Bond Radii Of Carbon.
- [44] **Săndulescu, R., Tertis, M., Cristea, C. And Bodoki, E.,** (2015). New Materials For The Construction Of Electrochemical Biosensors. *Biosensors-Micro And Nanoscale Applications*, 1-36.
- [45] **Vaia, R.A. And Wagner, H.D.** (2004). Framework For Nanocomposites. *Mater Today*, 7(2), 32–37.
- [46] **Rueger, D.V. And Kessler, M.R.** (2014). Effect Of Silane Structure On The Properties Of Silanized Multiwalled Carbon Nanotube-Epoxy Nanocomposites. *Polymer*, 55(11), 1854-1865.
- [47] **Jin, S.B., Son, G.S., Kim, Y.H. And Kim, C.G.** (2013). Enhanced Durability Of Silanized Multi-Walled Carbon Nanotube/ Epoxy Nanocomposites Under Simulated Low Earth Orbit Space Environment. *Compos Science Techonogy*, 87(7), 224–231.
- [48] **Ullah-Khan, S., Pothnis, J.R. And Kim, J.K.** (2013). Effects Of Carbon Nanotube Alignment On Electrical And Mechanical Properties Of Epoxy Nanocomposites. *Composite*, 49(24), 26–34.
- [49] **Shadlou, S., Alishahi, E. And Ayatollahi, M.R.** (2013). Fracture Behavior Of Epoxy Nanocomposites Reinforced With Different Carbon Nano-Reinforcements. *Composions Struces*, 95(15), 577–581.
- [50] **Lingpu, J., Shengjiao, Y., Yimin, J., And Chunming, W.** (2014). Electrochemical Deposition Of Diluted Magnetic Semiconductor ZnMnse On

Reduced Graphene Oxide/Polyimide Substrate And Its Properties. Alloy Compositions, 609(29), 233–238.

- [51] **Zhang, X., Liu, M., Mao, Y., Xu, Y. And Niu, S.** (2014). Ultrasensitive Photo Electrochemical Immunoassay Of Antibody Against Tumor-Associated Carbohydrate Antigen Amplified By Functionalized Graphene Derivates And Enzymatic Biocatalytic Precipitation. Biosenc Bioelec, 59(28), 21–27.
- [52] **Dao, T.D., Hong, J.E., Ryu, K.S. And Jeong, H.M.** (2014). Supertough Functionalized Graphene Paper As A High-Capacity Anode For Lithium Ion Batteries. Chem Engeland, 250(12), 257–266.
- [53] **Aoyama, S., Park, Y.T. And Macosko, W.** (2014). Melt Crystallization Of Poly (Ethylene Terephthalate): Comparing Addition Addition Of Graphene Vs Carbon Nanotubes. Polymer, 55(1), 2077-2085.
- [54] **Bandla, S. And Hanan, J.C.** (2012). Microstructure And Elastic Tensile Behavior Of Polyethylene Terephthalate-Exfoliated Graphene Nanocomposites. Materyal Science, 47(11), 76-82.
- [55] **Li, M. And Jeong, Y.G.** (2012). Influences Of Exfoliated Graphite On Structures, Thermal Stability, Mechanical Modulus, And Electrical Resistivity Of Poly. Applied Polymer Science, 125(12), 53-40.
- [56] **Kotov, N.A.** (2006). Materials Science: Carbon Sheet Solutions. Nature, 442(22), 254–255.
- [57] **Rao, C.N.R., Biswas, K., Subrahmanyam, K.S. And Govindaraj, A.** (2009). Graphene, The New Nanocarbon. Materials Chemistry , 19(11), 2457–2469.
- [58] **Rao, C.N.R., Biswas, K., Subrahmanyam, K.S. And Govindaraj, A.** (2010). Graphene, The New Nanocarbon. Journal Modares Mechanical Engineering, 19(8), 2457–2469.
- [59] **Soldano, C., Mahmood, A. And Dujardin, E.** (2010). Production, Properties And Potential Of Graphene. Carbon, 48(6), 2127–2150.
- [60] **Novoselov, K.S., Geim, A.K., Morozov, S.V., Jiang, D., Zhang, Y., Dubonos, S.V. And Grigorieva, I.V.** (2004). Electric Field Effect In Atomically Thin Carbon Films. Science, 306(2), 666–669.
- [61] **Shokrieh, M.M., Shokrieh, Z. And Hashemianzadeh, S.M.** (2012). Effective Parameters In Modeling Of Graphene Sheet Young's Modulus. Journal Modares Mechanical Engineering, 12 (3), 147-155.
- [62] **Dato, A., Radmilovic, V., Lee, Z., Phillips, J. And Frenklach, M.** (2008). Substrate-Free Gas-Phase Synthesis Of Graphene Sheets. Nano Letters, 8(2), 2012–2016.
- [63] **Reina, A., Jia, X., Ho, J., Nezich, D., Son, H., Bulovic, V., Dresselhaus, M.S. And Kong, J.** (2009). Large Area, Few-Layer Graphene Films On Arbitrary Substrates By Chemical Vapor Deposition. Nano Lett, 9(1), 30–35.
- [64] **Verdejo, R., Mar-Bernal, M., Romasanta, L.J. And Manchado, M.A.** (2011). Graphene Filled Polymer Nanocomposites. Materials Chemistry , 21(33), 3301-3310.

- [65] **Park, S. And Ruoff, R.S.** (2009). Chemical Methods For The Production Of Graphenes. *Naturel Nanotech*, 4(2), 217–224.
- [66] **Chen, G., Wu, D., Weng, W. And Wu, C.** (2003). Exfoliation Of Graphite Flake And Its Nanocomposites. *Carbon*, 41(11), 619–621.
- [67] **Ramanathan, T., Stankovich, S., Dikin, D.A., Liu, H., Shen, H., Nguyen, S.T. And Brinson, L.C.** (2007). Graphitic Nanofillers In Pmma Nanocomposites-An Investigation Of Particle Size And Dispersion And Their Influence On Nanocomposite Properties. *Polymed Science Part B: Polymed Physholg*, 45(4), 2097–2112.
- [68] **Uhl, F.M., Yao, Q. And Wilkie, C.A.** (2005). Formation Of Nanocomposites Of Styrene And Its Copolymers Using Graphite As The Nanomaterial. *Polymers For Advanced Technologies*, 16(21), 533–540.
- [69] **Sen, M.** (2020). *Nanocomposite Materials*, Intech Open Science, London.
- [70] **Jamir M. R. M., Majid, M. S. A., Khasri, A.** (2018). Natural Lightweight Hybrid Composites For Aircraft Structural Applications, Sustainable Composites For Aerospace Applications, Woodhead Publishing Series In Composites Science And Engineering, 155-170.
- [71] **Nabil, B., Raji, M., Boujmal, R., Essabir, H., Bensalah, M.-O., Bouhfid, R., El Kacem Qaiss, A.** (2019). Numerical Modeling Of Hybrid Composite Materials. Modelling Of Damage Processes In Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites And Hybrid Composites, Woodhead Publishing, 57-101.
- [72] **Maley, J.A.** (2008). An Investigation Into Low-Cost Manufacturing Of Carbon Epoxy Composites And A Novel "Mouldless" Technique Using The Vacuum Assisted Resin Transfer Moulding (Vartm) Method. Master Of Applied Science, Ottawa-Carleton Institute For Mechanical And Aerospace Engineering, Ottawa.
- [73] **Potter, K.** (1996). *An Introduction To Composite Products: Design, Development And Manufacture*. Springer, 5th Ed. Chapman & Hall, London.
- [74] **Bunsell, A. R., Renard, J.** (2005). *Fundamentals Of Fibre Reinforced Composite Materials*, Institute Of Physics Publishing Ltd.
- [75] **Summerscales, J. And Searle, T.J.** (2005). Low-Pressure (Vacuum Infusion) Techniques For Moulding Large Composite Structures. *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part L: Journal Of Materials Design And Applications*, 219(1), 45-58.
- [76] **Williams, C., Summerscales, J. And Grove, S.** (1996). Resin Infusion Under Flexible Tooling (Rift): A Review. *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 27(7), 517-524.
- [77] **Tuccillo, F., Antonucci, V., Calabro, A., M., Giordano, M. And Nicolais, L.** (2005). Practical And Theoretic Analysis Of Resin Flow In Vacuum Assisted Resin Transfer Molding Processes. In *Macromolecular Symposia*. Basım Yeri: Wiley Online Library.

- [78] **Parnas, R.S. And Walsh, S.M.** (2005). Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding Model. *Polymer Composites*, 26(4), 477-485.
- [79] **Bunsell, A. R., Renard, J.** (2005). *Fundamentals Of Fibre Reinforced Composite Materials*, Institute Of Physics Publishing Ltd.
- [80] **Spasojevic, P. M.** (2019). Thermal And Rheological Properties Of Unsaturated Polyester Resins-Based Composites, *Unsaturated Polyester Resins Fundamentals, Design, Fabrication, And Applications*, 367-406.
- [81] **Can Cao A,1, Jingsong Peng A,1, Xiumin Liang A,1, Eduardo Saiz D, Stephan E. Wolf E, Hanoch Daniel Wagner F, Lei Jiang A,B, Qunfeng Cheng A,B,C,*** -- Strong, Conductive Aramid Fiber Functionalized By Graphen.
- [82] **Saleem Hussain A, Ceyla Yorucu B, Iftikhar Ahmedc, Rizwan Hussainc, Biqiong Chenb, M. Bilal Khand, Naveed A. Siddique C, Ihtesham Ur Rehman** (2014). Surface Modification Of Aramid Fibres By Graphene Oxide Nano-Sheets For Multiscale Polymer Composites.
- [83] **Xiaoma Ding1, Ziling Zhang1, Haijuan Kong2, Mengmeng Qiao1, Zhifeng Hu1, Luwei Zhang1, And Muhuo Yu1.** (2019). Influences Of Graphene Oxide Addition On Mechanical Properties Of Aramid Fiber Reinforced Composites.
- [84] **Yinqiu Wu, Bolin Tang, Kun Liu, Xiaoling Zeng, Jingjing Lu, Tongtong Zhang, And Xiaojun Shen.** (2019). Enhanced Flexural Properties Of Aramid Fiber/Epoxy Composites By Graphene Oxide.
- [85] **Lei Zeng1 & Xuqing Liu1 & Xiaogang Chen1 & Constantinos Soutis1,2.** (2018). Surface Modification Of Aramid Fibres With Graphene Oxide For Interface Improvement In Composites.
- [86] **Evren Erikli, Arif Hasanoğlu** (2018). Grafen Oksit/Aramid Ve Grafen/Aramid Kompozitlerinin Eliştirilmesi, Development Of Graphene Oxide/Aramid And Graphene/Aramid Composites.
- [87] **Baby M., Hiremath M., Swamy S., Manjunatha L.H.,** (2017). Study Of Mechanical And Morphological Properties On Glass Fiber Reinforcement Polyester Composite With Graphene, *International Journal Of Advances In Scientific Research And Engineering*, , 3(5): 82-87.
- [88] **Wang, X., Song, L., Pornwannchai, W., Hua, Y. And Kandola, B.** (2013). The Effect Of Graphene Presence In Flame Retarded Epoxy Resin Matrix On The Mechanical And Flammability Properties Of Glass Fiber-Reinforced Composites. *Composite A*, 53(2), 88–96.
- [89] **Kamar, Nicholas.T. And Hossain, M.M.** (2014). Interlaminar Reinforcement Of Glass Fiber/Epoxy Composites With Graphene Nanoplatelets *Sciencedirect Composites. Part A*. 32(4), 36-40.
- [90] **Lee, C., Wei, X.D., Kysar, J.W. And Hone, J.** (2008). Measurement Of The Elastic Properties And Intrinsic Strength Of Monolayer Graphene. *Science*, 321(11), 385–388.

- [91] **Das, B., Prasad, K.E., Ramamurty, U. And Rao, C.N.R.** (2009). Nano-Indentation Studies On Polymer Matrix Composites Reinforced By Few-Layer Graphene, *Nanotechnology*, 20(11), 125701–125705.
- [92] **Rafiee, M.A., Rafiee, J., Wang, Z., Song, H., Yu, Z.Z. And Koratkar, N.** (2009). Enhanced Mechanical Properties Of Nanocomposites At Low Graphene Content. *ACS Nano*, 3(2), 3884–3890.
- [93] **Rafiee, M.A., Rafiee, J., Srivastava, I., Wang, Z., Song, H., Yu, Z.Z. And Koratkar, N.** (2010). Fracture And Fatigue In Graphene Nanocomposites. *Small*, 6(1), 179–183.
- [94] **Steur, P., Wissert, R., Thomann, R. And Mulhaupt, R.** (2009). Functionalized Graphenes And Thermoplastic Nanocomposites Based Upon Expanded Graphite Oxide. *Macromolecular Rapid Communications*, 30(15), 316–327.
- [95] **Tang, L.C., Wan, Y.J., Yan, D. And Pei, Y.B.** (2013). The Effect Of Graphene Dispersion On The Mechanical Properties Of Graphene/Epoxy Composites. *Carbon*, 60(11), 16-27.
- [96] Prof. Dr. Kâşif ONARAN (2009). *Malzeme Bilimi Ders Kitabı*.
- [97] **Url4**<http://Www2.Bayar.Edu.Tr/Muhendislik/Malzeme/Dersler/Malzeme_Lab/E%C4%9Fme.Pdf>.
- [98] **TS 205.** Metalik Malzemenin Eğme ve Katlama Deneyleri.
- [99] **T.C. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi,** Mühendislik Fakültesi Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü, Mühendislikte Deneysel Metodlar Dersi.
- [100] **Standard For Plastics–Determination Of Charpy Impact Properties–Part 1:** Noninstrumented Impact Test. International Organization For Standardization 2000. ISO 179-1.
- [101] **Valença, S.L., Griza, S., Oliveira V.G., Sussuchi, E.M., Cunha, F.G.C.** (2015). Evaluation Of The Mechanical Behavior Of Epoxy Composite Reinforced With Kevlar Plain Fabric And Glass/Kevlar Hybrid Fabric. *Composites Part B: Engineering*, 70, 1-8.
- [102] **Farnoud Khakzad.** (2017). Grafen katkılı cam/epoksi nanokompozit plakaların mekanik özelliklerinin incelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Türkiye .
- [103] **Yinqiu W., Bolin T., Kun L., Xiaoling Z., Jingjing L., Tongtong Z., and Xiaojun S.** Enhanced flexural properties of aramid fiber/epoxy composites by graphene oxide.
- [104] **Rafiee, M.A., Rafiee, J., Srivastava, I., Wang, Z., Song, H., Yu, Z.Z. and Koratkar, N.** (2010). Fracture and fatigue in graphene nanocomposites. *Small*, 6(1), 179–183.
- [105] **Tang, L.C., Wan, Y.J., Yan, D. and Pei, Y.B.** (2013). The effect of graphene dispersion on the mechanical properties of graphene/epoxy composites. *Carbon*, 60(11), 16-27.

[106] **Xiaoma Ding¹, Ziling Zhang¹, Haijuan Kong², Mengmeng Qiao¹, Zhifeng Hu¹, Luwei Zhang¹, and Muhuo Yu^{1,*}** Influences of graphene oxide addition on mechanical properties of aramid fiber reinforced composites.

