

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

FARKLI ORANLARDA NANO-GRAFEN DOLGULU CAM ELYAF
TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS

Onur Kazım ATEŞ

MART-2024
GÜMÜŞHANE



**T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**FARKLI ORANLARDA NANO-GRAFEN DOLGULU CAM ELYAF
TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF GLASS FIBER
REINFORCED POLYMER COMPOSITES FILLED WITH NANO-GRAPHENE
AT DIFFERENT RATES**

YÜKSEK LİSANS

Onur Kazım ATEŞ

**MART-2024
GÜMÜŞHANE**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlamış olduğum “**Farklı Oranlarda Nano-Grafen Dolgulu Cam Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi’nin lisanslı kullanıcısı olduğu intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanması için izin verdiğimi onaylarım.

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği’nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

04/03/2024

.....
Onur Kazım ATEŞ

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Tezi çalışmalarım sırasında bilgi ve deneyimleriyle yol gösteren, çalışmanın her aşamasında yardım ve hoşgörüsünü esirgemeyen hocam sayın Doç. Dr. Filiz KARABUDAK’a sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmaların analiz süresinde değerli tecrübelerini benimle paylaşan Dr. Hamid ZAMANLOU’ya ve kıymetli hocam sayın Prof. Dr. Ebru Emine DEMİRCİ ŞÜKÜROĞLU’na ve sayın Dr. Öğr. Üyesi Süleyman ŞÜKÜROĞLU hocama minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen tüm kararlarımın sonucu ne olursa olsun doğruya yönlendirmekten başka gayesi olmayan ve hayat boyunca bana arkadaş aratmayan değerli Annem Kehribar ATEŞ ve Babam Cafer ATEŞ’e ve birlikte omuzladığımız hayatın yükünü sırtımdan eksiltip hep kolaylaştıran, her koşulda desteğini daima arkamda hissettiğim değerli nişanlım Zeynep Hazal ULUTAŞ’a tüm kalbimle teşekkür ederim.

Onur Kazım ATEŞ
GÜMÜŞHANE – 2024

ÖZET

Metalik malzemelere kıyasla daha düşük ağırlığa sahip olan yüksek performanslı polimer kompozit malzemeler; otomotiv, havacılık ve kimya endüstrisinde, çalışma koşullarındaki mühendislik uygulamalarında yapısal malzeme olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ekonomik verimlilik ve güvenliğin sağlanması için düşük özgül ağırlık, benzersiz mekanik ve tribolojik özellikler ve bozulmaya karşı yüksek direnç sağlanması gerekmektedir. Polimer matrisine homojen olarak ilave edilen nano veya mikro boyutlu inorganik parçacıklar hafif ve dayanıklı kompozit malzemelerin üretimine katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada, cam elyaf kumaş kullanılarak, Hexion Epikote Resin MGSLR 635\Hexion Epikure Curing Agent MGH LH 635 epoksi reçine sistemi ile el yatırma yöntemi uygulanarak farklı oranlarda nano-grafen parçacık takviyeli polimer kompozit malzemeler üretilmiştir. Matrise ağırlıkça % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 ve %1 oranlarında nano-grafen parçacıkları eklenerek çekme ve üç nokta eğme testleriyle nano-grafen takviyesinin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Çekme ve üç nokta eğme testleri sonucunda, ağırlıkça artış miktarına paralel olarak nano-grafen takviyeli polimer kompozitlerin çekme mukavemet değerlerinin artmasının aksine eğme mukavemet değerlerinin azaldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Çekme, Eğme, Grafen, Kompozit, Nano

SUMMARY

High-performance polymer composite materials that have lower weight compared to metallic materials; It is widely used as a structural material in the automotive, aerospace and chemical industries and in engineering applications under working conditions. To ensure economic efficiency and safety, low specific gravity, unique mechanical and tribological properties and high resistance to degradation are required. Nano- or micro-sized inorganic particles added homogeneously to the polymer matrix contribute to the production of light and durable composite materials.

In this study, nano-graphene particle reinforced polymer composite materials at different rates were produced by using glass fiber fabric, Hexion Epikote Resin MGSLR 635\Hexion Epikure Curing Agent MGH LH 635 epoxy resin system and hand lay-up method. Nano-graphene particles were added to the matrix at rates of 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1% by weight, and the effect of nano-graphene reinforcement on the mechanical properties was investigated by tensile and three-point bending tests.

As a result of tensile and three-point bending tests, it was observed that the bending strength values of nano-graphene reinforced polymer composites decreased in parallel with the increase in weight, as opposed to the tensile strength values increasing.

Keywords:Tensile, Bending, Graphene, Composite, Nano

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....	IV
TEŞEKKÜR.....	V
ÖZET.....	VI
SUMMARY	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1.GİRİŞ	1
2.LİTERATÜR ÖZETİ.....	5
2.1.Kompozit Malzemeler.....	5
2.2.Kompozit Malzemelerin Olumlu Ve Olumsuz Özellikleri	5
2.3.Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	7
2.4.Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	8
2.4.1.Metal Matrisli Kompozitler.....	9
2.4.2.Seramik Matrisli Kompozitler.....	9
2.4.3.Polimer Matrisli Kompozitler	9
2.4.4.Eylafli Kompozitler.....	10
2.5.Polimer Matrisli Kompozitlerin Elemanları	15
2.5.1.Matris Elemanı	15
2.5.2.Takviye Elemanı	17
2.5.3.Dolgu Elemanı	18
2.5.4.Sürekli Elyafların Dokuma Çeşitleri	18
2.5.5.Düz(Plain)	19
2.5.6.Çapraz (Twill)	19
2.5.7.Saten (Satin).....	19
2.5.8.Sepet (Basket)	20
2.6.Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemi.....	20
2.6.1.Püskürtme Yöntemi.....	20
2.6.2.Vakumlama Yöntemi	21
2.6.3.Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi	22

2.6.4.Prepregler	22
2.7.Dolgu Malzemeleri.....	23
2.7.1.Grafen.....	24
3.MATERYAL VE YÖNTEM	27
3.1.Kompozit Plaka Üretimi	27
3.2.Deney Numunelerinin Oluşturulması	28
3.2.1.Deney numunelerinin Çekme Testinin Yapılması	29
3.3.Deney Numunelerinin Eğme Testinin Yapılması	30
4.DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	32
4.1.Çekme Analizi Sonuçları	32
4.2.Eğme Analizi Sonuçları	34
5.SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	37
KAYNAKÇA.....	38
ÖZGEÇMİŞ	48

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Kimyasal bileşimleri ve özellikleri ile farklı cam elyafı türlerini.....	11
Tablo 2. Cam elyaf türlerinin kompozisyonları	11
Tablo 3. Cam elyaf türlerinin % ağırlık bileşenleri	12
Tablo 4. Kompozit ve metallerin mekanik özellikleri.....	12
Tablo 5. Karbon elyafların mekanik özellikleri	13
Tablo 6. Bazı aramid elyafların mekanik özellikleri	14
Tablo 7. Kullanılan nano parçacıkların teknik özellikleri	28



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.Karbon Elyaf	13
Şekil 2.Kompozit Malzemeler	17
Şekil 3.Kompozit Malzemenin Takviye Ediciye Göre Sınıflandırılması	17
Şekil 4.Piyasada Sıkça Kullanılan Düz Dokuma Stili.....	19
Şekil 5.El İle Yatırma Yöntemi	21
Şekil 6.Vakumlama Yöntemi	21
Şekil 7.Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi	22
Şekil 8.Karbon Esaslı Malzemeler	25
Şekil 9.Grafen Nano Tozu.....	26
Şekil 10.Cam Elyaf	28
Şekil 11. Nano-Grafen Parçacık Takviyeli Reçine/Sertleştirici Polimerik Sisteminin Hazırlanışı	28
Şekil 12. Fırçalama İşlemi Ve Elyaf Yatırma	28
Şekil 13. Kompozit plakaların Kesimi Ve Sınıflandırılması	29
Şekil 14. Çekme Test Cihazı.....	30
Şekil 15. Eğme Test Cihazı	31
Şekil 16. Kontrol Grubu Ve Ağırlıkça % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 Ve %1 Grafen Nanopartikül Takviyeli Kompozitlerin Çekme Deneyi Numuneleri Hasar Görüntüleri	32
Şekil 17. Kontrol Grubu Ve Ağırlıkça % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 Ve %1 Grafen Nanopartikül Takviyeli Kompozitlerin Ortalama Çekme Mukavemetleri	33
Şekil 18. Kontrol Grubu Ve Ağırlıkça % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 Ve %1 Grafen Nanopartikül Takviyeli Kompozitlerin Çekme Gerilmesi/Yer Değiştirme Diyagramı.....	34
Şekil 19. Kontrol Grubu Ve Ağırlıkça % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 Ve %1 Grafen Nanopartikül Takviyeli Kompozitlerin Eğme Deneyi Numuneleri Hasar Görüntüleri	34
Şekil 20. Kontrol Grubu Ve Ağırlıkça % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 Ve %1 Grafen Nanopartikül Takviyeli Kompozitlerin Ortalama Eğme Mukavemetleri	35
Şekil 21.Kontrol Grubu Ve Ağırlıkça % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 Ve %1 Grafen Nanopartikül Takviyeli Kompozitlerin Eğme Kuvveti/Yer Değiştirme Diyagramı.....	36

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ASTM	: American Society for Testing and Materials
AE	: Aramid/epoksi
CE	: Cam/epoksi
E	: Epoksi
MÖ	: Milattan önce
Ag	: Gümüş
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
Fiberglas	: Cam Elyaf
Al	: Alüminyum
Mg	: Magnezyum
Cu	: Bakır
MMK	: Metal Matrisli Kompozit
PMK	: Polimer Matrisli Kompozit
Si	: Silisyum
Ca	: Kalsiyum
B	: Bor
Ar.	: Aramid
Lif	: Elyaf
UV	: Ultraviyole

1. GİRİŞ

Chaharmahali vd., (2014), çalışmalarında nano-grafen (NG) katkısının bagas/polipropilen kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek için en iyi yaklaşımın belirlenmesini amaçlamıştır. Farklı NG içerikli kompozitler, ikiz vidalı ekstrüderde eriyik karıştırma ve ardından enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilmişlerdir. Bagas unu (BF) ile polimerin kütle oranı 15/85 ve 30/70 (a/a) olarak ayarlanmışlardır. Üretilen kompozitlerin su absorpsiyonu, kalınlık şişmesi, çekme mukavemeti, eğilme özellikleri, darbe mukavemeti ve morfolojik özellikleri değerlendirilmiştir. Genel olarak, NG uygulamasının kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Mekanik test sonuçları, sadece % 0.1 ağırlık oranında NG ilave edildiğinde, çekme ve eğilme özelliklerinin maksimum değerlere ulaştığını, ancak çentikli darbe mukavemetinin hafifçe azaldığını göstermişlerdir. % 0.1 NG ve % 30 BF içeren kompozitler, en yüksek çekme, eğilme ve çentikli darbe mukavemeti değerlerine sahip olmuştur. NG'nin polimer matrise etkin bir şekilde katılması mekanik özellikleri iyileştirirken, bu iyileştirme uygun nanodolgu yüklemesi (% 0.1 ağırlık) ile gerçekleşmiştir. NG ilavesi, kontrol (NG'siz) numunelere kıyasla, ortalama su alımı ve kalınlık şişmesini neredeyse değiştirmedikleri gözlemlenmiştir. Morfolojik çalışma, yüksek oranlarda (% 0.5-1 ağırlık) NG'nin kolayca aglomere olduğunu doğrulamışlardır. Termal analiz, NG partiküllerinin katılmasıyla WPC'lerin termal kararlılığında hafif bir artış göstermiştir. Ayrıca, BF'nin kompozitlerin malzeme özellikleri üzerindeki etkisinin önemli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Kompozit malzemeler, takviye malzemesi ve matris malzemesi olmak üzere iki ana bileşenden oluşur. Takviye malzemesi, kompozitin mukavemetini, sertliğini ve esnekliğini artıran, yüksek gerilme dayanımına sahip malzemedir. Matris malzemesi ise, takviye malzemesini bir arada tutan, yüke eşit şekilde dağıtan ve kompozitin şekillendirilmesini sağlayan malzemedir (Khakzad, 2017).

Kompozit malzemelerin en önemli avantajları, yüksek mukavemet, yoğunluğu düşük, sertliği fazla, aşınmaya karşı kuvvetli, ısıyı iyi aktaran, yüksek korozyon direnci, yüksek elektriksel iletkenlik, yüksek esneklik, yüksek darbe dayanımı gibi özelliklerdir (Adem ve Uyaner, 2019).

Muharrem (2019) çalışmasında; karbon nanotüp (CNT) ve nano grafen (G) ile takviye edilerek farklı oranlarda (%0,5-%1,0-%2,0-%4,0) üretilen Al 2024 kompozitlerin mekanik özelliklerini belirlemek için mikroyapı, sertlik ve aşınma analizleri yapmıştır. Ayrıca 200 m/min kesme hızı, 0,10 - 0,15 ve 0,30 mm/dev ilerleme ve 1,0 mm kesme derinliği ile işlenebilirlik deneyleri gerçekleştirmiştir. İşleme deneyleri esnasında yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş ve kesici takımların aşınma durumları mikroskopla incelemiştir. Deney sonuçlarına göre kompozitlerdeki nano malzeme oranlarının en uygun değerleri tespit etmiştir. Çalışmada, nano malzeme katkısının kompozitlerin sertlik, aşınma ve işlenebilirlik özelliklerini iyileştirdiği, ancak nano malzeme miktarının artmasıyla kompozitlerin yüzey pürüzlülüğünün de arttığı sonucuna varmıştır.

İlhan ve Feyzullahoğlu (2019), yaptıkları çalışmada farklı doğal elyaf ve dolgu maddelerinin CTP kompozit malzemelerin özelliklerine nasıl etki ettikleri bu çalışmada araştırmışlardır. Çalışmanın ilk kısmında doğal ve cam elyaf takviyeli polimer kompozitler hakkında genel bilgiler verilmiştir. Doğal elyaf ve dolgu maddelerinin katkısının CTP kompozitlerin özelliklerini iyileştirdiği, ancak bazı durumlarda olumsuz etkiler de yaratabildiği sonucuna varmışlardır. (İlhan ve Feyzullahoğlu, 2019)

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan, her biri kendi özelliklerini koruyan ve birlikte çalışarak yeni ve üstün özellikler kazandıran malzemelerdir (Erdoğan, 2020).

Shanmugasundar vd., (2020), çalışmalarında PVC/Cam elyaf/grafen nano kompozitlerin üretimi için geleneksel kalıplama yöntemini incelemişlerdir. Daha iyi bağlanma için matrisle birlikte düzgün grafen dağılımı gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada üretilen nano kompozitlerin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Geliştirilen Nano-Kompozitlerin performansı için üç önemli standart test değerlendirilmiştir. Kompozitler, boru uygulamaları için düz numune olarak geliştirilmiştir. Aksiyel gerilme, basınç ve enine basınç içeren üç standart test incelenmiştir. Grafen nano kompozitler % 0.5, % 1, % 1.5 ve % 2 oranlarında değiştirilmiştir. Sonuçlara göre, grafen yüzdelesindeki artışın, Nanokompozitin basınç mukavemetini artırmaya yol açan düzgün bir dağılım yaptığı sonucuna varmışlardır. Aksiyel basınç mukavemeti ve rijitlikte artış gözlenmiş ve eğilim değerindeki artış esas olarak % 1.5 ağırlık ve % 2 ağırlık oranlarında gözlemlemişlerdir.

Aswathnarayan vd., (2020), yaptıkları çalışmada, nano grafenin cam-epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerine nasıl etkilediğini araştırmıştır. Çalışmada, saf epoksi, %1 ve %2 nano grafen içeren cam-epoksi kompozitleri karşılaştırılmıştır. Bu

malzemeler vakum torba yöntemiyle hazırlanmıştır. Çekme, eğilme ve darbe testleriyle mekanik performansları ölçülmüştür. Ayrıca, X-ışını kırınımıyla kristal yapıları analiz edilmiştir. Ulaşıtları neticede, nano grafen katkısının cam-epoksi kompozitlerin mekanik davranışını belirgin şekilde geliştirdiğini gözlemlenmiştir. Bu gelişme, nano grafenin homojen dağılımı ve cam kumaşla iyi bağlanmasıyla ilgili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu da nano kompozitlerin daha sağlam olmasını sağlamıştır. SEM görüntüleri, nano grafen ve cam kumaş arasındaki uyumu doğrulamıştır.

Mishra vd., (2020), Çalışmalarında cam/epoksi polimer kompozitlerin grafen ile nasıl iyileştirilebileceğini araştırmışlardır. Yapılan araştırmada grafenin, nano boyutta bir karbon malzemesi olup, yüksek güç ve esneklik gibi harika özellikleri gösterdiği görmüştür. Yaptığı çalışmada cam elyaf epoksi kompozitlere %0, %1, %2 ve %3 oranlarında grafen katılarak, mekanik testler yapılmıştır. Testler, iki farklı katman düzeni ile [(O/90)_{12s} ve (O/90/±45)_{6s}]. hazırlanan cam/epoksi nano kompozit levhalar üzerinde uygulanmıştır. Test sonuunda, grafen katkılı kompozitlerin, grafensiz kompozitlere göre çekme, eğilme ve darbe dayanımlarında belirgin bir iyileşme sağladığını gözlemlemiştir. Ayrıca, mekanik özelliklerin en yüksek değerine, her iki katman düzeni için de %2 grafen ilavesi ile ulaşıldığı bulunmuştur. Ayrıca, (O/90/±45)_{6s} katman düzeninin, (O/90)_{12s} katman düzeninden daha iyi performans gösterdiği gözlemlemiştir. Araştırmasında, grafenin cam elyaf epoksi kompozitler için etkili bir nano dolgu maddesi olduğunu ve polimer kompozitlerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynayabileceğini ortaya koymuştur.

Kompozit malzemelerin takviye malzemesi olarak genellikle cam iplik, karbon iplik, aramid iplik, doğal iplik gibi lifli malzemeler kullanılır. Lifli malzemeler, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, yüksek esneklik, yüksek ısı iletkenliği gibi özelliklere sahiptir. Lifli malzemelerin boyutları, mikro, nano ve makro olarak sınıflandırılabilir. Nano boyuttaki lifli malzemeler, nanolifler olarak adlandırılır. Nanolifler, çapı 100 nm'den küçük olan lifli malzemelerdir (Murat vd. 2022).

Güven vd., (2022) çalışmalarında E-cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özellikleri ve burkulma davranışı, Al₂O₃ ve TiO₂ nanopartiküller ile takviye edilerek deneysel olarak araştırmışlardır. Bu amaçla saf, % 2 Al₂O₃ ilaveli ve % 2 TiO₂ ilaveli e-cam elyaf takviyeli üç çeşit kompozit plaka vakum destekli reçine infüzyon tekniği ile hazırlanmıştır. Üretilen kompozit plakaların burkulma davranışı, dört nokta eğme deneyi ile belirlenmiştir. Ayrıca kompozit plakaların sertlik ve çekme özellikleri de ölçülmüştür. Makalede, nanopartikül katkısının kompozit plakaların burkulma

yükünü, sertliğini ve çekme dayanımını artırdığı, ancak burkulma sonrası kalıntı dayanımını azalttığı sonucuna varılmıştır. (Murat vd., 2022)

Nanolifler, elektro eğirme, karbon nanotüp sentezi, kimyasal buhar biriktirme, lazer ablasyonu, anodik oksidasyon gibi yöntemlerle üretilebilir (Akcan, 2023).

Seeli vd., (2023) E-cam elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik ve termal davranışlarını konu alarak nanografen ve bir E-cam katmanı ile güçlendirilmiş kompozitleri, mekanik karıştırma ve elle yatırma teknikleri ile farklı ağırlık oranlarında hazırladı. Nanokompozitler, nanomalzemelerin ağırlıkça %1, %2 ve %3 olacak şekilde üç farklı formülasyona sahiptir. Nanokompozitlerin bükme dayanımı, çekme dayanımı, TGA, DTA, DSC ve sertlik gibi mekanik parametreleri test edildi ve nano dolgu maddelerinin etkisi karşılaştırdı. Sonuç olarak, nanografen (NG) kompozitlerin mekanik performansı artırmada etkili bir yöntem olduğunu, düz E-cam kompozitlerle kıyaslandığında ortaya koyduğu sonuçlar, E-cam kumaş takviyeli kompozitte nanografenin ağırlıkça %1, 2 ve 3'lük değerlerinin deneysel olarak incelenmesiyle elde etti. Ayrıca nanografenin mekanik ve termal özelliklerinin optimum ağırlık oranına eriştikten sonra nanomalzeme ilavesiyle azalma gösterdiğini tespit etmiştir.

İncelenen literatür araştırmaları doğrultusunda; kompozit malzemelerinin dayanıklılığının, nano partikül tozlarının türüne ve miktarına bağlı olarak değişmekte olduğu görülmektedir.

. Bu çalışmamızın amacı; el yatırma yöntemiyle üretilecek olan cam elyaf polimer kompozitlere ağırlıkça % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 ve %1 oranlarında nano-grafen takviyeninin, mekanik özelliklere etkisini çekme ve üç nokta eğme testleriyle değerlendirmektir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler, birbirinden farklı yapıya sahip farklı materyallerin birleşerek, birbirlerinin özelliklerini tamamlayıcı şekilde yeni bir malzeme oluşturmalarıdır (Mustafa ve Solmaz, 2007). Kompozit malzemelerde, biri matriks (bağlayıcı) diğeri takviye (güçlendirici) olmak üzere iki temel bileşen bulunur (Ulunam vd., 2011). Matriks malzeme, takviye malzemeyi sararak kompozit yapının şeklini belirler, dış etkilere karşı korur ve yük aktarımını sağlar. Takviye malzeme ise kompozit yapının mekanik, termal, elektriksel ve diğer özelliklerini iyileştirir. Kompozit malzemeler, geleneksel malzemelerin karşılayamadığı yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır (Muharrem, 2019) .

Kompozit malzemeler, havacılık, uzay, otomotiv, denizcilik, inşaat, enerji, savunma, spor, sağlık ve diğer pek çok sektörde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Kompozit malzemeler, hafiflik, yüksek mukavemet, yüksek sertlik, yüksek esneklik, yüksek aşınma direnci, yüksek korozyon direnci, yüksek ısı direnci, yüksek elektriksel iletkenlik, yüksek termal iletkenlik, yüksek ses yalıtımı, yüksek yangın dayanımı, yüksek radyasyon dayanımı, yüksek biyouyumluluk gibi pek çok üstün özelliğe sahiptir. Kompozit malzemeler, üretim yöntemleri, matriks ve takviye malzemeleri, takviye şekilleri, takviye oranları, takviye yönelimleri gibi pek çok parametreye göre sınıflandırılabilir (Özkan ve Yastımoğlu, 2017).

2.2. Kompozit Malzemelerin Olumlu Ve Olumsuz Özellikleri

Kompozit malzemelerin olumlu ve olumsuz özellikleri, bileşenlerinin cinsine, oranına, şekline, dağılımına ve arayüzey bağlarına bağlı olarak değişebilmektedir. Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajlarına ilişkin literatür taraması yapılmıştır.

Kompozit malzemelerin olumlu özellikleri şunlardır:

Yapısal uyumluluk: Kompozit malzemeler, farklı geometri ve boyutlarda tasarlanabilen ve istenilen özellikleri sağlayabilen malzemelerdir (Ali vd., 2021). Özellikle ortopedik ve dental uygulamalarda, vücut dokularıyla uyumlu kompozit malzemeler tercih edilmektedir (Özkan vd., 2016).

Yüksek dayanım: Kompozit malzemeler, bileşenlerinin dayanımlarından daha yüksek bir dayanıma sahip olabilmektedir (Ali vd., 2021). Örneğin, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitler, çelikten 5 kat daha yüksek bir mukavemete sahiptir (Özkan ve Yastımoğlu, 2017).

Düşük elastikiyet modülü: Kompozit malzemeler, homojen malzemelere göre daha düşük bir elastikiyet modülüne sahip olabilmektedir. Bu sayede, kompozit malzemeler, yüksek esneklik ve darbe dayanımı gösterebilmektedir.

Hafiflik: Kompozit malzemeler, homojen malzemelere göre daha düşük bir yoğunluğa sahip olabilmektedir. Bu sayede, kompozit malzemeler, taşıma kolaylığı, yakıt tasarrufu ve performans artışı sağlayabilmektedir (Güler ve Ulay).

Korozyon direnci: Kompozit malzemeler, kimyasal ve atmosferik etkilere karşı daha dayanıklı olabilmektedir (Ali vd., 2021). Bu sayede, kompozit malzemeler, bakım maliyetlerini azaltabilmektedir (Özkan ve Yastımoğlu, 2017).

Boyutsal stabilite: Kompozit malzemeler, sıcaklık ve nem değişimlerine karşı daha az genleşme ve büzülme gösterebilmektedir. (Ali vd., 2021) Bu sayede, kompozit malzemeler, uzun süreli kullanımda boyutlarını koruyabilmektedir.

Kompozit malzemelerin olumsuz özellikleri şunlardır:

Zayıf arayüzey bağı: Kompozit malzemeler, bileşenleri arasında yeterli bir bağ oluşmaması durumunda, arayüzeyde kırılma ve ayrılma meydana gelebilmektedir (Ali vd., 2021). Bu durum, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir (Kemiklioğlu, 2020).

Yüksek nem emilimi: Kompozit malzemeler, özellikle doğal lifler içeren kompozitler, su ve nem emilimine karşı hassas olabilmektedir¹. Bu durum, kompozit malzemelerin boyutlarında, ağırlığında ve mekanik özelliklerinde değişimlere neden olabilmektedir (Kemiklioğlu, 2020).

Düşük yanma dayanımı: Kompozit malzemeler, özellikle polimer matrisli kompozitler, yüksek sıcaklıklara ve ateşe karşı dayanıksız olabilmektedir (Ali vd., 2021). Bu durum, kompozit malzemelerin yangın güvenliği açısından risk oluşturabilmektedir (Kemiklioğlu, 2020).

Düşük darbe dayanımı: Kompozit malzemeler, özellikle tek yönlü takviyeli kompozitler, takviye yönüne dik gelen darbelere karşı zayıf olabilmektedir (Ali vd., 2021). Bu durum, kompozit malzemelerin hasar görmesine veya kırılmasına neden olabilmektedir (Kemiklioğlu, 2020).

Nispeten düşük dayanım: Kompozit malzemeler, bileşenlerinin dayanımlarından daha yüksek bir dayanıma sahip olabilmesine rağmen, bazı durumlarda bileşenlerinin dayanımlarından daha düşük bir dayanıma sahip olabilmektedir (Ali vd., 2021).

2.3. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemelerin kullanım alanları çok geniş ve çeşitlidir. Bazı kullanım alanları şunlardır:

Otomotiv sektörü: Kompozit malzemeler, otomotiv sektöründe araçların hafifletilmesi, yakıt tasarrufu, güvenlik, performans ve estetik gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Örneğin, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitler, araç gövdesi, kapı, bagaj kapağı, tampon, spoiler, jant, egzoz sistemi gibi parçalarda kullanılmaktadır (Eker ve Eryıldız, 2015).

Havacılık ve uzay sektörü: Kompozit malzemeler, havacılık ve uzay sektöründe uçak, helikopter, uydu, roket, füze gibi araçların yapısal parçalarında, kanat, kuyruk, gövde, iniş takımı, pervane, türbin gibi bileşenlerinde kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler, bu sektörde araçların hafifliği, dayanımı, aerodinamikliği, ısı ve korozyon direnci gibi özelliklerini artırmaktadır (Kemiklioğlu, 2020).

Savunma sanayi: Kompozit malzemeler, savunma sanayinde zırhlı araçlar, silah gövdeleri, kurşungeçirmez yelekler, sıvı zırhlar, insansız hava araçları, tank ve hava araçları zırhları, füze rampaları, helikopter ve uçak pistleri gibi askeri uygulamalarda kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler, bu sektörde araçların hareket kabiliyeti, dayanıklılık, koruma, gizlilik gibi özelliklerini sağlamaktadır (Çavdar ve Bingöl, 2016).

İnşaat sektörü: Kompozit malzemeler, inşaat sektöründe bina, köprü, tünel, baraj, boru, kablo, giriş, kolon, kafes, çatı, pencere, kapı, izolasyon, dekorasyon gibi yapısal ve mimari uygulamalarda kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler, bu sektörde yapıların dayanımı, sertliği, esnekliği, hafifliği, yangın ve deprem direnci, bakım kolaylığı, estetik görünüm gibi özelliklerini sağlamaktadır.

Spor malzemeleri: Kompozit malzemeler, spor malzemeleri sektöründe bisiklet, kayak, snowboard, sörf, yelkenli, golf sopası, tenis raketi, hokey sopası, beyzbol sopası, yay, ok, balıkçılık kamışı, spor ayakkabısı, kask, protez gibi ürünlerde kullanılmaktadır. Kompozit malzemeler, bu sektörde ürünlerin hafifliği, dayanımı, sertliği, esnekliği, performansı, konforu gibi özelliklerini sağlamaktadır (Kemiklioğlu, 2020).

2.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Matris malzemesi, kompozit malzemenin ana bileşenidir ve takviye malzemesini sararak ona şekil verir, yük aktarır ve çevresel etkilere karşı korur. Matris malzemesi, metal, polimer veya seramik olabilir. Metal matrisli kompozitler (MMK), metal veya alaşımlardan oluşan bir matris ile takviye edilen kompozitlerdir. MMK'ler, yüksek sıcaklık, korozyon, aşınma ve yorulma direnci gibi özellikleriyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır (Saruhan ve Uygur, 2004).

Polimer matrisli kompozitler (PMK), polimer veya plastiklerden oluşan bir matris ile takviye edilen kompozitlerdir. PMK'ler, düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, esneklik, kimyasal direnç ve kolay işlenebilirlik gibi özellikleriyle çeşitli uygulama alanlarında tercih edilmektedir. Seramik matrisli kompozitler (SMK), seramik veya camlardan oluşan bir matris ile takviye edilen kompozitlerdir. SMK'ler, yüksek sıcaklık, oksidasyon, erime, kırılma ve aşınma direnci gibi özellikleriyle özellikle havacılık, uzay, nükleer ve biyomedikal alanlarda kullanılmaktadır (Karakoç, 2020).

Takviye malzemesi, kompozit malzemenin mekanik, termal, elektriksel ve optik özelliklerini iyileştirmek için matris malzemesine eklenen malzemedir. Takviye malzemesi, parçacık, elyaf veya yapısal şekillerde olabilir. Parçacık takviyeli kompozitler (PTK), matris malzemesine dağıtılmış küçük parçacıklar içeren kompozitlerdir. Parçacıklar, metal, seramik, karbon, polimer veya doğal malzemeler olabilir. PTK'ler, sertlik, aşınma direnci, süneklik ve ısıl genleşme gibi özellikleriyle otomotiv, savunma, elektronik ve inşaat sektörlerinde kullanılmaktadır (Kösedağ ve Ekici, 2019).

Elyaf takviyeli kompozitler (ETK), matris malzemesine yerleştirilmiş uzun veya kısa elyaf veya kumaşlar içeren kompozitlerdir. Elyaf, metal, seramik, karbon, cam, doğal veya sentetik malzemeler olabilir. ETK'ler, yüksek mukavemet, rijitlik, esneklik, darbe direnci ve yön bağımlılığı gibi özellikleriyle spor, havacılık, uzay, denizcilik ve enerji sektörlerinde kullanılmaktadır. Yapısal kompozitler, farklı şekil ve boyutlarda birden fazla kompozit malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan kompozitlerdir. Yapısal kompozitler, sandviç, laminat, hibrit veya köpük gibi çeşitli tiplerde olabilir. Yapısal kompozitler, yüksek dayanım, sertlik, hafiflik, ısı ve ses yalıtımı gibi özellikleriyle mimari, ulaşım, askeri ve endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır (Saruhan ve Uygur, 2004).

2.4.1. Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler, isimlerinden de anlaşılabilir gibi, metal türlerini matris malzemesi olarak kullanan kompozit malzemelerdir. Alüminyum veya alüminyum alaşımları, matris malzemesi olarak sıklıkla seçilen metallerdir, ancak bazı uygulamalarda magnezyum ve bakır matrisleri de kullanılır (Balaji vd., 2015).

Metal matrisli kompozitler (MMK), metal bir matris içerisinde takviye fazlarının bulunduğu çok fazlı malzemelerdir. Takviye fazları, partikül, lif veya lamel şeklinde olabilir. MMK'ler, yüksek sertlik, aşınma direnci, ısı iletkenliği ve korozyon direnci gibi üstün özelliklere sahiptirler. MMK'ler, havacılık, otomotiv, savunma ve biyomedikal gibi çeşitli sektörlerde kullanılmaktadırlar (Gökhan ve Kayabaşı).

Metal matrisli kompozitler (MMK), metal bir matris içerisinde takviye fazlarının bulunduğu çok fazlı malzemelerdir. Takviye fazları, partikül, lif veya lamel şeklinde olabilir. MMK'ler, yüksek sertlik, aşınma direnci, ısı iletkenliği ve korozyon direnci gibi üstün özelliklere sahiptirler. MMK'ler, havacılık, otomotiv, savunma ve biyomedikal gibi çeşitli sektörlerde kullanılmaktadırlar (Metin ve Gavgalı, 2015).

MMK'ler, ergimiş metal karıştırma, mekanik alaşımlama, sıcak presleme, sürtünme karıştırma gibi farklı yöntemlerle üretilebilirler (Saruhan ve Uygur, 2004).

2.4.2. Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik matrisli kompozitler (CMC), seramik liflerin seramik bir matris içine gömülmesiyle oluşturulan yüksek performanslı malzemelerdir (Sun vd., 2023).

CMC'ler, yüksek sıcaklık, aşınma, korozyon ve oksidasyona karşı direnç, düşük yoğunluk ve yüksek mukavemet gibi üstün özelliklere sahiptir (Zhou vd., 2014).

2.4.3. Polimer Matrisli Kompozitler

Liflerle güçlendirilmiş polimer matrisli kompozitler (PMK) lifli bir takviye malzemesi ile polimerden bir matris malzeme kullanılarak üretilen malzemelerdir. Bu kompozitlerde lifler genelde cam, karbon veya polimer gibi malzemelerden seçilir. Lifler, kompozitin mukavemetini, rijitliğini, ısı iletkenliğini ve aşınma direncini artırır.

Lifler, kısa, uzun, sürekli veya dokunmuş şekillerde olabilir. Liflerin oranı, yönelimi ve dağılımı, kompozitin özelliklerini etkiler (Gündoğan ve Koksall, 2020).

Son yıllarda, nanometre boyutunda liflerin kullanımı ile polimer matrisli nanokompozitler üretilmektedir. Nanokompozitler, daha yüksek mukavemet, daha iyi bariyer özellikleri, daha düşük gaz geçirgenliği, daha iyi alev geciktiricilik ve daha iyi elektriksel iletkenlik gibi üstün özelliklere sahiptir (Adem ve Uyaner 2019).

2.4.4. Eylaflı Kompozitler

Takviye aşaması, kompozitlerin %70-80'lik yükünü destekler. Bu aşama, yükün bir bölümünü üstlenir. Kompozitlerin son mukavemeti, fiber çeşidine ve kompozitlerin oranına bağıdır (Rosa vd., 2009).

Kompozit malzemenin yükle aynı yönde lifleri olmalıdır ki iyi bir mukavemet sağlasın. Liflere dik gelen yük, malzemenin mukavemetini düşürür. Yükün yönü değişiyorsa, liflerin katmanları farklı açılarda olmalıdır. Bu yüzden bu malzemenin lifleri üç boyutlu ya da iki boyutlu seçilir (Hyer ve White, 2009; Datoo, 2012; Tuncer, 2018).

Kompozit malzemelerde kullanılan başlıca lif türleri şunlardır:

Cam lifi: Cam lifi, kompozit malzemelerde en yaygın kullanılan lif türüdür. Cam lifi, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, düşük maliyet, iyi kimyasal dayanım ve ısı yalıtımı gibi avantajlara sahiptir. Cam lifi, polimer matris ile iyi uyum sağlar ve çeşitli şekillerde üretilebilir. **Karbon elyafı:** Karbon elyafı, kompozit malzemelerde yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilen bir lif türüdür. Karbon elyafı, yüksek mukavemet, yüksek sertlik, yüksek elastisite modülü, düşük yoğunluk, yüksek ısı iletkenliği ve düşük ısı genleşmesi gibi özelliklere sahiptir. Karbon elyafı, polimer matris ile iyi uyum sağlamaz ve yüksek maliyetlidir. **Aramid lifleri:** Aramid lifleri, kompozit malzemelerde yüksek darbe dayanımı ve enerji soğurumu gerektiren uygulamalarda kullanılan bir lif türüdür. Aramid lifleri, yüksek mukavemet, yüksek sertlik, yüksek elastisite modülü, düşük yoğunluk, yüksek aşınma direnci ve yüksek ısı dayanımı gibi özelliklere sahiptir. Aramid lifleri, polimer matris ile iyi uyum sağlar ve çeşitli şekillerde üretilebilir (Yavuz, 2011; Cengiz ve Topsakal, 2018).

Diğer lif türleri: Kompozit malzemelerde cam lifi, karbon elyafı ve aramid lifleri dışında da bazı lif türleri kullanılabilmektedir. Bunlar arasında seramik elyafı, polietilen, silis ve bor elyafı sayılabilir. Bu lif türleri, kompozit malzemelerde özel özellikler sağlamak için kullanılmaktadır. Örneğin, seramik elyafı yüksek ısı dayanımı, polietilen yüksek darbe dayanımı, silis yüksek ısı yalıtımı ve bor elyafı yüksek nötron soğurumu sağlamaktadır (Masuelli, 2013; Hearle, 2001; Yavuz, 2011).

2.4.4.1. Cam Elyaf

Cam elyafının tarihi çok eskilere dayanmaktadır. İlk olarak Mısırlılar ve Fenikeliler cam çubukları ısıtarak cam elyafı üretmişlerdir (Wallace-Dunlop, 1882).

17. yüzyılda İtalya'da cam elyafın sanatsal amaçlarla kullanıldığı görülmüştür (Turkmen ve Koksall, 2014).

19. yüzyılda ise cam elyafın endüstriyel uygulamaları gelişmiştir. 1930’larda cam elyaf takviyeli plastik kompozitlerin üretimi başlamıştır (Korku vd., 2022).

Bu elyaf, seramik gibi malzemelerin birleştirilmesinde kullanılmıştır. Cam elyafın modern alanda kullanılması 1930’lu ve 1940’lı yıllarda başlanmıştır (Lubin, 2013; Clauser, 1973).

Günümüzde cam elyaf, otomotiv, havacılık, uzay, savunma, inşaat, enerji, spor, tıp gibi pek çok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır (Türkmen ve Köksal, 2012).

Cam elyafın elde edilmesi için cam hamuru, yüksek sıcaklıkta eritilerek akışkan hale getirilir. Eritilen cam, delikli bir plakadan geçirilerek ince ipliklere ayrılır. Bu iplikler soğutularak katılaştırılır ve istenilen boyutta kesilir. Cam elyafın özellikleri, kullanılan cam türüne, iplik çapına, iplik sayısına, iplik şekline ve yüzey işlemine bağlı olarak değişebilir. (Korku vd., 2022)

Tablo 1. Kimyasal bileşimleri ve özellikleri ile farklı cam elyafı türlerini göstermektedir(Tuncer, 2018).

A-Camı	Yüksek alkali oranı-Düşük maliyet
C-Camı	Kimyasal dayanım
E-Camı	Elektriksel özellikler
L-Camı	Radyasyona karşı kurşun içerir
M-Camı	Yüksek elastik modül
S-2 Camı	Yüksek çekme dayanımı
W-2 Camı	Paneller için yarı şeffaf
AR- Camı	Alkali dayanım
R- Camı	Yüksek çekme dayanımı

Cam elyaf çeşitlerinin kompozisyonları Tablo 2’de verilmektedir

Tablo 2. Cam elyaf türlerinin kompozisyonları (Polat, 2019)

	A	C	E	R	S
SiO ₂	72.0	64.6	52.4	60.0	64.4
Al ₂ O ₃	1.5	4.1	14.4	25.0	25.0
CaO	10.0	13.4	17.2	9.0	-
MgO	2.5	3.3	4.6	6.0	10.3
Na ₂ O, K ₂ O	14.2	9.6	0.8	-	0.3
B ₂ O ₃	-	4.7	10.6	-	-
BaO	-	0.9	-	-	-

Kompozit malzemelerin güçlendirilmesinde en önemli malzeme olan E tipi cam elyaf (E-cam), nem ısı ve kimyasallara karşı gösterdiği direnç ve yüksek çekme gücüne sahip bir cam türü olması hasebiyle en çok kullanılan cam çeşididir (Çakır ve Berberoğlu, 2018).

Termal genleşme katsayısı düşük olan e-cam, yüksek elektriksel özelliklere sahiptir. E-cam ile takviye edilen kompozitlerin elastisite modülü, mukavemeti, elyaf hacmi, elyaf yönü ve çap-uzunluk oranı ile ilişkilidir. Fiberglas kullanım alanlarına göre, elyaf demetleri farklı tiplerde olabilir, bir demet içindeki elyaf sayısı ve elyaf çapı değişkenlik gösterebilir (Assarar vd., 2011; Seydibeyoğlu vd., 2017).

Tablo 3. Cam elyaf türlerinin % ağırlık bileşenleri (Yalçın, 2012)

Bileşen	E-cam(%)	C-cam(%)	S-cam(%)
SiO ₂	52.4	64.4	64.4
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	14.4	4.1	25.0
CaO	17.2	13.4	-
MgO	4.6	3.3	10.3
Na ₂ O, K ₂ O	0.8	9.6	0.3
B ₂ O ₃	10.6	4.7	-

Çeliğin ısı mukavemeti cam elyafından daha yüksektir, ancak cam elyafın çekme mukavemeti çeliğinkinden çok daha fazladır (Ertekin, 2017).

Tablo 4'te, karbon fiber, S-cam, E-cam, alüminyum, titanyum ve çeliğin yoğunluk, elastisite modülü ve çekme mukavemeti değerleri sunulmuştur.

Tablo 4. Kompozit ve metallerin mekanik özellikleri (Yalçın, 2012)

	Epoksi/ S- Cam Elyaf	Epoksi/ S- Cam Elyaf	Epoksi/ S- Cam Elyaf	Alüminyum (7075T6)	Titanyum (6Al-4V)	Çelik (4130)
Çekme Mukavemeti [N/mm ²]	1751	1103	1482	572	1103	1300
Elastiklik Modülü [GPa]	59	52	145	69	114	207
Yoğunluk [g/cm ³]	1.99	1.99	1.55	2.76	4.43	8.01

2.4.4.2. Karbon Elyaf

Kontrollü yakma ve karbonizasyon yöntemiyle üretilen siyah renkli karbon lifleri, organik karbon içeren malzemelerdir (Şekil 1'e bakınız). Isıl işlemin sıcaklığına bağlı olarak, karbon liflerinin mekanik yapısı değişmektedir. Karbon lifleri, diğer liflere kıyasla çok pahalıdır, ancak çok yüksek elastiklik ve çekme mukavemetine sahiptirler (Baker vd., 2012).

Diğer liflerden farklı olarak, karbon lifleri yaşlanma ve yorulma faktörlerine daha spesifik bir şekilde tepki verirler. Ancak, karbon fiberin diğerlerine göre daha düşük bir darbe dayanımı vardır (García-Moreno vd., 2019).

Karbon elyafın yoğunluğu ortalama olarak 1800 kg/m³'tür. Pahalı olmasına rağmen, daha çok tercih edilir (Ekinci vd., 2022).



Şekil 1. Karbon elyaf URL-1

Karbon fiber, akıcılığı, dayanıklılığı, düşük yoğunluğu ve yüksek direnci ile öne çıkan bir malzemedir. Bu malzemeler, epoksi reçineler veya alüminyum ve magnezyum gibi metal matrislerle kombine edilerek kullanılır (Mahmud vd., 2021; Öztürk, 2015). Bu elyafın kendine has mekanik özellikleri Tablo 5'te sunulmuştur.

Tablo 5. Karbon elyafların mekanik özellikleri (Yalçın, 2012)

Ürün Kodu	Çekme Mukavemeti [N/mm ²]	Eastiklik Modülü [GPa]	Yoğunluk [g/cm ³]
T300 3K	3650	231	1.76
T650/35 3K	4550	241	1.77
Thornel P25	1400	160	1.90
Thornel P75	930	320	1.70

2.4.4.3. Aramid Elyaf

Aramid, naylonun doğal bir türevi olup, yüksek modül ve mukavemet sağlar. Lifler, aromatik halkalı moleküler bağlara ve ısıya karşı dayanıklı bir yapıya sahiptir. Aramidler iki tipe ayrılır: Para Aramidler ve Meta Aramidler. Para-aramidler daha yaygın kullanılır (Ertekin, 2017).

Aramid lifin özellikleri şunlardır:

Aramid elyaflar güçlüdür.

Sıcaklığa karşı dayanıklıdır.

Aşınma ve kesilmeye karşı çok dirençlidirler.

Asitlerle temas ettiğinde yapısı bozulur.

Elyaf veya kumaş halinde işlemek, kesmek ve katlamak zor olur.

Nem emmeye elverişlidir.

Aramid, “Poly Para Phenylene terephthalamide” adlı bir kimyasal bileşiktir. Metaaramidler, koruyucu kıyafetler, termal ve elektrik ekipmanlar gibi yüksek sıcaklıklı uygulamalarda kullanılır. Para-aramidler ise harika mekanik özelliklere sahiptir ve çok çeşitli ürünlerde yer alır. Araba lastiklerinde para-aramidler kullanılır, çünkü çelik tellerden daha iyi bir malzemedir. Aramid lifinin ilk keşfedeni Dupont adlı bir firmadır ve ilk para-aramid lifine Kevlar adını vermiştir. Dünyada aramid lifinin ikinci keşfedeni ise Japon Teijin firmasıdır (Çiçek, 2019).

Aramid lifleri, Kevlar, Technora, Kevlar 49 ve Twaron gibi farklı türleri olan, çok yönlü bir malzemedir. Cam elyafından sonra en sert ve hafif liflerdir. Ucuz ve Kevlar adıyla bilinirler. Nem ve mukavemete karşı zayıftırlar (Ertekin, 2017).

Kömür lifleriyle birlikte havacılıkta kullanılan kompozit malzemelerin bir parçasıdırlar. Aramid liflerinin mekanik özellikleri Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Bazı aramid elyafların mekanik özellikleri (Nair vd., 2020)

	Çekme Mukavemeti [N/mm ²]	Eastiklik [GPa]	Modülü Uzama [%]	Yoğunluk [g/cm ³]
Kevlar 29	2920	70	3.6	1.44
Kevlar 49	3000	112	2.4	1.44
Kevlar 149	3450	179	2	1.47

Aramid lifleri, kurşun geçirmez ve kompozit malzemelerde kullanılan, yüksek erime noktası (530 °C) ve sıcaklık kararlılığı olan bir malzemedir. Camın geçiş sıcaklığından (375 °C) daha yüksek sıcaklıklarda negatif genleşme gösterir ve 640 °C’de mukavemeti kaybolur (Ertekin, 2017). Kevlar XP, Heracron, Kevlar 129, Kevlar 149, Kevlar 100, Kevlar 159, Kevlar 119 gibi farklı para-aramid türleri, farklı alanlarda kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Para-aramid kullanan kompozitlerde fenolik, vinil ester ve epoksi reçineler gibi matrisler tercih edilir. Lifler, yüksek çekme dayanımına sahiptir, ancak cam elyaflardan daha az yoğun ve daha az mukavemetlidir (Torki, 2012).

Kevlar 49 (Dupont) ve benzeri para-aramid lifleri, hafif ve yüksek kaliteli kompozit parçalar üretmek için kullanılır. Diğer liflere göre daha ucuz ve esnektir.

Sürtünme, darbe, sıcaklık ve kırılmaya karşı dayanıklıdır. UV ışığına ve neme hassastır, bu yüzden kuru ve karanlık bir yerde saklanmalıdır (Çiçek, 2019).

2.5. Polimer Matrisli Kompozitlerin Elemanları

Kompozit, iki ana eleman olan donatı ve matris ile birlikte ek bir dolgu elemanı içerir (Ömercikoğlu, 2009).

2.5.1. Matris Elemanı

Takviye elemanı, kompozitin üzerine bir kuvvet uygulandığında matris elemanı ile bağlantı kurar, çünkü matris elemanı ana elemandır. Bu bağlantı, takviye elemanının aşınmaya ve kimyasal etkilere karşı korunmasını sağlar (Hollaway, 2011).

Matris elemanı, yüksek yapışma gücüne ve çevresel faktörlere karşı dirence sahip olmalıdır. Bu matris malzemeleri, mekanik özellikleri zayıf olan ve sert ve kırılğan malzemeler gibi dış etkilere daha dayanıksız olan malzemelerdir. PMK' de matris elemanları, termoplastik ve termoset olarak iki gruba ayrılır (Ömercikoğlu, 2009).

Termoplastikler, düşük sıcaklıklarda sert ve dayanıklıdır, ancak yüksek sıcaklıklarda yumuşarlar. Isıl işlem gören termoplastikler, tekrar ısıtıldıklarında şekillerini kaybederler (Hollaway, 2011). Termosetler, termoplastiklere kıyasla daha az dayanıklı ve daha kolay kırılırlar. Bununla birlikte, faydalı özelliklere sahiptirler, ancak kalıplama için çok fazla ısı ve maliyet gerektirdikleri için kompozit üretiminde sıkça kullanılmazlar. Termosetler, yüksek çekme ve eğilme direncine sahiptirler, bu da onları havacılık sektöründe yüksek mukavemetli malzemeler olarak uygun kılar. Ayrıca geri dönüştürülebildikleri için otomotiv endüstrisinde de tercih edilirler (Ömercikoğlu, 2009).

Termoplastiklere göre termosetler, polimer matrisli kompozit üretiminde daha sık kullanılırlar. Isıyla katılaştıran plastiklere reçine de denir ve bunlar oda sıcaklığında akışkandır. Termoset atıkları, sertleştirici veya katkı maddeleri ile karıştırıldığında kimyasal bir reaksiyon sonucu sert ve katı hale gelirler (Hollaway, 2011). Kimyasal reaksiyonun gerçekleştiği ortamın sıcaklığı, termoset yapının mekanik niteliklerini ve reaksiyon süresini belirler. Termosetler, termoplastiklerin tersine, yüksek sıcaklıklarda erimezler ve tekrar şekillendirilemezler. Fakat termosetler, maliyetleri düşük ve kullanımları kolay olduğu için önemlidir (Amin vd., 2011).

2.5.1.1. Polyester Reçine

Polyester reçine, çok fonksiyonlu asitler ve alkollerin reaksiyonuyla oluşan sentetik bir polimerdir. Polyester reçineler, doymuş ve doymamış olarak ikiye ayrılır. Doymamış polyester reçineler, kompozit malzemeler olarak kullanılır. Polyester reçineler, ısıyla sertleşir ve cam elyaflarla iyi bağlanır. Polyester reçineler, suya, havaya ve bazı asitlere dayanıklıdır. Polyester reçineler, kalıp yapımı, döküm, tekne yapımı, plastik onarımı, jakuzi, havuz gibi birçok alanda kullanılır (Tuncer, 2018).

2.5.1.2. Vinilester Reçine

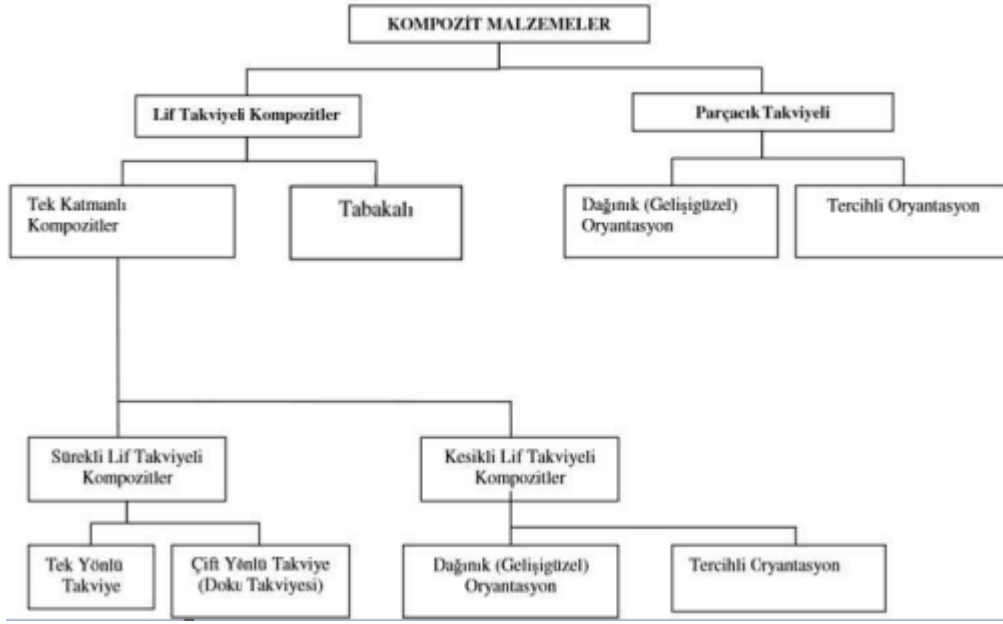
Vinilester reçine, epoksi ve doymamış asitlerin reaksiyonuyla oluşan bir polimer matrisli kompozittir. Polyester ve epoksi reçinelerin özelliklerini bir arada sunar. Vinilester reçine, yüksek mekanik, kimyasal ve termal dayanıma sahiptir. Vinilester reçine, kompozit malzemeler, denizcilik, kimya, petrokimya, boru, kalıp, depo gibi çeşitli sektörlerde kullanılır (Kartal vd., 2019).

2.5.1.3. Epoksi Reçine

Epoksi reçine, iki bileşenli bir malzemedir. Reçine ve sertleştirici karıştırıldığında, kimyasal bir reaksiyon gerçekleşir ve sıvı reçine katı bir plastik hâline dönüşür. Epoksi reçine, yüksek parlaklıkta, temiz, güçlü, dayanıklı, esnek ve ısıya ve kimyasallara karşı dirençli bir yüzey oluşturur (Kocaman, 2019).

Epoksi, reçine ve sertleştiriciden oluşan iki bileşenli bir malzemedir. Bu bileşenlerin uygun oranlarda karıştırılması gerekir. Epoksi, diğer malzemelere göre daha pahalıdır, ancak mekanik özellikleri daha iyidir. Bu yüzden, otomotiv, savunma, ulaşım gibi birçok sektörde kullanılmaktadır (Bello vd., 2015).

Daha önce belirtildiği üzere, polyester, vinilester ve epoksi reçinelerin mekanik özellikleri, kurutma sıcaklığı ve süresine bağlı olarak değişmektedir. Bu değişimi Şekil 2’de görebilirsiniz. Ayrıca, kompozit levha yapımında kullanılan epoksi reçinenin kompozit türlerine göre dağılımı Şekil 3’te verilmiştir (Chemicals, 2016).



Şekil 2.Kompozit malzemeler (Agarwal ve Broutman, 1990)

2.5.2. Takviye Elemanı

Takviye elemanı, kompozit malzemelerde matris malzemenin mekanik, termal, elektriksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirmek için kullanılan bir katkı malzemesidir¹. Takviye elemanları, şekil, boyut, yapı ve malzeme türüne göre sınıflandırılabilir. Şekil ve boyut açısından, takviye elemanları parçacık, kısa elyaf, uzun elyaf, sürekli elyaf, dokuma ve örgü gibi formlarda olabilir. Yapı açısından, takviye elemanları tek fazlı veya çok fazlı olabilir. Malzeme türü açısından, takviye elemanları metal, seramik, karbon, cam, doğal lif, polimer gibi malzemelerden olabilir (Hasan ve Özyürek, 2009; Egun ve Aztekin, 2011).

Bileşen malzeme, kompozit malzemelerin güç ve dayanıklılık kazanmasını sağlar. Bu nedenle, kompozit parçaların mekanik özellikleri, hangi bileşen malzemenin kullanıldığına göre değişir. Bileşen malzemeler, parçacık, süresiz elyaf veya sürekli elyaf şeklinde olabilirler (Bahl, 2021).



Şekil 3.Kompozit malzemenin takviye ediciye göre sınıflandırılması (Kaya, 2016)

Sürekli ve sürekli elyaflar, parçacık şeklindeki takviyelerden daha iyi mekanik özelliklere sahiptir. Parçacık takviyeli kompozitlerin en bilinen uygulamaları asfalt beton ve silikat esaslı hidrolik çimentodur. Asfalt beton, asfalt ve kırılmış taşın oluşturduğu kompozit malzemedir ve yüksek dayanım ve süneklik gösterir (Ömercikoğlu, 2009).

Sürekli liflerle takviye edilen kompozit malzemeler, kaplamalara göre daha üstün mekanik özelliklere sahiptir. Sürekli lifler, sürekli liflerin kesilmesiyle elde edilir. Kesilmiş lifler, basınç uygulanarak rastgele olarak adlandırılan bir lifli kumaş oluşturmak için kullanılır (Onaran, 2000).

Kompozit malzemeleri üretirken, en çok tercih edilen takviye elemanı sürekli liflerdir. Sürekli lifler, tek tek veya kumaş şeklinde dokunarak takviye elemanı olarak işlev görür. Sürekli elyaf dokumanın bileşimi sonraki bölümde ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. Bu bölümler, cam, karbon ve aramid gibi en çok kullanılan elyaf türlerini karşılaştırmaktadır (Güneş vd., 2021).

2.5.3. Dolgu Elemanı

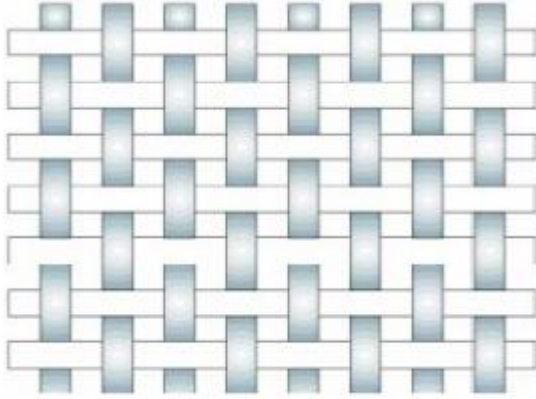
Kirişin kalınlığı arttıkça, eğilme rijitliği de küpüyle orantılı olarak yükselir. Bu yüzden, kompozit malzemelerin eğilme rijitliğini artırmak için kalınlık artırılmalıdır. Ancak, bu yöntem, çok katmanlı kompozitlerde ağırlık sorunu yaratır. Bu sorunu çözmek için, kompozit katmanların arasına düşük yoğunluklu dolgu malzemeleri konularak sandviç yapılar oluşturulur. Sandviç yapılar, “T” şeklindeki kirişler gibi taşıyıcıdır. Kompozit katmanlar, eğilme kuvvetlerini, dolgu malzemeleri ise kesme kuvvetlerini karşılar (Ömercikoğlu, 2009).

2.5.4. Sürekli Elyafların Dokuma Çeşitleri

Karbon, cam ve aramid liflerinden oluşan kesintisiz lifler, düzgün ve pürüzsüz bir yüzey meydana getirir. Bu lifler, yapıştırma işlemi veya farklı yöntemlerin kombinasyonu ile kumaş haline getirilir. Eğer lifler, filament veya ince ipliklerden oluşuyorsa ve bu lifler, daha küçük ipliklerle bir araya getirilmişse, sonuçta elde edilen kumaşlar tek yönlü bir yapı sergiler (Ömercikoğlu, 2009).

Farklı lif türlerinden üretilen örgü kumaşlar, yatay ve dikey çizgilerle entegre edilerek oluşturulur. Bu kumaşlar, bakım süreçleri ve uygulama alanları açısından farklılık gösterir. Dokuma biçimleri ve kullanım amaçlarına göre değişen özelliklere sahip olan bu kumaşlar, piyasada yaygın olarak tercih edilen tekstil ürünleri arasında yer

alır (Aktaş vd., 2013). Örneğin, Şekil 4’te gösterilen tekstil türleri, piyasadaki çeşitliliği ve kullanım alanlarını yansıtır.



Şekil 4.Piyasada sıkça kullanılan düz dokuma sitili (Yıldızhan, 2008)

2.5.5. Düz(Plain)

Bu tür dokumada, yatay elyaflar dikey elyafların arasından sırayla geçirilerek işlenir. Simetrik ve stabil bir yapıya sahip düz dokuma kumaşlar, kıvrımlı ve katlanmış hallerde kullanımları zorlaştırır. Kavisli yüzeyler için kullanıldığında, diğer dokuma türlerine nazaran mekanik özellikler açısından daha az performans gösterirler. İnce elyafların dokunması için bu yöntem sıklıkla tercih edilir (Ömercikoğlu, 2009).

2.5.6. Çapraz (Twill)

Çapraz dokuma yönteminde, yatay elyaflar birden fazla dikey elyafı geçerek çapraz bir düzen oluştururlar. Bu dokuma tarzı, görsel bir etki ile $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ açılarında dokunmuş gibi bir izlenim sunar ve kumaşta çapraz desenler belirginleşir. Düz dokumaya kıyasla daha iyi kıvrılma kabiliyetine ve reçine emilimine sahiptir. Düz dokumanın stabilitesinden biraz daha az olsa da, mekanik özellikler açısından üstünlük sağlar (Ömercikoğlu, 2009).

2.5.7. Saten (Satin)

Saten dokuma, çapraz dokumanın bir varyasyonu olarak kabul edilir ve bu yöntemde, yatay ve dikey lifler daha seyrek bir şekilde kesişir. Genellikle her 4, 5 veya 8 lifte bir, yatay lifler dikey liflerin üzerinden ve altından kayarak geçer. Saten dokuma kumaşları düzgün bir yüzeye sahiptir, reçine emilimi kolaydır ve esnek bir yapıya sahip oldukları için rahatça kıvrılabilirler. Ancak, saten dokuma kumaşların stabilitesi ideal

seviyede değildir ve asimetrik bir yapı gösterirler. Bu asimetri, bir yüzeyde yatay liflerin, diğer yüzeyde ise dikey liflerin hakim olmasına yol açar (Ömercikoğlu, 2009).

2.5.8. Sepet (Basket)

Sepet dokuma, düz dokumanın bir varyasyonu olarak tanımlanabilir ve bu teknikte, iki veya daha fazla yatay lif, iki veya daha fazla dikey lifin üzerinden ve altından geçerek dokunur. Eğer iki yatay lif, iki dikey lifin üzerinden ve altından geçiyorsa, bu tür dokuma “Sepet 2x2” olarak adlandırılır. Ayrıca, 8x2 veya 5x4 gibi asimetrik sepet dokuma stilleri de mevcuttur. Sepet dokuma, düz dokumadan daha yüksek dayanıklılığa sahip olmasına karşın, stabilite ve esneklik açısından daha düşük performans gösterir. Bu dokuma stili, genellikle daha ağır ve kalın lifler için tercih edilen bir yöntemdir (Ömercikoğlu, 2009).

2.6. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemi

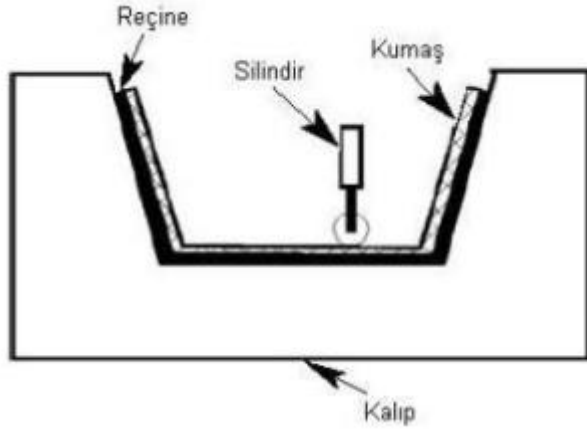
Kompozit malzemelerin mekanik karakteristikleri, üretim sürecinde tercih edilen elyaf türleri, reçine çeşitleri ve temel malzemelerin niteliklerine, ayrıca kullanılan imalat tekniklerine göre farklılık gösterir. Bu sebepten ötürü, bu kısımda kompozit plakaların imalatı için uygulanabilecek çeşitli yöntemler detaylandırılmaktadır (Yıldızhan, 2008)

2.6.1. Püskürtme Yöntemi

Bu yöntem, genelde dokuma tekstil ürünlerinin üretiminde tercih edilir. İşlem sırasında, kalıp içine manuel olarak yerleştirilen kumaşlar jel ile kaplanır ve ardından reçine emdirilmiş fırça ile ıslatılır. Bu prosedür, liflerin reçine ile doyurulmasını hedefler. Kalıp yüzeyinde biriken fazla reçine, transfer edilerek lifler ıslatılır. Bu metodun öğrenilmesi ve uygulanması basit ve maliyet etkin olup, püskürtme yöntemine kıyasla lifleri koruyarak daha üstün mekanik nitelikler sağlar. Ancak, ağır ve geniş yüzeyli lifler için uygulaması zorlayıcıdır. Ayrıca, bu yöntem malzemenin karışım oranını ve son ürünün kalitesini etkileyebilir. Üretim alanının iş güvenliği standartlarına uygun olması ve iyi havalandırılması gerekmektedir. Sıklıkla rüzgar türbin kanatları, deniz araçları ve mimari yapılar gibi geniş uygulamalar için kullanılır. (Srinivasarao vd., 2014).

Püskürtme tekniği, özel bir tabanca veya aparat kullanılarak, kalıp üzerine kesilmiş elyaf ve reçinenin uygulanmasını ifade eder. Şekil 5’te gösterildiği üzere, elyaf kesme işlemi, püskürtme tabancasının üst kısmında bulunan ve bağımsız bir şekilde

çalışan bir kesici ünite de gerçekleştirilir. Püskürtme tamamlandıktan sonra, yüzeyin düzeltilmesi için bir rulo kullanılır (Genç ve Arıcı, 2018).

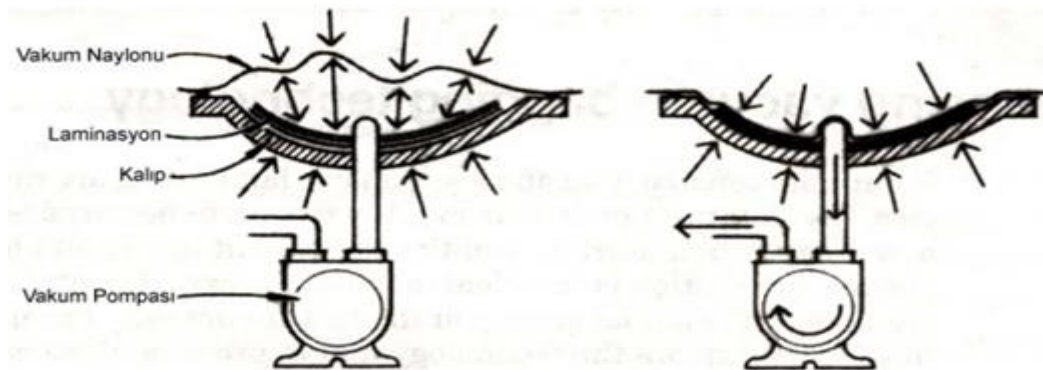


Şekil 5.El ile Yatırma Yöntemi (Ersoy, 2005)

2.6.2. Vakumlama Yöntemi

Islak elle serme yöntemi, kumaşların el ile yerleştirilip, vakumla temizlenerek ve atmosferik basınç altında torbalanarak fazla reçinenin uzaklaştırıldığı bir üretim sürecidir. Bu işlem sırasında, “pee-ply” adı verilen özel bir katman kullanılarak parlak bir yüzey elde edilir ve kalıptan ayrılması için ayırıcı madde sürülür. Vakum yöntemi, eşit reçine dağılımı sağlayarak daha kaliteli ve iyi mekanik özelliklere sahip ürünler üretir, ancak maliyeti artırır ve deneyimli personel gerektirir. Bu yöntem, özellikle tekne ve otomobil parçaları gibi uygulamalar için uygundur (Balasubramanian vd., 2018).

Püskürtme yöntemine kıyasla, vakum infüzyonu daha yüksek kalite ve mekanik performansa sahip parçaların üretimini mümkün kılar. Bu süreçte, lifler atmosferik basınç altında reçineyi daha homojen bir şekilde emerler. Çeşitli malzemelerin kullanımı maliyetleri artırır ve daha tecrübeli iş gücü gerektirir. Bu yöntem, özellikle deniz araçları ve otomotiv bileşenleri gibi alanlarda tercih edilir (Chyuan, 2005).

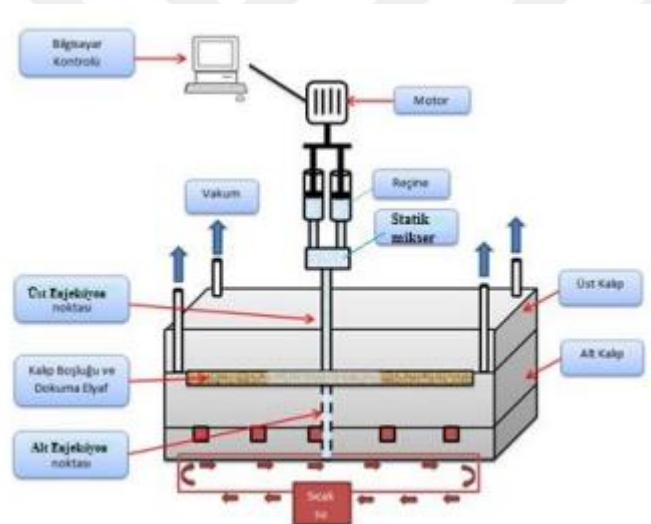


Şekil 6.Vakumlama yöntemi (Genç, 2006)

2.6.3. Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi

Bu prosedürde, kumaşlar kadın ve erkek kalıplar arasına konumlandırılır ve kalıplar arasındaki açıklığa reçine basıncı uygulanarak malzeme ıslatılır. Bazı durumlarda, kumaşın reçineyi daha homojen bir şekilde emmesi için, kalıbın bir yüzeyindeki deliklerden vakum uygulaması yapılır. Kumaşlar tamamen ıslanınca, reçine beslemesi ve vakum işlemi sonlandırılır, böylece reçinenin sertleşmesi beklenir (Rudd vd., 1997).

Bu proses, özellikle düzgün ve pürüzsüz yüzeylerin önemli olduğu parçaların imalatında tercih edilir. Manuel yöntemlere göre daha hızlı ve kaliteli üretim sağlar. Kapalı kalıp kullanımı, toksik gazların emilimini engeller ve yüzey kalitesini artırır, bu da karmaşık ve önemli yapıların imalatında avantaj sağlar. Yüksek basınç toleransı nedeniyle maliyeti yüksektir ve hassas kalıplama gerektirir. Genellikle küçük boyutlu parçaların üretiminde kullanılır (Almagro Coll, 2014).



Şekil 7.Reçine transfer kalıplama yöntemi (Sakin ve Gülnar)

2.6.4. Prepregler

Prepreg, önceden reçine ile doyurulmuş ve kullanıma hazır hale getirilmiş kumaşlardır. Üreticiler, bu kumaşları ısı ve basınç uygulayarak veya solventler kullanarak aktivasyon enerjisini azaltırlar, böylece prepregler uzun süre boyunca saklanabilir hale gelir. Prepreglerin özelliklerini korumak için belirli saklama koşulları gereklidir ve bu malzemeler, kullanılmadan önce dondurularak muhafaza edilebilirler (Garcia vd., 2008).

Prepreg malzemelerinin performansını korumak için özel depolama şartlarına ihtiyaç vardır. Kalıba elle ya da mekanik olarak yerleştirilen prepreg, hava alınarak 121-

181 °C aralığında ısıtılır. Isıtma sürecinde, katalizörler aktif hale gelir, iyileşme ve sertleşme işlemi başlar. Bu süreç, prepreg malzemelerinin özelliklerini koruyarak kullanıma hazır hale getirir (Shaik vd., 2021).

Prepreg malzemeler, özellikle yüksek basınç altında performans gösteren parçaların imalatında kullanılır. Bu, özel uçaklar, yarış otomobilleri ve spor aletleri gibi alanlarda, dayanıklılık ve hafiflik gerektiren parçalar için idealdir. Prepregler, bu tür uygulamalarda tercih edilen malzemeler arasındadır çünkü yüksek basınçlı ortamlarda bile mükemmel mekanik özellikler sunarlar (Bajpai, 2013).

Prepreg malzemeler, reçine oranının doğru ayarlanmasıyla yüksek kalite ve standartlara uygun ürünlerin üretimini sağlar. Güvenlik ve sağlık açısından diğer yöntemlere göre avantajlıdır ve oda sıcaklığında uzun süreli pişirme kapasitesine sahiptir, bu da uzun süreli işlemler için idealdir (Witik vd., 2012).

2.7. Dolgu Malzemeleri

Katı katkıları, kompozitlerin dayanıklılığını artırma amacıyla, çok düşük oranlarda eklenen ve ana matris yapısından farklı olan parçacıklardır. Bu katkıları, kullanım amacına göre mikro veya nano boyutlarda olabilirler ve genellikle kompozitlerin temel bileşenlerinden daha ekonomiktirler, bu da maliyet avantajı sağlar. Dolgu maddesi olarak %40-60 oranında kullanıldıklarında, kompozitlerin maliyetini düşürmeye yardımcı olurlar (Qu vd., 2019).

Katkı maddeleri çoğunlukla inorganik olmakla birlikte, organik seçenekler de mevcuttur. Bunlar, kompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerine büyük etki ederler ve özellikle polimer matrislerde farklılık yaratırlar. Ana hedef, bileşen maliyetlerini minimize etmektir. Seçim yaparken öncelikli dikkate alınması gereken konular vardır. Yanlış kullanıldıklarında, belirtilen işlevleri yerine getiremezler. Dikkat edilmesi gereken sorunlar şunlardır (Tuncer, 2018).

- Uygun parçacık boyutunun seçilmesi
- Eklendiğinde kimyasal tepkimelerin bilinmesi
- Yapıyla homojen entegrasyonun sağlanması
- Dikkatli üretim ve karıştırma işlemi
- Yüksek düzeyde üretim güvenliği

Parçacıkların maliyetinin hesaplanması Burada anahtar nokta maliyettir, zira çok sayıda organik ve inorganik safsızlık bulunmaktadır. Her birinin sunduğu farklı özellikler, boyutlandırma sürecini ve sonuç olarak nanopartiküllerin maliyetini etkileyecektir. Katkı maddelerinin mekanik özelliklere etkisi de kısaca ele alınmıştır.

Örneğin, yüksek çekme dayanımına sahip bir kompozit malzeme arzu ediliyorsa, basınç dayanımı için nano boyutlu küresel katkılar tercih edilmelidir (Rojas ve ark., 2020; Rojas vd., 2020).

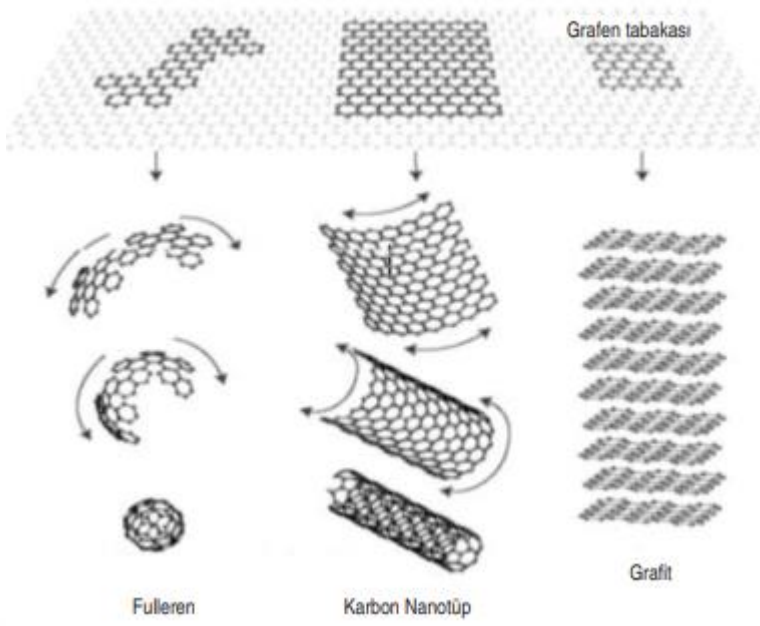
Eğer kompozitlerin sertliği artırılmak isteniyorsa, sert katkılar veya dolgu malzemeleri eklenir ve yoğunluk ayarlaması ile daha fazla dayanıklılık sağlanır. Daha yumuşak bir malzeme üretildiğinde ise, bu küçük aşınma ve yıpranmalara yol açabilir. Günümüzde kompozit malzemelerde sıkça kullanılan katkı maddeleri şunlardır (Tuncer, 2018):

- 1- Karbon siyahı
- 2- Doğal katkılar; odun talaşı, fındık kabuğu
- 3- Cam elyafı

2.7.1. Grafen

Daha önce, karbonun yalnızca grafit ve elmas formunda doğal allotropları olduğu düşünülüyordu. Andre Geim ve Konstantin Novoselov 2004 yılında Manchester Üniversitesi'nde iki boyutlu malzeme olan grafen ile devrim yaratan deneyler gerçekleştirdiler, tek katman, çift katman ve çok katmanlı formlarda bulunan iki boyutlu bir malzeme olan grafeni sentezlediler (Çiftci, 2015).

Grafenin iki boyutlu yapısından yola çıkarak, fulleren, grafit ve karbon nanotüp gibi farklı karbon allotropları üretilebilir. Fulleren, grafenin küresel bir yapıya dönüştürülmesiyle, karbon nanotüp ise silindirik bir yapıya bükülmesiyle oluşur. Diğer yandan, grafit, çok sayıda grafen tabakasının Van der Waals kuvvetleriyle bir araya gelmesiyle meydana gelen üç boyutlu bir karbon allotropudur. Katı haldeki grafit, düşük sertliğe sahip ve yağlı bir yapıdadır. Grafit yağı, sürtünme ve temas yüzeylerindeki hareketten kaynaklanan enerji kaybını ve aşınmayı azaltmak için kullanılan bir yağlayıcıdır (Öztop, 2017).



Şekil 8.Karbon esaslı malzemeler (Şenel vd., 2015)

Grafen, karbonun diğer formlarından farklı olarak dikkate değer özelliklere sahiptir. İncelemeler, grafenin yaklaşık $1500 \text{ m}^2/\text{g}$ gibi geniş bir yüzey alanına, yüksek termal iletkenliğe ve diğer karbon allotroplarına kıyasla en yüksek sertliğe sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Elektronikte yaygın olarak kullanılan silisyum, grafenle karşılaştırıldığında, elektron hızı açısından çok daha yavaştır. Grafen, güçlü karbon bağları sayesinde son derece dayanıklı bir malzemedir ve bu, onun çelikten yüz kat daha büyük bir elastikiyet modülüne sahip olduğu anlamına gelir (Kozal, 2012).

Grafen, elmasın sahip olduğu sertlik seviyesini aşarken aynı zamanda esnekliği ile de dikkat çeker; bu sayede çok çeşitli yüzeylere farklı formlarda uygulanabilir. Şeffaf bir grafen tabakasının mükemmel bir ısı iletimine sahip olduğu bilinir. Grafenin doğal olarak düşük sürtünme katsayısına sahip olması, malzemelerin aşınma direncini artırarak aşınmayı azaltır. Bu özelliklerle grafen, dünya çapında birçok yeniliğe öncülük edebilir (Şenel vd., 2015).



Şekil 9.Grafen nano tozu

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kompozit Plaka Üretimi

Bu araştırmada, el yatırma tekniği ile nano-parçacık güçlendirilmiş cam elyaf kompozit levhalar hazırlanmıştır (Şekil 14'e bakınız). Matris malzeme olarak Hexion Epikote Resin MGSLR 635\Hexion Epikure Curing Agent MGH LH 635 epoksi sertleştirici polimerik sistem seçilmiştir. Nano parçacık güçlendirici olarak farklı büyüklüklerde ağırlıkça % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 ve %1 oranında, küresel nano-grafen tozlar kullanılmıştır (Tablo 7'ye bakınız). 6 katmanlı levhaların hazırlanması için 6 adet cam 300gr/m² dokuma cam elyaf kumaş bir kesme aleti ile eşit boyutlarda kesilmiştir. Epoksi/sertleştirici matris malzeme, oda sıcaklığında ağırlıkça 70/30 oranında 1 dk boyunca karıştırılarak elde edilmiştir. Daha sonra nano grafen tozları topaklanmayı engellemek ve homojen bir karışım elde etmek için, 3000 rpm manyetik karıştırıcıda 5 dk karıştırılarak hazırladığımız epoksi sertleştirici karışımına ilave edilerek homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırma işlemi devam etmiştir. (Şekil 11'e bakınız). Şekil 12'da görüldüğü gibi mermer plaka üzerine şeffaf yapışmaz bir naylon kumaş konulmuştur.

Nano parçacık güçlendirilmiş epoksi reçine karışımı ilk olarak naylon üzerine bir fırça ile eşit bir şekilde yayıldıktan sonra sırayla 1 adet cam ve arasına belirlenen oranlarda nano grafen tozlar, 1 adet cam elyaf kumaş reçine ile tekrar uygulanarak toplamda 6 katmanlı levhalar hazırlanmıştır. Fırçalama ve kumaş yerleştirme işleminden sonra levhaların üzeri yanmaz naylon ile örtülmüştür. Hava kabarcıklarını ve fazla reçineyi gidermek için üzerine sert bir nesne konulan levhalar, kurumaları için bekletilmiştir. Bu işlem; kontrol grubu ve ağırlıkça % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 ve %1 oranında nano-grafen ekli cam elyaflar için ayrı ayrı yinelenerek toplamda 6 grup güçlendirilmiş polimer kompozit levha üretilmiştir. Şekil 13'de gösterildiği gibi kuruma işlemi bittikten sonra levhalar, reçine kalıntıları ve çapaklardan arındırılmıştır.



Şekil 10. Cam Elyaf



Şekil 11. Nano-grafen parçacık takviyeli reçine/sertleştirici polimerik sisteminin hazırlanışı

Tablo 7. Kullanılan nano parçacıkların teknik özellikleri

Katkı Malzemesi	Tane Boyutu(nm)	Safılık (%)	Dia.	Renk
Grafen Tozu	3 nm	99	1.5 μ m	Siyah

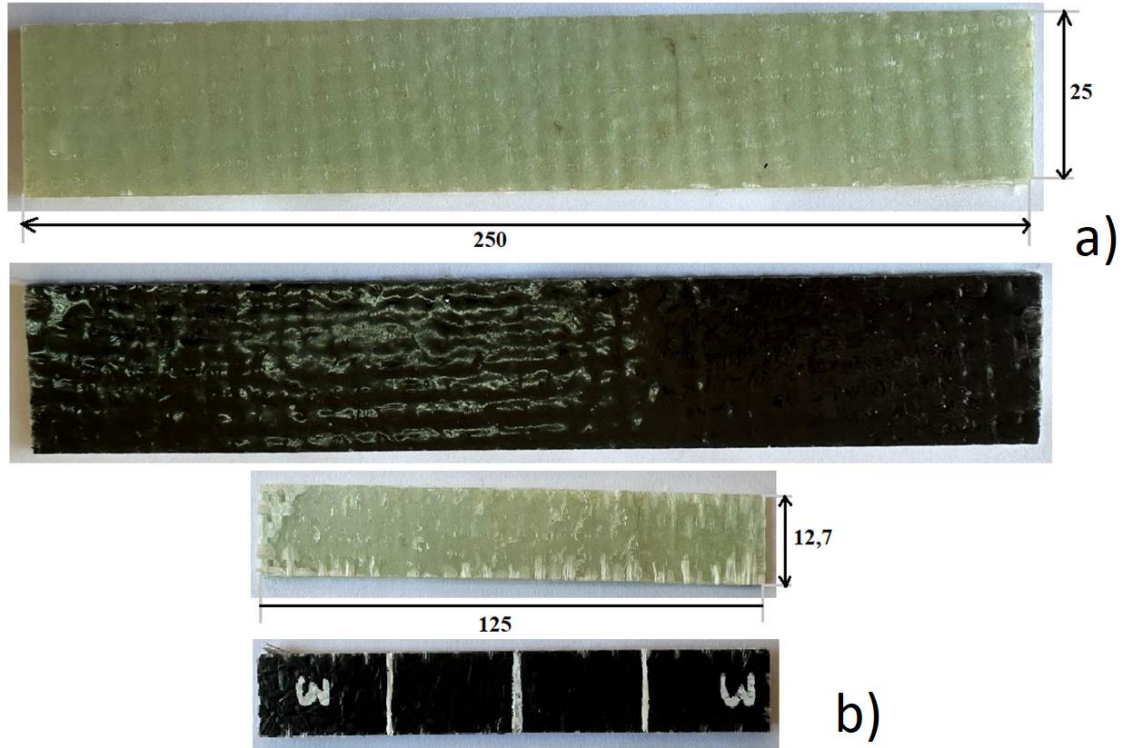


Şekil 12. Fırçalama işlemi ve elyaf yatırma

3.2. Deney Numunelerinin Oluşturulması

Bu çalışmada, çekme testi numuneleri ASTM D 3039/D standardına göre (ASTM, 1995) 25x250 mm ebatlarında ve üç nokta eğme testi numuneleri ASTM D790 standardına uygun (ASTM, 1997) olarak 12,7x125 mm ebatlarında su jeti kesim yöntemi ile kesilmiştir (Şekil 13). Numuneler kesildikten sonra kuru, temiz bir bez ile

silinerek arındırılmıştır. Her numunenin kalınlığı yaklaşık olarak $3 \pm 0,2$ mm olarak ölçülmüştür. Numuneler kesildikten sonra kuru, temiz bir bez ile silinerek düzenlenmiştir (Şekil 13’e bakınız).



Şekil 13. Kompozit plakaların kesimi ve sınıflandırılması a) çekme b) üç nokta eğme (ölçüler mm cinsinden)

3.2.1. Deney numunelerinin Çekme Testinin Yapılması

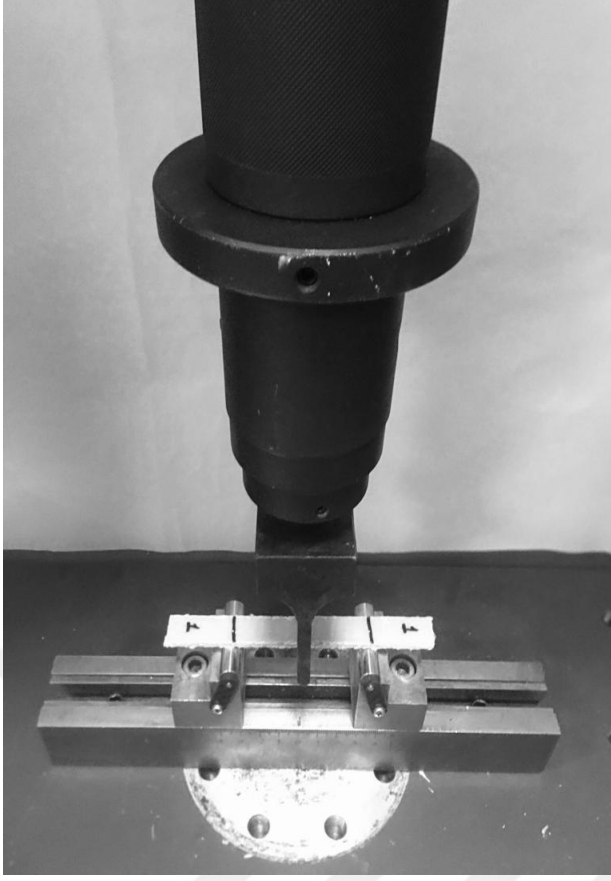
Bu çalışmada, 12-480 bar hidrolik basınç ve ± 20 kN çekme gücüne sahip Besmak Bmt 200es model test makinesi ile, oda sıcaklığında ve 2 mm/dk çekme hızı ile çekme numuneleri test edilmiştir. Gümüşhane Üniversitesi'nde bulunan bu makineye, Şekil 14'da görüleceği gibi test numunesi cihazın ortasına düzgün bir şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 14. Çekme Test Cihazı

3.3. Deney Numunelerinin Eğme Testinin Yapılması

Bu çalışmada, oda sıcaklığında ve 1 mm/dk eğme hızı ile nano-parçacık güçlendirilmiş polimer kompozitlerin eğme testleri, Atatürk Üniversitesi'nde bulunan Shimadzu AGS-X universal test cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 15'e bakınız).

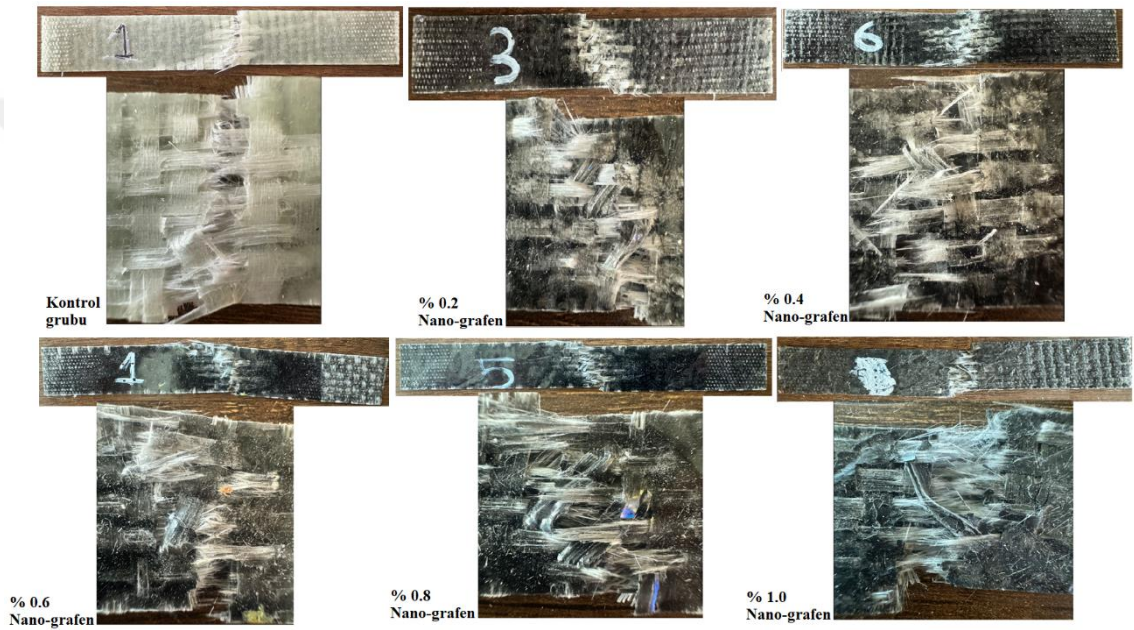


Şekil 15. Eğme test cihazı

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Kontrol grubu ve ağırlıkça % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 ve %1 oranında; grafen, ilave edilen nanopartikül takviyeli kompozit plakalar çekme ve üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Her plaka grubundan çekme ve eğme testleri için aynı ölçülerde en az 6 adet numune üretilmiştir.

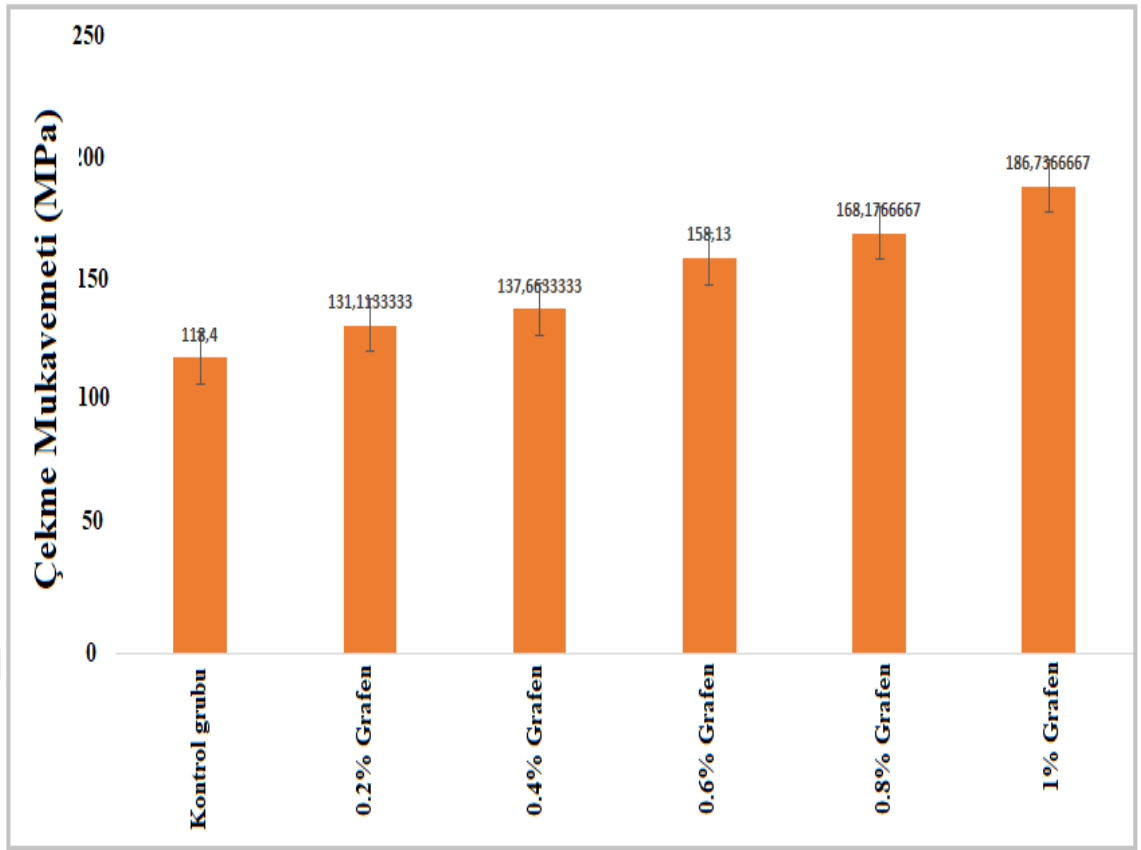
4.1. Çekme Analizi Sonuçları



Şekil 16. Kontrol grubu ve ağırlıkça % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 ve %1 Grafen Nanopartikül takviyeli kompozitlerin çekme deneyi numuneleri hasar görüntüleri

Şekil 16’da çekme yükü altında kontrol grubu ve ağırlıkça % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 ve %1 grafen nanopartikül takviyeli polimer kompozitte görülen hasar mekanizmalarının görüntüsü gösterilmektedir. Altı grupta da matris ve fiber kırıkları olduğu görülmektedir. Literatür doğrultusunda epoksi ve lifin ayrılması ile meydana geldiği tahmin edilen lif olukları testere dişi hasar mekanizmasına işaret etmektedir (Hu ve Zhang, 2004; Gao vd., 2022; Fan vd., 2024).

Testere dişleri, lif yönüne dik olarak oluşan hasar mekanizmaları ve kompozitlerde görülen en önemli fraktografik özelliklerden birisidir (Brockmann ve Salviato, 2023; Abdullah vd., 2024).

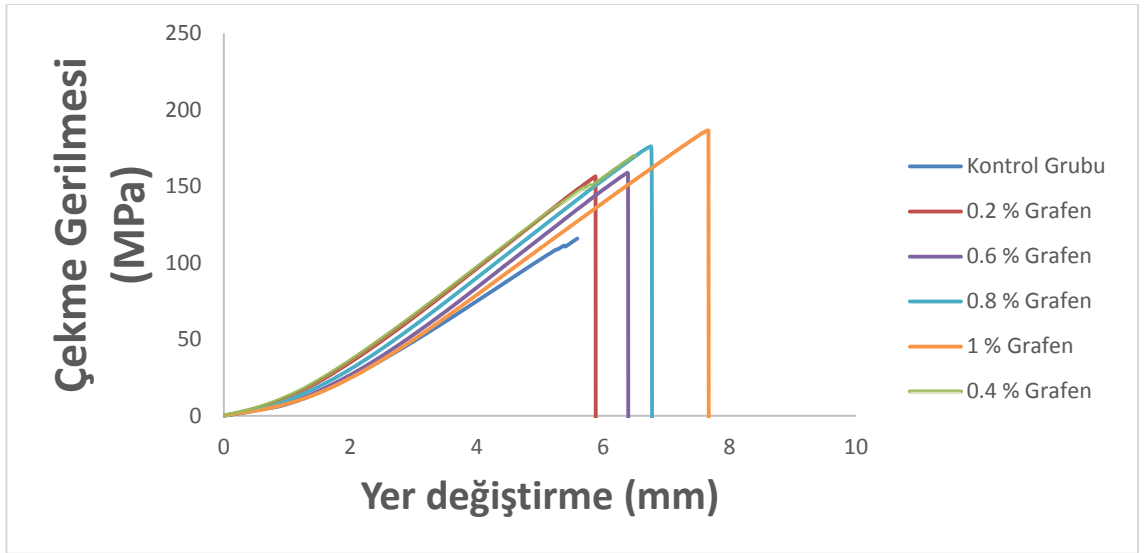


Şekil 17. Kontrol grubu ve ağırlıkça % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 ve %1 Grafen Nanopartikül takviyeli kompozitlerin ortalama çekme mukavemetleri

Kontrol grubu ve ağırlıkça % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 ve %1 Grafen Nanopartikül takviyeli kompozitlerin ortalama çekme mukavemetleri Şekil 22’ de verilmiştir. Buna göre; kontrol grubu, % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 ve %1 Grafen nanopartikül takviyeli kompozitlerin ortalama çekme mukavemetleri, sırasıyla, 118.4, 131.11, 137.66, 158.13, 168.17, ve 186.73 MPa olarak belirlenmiştir. Çekme mukavemetine en yüksek katkı, öngörüldüğü gibi ağırlıkça %1 Grafen nanopartikül takviyeli kompozitlerde meydana gelmiştir.

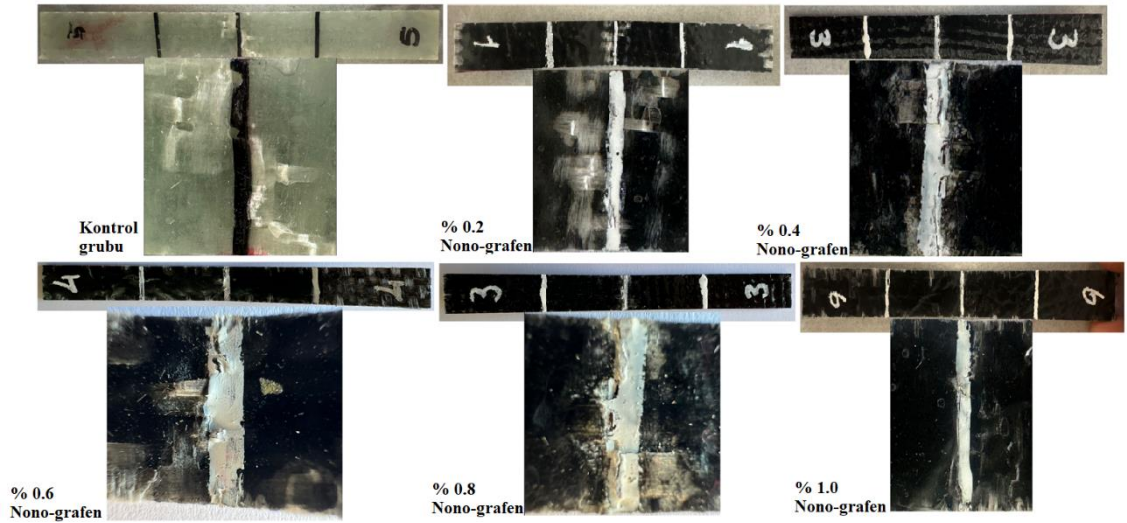
Kontrol grubuna göre değerlendirildiğinde % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 ve %1 Grafen Nanopartikül takviyeli kompozitlerde sırasıyla %10.98, %16.52, % 33.84, %42.03 ve %57.71 oranında artış meydana gelmiş ve grafen nanopartikül takviyesinin ağırlıkça miktarı arttıkça kompozitlerin çekme mukavemetinde önemli bir artış olduğu gözlenmiştir.

Bu numunelerin temsili çekme gerilmesi ve yer değiştirme eğrileri Şekil 18’de gösterilmektedir.



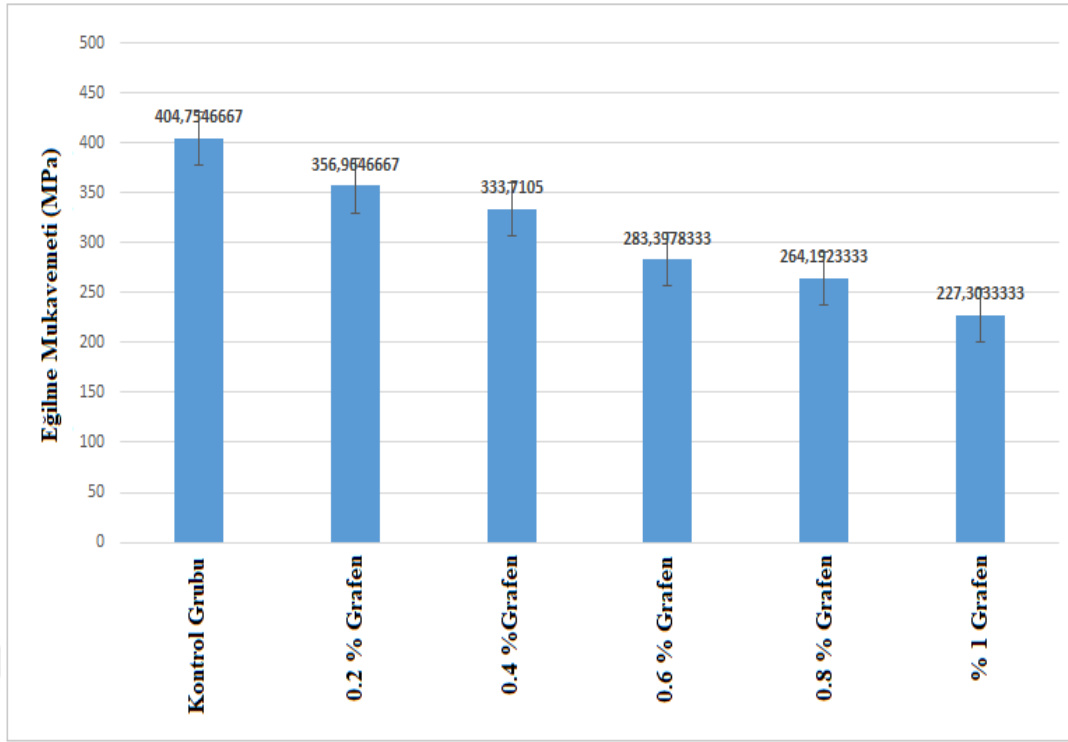
Şekil 18. Kontrol grubu ve ağırlıkça % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 ve %1 Grafen Nanopartikül takviyeli kompozitlerin Çekme gerilmesi/Yer değiştirme diyagramı

4.2. Eğme Analizi Sonuçları



Şekil 19. Kontrol grubu ve ağırlıkça % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 ve %1 Grafen Nanopartikül takviyeli kompozitlerin eğme deneyi numuneleri hasar görüntüleri

Şekil 19' de eğme yükü altında ağırlıkça farklı oranlarda grafen nano parçacık ilaveli polimer kompozitte görülen hasar mekanizmalarının görüntüsü sunulmuştur. Kontrol grubu dahil 6 grupta da orta ara yüzde matrisin kırılmasıyla birlikte bir miktar daha yük taşıdıktan sonra ani kırılma sonucu plaka bütünlüğü kaybolmuştur. Bütün plakalarda meydana gelen gerilmeler altında önce üst katman, sonra alt katman kırılmıştır.

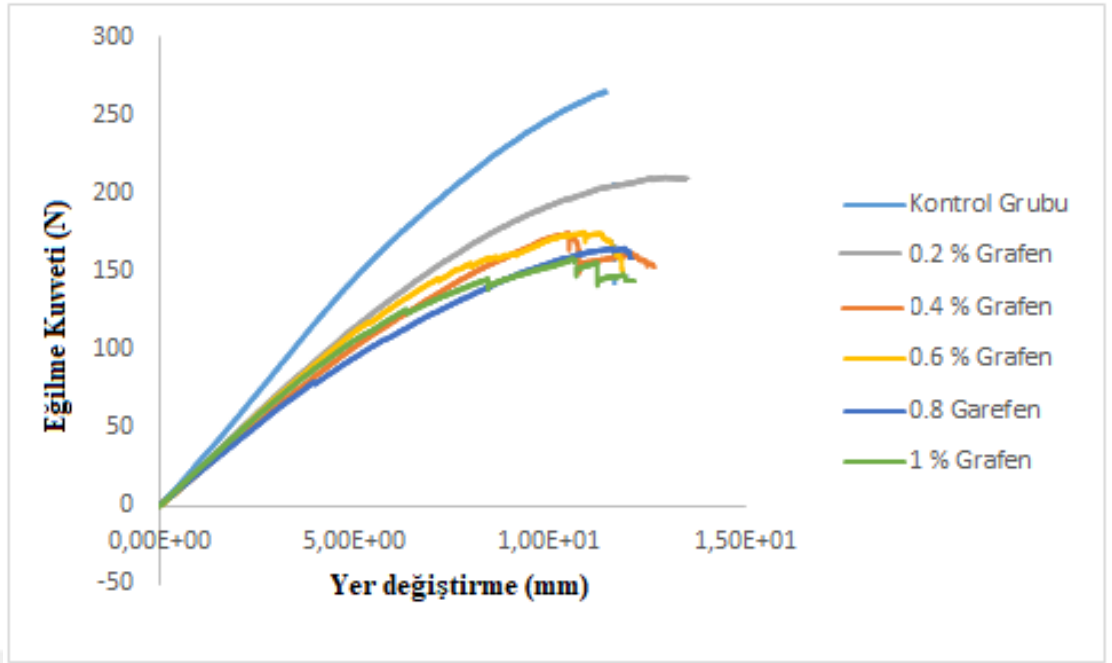


Şekil 20. Kontrol grubu ve ağırlıkça % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 ve %1 Grafen Nanopartikül takviyeli kompozitlerin ortalama eğme mukavemetleri

Grafen nanopartikül takviyeli kompozitlerin ortalama eğilme modülleri Şekil 25’de gösterilmiştir . Buna göre; Kontrol grubu ve ağırlıkça % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 ve %1 Grafen Nanopartikül takviyeli kompozitlerin ortalama eğme mukavemetleri, sırasıyla, 404.75, 356.96, 333.71, 283.39, 264.19 ve 227.30 MPa olarak bulunmuştur.

Farklı oranlarda grafen nanopartikül takviyesinin kompozitlerin ortalama eğilme mukavemetlerinde kayda değer azalma gözlemlendiği belirtilmelidir. Bu kapsamda; kontrol grubuna göre değerlendirildiğinde % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 ve %1 Grafen Nanopartikül takviyeli kompozitlerde sırasıyla %11.80, %17.55, % 29.98, %34.72 ve %43.84 oranında azalma meydana gelmiştir. Grafen nanopartikül takviyesinin ağırlıkça miktarı arttıkça kompozitlerin eğilme mukavemetinde beklenenin aksine azalma meydana gelmiştir (Seeli, 2023). Yaptıkları çalışmada cam elyafa nano grafen takviyesiyle eğilme mukavemetinin düştüğü sonucuna varmışlardır. Bunu da Nano-grafenin devasa yüzey alanının, atomik yapısının ve işlevsellik eksikliğinin bu fenomenin muhtemel sorumlusu olacağı yönünde izah etmişlerdir.

Bu numunelerin temsili kuvvet ve yer değiştirme eğrileri Şekil 21’de gösterilmektedir.



şekil 21.Kontrol grubu ve ağırlıkça % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 ve %1 Grafen Nanopartikül takviyeli kompozitlerin Eğme Kuvveti/Yer değiştirme diyagramı

5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Ağırlıkça % 0.2, % 0.4, % 0.6, % 0.8 ve %1 Grafen Nanopartikül takviyeli kompozitlerin çekme ve 3 nokta eğme testleri değerlerine göre aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Farklı oranlarda grafen nanopartikül katkısının çekme mukavemetine en yüksek katkısı ağırlıkça % 1 grafen takviyeli kompozitlerde 186.73 MPa değerinde ve kontrol grubuna göre %53.71 artış oranı gözlenmiştir.

- Eğme testinde de çekme testinin aksine en yüksek artış ağırlıkça cam elyaf kontrol grubu kompozitlerde 404.75 Mpa değerinde gözlenmiştir. Eğilme mukavemetinin nano- grafen takviye ağırlığı yüzdesindeki artışla azaldığı gösterilmiştir.

- Çekme testi hasar görüntüleri bulgularına göre tüm plaka çeşitlerinde matris ve fiber kırıkları ile birlikte tabakalar arası ayrışma (delaminasyon) gözlenmiştir.

- Üç nokta eğme testi hasar görüntüleri bulguları değerlendirildiğinde Kontrol grubu dahil 6 grupta da orta ara yüzde matrisin kırılmasıyla birlikte bir miktar daha yük taşıdıktan sonra ani kırılma sonucu plaka bütünlüğü kaybolmuştur.

- Sonuç olarak ağırlıkça farklı oaranlarda grafen takviyesinin, ağırlıkça artış miktarına paralel olarak, çekme mukavemetinde kayda değer oranda artış ancak eğilme mukavemetinde düşüşe neden olduğu tespit edilmiştir.

KAYNAKÇA

- Abdullah, S., Bokti, S., Wong, K., Johar, M., Chong, W., ve Dong, Y. (2024). Mode II And Mode III Delamination Of Carbon Fiber/Epoxy Composite Laminates Subjected To A Four-Point Bending Mechanism. *Composites Part B: Engineering*, 270, 111110.
- Adem, Y., ve Uyaner, M. (2019). Nano Elyaf Takviyeli Nanokompozit Üretimi Ve Karakterizasyonu. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(1), 10-19.
- Adem, Y., ve Uyaner, M. (2019). Nano Elyaf Takviyeli Nanokompozit Üretimi Ve Karakterizasyonu. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(1), 10-19.
- Agarwal, B., ve Broutman, L. (1990). *Analysis And Performance Of Fiber Composites* Second Edition. John Wiley ve Sons.
- Akcan, H. (2023). Grafit Ve B4c Dolgulu Cam Ve Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozitlerin Mekanik, Tribolojik Ve Delme Performanslarının İncelenmesi, Batman Üniversitesi, Batman
- Aktaş, A., Aktaş, M., ve Turan, F. (2013). The Effect Of Stacking Sequence On The Impact And Post-Impact Behavior Of Woven/Knit Fabric Glass/Epoxy Hybrid Composites. *Composite Structures*, 103, 119-135.
- Ali, A., Eker, A., ve Bodur, M. (2021). Yeşil Kompozit Malzemelerin Performans Özellikleri Ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı. *Journal Of The Institute Of Science And Technology*, 11(4), 3035-3054.
- Almagro Coll, J. (2014). Fabricación De Una Boya Marina En Biocomposite De Fibra Y Resina Naturales.
- Amin, S., ve Amin, M. (2011). Thermoplastic Elastomeric (Tpe) Materials And Their Use İn Outdoor Electrical İnsulation. *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 29(1), 15-30.
- Assarar, M., Scida, D., El Mahi, A., Poilâne, C., ve Ayad, R. (2011). Influence Of Water Ageing On Mechanical Properties And Damage Events Of Two Reinforced Composite Materials: Flax–Fibres And Glass–Fibres. *Materials Ve Design*, 32(2), 788-795.
- ASTM. (1995). Astm D 3039/D 3039m – 95a, Standard Test Method For Tensile Properties Of Polymer Matrix Composite Materials, *American Society Of Testing Materials (ASTM)*.

- ASTM. (1997). Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. ASTM D790. *Annual book of ASTM Standards*.
- Aswathnarayan, M., Muniraju, M., Reddappa, H., ve Rudresh, B. (2020). Synergistic Effect Of Nano Graphene On The Mechanical Behaviour Of Glass-Epoxy Polymer Composites. *Materials Today: Proceedings*, 20, 177-184.
- Bahl, S. (2021). Fiber Reinforced Metal Matrix Composites-A Review. *Materials Today: Proceedings*, 39, 317-323.
- Bajpai, P. (2013). Update On Carbon Fibre. Smithers Rapra.
- Baker, D., Gallego, N., ve Baker, F. (2012). On The Characterization And Spinning Of An Organic-Purified Lignin Toward The Manufacture Of Low-Cost Carbon Fiber. *Journal Of Applied Polymer Science*, 124(1), 227-234.
- Balaji, V., Sateesh, N., ve Hussain, M. (2015). Manufacture Of Aluminium Metal Matrix Composite (Al7075-Sic) By Stir Casting Technique. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 3403-3408.
- Balasubramanian, K., Rajeswari, N., ve Balasubramanian, K. (2018). Manufacturing Methods Of Composites Materials. *Advanced Engineering Research And Applications*, 241.
- Batten, S., Champness, N., Chen, X., Garcia-Martinez, J., Kitagawa, S., Öhrström, L., Et Al. (2012). Coordination Polymers, Metal–Organic Frameworks And The Need For Terminology Guidelines. *Crystengcomm*, 14(9), 3001-3004.
- Bello, S., Agunsoye, J., Hassan, S., ve Kana, M. (2015). Epoxy Resin Based Composites, Mechanical And Tribological Properties: A Review. *Tribology In Industry*, 37(4), 500.
- Brockmann, J., ve Salviato, M. (2023). The Gap Test–Effects Of Crack Parallel Compression On Fracture In Carbon Fiber Composites. *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 164, 107252.
- Cengiz, Ö., ve Topsakal, A. (2018). Lif Takviyeli Polimer Kompozit Malzemelerde Lif Türü Ve Oranının Fiziksel ve Mekanik Özelliklere Etkisi. *El-Cezeri*, 5(1), 107-116.
- Chaharmahali, M., Hamzeh, Y., Ebrahimi, G., Ashori, A., ve Ghasemi, L. (2014). Effects Of Nano-Graphene On The Physico-Mechanical Properties Of Bagasse/Polypropylene Composites. *Polymer Bulletin*, 71, 337-349.
- Chemicals, R. (2016). The advantages of epoxy resin versus polyester in marbles ve stones. *RachTR chemicals*.

- Chyuan, L. (2005). *Linear Static Finite Element Analysis Of Composite Hat-Stiffened Laminated Plates*.Universiti Teknologi Malaysia.
- Clauser, H. (1973). Advanced Composite Materials. *Scientific American*, 229(1), 36-45.
- Çakır, M., ve Berberoğlu, B. (2018). E-cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerin elyaf oranındaki artış ile mekanik özelliklerindeki değişimlerin incelenmesi. *El-Cezeri*, 5(3), 734-740.
- Çavdar, K., ve Bingöl, M. (2016). Farklı Takviye Malzemelerinin Kompozit Malzeme Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesine Etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 21(2), 123-132.
- Çiçek, Ö. (2019). *Aramid Elyaf ve Cam Elyaf İle Oluşturulan Kompozit Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Gerilme Davranışı* .Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi,Malatya
- Çiftci, N. (2015). *İndirgenmiş Grafen Okside Desteklenmiş Nikel-Paladyum Alaşım Nanopartikülleri: Sentezi, Yapısal Tanımlanmaları Ve Amonyak Boran'dan Hidrojen Üretiminde Katalitik Etkinlikleri*. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi,Erzurum
- Datoo, M. (2012). *Mechanics Of Fibrous Composites*. Springer Science ve Business Media.
- De Rosa, I., Santulli, C., ve Sarasini, F. (2009). Acoustic Emission For Monitoring The Mechanical Behaviour Of Natural Fibre Composites: A Literature Review. *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 40(9), 1456-1469.
- Dhaliwal, G., ve Newaz, G. (2018). Effect Of Resin Rich Veil Cloth Layers On The Uniaxial Tensile Behavior Of Carbon Fiber Reinforced Fiber Metal Laminates. *Journal Of Composites Science*,, 2(4), 61.
- Durgun, İ. (2014). El Yatırma Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi, 7. *Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu*, Ankara.
- Eker, A., ve Eryıldız, E. (2015). Savunma Sanayinde Kullanılan İleri Kompozit Malzemeler Ve Uygulama Alanları. *International Journal Of Engineering Research And Development*, 7(4), 8-12.
- Ekinci, A., Abki, A., ve Mirzababaei, M. (2022). Parameters Controlling Strength, Stiffness And Durability Of A Fibre-Reinforced Clay. *International Journal Of Geosynthetics And Ground Engineering*, 8(1), 6.
- Eniş, A. (2008). Polymer Based Composites İn Industrial Design. *Emi Ve Deniz Teknolojisi* (178), 10.

- Seydibeyoglu, M. O., Mohanty, A. K., ve Misra, M. (Eds.). (2017). *Fiber technology for fiber-reinforced composites*. Woodhead Publishing.
- Erdođdu, Y. (2020). *Doğal Lif Takviteli Partikül Dolgulu Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik Ve Tribolojik Davranışlarının İncelenmesi*. Doktora Tezi. İnönü Üniversitesi, Malatya
- Ergun, A., ve Aztekin, K. (2011). Parçacık Ve Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Yoğunluk Ve Basma Dayanımı Özellikleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, , 26(2).
- Ersoy, M. (2005). *Lif Takviyeli Kompozit Malzeme Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş
- Ertekin, M. (2017). *Elyaf Takviyeli Kompozitler İçin Elyaf Teknolojisi*. Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye. ss. 153.
- Fan, T., Wang, Y., Liu, C., Li, Y., ve Liu, S. (2024). Damage Failure Prediction Study Of Carbon Fiber Metal Laminates İn Hot Stamping Process. *Advanced Composite Materials*, 1-29.
- Gao, T., Li, C., Wang, Y., Liu, X., An, Q., Li, H., Et Al. (2022). Carbon Fiber Reinforced Polymer İn Drilling: From Damage Mechanisms To Suppression. *Composite Structures*, 286, 115232.
- Garcia, E., Wardle, B., ve Hart, A. (2008). Joining Prepreg Composite Interfaces With Aligned Carbon Nanotubes. *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 39(6), 1065-1070.
- García-Moreno, I., Caminero, M., Rodríguez, G., ve López-Cela, J. (2019). Effect Of Thermal Ageing On The İmpact And Flexural Damage Behaviour Of Carbon Fibre-Reinforced Epoxy Laminates. *Polymers*, 11(1), 80.
- Genç, Ç. (2006). Cam Elyaf Takviyeli Plastiklerin Üretim Yöntemlerinin Deneysel Karşılaştırılması, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Genç, Ç., ve Arıcı, A. (2018). Yat İmalatında Kullanılan Ctp Malzeme Ve İmalat Yöntemleri. *Bölüm I: El Yatırma Yöntemi*.
- Gökhan, S., ve Kayabaşı, İ. (Tarih Yok). Hafif Metal Ana Fazlı Kompozit Malzeme Üretim Sisteminin Tasarım, İmalat Ve Performansının İncelenmesi. *Gazi University Journal Of Science Part C: Design And Technology*, 7(1), 63-79.
- Güler, C., ve Ulay, G. (Tarih Yok). Köpüklü Kompozit (Sandviç) Levhaların Bazı Teknolojik Özellikleri.
- Gündoğan, K., ve Koksall, D. (2020). Nanopartikül Takviyeli Polimer Matrisli R-Pet Geri Dönüşüm İpliklerinin Mikroyapı, Termal, Mekanik Ve Antistatik

- Özelliklerinin İncelenmesi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(3), 526-534.
- Güneş, D., Çanlı, M., ve Urtekin, L. (2021). Investigation Of Mechanical Properties Of Carbon Fibre Reinforced Polyester Matrix Composite. *Journal Of Scientific Reports-A*, 047, 68-79.
- Hasan, K., ve Özyürek, D. (2009). Spex Tipi Mekanik Alaşımlama/Mekanik Öğütme Cihazı İle Üretilen Tib 2 Parçacık Takviyeli Alüminyum Bazlı Kompozit Tozların Karakterizasyonu. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10(3), 460-464.
- Hearle, J. (2001). High-Performance Fibres. *Elsevier*.
- Hollaway, L. (2011). Key Issues In The Use Of Fibre Reinforced Polymer (Frp) Composites In The Rehabilitation And Retrofitting Of Concrete Structures. In *Service Life Estimation And Extension Of Civil Engineering Structures* (Pp. 3-74). Woodhead Publishing.
- Hu, N., ve Zhang, L. (2004). Some Observations In Grinding Unidirectional Carbon Fibre-Reinforced Plastics. *Journal Of Materials Processing Technology*, 152(3), 333-338.
- Hyer, M., ve White, S. (2009). Stress Analysis Of Fiber-Reinforced Composite Materials. *Destech Publications, Inc.*
- İlhan, R., ve Feyzulloğlu, E. (2019). Cam Elyaf Takviyeli Polyester (Ctp) Kompozit Malzemelerde Kullanılan Doğal Elyaflar Ve Dolgu Maddeleri. *El-Cezeri*, 6(2), 355-381.
- Karakoç, H. (2020). Toz Metal Al7075/B4c/Si3n4 Kompozit Malzemelerin Üretimi Ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 23(4), 1141-1151.
- Kartal, I., Naycı, G., ve Demirer, H. (2019). Cam Ve Bambu Lifleriyle Takviyelendirilmiş Vinilester Kompozitlerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *International Journal Of Multidisciplinary Studies And Innovative Technologies*, 3(1), 34-37.
- Kaya, A. (2016). Kompozit Malzemeler Ve Özellikleri. *Composite Poliüretan Ve Kompozit Sanayi Dergisi*, 29, 38-45.
- Kemiklioğlu, U. (2020). Kompozit Malzemelerin Ön Yükleme Etkilerinin İncelenmesine Yönelik Bir Aparatın Tasarımı Ve Üretimi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 22(66), 897-903.

- Khakzad, F. (2017). Grafen Katkılı Cam/Epoksi Nanokompozit Plakaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi (Doctoral Dissertation, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara).
- Kim, Z. (2004). Width-Dependent Conductance Of Graphene Nanoribbons. *Computational Materials Science*.
- Kocaman, S. (2019). Farklı Kimyasallarla Modifiye Edilen Doğal Atık Takviyeli Epoksi Reçine Matrisli Kompozitlerin Hazırlanması Ve Karakterizasyonu. *International Journal Of Engineering Research And Development*, 11(1), 77-86.
- Korku, M., Feyzullohoğlu, E., ve İlhan, R. (2022). Farklı Türlerde Polyester Ve Çekme Katkısı İçeren Cam Elyaf Takviyeli Polyester Kompozit Malzemelerde Çevresel Koşulların Aşınma Davranışlarına Olan Etkilerinin İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 1(1).
- Kozal, B. (2012). Karbon Tabanlı Petek Örgülerin Elektronik Özellikleri.
- Kösedağ, E., ve Ekici, R. (2019). Partikül Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Darbe Davranışları Üzerine Bir Derleme. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 384-393.
- Lubin, G. (2013). Handbook Of Composites. Springer Science Ve Business Media.
- Mahmud, S., Hasan, K., Jahid, M., Mohiuddin, K., Zhang, R., ve Zhu, J. (2021). Comprehensive Review On Plant Fiber-Reinforced Polymeric Biocomposite. *Journal Of Materials Science*, 56, 7231-7264.
- Masuelli, M. (2013). Ntroduction Of Fibre-Reinforced Polymers– Polymers And Composites: Concepts, Properties And Processes. *In Fiber Reinforced Polymers-The Technology Applied For Concrete Repair. Intechopen*.
- Metin, Ö., ve Gavgalı, M. (2015). In Situ Alüminyum Metal Matrisli Kompozitler Ve Sıcak Presleme İle Üretimleri. *Ordu Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 5(2), 63-73.
- Mishra, B., Mishra, D., ve Panda, P. (2020). An Experimental Investigation Of The Effects Of Reinforcement Of Graphene Fillers On Mechanical Properties Of Bi-Directional Glass/Epoxy Composite. *Materials Today: Proceedings*, 33, 5429-5441.
- Muharrem, P. (2019). Karbon Nanotüp (Cnt) Ve Nano Grafen (G) Takviyeli Al 2024 Kompozitlerin Vorteks Yöntemiyle Üretilerek Aşınma Ve İşlenebilme Özelliklerinin İncelenmesi. *International Journal Of Engineering Research And Development*, 11(1), 370-382.

- Muharrem, P. (2019). Karbon Nanotüp (Cnt) Ve Nano Grafen (G) Takviyeli Al 2024 Kompozitlerin Vorteks Yöntemiyle Üretilerek Aşınma Ve İşlenebilme Özelliklerinin İncelenmesi. *International Journal Of Engineering Research And Development*, 11(1), 370-382.
- Murat, K., Mustafa, Ö., Güven, C., ve Demircan, G. (2022). Al₂O₃ Ve TiO₂ Nanopartikül Katkısının Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerine Ve Burkulma Davranışına Etkisi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 7(3), 161-172.
- Mustafa, G., ve Solmaz, Y. (2007). Tabakalı Kompozit Plakalarda Takviye Malzemesi Ve Oryantasyon Açısının Gerilme Analizine Etkisi. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 6(1), 16-25.
- Onaran, K. (2000). Malzeme Bilimi (8. Baskı). İstanbul: Bilim Teknik Yayınevi.
- Ömercikoğlu, A. (2009). *Metal Katmanlar İçeren Hibrit Katmanlı Kompozit Plakların Anlık Basınç Yükü Altındaki Dinamik Cevabının İncelenmesi. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.*
- Özkan, A., ve Yastımoğlu, F. (2017). Tekrarlanan Yükler Altında Kompozit Malzemelerin Yapılarının İncelenmesini Amaçlayan Deney Aygıtı Tasarımı. *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 56-66.
- Özkan, A., Şişik, N., ve Öztürk, U. (2016). Kompozit Malzemelerin Ağız, Yüz, Çene Cerrahisinde Kullanımı Ve Malzeme Uygunluklarının Belirlenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 4(1), 227-242.
- Öztop, B. (2017). *Atık Alüminyum Kullanarak Grafen Ve Silisyum Nitrür Takviyeli Kompozit Üretimi Ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. On Dokuz Mayıs Üniversitesi, İzmir.*
- Öztürk, Ö. (2015). *Poliüre Matris Malzemesi Ve Cam, Aramid, Karbon Elyaf Kumaş Takviyeleri Kullanılarak Üretilen Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Namık Kemal Üniversitesi.*
- Polat, B. (2019). *Cam Takviyeli Polimer Matrisli Termoplastik Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. İskenderun Teknik Üniversitesi, Hatay.*
- Qu, Y., Wang, S., Tian, Y., ve Zhou, D. (2019). Comprehensive Evaluation Of Paraffin-Hdpe Shape Stabilized Pcm With Hybrid Carbon Nano-Additives. *Applied Thermal Engineering*, 163, 114404.

- Rojas, D., Pineda-Gomez, P., ve Guapacha-Flores, J. (2020). Effect Of Silica Nanoparticles On The Mechanical And Physical Properties Of Fibercement Boards. *Journal Of Building Engineering*, 31, 101332.
- Rudd, C., Long, A., Kendall, K., ve Mangin, C. (1997). Liquid Moulding Technologies: Resin Transfer Moulding, Structural Reaction Injection Moulding And Related Processing Techniques. *Elsevier*.
- Sakin, R., ve Gülnar, M. (2015). Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama (Rtm) Yöntemi İle Kompozit-Plaka Üretim Prosesi Üzerine Çalışmalar. *Uluslar Arası Katılımlı 3. Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, Kuşadası*
- Saruhan, H., ve Uygur, İ. (2004). Aluminyum Esaslı Metal Matris Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri. *Sakarya University Journal Of Science*, 8(1), 167-174.
- Seeli, H., Prasad, V. V. S., ve Venkatesh, M. (2023). Nano-graphene E-glass fibre epoxy polymer composite thermal and mechanical characteristics study. *Materials Today: Proceedings*.
- Shaik, F., Ramakrishna, M., ve Varma, P. (2021). A Review On Fabrication Of Thermoset Prepreg Composites Using Out-Of-Autoclave Technology. *Incas Bulletin*, 13(2), 133-149.
- Shanmugasundar, G., Vanitha, M., Babu, L., Suresh, P., Mathiyalagan, P., Krishnan, G., Et Al. (2020). Fabrication And Analysis Of Mechanical Properties Of Pvc/Glass Fiber/Graphene Nano Composite Pipes. *Materials Research Express*, 7(11), 115303.
- Srinivasarao, D., Reddy, M., Veni, M., ve Kumar, M. (2014). Effect Of Nano Rubber Additions On Wear And Mechanical Properties Of Epoxy Glass Fibre Composites. *Journal Of Material Sciences Ve Engineering*, 3(143), 2169-0022.
- Sun, J., Ye, D., Zou, J., Chen, X., Wang, Y., Yuan, J., Et Al. (2023). Review On Additive Manufacturing Of Ceramic Matrix Composites. *Journal Of Materials Science ve Technology*, 1(16), 138.
- Şenel, M., Gürbüz, M., ve Erdem, K. (2015). Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Yeni Nesil Kompozitler. *Mühendis Ve Makina*, 56(669), 36-47.
- Şenel, M., Gürbüz, M., ve Koç, E. (2015). Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Yeni Nesil. *Mühendis Ve Makina*, 669, 36-47.
- Torki, A. (2012). Dynamic Mechanical Properties Of Hybrid Nanocomposite Materials. *Универзитет У Београду*.

- Tuncer, C. (2018). *Caco₃, Sio₂ Ve Grafen Nano Partikül Katkısının Tabakalı Cam Elyaf Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkisi. Pamukkale Üniversitesi, Denizli.*
- Tuncer, C. (2018). *CaCO₃, SiO₂ ve Grafen Nano Partikül Katkısının Tabakalı Cam Elyaf Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi, Denizli.*
- Türkmen, İ., ve Koksall, N. (2014). Investigation Of Mechanical Properties And Impact Strength Depending On The Number Of Fiber Layers In Glass Fiber-Reinforced Polyester Matrix Composite Materials. *Materials Testing*, 56(6), 472-478.
- Türkmen, İ., ve Köksall, N. (2012). Cam Elyaf Takviyeli Polyester Matrisli Kompozit Malzemelerde (Ctp) Elyaf Tabaka Sayısına Bağlı Mekanik Özelliklerin Ve Darbe Dayanımının İncelenmesi-Investigation Of Mechanical Properties And Impact Strength Depending On The Number Of Fibre Layers In Gl. *Celal Bayar University Journal Of Science*, 8(2), 17-30.
- Ulunam, M., Tankut, A., ve Bardak, T. (2011). İleri Mühendislik Malzemelerinin Orman Endüstrisinde Kullanımı. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 13(19), 90-99.
- URL-1, <https://www.dostkimya.com.tr/tr/haberler/karbon-fiber-guclendirme-urunleri>
- Wallace-Dunlop, M. A. (1882). *Glass in the old world*. Field ve Tuer.
- Witik, R., Gaille, F., Teuscher, R., Ringwald, H., Michaud, V., ve Månson, J. (2012). Economic And Environmental Assessment Of Alternative Production Methods For Composite Aircraft Components. *Journal Of Cleaner Production*, 29, 91-102.
- Yalçın, E. (2012). *Farklı Kumaş Ve Farklı Yöntemlerle Üretilmiş Ctp Kompozitlerin Balistik Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.*
- Yastımoğlu, F., ve Özkan, A. (2017). Tekrarlanan Yükler Altında Kompozit Malzemelerin Yapılarının İncelenmesini Amaçlayan Deney Aygıtı Tasarımı. *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 56-66.
- Yavuz, G. (2011). Lif Takviyeli Polimerlerin Betonarme Kirişlerde Donatı Olarak Kullanımı. *E-Journal Of New World Sciences Academy*.
- Yıldızhan, H. (2008). *Polimer matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi,İsparta*

Zhou, D., Qiu, F., Wang, H., ve Jiang, Q. (2014). Manufacture Of Nano-Sized Particle-Reinforced Metal Matrix Composites: A Review. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 27, 798-805.



ÖZGEÇMİŞ

İlk ve ortaokul eğitimini Gümüşhane tamamlamıştır. Lise eğitimine Trabzon'da devam etmiştir. Akabinde 2015 yılında başladığı Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Fakültesinden 2021 yılında Makine Mühendisi olarak mezun olmuştur. 2021 yılında Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2022 yılında tamamladığı askerlik görevinden sonra 2023 yılında Emniyet Teşkilatında göreve başlamıştır ve halen görev yapmaktadır.

