



**GRAFEN VE ARAMİD TAKVİYELİ EPOKSI
MATRİSLİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Ömer ŞEN

**2022
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİYEL TASARIM MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğretim Üyesi Musa YILDIRIM**

**GRAFEN VE ARAMİD TAKVİYELİ EPOKSİ MATRİSLİ HİBRİT
KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Ömer ŞEN

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Musa YILDIRIM**

**KARABÜK
Haziran 2022**

Ömer ŞEN tarafından hazırlanan “GRAFEN VE ARAMİD TAKVİYELİ EPOKSİ MATRİSLİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Musa YILDIRIM

Tez Danışmanı, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 17.06.2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Suat ALTUN (KBU)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Bekir YAVUZER (BU)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Musa YILDIRIM (KBU)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Ömer ŞEN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GRAFEN VE ARAMİD TAKVİYELİ EPOKSİ MATRİSLİ HİBRİT KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ömer ŞEN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Dr. Öğr. Üyesi Musa YILDIRIM

Haziran 2022, 77 sayfa

Bu çalışmada, grafen miktarının dokuma aramid fiber epoksi kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çalışma kapsamında %0.25, %0,5, %1 ve %2 olmak üzere 4 farklı oranda grafen nanopartikül epoksi matris içerisine ilave edildikten sonra mekanik karıştırılarak el yatırma ve vakum infüzyon yöntemiyle 5 katlı grafen/aramid/epoksi kompozit plakalar üretilmiştir. Üretilen kompozit plakaların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla üç nokta eğme ve çekme test numuneleri standartlara göre su jeti ile kesilerek testler uygulanmıştır, Mikro yapı incelemeleri makro mikroskopta yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda Kompozitlerin mikro yapılarında aglomerasyonun olduğu kompozite ilave edilen grafenin eğilme dayanımı ve eğilme modülünü arttırdığı en yüksek eğme gerilmesinin %1 grafen ilave edilen numunelerde görülürken, Yapılan çekme testleri sonrasında en yüksek çekme dayanımının katkısız numunede olduğu %0.25 grafen ilavesinden sonra çekme dayanımının yapıda oluşan aglomerasyona bağlı olarak düştüğü görülmüştür.

Anahtar Sözcükler : Hibrit kompozit, Aramid, Grafen

Bilim Kodu : 91417

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF GRAPHENE AND ARAMID REINFORCED EPOXY MATRIX HYBRID COMPOSITES

Ömer ŞEN

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Industrial Design Engineering

Thesis Advisor:

Assist. Prof. Dr. Musa YILDIRIM

June 2022, 77 pages

In this study, aramid fiber of woven fabrics will be applied using graphene. After the graphene epoxy epoxy 4 at a rate of 0.25%, 0.5%, 1% and 2%, 5-layer graphene/aramid/epoxy plates were formed by mechanical mixing, manual and vacuum intervention. made of material made of material with three-point test specimens to be produced from the material made of composite material. The examinations made on the samples taken within the scope of the training on agglomeration in the micro-design of Composites for the work done here, the samples taken in the samples taken in the samples related to the examination related to the examination made, the samples taken in the sample obtained from the examination related to the examination made, the samples taken within the scope of the additional examination. delivered due to agglomeration.

Key Word : Hybrid composite, Aramid, Graphene

Science Code : 91417

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın sürecinde ve eğitim planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Dr. Öğretim Üyesi Musa YILDIRIM'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu Yüksek Lisans Tez Çalışması, Karabük Üniversitesi Rektörlüğü BAP Komisyonu tarafından KBÜ-BAP-21-YL-010 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Her süreçte yanımda bulunup destek veren abim Kenan ŞEN'e sonsuz teşekkür ederim. Tez süresi boyunca yanımda olan ve destekleyen arkadaşım Umut KİBAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme, maddi ve manevi yardımlarını benden esirgemedi her zaman yanımda oldukları için teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
KOMPOZİTLER	4
2.1. NANOKOMPOZİTLER	4
2.2. HİBRİT KOMPOZİTLER	5
2.3. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI.....	6
2.3.1 Metal Matrisli Kompozitler	6
2.3.2 Seramik Matrisli Kompozitler	8
2.3.3. Polimer Matrisli Kompozitler.....	8
2.4. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERDE KULLANILAN TERMOSET ESASLI MATRİSLER	9
2.5. EPOKSİ REÇİNELER	9
2.6. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERDE KULLANILAN TAKVİYE ELEMENLARI	12
2.6.1. Dolgu Takviyeler	13
2.6.2. Partikül Takviyeler	13
2.6.3. Fiber Takviyeler.....	14
2.6.4. Doğal Fiber Takviyeler.....	15

	<u>Sayfa</u>
2.6.5. Cam Fiber Takviyeler	16
2.6.6. Karbon Fiber Takviyeler	16
2.7. TERMOSET MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ ..	17
2.7.1. Elle Yatırma (Hand Lay-up).....	17
2.7.2. Püskürtme Yöntemi (Spray-Up).....	18
2.7.3. Elyaf Sarma Yöntemi (Filament Winding).....	19
2.7.4. Vakum İnfüzyon (vakum bagging).....	19
2.7.5. Hibrit El Yatırma Yöntemi	20
2.7.6. Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi	20
2.7.7. Üretim Yöntemlerinin Kıyaslanması	21
BÖLÜM 3	23
GRAFEN.....	23
BÖLÜM 4	29
ARAMİD FİBER	29
4.1. ARAMİD FİBERLERİN AVANTAJLARI.....	32
4.2. ARAMİD FİBERLERİN DEZAVANTAJLARI	32
4.3. ARAMİD FİBER YÜZEY İŞLEMLERİ	32
BÖLÜM 5	34
LİTARETÜR ARAŞTIRMASI	34
BÖLÜM 6	38
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	38
6.1. MATERYAL.....	38
6.2. KOMPOZİT PLAKALARIN ÜRETİLMESİ	40
6.2.1. Vakum Destekli El Yatırma Sisteminin Hazırlanması	41
6.2.2. Epoksi Reçine Hesabı	43
6.2.3. Grafen Katkılı Kompozit Numuneler İçin Grafen Oran Hesabı.....	43
6.2.4. Epoksi Reçinenin Sisteme Verilmesi.....	45
6.3. DENEY NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI	47

	<u>Sayfa</u>
6.4. ÜRETİLEN KOMPOZİT MALZEMELERE UYGULANAN MEKANİK TESTLER	49
6.5. ÜRETİLEN KOMPOZİTLERİN MİKRO YAPI İNCELEMELERİ	49
6.6. ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ	50
6.7. ÇEKME TESTİ	53
BÖLÜM 7	55
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	55
7.1. ÜRETİLEN KOMPOZİTLERİN MİKRO YAPI İNCELEMELERİ	55
7.2. ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ	57
7.3. ÇEKME TESTİ	62
BÖLÜM 8	67
SONUÇLAR ve ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Kompzotilerin sınıflandırılması.....	6
Şekil 2.2.	Epoksi reçine kimyasal yapısı.....	11
Şekil 2.3.	Epoksi reçineye ait çapraz bağlanma mekanizması	11
Şekil 3.1.	Grafen nano partikülünün SEM görüntüsü	23
Şekil 3.2.	Karbon esaslı malzemeler	24
Şekil 3.3.	Grafenin diğer malzemeler ile kıyaslanması.....	26
Şekil 4.1.	Kullanılan aramid fiberin; (a) moleküler yapısını, (b) iplikleri ve (c) dokuma kumaşı	30
Şekil 4.2.	Aramid fiber kumaşların dokuma tipleri	30
Şekil 6.1.	Aramid kumaş örgü tipi	39
Şekil 6.2.	Aramid kumaş ve aramid makası.....	41
Şekil 6.3.	Numune kesim planı	41
Şekil 6.4.	Pleksi cam levha	42
Şekil 6.5.	Sızdırmazlık bantları.....	42
Şekil 6.6.	Grafenin tartılması	44
Şekil 6.7.	Reçine ve grafen karıştırma işlemi	45
Şekil 6.8.	Kompozit plakanın hazırlanışının adımları şematik gösterim	46
Şekil 6.9.	Vakumlama işlemi	46
Şekil 6.10.	a) katkısız, b) %0,25 katkılı, c) %0,5 katkılı d) %1 katkılı, e) %2 katkılı	47
Şekil 6.11.	Su jeti ile kesim işlem	48
Şekil 6.12.	Su jeti ile kesilen kompozit plaka	48
Şekil 6.13.	Streo mikroskop cihazı	49
Şekil 6.14.	Üç nokte eğme testi numeleri	51
Şekil 6.15.	Eğme tesinten sonra numune görüntüleri	52
Şekil 6.16.	Üç nokta eğme testi.....	53
Şekil 6.17.	Çekme Test Numuneleri	54
Şekil 6.18.	Numuların çekme testinden sonra görüntüleri.....	54

Sayfa

Şekil 7.1.	a) epoksi aramid fiber kompozit b) %0,25 katkı c) %0,5 katkı d) %1 katkı e) %2 katkı	56
Şekil 7.2.	Hibrit kompozitler levhalar arası mikroskop görüntüsü	57
Şekil 7.3.	%0 Katkılı kompozitin gerilme - şekil değişme grafiği	58
Şekil 7.4.	%0,25 Katkılı kompozitin gerilme - şekil değişme grafiği	58
Şekil 7.5.	%0,5 Katkılı kompozitin gerilme - şekil değişme grafiği	59
Şekil 7.6.	%1 Katkılı kompozitin gerilme - şekil değişme grafiği	59
Şekil 7.7.	%2 Katkılı kompozitin gerilme - şekil değişme grafiği	60
Şekil 7.8.	Eğilme direnci ve eğilme modül grafiği	61
Şekil 7.9.	%0 Katkılı kompozitin gerilim - gerinim grafiği	62
Şekil 7.10.	%0,25 Katkılı kompozitin gerilim - gerinim grafiği	62
Şekil 7.11.	%0,5 Katkılı kompozitin gerilim - gerinim grafiği	63
Şekil 7.12.	%1 Katkılı kompozitin gerilim - gerinim grafiği	63
Şekil 7.13.	%2 Katkılı kompozitin gerilim - gerinim grafiği	64
Şekil 7.14.	Maksimum gerilme ve elastisite modülü grafiği	64
Şekil 7.15.	Şekil değiştirme grafiği	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Kompozit malzemelerde kullanılan bazı liflerin özellikleri	15
Çizelge 2.2. Kompozit üretim yöntemlerinin kıyaslanması.....	22
Çizelge 3.1. Tek tabakalı grafenin özellikleri	25
Çizelge 4.1. Bazı fiberlerin karşılaştırılması	31
Çizelge 6.1. Epoksi reçine ve sertleştirici teknik özellikleri	38
Çizelge 6.2. Çalışmada kullanılan Aramid fiber kumaş malzemesinin teknik özellikleri.....	39
Çizelge 6.3. Çalışmada kullanılan grafen teknik özellikleri	40
Çizelge 6.4. Grafen katkı oranları	44
Çizelge 6.5. Üretilen nanokompozit plakalar.....	47
Çizelge 6.6. Uygulanan testler	49
Çizelge 7.1. Eğilme direnci, eğilme uzama, eğilme modülü değerleri	60
Çizelge 7.2. Maksimum gerilme ve elastisite modülü değerleri	64
Çizelge 7.3. Şekil değiştirme değerleri	65

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesi ve insanların ihtiyaçlarının gün geçtikçe artmasından dolayı bu ihtiyaçlara cevap verebilecek yeni malzeme arayışları her geçen gün artmaktadır. Bu yeni nesil malzemelerden biri olan kompozitler iki ya da daha fazla farklı özellikteki malzemelerin iyi özelliklerini bir arada toplayabilmek amacıyla oluşturulurlar. Böylelikle geleneksel malzemenin özelliklerinin yanı sıra ilave edilecek ikinci malzemenin de üstünlüklerinden aynı anda faydalanılmaktadır (Abdellaoui, 2019).

Kompozit yapıda bulunan bu iki farklı malzeme grubundan miktar olarak çok olan matris az olanı ise takviye elemanı olarak isimlendirilmektedir. Kompozit yapılarda matris malzemeleri polimer, metal ya da seramik malzeme grubunda olabilmektedir. Takviye elemanları ise genellikle matristen farklı bir malzeme grubundan seçilmektedir. Böylelikle matris ve takviye elemanının istenen özelliklerinin birleştirilmesi ile geleneksel malzemelerden farklı olarak yüksek mekanik özellikler elde edilebilmektedir (Suryanarayana, 2013).

Matrisi polimer malzemenin oluşturduğu takviye elemanını ise farklı malzeme çeşitlerinden seçilebildiği polimer matrisli kompozitler, yoğunluğunun düşük olması, maliyetinin az olması, iyi mekanik özellik göstermesi, aşınma ve korozyona karşı dayanıklı olması gibi sebeplerden dolayı başta havacılık sanayi, otomotiv sanayi, askeri alanlarda olmak üzere hayatımızın birçok mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. (Oliwa, 2020; Balaji, 2020). Polimer matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak polietilen polipropilen, ABS, PEEK gibi termoplastik malzemelerin yanı sıra, epoksi, polyester vinil ester gibi termoset malzemelerde matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak viskerler, parçacık ve fiberler ile takviyelendirilmektedir (Batra, 2020; Balaji, 2020; Lin, 2020).

Epoksi reçineler, yüksek kimyasal korozyon direnci ve kürleşme sırasında düşük büzölmeye sahip olmasının yanı sıra düşük ağırlık, yüksek yapışma özelliklerinden dolayı fiber takviyeli polimer kompozitlerde yaygın kullanılan matris malzemelerinden biridir. Bu matris malzemenin güçlendirilmesi amacıyla cam fiber, karbon fiber ve aramid fiberler kullanılmaktadır (Sathishkumar vd, 2014; Zhang vd, 2021).

Aramid fiber sahip olduğu düşük yoğunluk (1,44 g/cm³) yüksek rijitlik, yüksek dayanım (3620 MPa çekme dayanımı), yüksek spesifik modül gibi birçok üstün özelliğinden dolayı polimer matrisli kompozitlerde tercih edilen bir takviye elemanıdır. Çeşitli reçineler ile birleştirilerek oluşturulan bu polimer matrisli kompozitler uçaklarda, helikopterlerde balistik zırhlar gibi yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır (Kumar vd, 2010; Wu vd, 2019). Aramid fiber, iki aromatik halka arasında en az %85 oranında amid bağı içeren bir sentetik lif türüdür. Kevlar, Technora, Heracron, Twaron, Nomex ve Teijinconex, aramid liflerinin ticari adlarıdır. Genel olarak aramid fiber meta aramid ve para aramid olmak üzere iki gruba ayrılır. Aramid türü kimyasal bağı konumuna bağlıdır. Para aramidlerde lifin uzun yönünde hizalanmış bağlara sahipken meta aramidler, zikzak deseninde bağlara sahiptir. Bağ yönünün ve türünün farklı olmasından dolayı para aramidler daha yüksek mukavemete sahiptir. Aramid fiberler iplik ve dokuma kumaş şeklinde ticari olarak kullanılmaktadır (Prashanth vd, 2017; Mittal vd., 2018). Güçlü fibere ve uygun matris kullanılarak üretilen kompozitler her zaman yüksek mekanik özellikler sergileyebilir. Fiber takviyeli kompozitlerde mekanik özellikleri etkileyen önemli bir parametre de matris ile fiber arasında oluşan ara yüzey özellikleridir. Matris ile fiber arasında oluşan ara yüzey yapışmasının yüksek olması ile matristen fibere yük aktarımı daha kolay gerçekleşmekte ve böylelikle kompozitin dayanımı artmaktadır (Islam vd, 2015; Tareq vd, 2019).

Aramid fiberlerin kimyasal eylemsizlik, yüksek kristallik ve düzgün yüzey özelliklerine sahip olmasından dolayı matris ile fiber arasında arayüzey bağı zayıftır. Bu bağı geliştirmek amacıyla karbon nanotüp, grafen gibi karbon bazlı çeşitli nanodölgular ile kompozitlerin özellikleri geliştirilmektedir. Kullanılan tüm karbon allotropları arasında, grafen, fiber/matris ara yüzeyindeki bağlanmayı geliştirmek için

en etkili dolgu maddelerinden biri olarak kabul edilir (Mourad vd, 2020; Veerakumar vd, 2021).

Grafen bal peteği şeklinde düzenlenmiş iki boyutlu karbon atomlarından oluşan geniş yüzey alanına sahip (2630 m²/g) Elastik modülü 1,1 TPa, yüksek kırılma tokluğunun(125GPa) yanı sıra yüksek termal ve elektrik iletkenliğine sahip günümüzün en popüler malzemelerinden birisidir. Tüm bu üstün özelliklerinden dolayı fiber takviyeli polimer matrisli kompozitlerde dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır (Namdev vd, 2021; Kumar vd, 2022).

Otomotiv, havacılık, denizcilik ve askeri alanlarda kullanılan kompozitlerin performansının arttırılması amacıyla çeřitli takviyeler kullanılarak hibrit kompozitler geliřtirilmektedir. Bu hibrit kompozitlerde kullanılan nano takviyelerin hem rećine fiber arasındaki ara yüzey etkileřimini arttırdıđı hem de mekanik özellikler üzerinde olumlu etkisi olduđu ćalıřmalarda belirtilmektedir (Balguri vd, 2021). Özellikle grafen malzemesinin üstün özelliklerinden dolayı grafenin kompozitlere olan etkisinin tüm yönleriyle ele alınabilmesi ićin ćalıřmalara ihtiyać duyulmaktadır (Pathak vd. 2016).

Aramid takviyeli kompozitlerde grafenin mekanik özelliklere olan etkisinin incelendiđi ćalıřma sayısı dünyada her gećen gün artmaktadır ancak ülkemizde bu malzemelere yönelik yapılan ćalıřmalar oldukća sınırlıdır. Bu yüzden bu ćalıřmada aramid fiber takviyeli epoksi matrisli kompozitlere farklı oranlarda grafen ilave edilerek üretilecek hibrit kompozitlerde grafenin hem mikro yapıya hem de ćekme eđme dayanımı gibi mekanik özelliklere etkisi incelenmiřtir.

BÖLÜM 2

KOMPOZİTLER

Mühendislik malzemeleri arasında önemli bir yere sahip olan kompozitler iki ya da daha fazla malzemenin iyi özelliklerini tek bir malzemede toplamak amacıyla oluşturulan malzeme grubudur. Kompozit, gözle görülebilir düzeyde büyük ölçekte (makro düzeyde) birleştirilmesi ile oluşturulur. Ancak alaşımlarda olduğu gibi çözüme çözünme olayı gerçekleşmez. Kompozit yapıda bulunan bu iki farklı malzeme grubundan miktar olarak çok olan matris, az olanı ise takviye elemanı olarak isimlendirilmektedir. Kompozit yapılarda matris malzemeleri polimer metal ya da seramik malzeme grubunda olabilmektedir. Takviye elemanları ise genellikle matristen farklı bir malzeme grubundan seçilmektedir (Jia vd, 2018; Yang vd, 2019).

Kompozit malzemeler, elde edildikleri malzemelere kıyasla daha iyi performans sağlayan bir malzeme sınıfıdır. Bu malzemeyi oluşturan bileşenleri sayesinde rijitlik, yüksek dayanım, yüksek sıcaklıklarda çalışabilme ve yüksek aşınma dayanımı kazanırlar. Kompozit malzemeler farklı ebatlarda ve fazlarda, farklı malzemelerin birleşimiyle tasarım ve optimizasyon sonucu olarak son şekilde ortaya çıkan gelişmiş malzemelerdir. Yükseltilmiş performans veya tek bir malzemenin sağlayamayacağı bir işlev, kompozitlerde farklı seviyelerde kompozisyon, ara yüz veya boyutsal etkiler yoluyla gerçekleştirilebilir. Bu faktörler kompozit bilim alanının temelini oluşturur (Xiao-su yi, 2006).

2.1. NANOKOMPOZİTLER

Kompozit malzemenin, nanokompozit olabilmesi için, kompozit yapıyı oluşturan fazlardan en az birinin ölçüsü nanometre (nm) boyutunda olması gerekir. Kompozit malzemelerin gelişmiş, modern ve yenilikçi bir türü olarak bilinen bir kompozit malzeme türüdür. Bu tür kompozitler, diğer bilinen tür kompozitlere göre farklı olarak

atomik, moleküler ve makromoleküler seviyede incelenmektedir. Artık günümüzde nanokompozit ürünler akademik araştırmalarda ve çalışmalarda öne çıkarken bunun yanı sıra endüstride de gelişmekte ve kullanımı gittikçe artmaktadır (Balguri vd, 2021).

2.2. HİBRİT KOMPOZİTLER

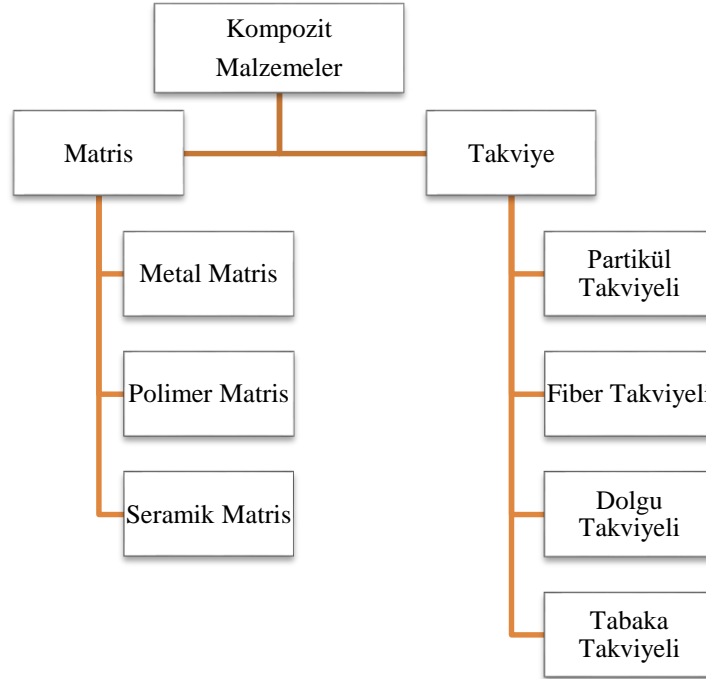
Kompozit malzemelerde matris fazının içerisinde en az iki veya ikiden fazla takviye elemanın eklenmesi ile oluşan malzemelere hibrit kompozit denir. Hibrit kompozitler monolitik kompozitlerle karşılaştırıldığında daha dengeli mukavemet ve sertlik, dengeli termal bozulma kararlılığı, daha yüksek yorulma direnci ve daha yüksek kırılma tokluğu gibi avantajları bulunmaktadır (Hossain vd, 2015). Valença vd. (2015), yaptıkları bir çalışmada kevların yanı sıra cam fiber takviyesi ile oluşturduğu hibrit kompozitlerde darbe gerilme dayanımının arttığını belirtmişlerdir. Gustin vd. (2015), yaptıkları çalışmada kevlar ve karbon fiber takviyeli hibrit kompozitlerin kevlar takviyeli kompozitlere göre darbe dayanımını arttırdığını bildirmişlerdir. Yahaya vd. yaptığı bir çalışmada kevların yanı sıra doğal bir elyaf olan kenaf ile hibrit kompozitler üretmişlerdir. Ürettikleri hibrit kompozitin enerji absorblanmasına pozitif etki ettiğini bildirmişlerdir.

Fiber takviyeli hibrit kompozitlerde ikinci takviye elemanı olarak farklı bir fiber kullanılmasının dışında son yıllarda nano boyutlara sahip takviye elemanları ile fiber takviyeli hibrit kompozitler üretilmektedir. İkincil Takviye elemanı olarak nano boyutlara sahip çeşitli seramikler (nano Al₂O₃, TiC, kil.) dışında karbon nanotüp grafen gibi karbon bazlı nano malzemeler kullanılmaktadır.

Taraghi vd. 2014 yaptığı bir çalışmada kevlar/ epoksi kompozitlerin içine ilave edilen karbon nanotüpün çekme eğme ve darbe direncine etkisini incelediği çalışmada ilave edilen karbon nanotüp ile bu değerlerin arttığını vurgulamıştır. Sivetaja vd. (2020), yaptığı bir çalışmada kevlar epoksi kompozitlerin içine farklı oranlarda nanokil ilave ederek hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonunda %1 nanokil ilave edilen kompozitlerde çekme dayanımının arttığını vurgulamışlardır.

2.3. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI

Kompozit malzemeler genellikle iki farklı duruma göre sınıflandırılırlar. Bunlardan birincisi matris malzemesi ve diğeri takviye malzemesidir. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması Şekil 2.1.'de verilmiştir. Kompozitlerde matris, malzemelerin içerisinde bulunan takviye elemanlarını desteklemek istenilen formu sağlamak ve malzemeyi bir arada tutma görevini üstlenir. Matris, kompozit malzemelerin üzerine gelen yükleri karşılayarak takviye elemanına aktarır. Ayrıca elyafların belirlenen yönlerde kalmasını ve buldukları pozisyonları korumalarında yardımcı olmaktadır. Bunların yanında matris ortam şartlarına direnç gösterir ve kompozitin maksimum çalışma sıcaklığını belirler. Takviye elemanının görevi ise kompozit yapıyı oluşturan matris yapıya destek sağlamak ve gelen yükü taşımaktır (Andrew vd, 2019).



Şekil 2.1. Kompozitlerin sınıflandırılması.

2.3.1 Metal Matrisli Kompozitler

Matris fazını metal malzemelerin oluşturduğu ve takviye fazını ise seramik malzemelerin kullanıldığı kompozit malzeme türlerindedir. Metal matrisli kompozitlerin temel üretim amaçlarından en önemlisi metalin ve takviye edilen

malzemenin üstün özellikleri ile birleştirerek yüksek dayanım, düşük yoğunluk ve yüksek elastite modülü gibi mekanik özellikleri sağlamaktır. Bu malzemeler en çok otomotiv, havacılık ve uzay gibi sektörlerde kullanılmaktadır. Metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak genellikle, düşük yoğunluğu sahip olan malzemeler tercih edilir (Yıldırım, 2016; Tjong, 2013). Metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak başta Al ve alaşımları olmak üzere Mg alaşımları, Ti alaşımları ve Cu alaşımları gibi malzemeler tercih edilirken takviye elemanı olarak da SiC, Al₂O₃, B₄C, AlN, Si₃N, TiB₂, TiC, MgO, BN gibi seramik malzemeler kullanılmaktadır (Tjong, 2013). Metal matrisli kompozitlerin avantajları ve dezavantajları aşağıda maddeler halinde verilmektedir (Miroslava, 2015).

Metal matrisli kompozitlerin avantajları:

- Yüksek mukavemet ve tokluk
- Yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirlik
- Düşük sönümlenme
- Geliştirilmiş – daha yüksek radyasyon direnci
- Gaz emme ya da yayma
- Çoğunlukla yanmazlar
- Elektriksel ve Isıl iletkenlikleri yüksektir
- Birbirleri ve diğer metaller ile kaynak yoluyla birleştirilebilirler
- Yüksek sertlik ve aşınma direnci gösterirler
- Yüzey hasarlarına daha çok dirençlidirler.

Metal matrisli kompozitlerin dezavantajları:

- Yüzey hasarlarına daha çok dirençlidirler.
- Daha karmaşık üretim
- Nispeten az gelişmiş üretim teknolojisi
- Yüksek özgül ağırlık ve yoğunluk
- Genellikle daha yüksek fiyatlılırlar
- Bazıları için korozyon dayanımı düşüktür.

2.3.2 Seramik Matrisli Kompozitler

Genellikle yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerdir. Gevrek ve kırılğan malzemeler olan seramik kompozit malzemeler, oldukça düşük kopma direnci gösterir, düşük tokluğa sahiptirler. Bundan dolayı lifler ile birlikte takviye malzemesi olarak kullanılır. Fakat bunlara göre daha yüksek çalışma sıcaklığına ve yüksek elastikiyet modülü değerine sahiptir (Markandan, 2017).

Seramik kompozit malzemeler 3 türdedir:

- Partiküllü kompozitler
- Süreksiz fiberli kompozitler
- Sürekli fiberli kompozitler

Seramik matrisli kompozit malzemelerde genellikle SiC, B₄C, Si₃N₄ ve Al₂O₃ kullanılmaktadır. Başlıca uygulama alanları olarak roket motorları için türbin diskleri, türbin motor parçaları, ısı değiştirici tüpler, sıcak gaz filtreleri, zırhlar vb. gibi alanlarda kullanılmaktadır (Tuncer, 2018).

2.3.3. Polimer Matrisli Kompozitler

Ana yapıyı polimer malzemenin oluşturduğu takviye elemanının ise farklı malzeme gruplarından seçilebildiği polimer matrisli kompozitler yoğunluğunun düşük olması, ucuz olması, iyi mekanik ve termodinamik özellikleri, aşınma ve korozyona karşı dayanıklı olması gibi nedenlerden dolayı başta havacılık sanayi, otomotiv sanayi, askeri alanlarda, denizcilik sektörü olmak üzere günlük hayatımızın birçok mühendislik uygulamasında yaygın olarak kullanılmaktadır (Oliwa, 2020; Balaji vd, 2020).

Polimer matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak polietilen polipropilen, ABS, PEEK gibi termoplastik malzemelerin yanı sıra, epoksi, polyester vinil ester gibi termoset malzemelerde matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Polimer matrisli

kompozitlerde takviye elemanı olarak viskerler, parçacık ve fiberler ile takviyelendirilmektedir. Termoset matrisli kompozitlerde en çok kullanılan takviye elemanlarına bakıldığında doğal ve sentetik fiberler kullanılmaktadır (Batra, 2020; Balaji, 2020; Lin, 2020).

2.4. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERDE KULLANILAN TERMOSET ESASLI MATRİSLER

Termosetler ısı ile şekillendirilemeyen malzemeler olarak bilinir. Bu malzemeler polimerizasyon yolu ile iki adımda elde edilir. İlk adımda malzemeyi oluşturan monomerler lineer zincirler bir araya getirirlerken ikinci adımda sıcaklık ve basınç ile tepkimeye girmeyen kısımların molekül zincirleri sıvılaşarak üç boyutlu yapıya sahip olarak rijitlenirler. Tekrar ısıtılan ve ardından yumuşatılamayan termosetler termoplastiklere kıyasla daha yüksek dayanıklılık gösterirler. Termal olarak kararlı yapılı, çapraz bağa ve moleküller içindeki yapının kovalent bağlı olmasına bağlı olarak termosetlerin özelliklerinde farklar oluşabilmektedir. Yüksek sıcaklıklara karşı dayanımının biraz daha düşük olması, mekanik özelliklerinin düşük olması, ısıl genişmesinin düşük olması termosetlerin dezavantajları olarak sıralanabilir (Çalık, 2004). Polimer matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak kullanılan epoksi, polyester, vinil ester fenolik gibi reçineler termoset matrislere örnek olarak gösterilebilir.

2.5. EPOKSİ REÇİNELER

Epoksi reçineler, termoset formuna veya üç boyutlu ağ yapısına dönüştürülebilen bir veya daha fazla α - veya 1,2-epoksit grubu içeren bir molekül olarak tanımlanır. Epoksi, kompozit yapımında sıklıkla kullanılan polimer matris malzemelerden birisidir. Kullanılan epoksi ve sertleştirici türüne ve kombinasyonuna bağlı olarak gösterdiği özellikler değişir. Epoksi reçine, yüksek mekanik mukavemeti, korozyon direnci, ölçüsel kararlılığı, dolgu ve fiber takviyeleri ıslatabilme kabiliyeti ve kimyasal direnci ile ön plana çıkmış termoset polimer malzemedir. Sahip olduğu bu özelliklerinden dolayı kompozitlerde matris malzemesi olarak kullanılmasının yanı sıra korozyona karşı yüzey kaplamalarında, yapıştırıcılarda, boya malzemelerinde, yarı iletken

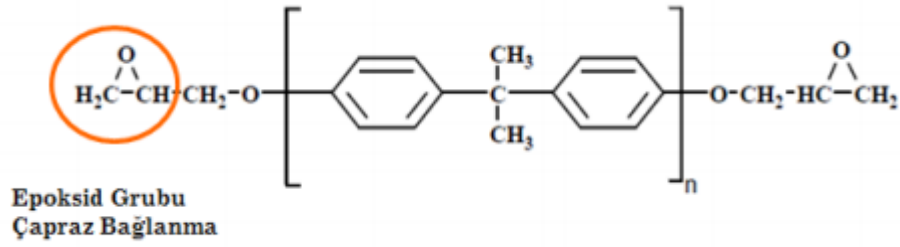
kapşüllerde, hafif köpük malzemelerde, endüstriyel kalıp uygulamaları ve biyomedikal uygulamalar gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer termoset malzemeler ile kıyaslandığında epoksi reçineler özel kimyasal özelliklere sahiptir. Bu reçinelerde kürleşme sırasında hiçbir yan ürün veya uçucu madde oluşmaz. Ayrıca kürleşme sonrasında büzülme oranının düşük olmasının yanında geniş bir sıcaklık aralığında kürleşmesi avantajları arasında gösterilebilir. Dezavantajları ise polyester reçinelere göre kıyaslandığında daha pahalı olmalarıdır (Jin vd, 2015; Karadurmuş, 2017).

Pihtili (2019), cam fiber/epoksi kompozitler ve cam fiber/polyester kompozitlerin aşınma davranışlarını incelediği çalışmada iki farklı termoset matris kullanılarak ürettiği kompozitlerin farklı yükler ve farklı kayma hızlarında aşınma performansını incelemiştir. Yaptığı çalışma sonucunda ürettiği kompozitleri kıyaslandığında epoksi matris kullanarak ürettiği kompozitlerin daha yüksek dayanım ve daha düşük aşınma gösterdiğini bildirmiştir.

Neves vd. (2020), kenevir fiber ile epoksi ve polyester matrisli kompozitler üreterek matris malzemesinin mekanik özelliklere etkisini inceledikleri çalışmada epoksi matris kullanılarak ürettikleri Kompozitlerin eğilme direnci, çekme dayanımı ve elastikiyet modülünün polyester matrisli kompozite göre daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir.

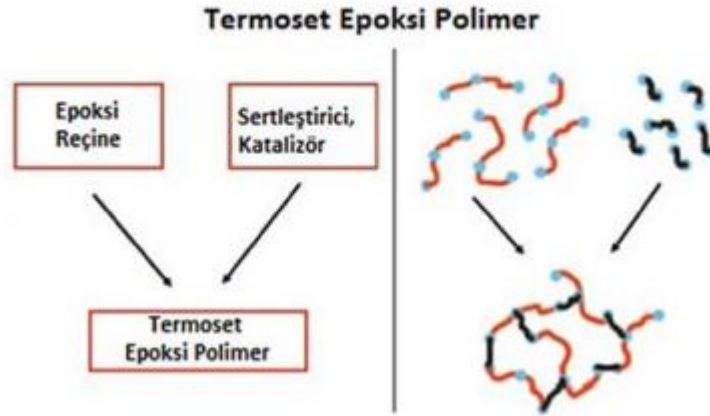
Cavalcanti vd. (2021), saf jut, jut ve curaua ve jut ve sisal gibi doğal fiberler ile epoksi reçine ve polyester reçineler kullanarak ürettikleri kompozitlerin mekanik ve termal özelliklerini inceledikleri çalışmada epoksi matrisli kompozitlerde çekme dayanımını daha yüksek olduğu kompozitlerde matris malzemenin mekanik özelliklerde büyük bir rol oynadığını bildirmişlerdir.

Epoksi reçineler, yapısal olarak iki veya daha fazla epoksi grubu (epoksi halkası) bulundurmaktadır. Şekil 2.2.'de epoksi grubu ve reçinenin kimyasal yapısı belirtilmiştir (Chung, 2010).



Şekil 2.2. Epoksi reçine kimyasal yapısı. (Chung, 2010)

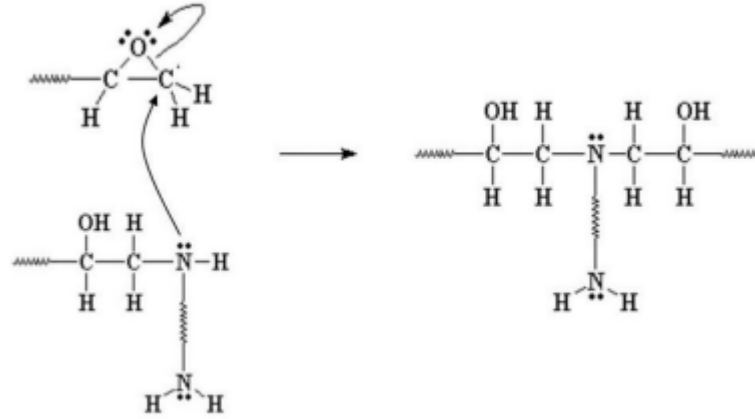
Termoset polimerlerden epoksi reçineler, sertleştirici ilavesi ile çapraz bağlanma ve polimerizasyon reaksiyonlarını başlatmaktadırlar. Reaksiyon hızı reçine ve sertleştirici çeşidine göre çeşitlilik göstermektedir. Bazı reaksiyonlar için yüksek sıcaklıkta birkaç saat içerisinde pişme (curing) tamamlanırken bazı reaksiyonlar oda sıcaklığında bir güne yakın sürebilmektedir. Şekil 2.3.' de epoksi reçineye ait çapraz bağlanma mekanizması belirtilmektedir.



Şekil 2.3. Epoksi reçineye ait çapraz bağlanma mekanizması. (Karadurmuş, 2017)

Epoksi reçineler doğrusal yapılı oligomer bileşiklerdir. Bu nedenle fiziksel özellikleri zayıftır. Fakat yapılarına eklenen sertleştirici ve katalizörlerin yardımıyla çok sayıda çapraz bağ içeren bir yapıya dönüşürler. Çapraz bağlanan reçineler artık termoset bir polimerik malzeme oluşturmuştur ve yüksek mekanik özellikler, yüksek kimyasal

direnç ve aşınma direnci kazanmıştır. Şekil 2.4.'de epoksi reçine ve sertleştirici arasındaki reaksiyon gösterilmiştir (Kurt, 2019).



Şekil 2.4. Epoksi reçine ve sertleştirici arasındaki reaksiyon. (Karadurmuş, 2017)

Epoksi reçinelerin avantajları şunlardır;

- Düşük ve yüksek sıcaklıklarda sertleşebilme özelliğine sahiptirler.
- En az su absorbe eden reçinedir.
- Minimum ısınma ve büzülme yapar bu sayede dış katmanı en az etkileyen reçinedir.
- Uçucu değildirler ve kimyasal dirençleri yüksektir.
- Elyaf yapılarla yüksek bağ mukavemeti sağlarlar.
- Yüksek aşınma direncine sahiptirler.

Dezavantajları:

- Polyesterle karıştırıldığında pahalıdırlar.
- Polyestere oranla yüksek viskoziteye daha az uygundur. (Kurt 2019)

2.6. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERDE KULLANILAN TAKVİYE ELEMANLARI

Takviye elemanları genellikle katılmış bir matrisin içinde farklı eksenlerde dizilmiş ya da yapı içerisine homojen olarak dağılmış bir şekilde bulunurlar. Matris, sistemi

birlikte tutarken takviye elemanı da sistemi mekaniksel olarak güçlendirir. (Kurukaya, 2019).

2.6.1. Dolgu Takviyeler

Üç boyutlu ve sürekli bir matris malzemenin işlem görmesi ile yapılan makro ölçekte bir yapıdır. Ardından bu yapı yine üç boyutlu bir matris malzemesiyle doldurulur veya kalıplanır ya da farklı takviye malzemeleriyle başka bir kompozit yapıları oluşturur. (Kurukaya, 2019).

2.6.2. Partikül Takviyeler

Partiküller matris içine karıştırılan bir tür takviye elemanıdır. Partiküller ya da parçacıklar halinde bulunurlar. Sıfır, tek ve iki boyutlu mikroskobik partiküllerin boyutları ortalama boyutu 1 μm 'den küçüktür ve yüzdece 25'ten az olarak kullanılmaktadır. Çoğunlukla karbon nanotüp, grafen, Al_2O_3 ve SiC gibi seramikler kullanılmaktadır (Kurukaya, 2019).

Ortaya çıkmış olan yapı izotropik bir yapıdır. Bu bağlamda yükü elyaf ve matris bir arada taşır. Metal, seramik ve polimerik birleşimlerden oluşabilme kabiliyetine sahip kompozitlerdir. Bu oluşan kompozitler iyileşme özelliğinden ziyade alışılmışın dışında özellikler gösterebilmektedir. Parçacıkların sert yapısı, yapının mukavemetini arttırıcı etki gösterebilmektedir. Genellikle plastik matris içerisinde metal partiküllerin eklenmesi ile birlikte kullanılmaktadırlar. Bu doğrultuda metal parçacıklar tarafından ısı ve elektriksel iletkenlik sağlanabilmektedirler (Maurya, 2019; Kurukaya, 2019).

Bu kompozitler malzemelerde seramik partiküller, metal bir matrisin içerisine katıldıkları zaman yüksek sertlikte ve yüksek ısı dayanımında yeni bir kompozit malzeme ortaya çıkarmaktadırlar. Fakat döküm yöntemi ile üretilen bu tür malzemelerde parçacık tozların karışması diğer yöntemlere göre daha zordur ve oluşacak eriyiğin viskozitesinin azalması, kalıbın doldurulamamasına, boşluklu yapının kalmasına ve istenmeyen kusurlara neden olabilmektedirler (Cha vd, 2019).

2.6.3. Fiber Takviyeler

Fiber takviyeli kompozitler neredeyse tüm mühendislik alanlarında yapısal bileşen malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanılan çeşitli formlarda (kısa fiber, uzun fiber, gibi) bulunan elyaflar geleneksel malzemelere göre ağırlığı azaltma, düşük bakım maliyeti, korozyona karşı direncinin yüksek olması, yorulma hasarlarına karşı dirençli olması gibi birçok üstünlüğünden dolayı özellikle otomotiv ve havacılık gibi ağırlığın azaltılmasının istendiği kritik sektörlerde yoğun ilgi görmektedir (Safri vd, 2018). Fiber takviyeli kompozitlerde sünek matrise uygulanan yükün yüksek dayanım ve yüksek elastikiyet modülüne sahip fiberlere aktarılması ile yüksek mukavemet artışı gerçekleşmektedir. Ayrıca kompozit yapılarda mukavemeti etkileyen önemli unsurlardan birisi matris yapı içerisine ilave edilen fiberlerin yönleri ve doğrultularıdır. Uygulanacak kuvvetin yönüne bağlı olarak tek yönlü fiberler ile oluşturulan kompozitlerin yanında örgü formunda (çok yönlü) fiberler ile oluşturulan kompozitler de izotropik davranış ve yüksek dayanımlar elde edilmektedir. Kompozit malzemelerde mukavemeti etkileyen bir diğer önemli etken ise ilave edilen fiberin mukavemeti ve matris ile takviye arasında oluşturduğu ara yüzey bağının iyi olmasıdır (Fallahi vd, 2020; Zhandarov vd, 2001).

Kompozit bir yapıda kullanılacak olan fiberlerin yüksek elastikiyet modülüne sahip olması, yoğunluğunun düşük, dayanımının yüksek ve matris ile iyi bir ara yüzeyi oluşturması beklenmektedir. Fiber takviyeli kompozitlerin üretiminde en yaygın kullanılan cam elyaf malzemelerdir. Cam elyaf malzemeler yüksek özgül mukavemete, yüksek sıcaklık direncine ve yüksek korozyon direncine sahip elyaflardır. Bu cam elyaflar kendi içerisinde farklı mekanik özellikler ve farklı yalıtkanlık değerlerin sahip farklı grupları mevcuttur. (A cam elyaf, C cam elyaf, E cam elyaf gibi). Cam elyaf dışında polimer matrisli kompozitlerde kullanılan bir diğer elyaf ise karbon fiberdir. Karbon fiber takviyeli kompozitler yüksek özgül dayanımları, spesifik rijitlikleri sayesinde uçaklarda, rüzgâr türbin kanatlarında, yarış arabaları ve üst sekment arabaların imalatında kullanımı önemli ölçüde ağırlık tasarrufu sağlarlar. Ancak bu takviye elemanlarının maliyetleri oldukça yüksektir. Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan bir diğer elyaf çeşidi aramid elyaflardır (Yang vd, 2019; Jia, 2018).

2.6.4. Doğal Fiber Takviyeler

Çevresel kaygılar ve yenilenebilir doğal kaynaklar konusunda artan farkındalık nedeniyle yeni nesil kompozit ürünler için çevre dostu ve biyolojik olarak bozunabilen malzemelere yönelik arayışlar artmaktadır. Kompozit malzemelerde doğal fiber takviyelerin kullanılması ile sera gazı emisyonlarında ve karbon ayak izinin azaltılması amaçlanmaktadır. Kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak kullanılan bu doğal liflerin biyolojik olarak parçalanabilmesi, geri dönüştürülebilir özellikleri, düşük yoğunlukları, yüksek spesifik mukavemet değerleri, yüksek elastikiyet modülü, işleme sırasında yüksek esneklik, korozyon direnci ve düşük maliyetleri gibi birçok üstün özelliğinden dolayı bu malzemelere yönelik olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Ancak bu doğal fiberlerin yüksek nem emme, yüksek anizotropi ve reçineler ile düşük uyumluluk gibi dezavantajları bulunmaktadır (Gholampour ve Ozbakkaloglu 2020).

Keten, kenevir, pamuk jüt, sisal, hindistan cevizi gibi bitkilerden elde edilen lifler doğal fiberlere verilebilecek örnekler arasında gösterilebilir. Çizelge 2.1’de kompozit malzemelerde bazı kullanılan doğal liflerin ve özellikleri verilmektedir (Westman vd, 2010).

Çizelge 2.1. Kompozit malzemelerde kullanılan bazı liflerin özellikleri. (Westman vd, 2010)

Fiber	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme gerilmesi (MPa)	Spesifik çekme gerilmesi (MPa)	Elastikiyet modülü (GPa)	Spesifik elastikiyet modülü (GPa)
Keten	1,5-1,6	400	250-267	5,5—12,6	3,5-8,1
Kenevir	1,45	930	641	53	36,5
Sisal	1,5	511-635	341-423	9,4-22	6,3-14,7
E-Cam	2,5	2000-3500	800-1400	70	28
Karbo	1,4	4000	2857	230-240	164-171

Kompozit malzemelerde matris malzemesi ile fiber arasında oluşacak ara yüzey kompozitin hem fiziksel hem mekanik özelliklerini etkilemektedir. Doğal fiberlerin matris ile uyumsuzluğu, zayıf yapışma ve doğal fiberlerin hidrofilitik yüzey yapısı bu kompozitlerin kullanımını sınırlamaktadır. Bu sorunların giderilmesi amacıyla doğal liflere ısı işlem ultraviyole gibi fiziksel işlemlerin yanı sıra alkalin, silan, sodyum klorit

gibi çeşitli kimyasallar ile liflerin yüzey modifikasyonları yapılarak matris ile uyumu ve ara yüzey bağlanması geliştirilmektedir (Bulut vd, 2011; Kocaman, 2019).

2.6.5. Cam Fiber Takviyeler

Cam fiberi, alüminyum oksit, silika, soda, kolemanit gibi cam üretim maddelerinden üretimi yapılmaktadır. Fiber takviyeli kompozitler arasında sık kullanılan ve en bilinenlerindedir. Üretilmesi için tasarlanmış ve alt kısmında küçük deliklerin yer aldığı özel bir ocaktan eritilmiş camın itilmesi ile olmaktadır. Bu aşamadan geçtikten sonra elde edilen ince yapılı fiberler soğuduktan sonra makaralara sarılır ve kompozit hammaddesi haline gelir. Matris ile cam fiber arasındaki yapışmasını arttıran ve fiber üzerinde ince film oluşturan kimyasallardan sonra kullanım sahaları genişlemiştir. Cam fiberler işlem gördükleri sırada dayanıklılıklarının yarısını kaybederler. Fakat buna rağmen oldukça sağlamlar. Üretim işlemler sırasında farklı kimyasal maddelerin eklenmesi ve bazı özel üretim yöntemleriyle de farklı türde cam fiberi üretilmektedir (Arıcasoy, 2006; Zhang, 2021).

2.6.6. Karbon Fiber Takviyeler

Uzun süredir özel uygulamalarda kullanılan geliştirilen karbonlu fiber malzemeler oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Fiyat açısından düşük olup, yüksek performans sergileyen kompozit malzemeler günümüzde metal malzemelerin yerine kullanıldığı uygulamalarda tercih edilerek kullanılmaya başlanmıştır. Metallere kıyasla daha hafif olması çok önemli bir avantajdır. Karbon fiberlerden yapılan tasarımlar daha güçlü, daha hafif ve hızlı yakıt verimliliği sergileyerek gün geçtikçe kullanıldığı alanları genişletmektedir (Walsh, 2001; Zhang, 2019).

Karbon fiberler yüksek ısı işlem uygulandığı zaman tam olarak karbonlaşır ve bu fiberlere grafit fiber denir. Artık günümüzde bu bahsedilen farklılık ortadan kalkmaktadır. Böylece karbon fiber de grafit fiber de aynı malzemeyi tanımlamaktadır. Karbon fiber epoksi matrisleriyle birleştirildiği zaman oldukça dayanıklılık, sertlik ve iyi özellikleri gösteren malzemeler haline gelir (Arıcasoy, 2006; Zhang, 2021). Şekil 2.5.'de örnek karbon fiber görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.5. Karbon fiber örnekleri. (Arıcasoy, 2006)

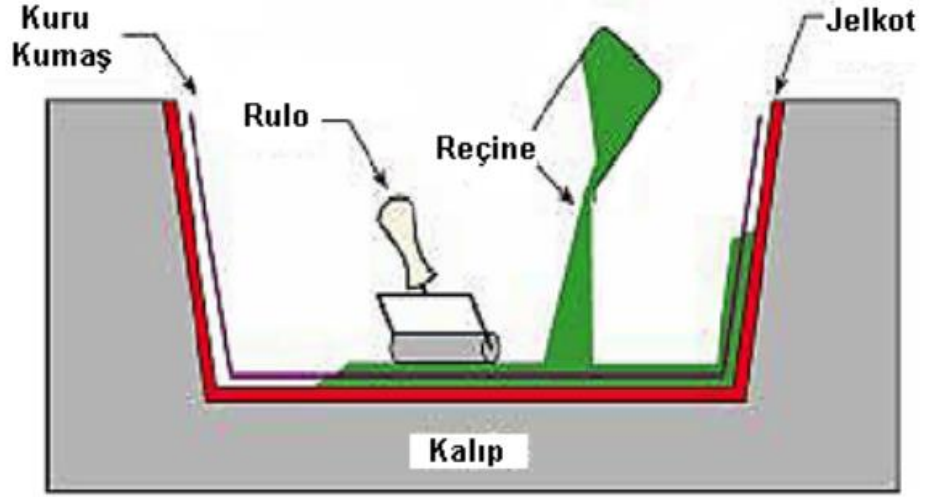
2.7. TERMOSET MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri oldukça fazladır. Ürünün kullanım alanı, ürünün şekli, ürün için imalat kolaylığı, ürünün adeti ve üretim süresi gibi sebeplerden dolayı birçok üretim yöntemi geliştirilmiştir.

2.7.1. Elle Yatırma (Hand Lay-up)

Örülmüş kumaş, kırılmış elyaflar veya fiberler ile oluşan kumaşların kalıbın üzerine elle yatırılarak sırayla ara katmanlarına Şekil 2.6.'daki gibi sıvı reçineyi fırça ile yayarak ve emdirilerek yapılan üretim yöntemine elle yatırma yöntemi denir. Polyester ve epoksinin yanında fenolik ve vinilester reçineler de el yatırma yöntemi kullanılmakta ve tercih edilmektedir (Çetinkal, 2019).

Elle yatırma yöntemin avantajlarını sıralarsak, düşük maliyetli başlangıç, basit üretim, yüksek kabiliyet gerektirmeyen ve büyük olan parçaların üretilmesine uygun olması gibi gösterilebilir. Dezavantajları ise sayı olarak düşük tekrarlanabilir olması ve kimyasal reaksiyonlardan dolayı oluşan gazların insan sağlığına zararları olarak sıralanabilir (Maley, 2008).



Şekil 2.6. El yatırma yönteminin şematik gösterimi. (Durgun, 2014)

2.7.2. Püskürtme Yöntemi (Spray-Up)

Püskürtme yöntemi, kalıbın üstüne kırılmış elyaflar ile reçinenin Şekil 2.7.'de ki gibi görülen özel bir püskürtme tabancası veya özel bir aparat yardımı ile püskürtülmesi şeklindedir. Elyafı kırma işlemi püskürtme tabancasının üstünde yer alan ve bağımsız çalışan bir kırpıcı ünite ile yapılmakta ve püskürtme işlemi bittikten daha sonra bir rulo yardımı ile yüzey düzeltilmektedir (Genç ve Arıcı 2008).



Şekil 2.7. Püskürtme tabancası. (Çetinkal, 2019)

2.7.3. Elyaf Sarma Yöntemi (Filament Winding)

Bu yöntem adından da anlaşıldığı üzere sürekli elyaf liflerinin özel biçimli bir şekilde sarımı ile gerçekleştirilen seri üretim yöntemlerinden biridir.

Sarımın yapıldığı filament sarım makinası Şekil 2.8.'de verilmektedir. Sarım işlemi sırasında sarım açılarındaki farklılıklar ve sarım katmanlarının sayısı malzemeye çeşitli mekanik özellikler kazandırır. Bu yöntemle ile yapılan ürünler genelde silindirik geometride olan borular, araba şaftları, uçak su tankları, yat direkleri, dairesel basınç tanklarıdır (Çetinkal, 2019).

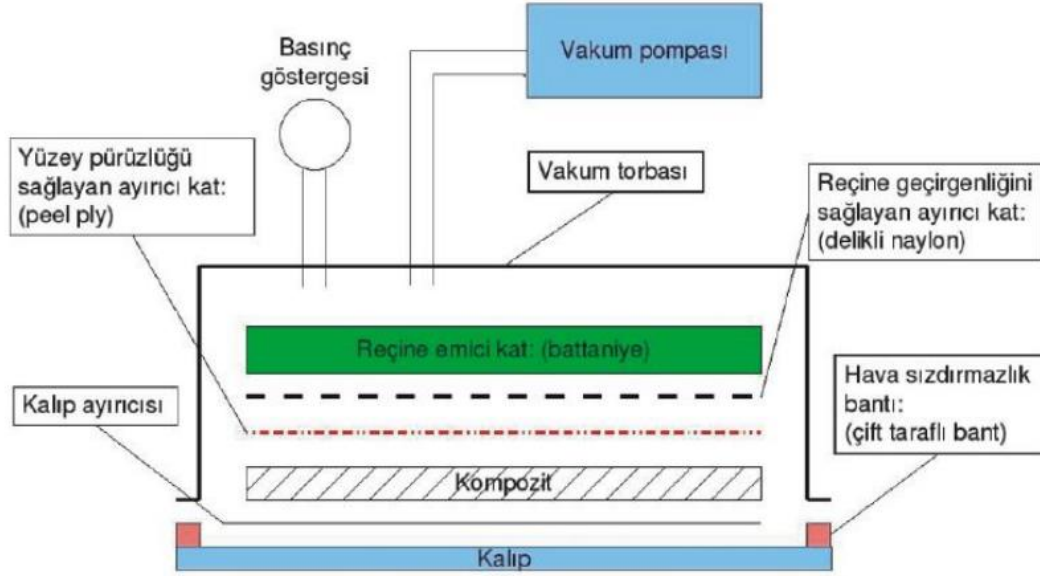


Şekil 2.8. Filament sarım makinası.

2.7.4. Vakum İnfüzyon (vakum bagging)

Kompozit malzemede kullanılacak olan fiber veya diğer takviye elamanları öncelikle kalıp üzerine yerleştirilir, sırası ile soyma kumaşı, delikli naylon, vakum battaniyesi ve vakum torbası koyulur. Vakum torbası sızdırmazlık bantları ile sabitlenir. Sistemdeki hava kaçakları kontrol edilir ve sızdırmazlığı sağlanmalıdır. Sistemin bir ucuna reçine haznesi yerleştirilir ve diğer kısmına vakum pompası yerleştirilir. Vakum pompası reçineyi sistemin içine çeker ve ayrıca vakum torbasında kalan havayı emerek, malzemenin üzerinde basınç oluşturarak içerideki bütün havayı dışarı atar, böylece kompozit malzemede hava kabarcıklarının oluşmasının önüne geçmeye çalışır ve malzemenin yüzeylerinin düzgün olması sağlanır. Ardından reçinenin kürleşmesi

için reçinenin özelliğine göre uygun sıcaklık ortamında kalıp bırakılır. Vakım infüzyon sisteminin şematik görüntüsü Şekil 2.9.'da verilmiştir.



Şekil 2.9. Vakım torbalama şematik gösterimi. (Durgun, 2014)

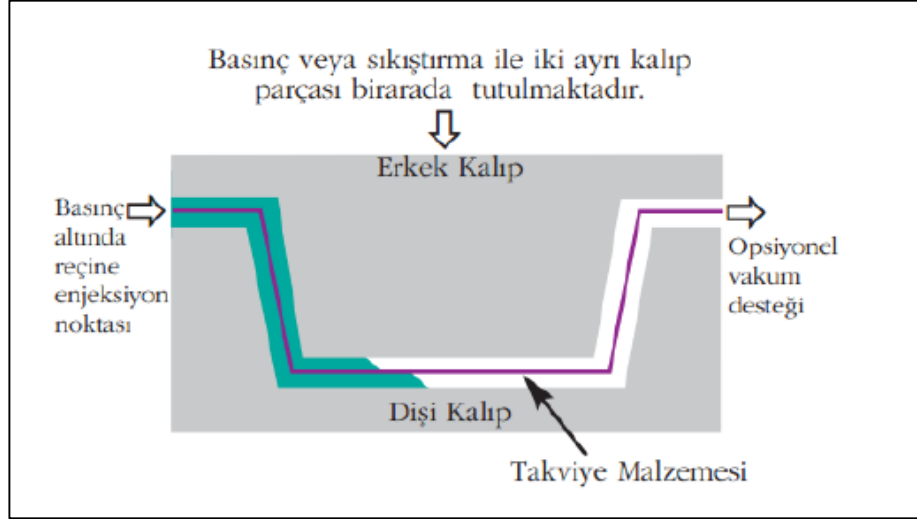
2.7.5. Hibrit El Yatırma Yöntemi

Bu yöntem elle yatırma yöntemi ve vakım torbalama yöntemlerinin birleşmesi gibidir. El yatırma yöntemine ek olarak kalıbın üstüne kurulan vakım sistemi el yatırma işlemi yapıldıktan sonra, vakumlama yaparak fazla reçinenin sistemden çekilmesidir. Bu yöntem ile üretilen kompozitlerin el yatırma yöntemine kıyasla fiber / hacim oranları daha yüksek ve boşluk oranı ise düşük olmaktadır. Bu yöntemin dezavantajı malzeme ve iş gücünün maliyeti artmasıdır (Maley, 2008).

2.7.6. Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi

Reçine transfer kalıplama metodu büyük miktarlı kompozit parçaları kısa zamanda imal etmek için en iyi ve seri bir yöntemdir. Bu yöntemde dişi ve erkek olmak üzere iki rijit kalıp kullanılır. Bu da maliyeti önemli bir açıdan artıran faktördür. Dişi ve erkek kalıp arada açık kalan bütün yüzeylerde kaliteli yüzey pürüzlülüğü vermektedir. Ve düşük boşluk oranı ile boyutsal olarak bir kesinlik vermektedir. Reçine transfer kalıplama metodu yüksek basınçlı pres ve ısıtılmış kalıplara gerek duymaktadır, bunlar

maliyet arttıran durumlardır (Khakzad, 2019). Reçine transfer kalıplama yöntemi şematik gösterimi Şekil 2.10.' da verilmiştir.



Şekil 2.10. Reçine transfer kalıplama yöntemi şematik gösterim. (Çetinkal 2019)

2.7.7. Üretim Yöntemlerinin Kıyaslanması

Çeşitli kompozitlerin üretim yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.2.'de kıyaslanmıştır (Maley,2008; Khakzad, 2019).

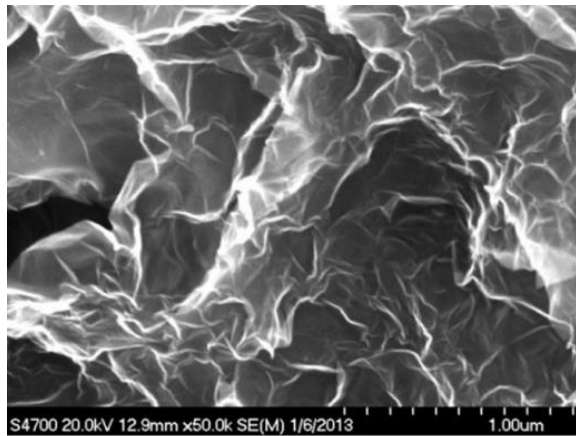
Çizelge 2.2. Kompzoit üretim yöntemlerinin kıyaslanması. (Maley, 2008; Khakzad, 2019)

Yöntem	Avantajlar	Dezavantajları
Elle yatırma yöntemi	-Düşük maliyet -Kolay üretim -Tek yönlü kalıp	-Tekrarlanma sayısı az -Sadece tek yüzeyin düzgün olması -Üretimde zararlı gaz açığa çıkması -El işçiliği fazla olması
Püskürtme yöntemi	-Karmaşık yapıda parçalar için uygun -Uygulanması basit	-Üretilen parçalar reçine oranının fazla olması -Kısa liflerden dolayı mekanik özelliklerin yeterince yüksek olmaması
Elyaf sarma yöntemi	-Termoset ve termoplastik kullanımına uygun olması -Prosesin otomasyon sistemine uyarlanabilmesi -İşçilik oranının az olması	-Tesis maliyeti gerektirmesi -Sadece aksel yönlü ürünler için kullanılabilmesi
Vakum infüzyon yöntemi	-Ürünün iki yüzeyinde düzgün olması -Reçine transfer yöntemine göre az kalıp maliyeti -Fiberler arası boşluk oranının daha az olması -Büyük parçalar üretilebilir	-Düşük üretim hızı -El ile yatırmaya göre daha çok maliyetli -Proses adımları nispeten karışıktır -Fiberlerin ıslanmama ihtimali olabilir
Hibrit el yatırma yöntemi	-Fiber hacim oranının el yatırmaya göre daha iyi olması -Vakum infüzyon yöntemine göre fiberler daha iyi ıslanır	-Fazla işgücü -Elle yatıma işlemine göre maliyetli
Reçine transfer kalıplama yöntemi	-Üretim hızı yüksek -Reçineye göre fiber oranı yüksek -Ürün üretim toleransları ayarlanabilmesi -Malzeme yüzeylerinin iki tarafının da düzgün olur	-Çift yönlü kalıp olduğu için kalıp maliyeti yüksek -Büyük parçalar için uygun değildir -Reçinenin kalıpta ulaşamadığı kısımlar olabilir

BÖLÜM 3

GRAFEN

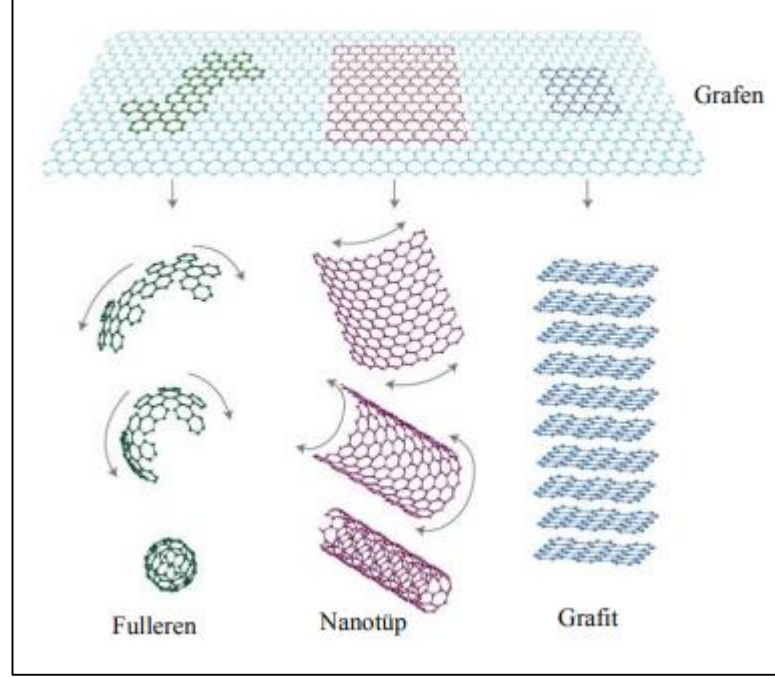
2010 yılı nobel fizik ödülünün grafen hakkındaki “Çığır açan deneyleri” ile Andre Geim ve Konstanti Novoselov’a verilmesi dikkatleri ‘mucize materyal’ olarak isimlendirilen bu malzemenin üzerine yöneltmiştir. Tek atom inceliğinde olan Grafen iki boyutlu olarak kabul edilen kovalent bağ ile bağlı karbon atomlarının altı bal petek tipinde örgüsüne kusursuzca dizilme ile birlikte oluşturduğu üstün özellikli sahip bir nano malzeme olarak bilinmektedir. Grafen, yapı bakımından karbon-karbon arası bağ uzunluğu 0,142nm’dir. Grafen içerisindeki elektron yapılar oda sıcaklığında kütsüz rölativistik parçacıklar halinde davranır, bu sayede grafen kuantum boşluğu etkisi gibi kendine ait özellikler sergiler. Grafenin özelliklerinden belirgin olanlar geniş yüzey alanı (2630 m² g⁻¹) yüksek elektron mobilitesi (200000 cm² / (V s)) yüksek ısı iletkenliği (5000 Wm⁻¹K⁻¹) ve yüksek young modülü (~1100 Gpa) olarak sıralanabilir (Bedeloğlu, 2016). Grafen nano partikülünün SEM görüntüsü Şekil 3.1.’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Grafen nano partikülünün SEM görüntüsü. (Bedeloğlu, 2016)

Bu malzeme sahip olduğu üstün özellikler nedeniyle birçok uygulama alanı bulmaktadır bunlar başlıca transparan elektrotlar, alan etkili transistörler, sensörler,

temiz enerji cihazları, nanokompozitler ve organik fotovoltaik cihazlar olarak sayılabilir (Bedeloğlu, 2016).



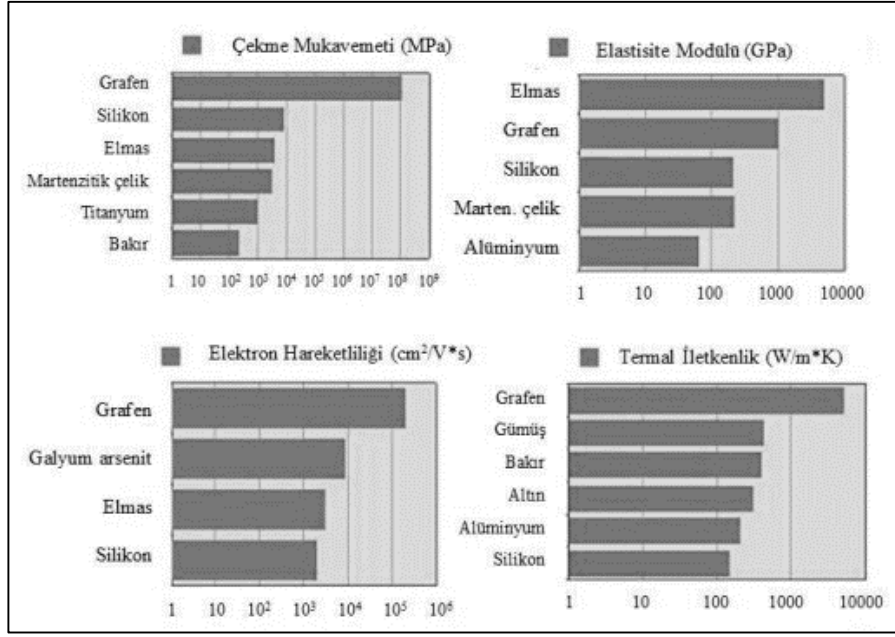
Şekil 3.2. Karbon esaslı malzemeler. (Randviir vd, 2014)

Grafen karbon elementinin bal peteği şeklinde örgülü halinde olan yapılarıdır. Grafen, altı adet karbon halkanın bir araya gelerek oluşturdukları nanokarbon tabakalarıdır. İki boyutlu sp^2 bağlı karbon atomlarının bağları ile oluşan tek tabakalı yapılar olarak bulunmaktadır. Normalde grafen yapısı tek tabakalı olandır. Ancak bir iki kat tabaklı olanlarda aynı derecede önemli yere sahiptir. Grafen karbon nanotüp ve fullerenden yapısal olarak farklıdır (Şekil 3.2.' de verilmiştir) (Randviir vd, 2014, Şenel vd. 2015). İdeal, tek tabakalı grafenin özellikleri Tablo 3.1.'de verilmiştir (Xavior vd, 2014).

Çizelge 3.1. Tek tabakalı grafenin özellikleri. (Xavior vd, 2014)

Özellikler	Değer
Hibrit şekil	sp^2
Tabaka sayısı	Tek tabakalı
Kristal yapısı	Hegzagonal
Boyut	İki
Safılık derecesi (%)	99
Kütlesel yoğunluk (g/cm^3)	0,3
Gerçek yoğunluk (g/cm^3)	2,25
Kalınlık (nm)	1-2
Yüzey alanı (m^2/g)	2600
Yüksek sıcaklık direnci	-75, +200 °C
Elastite Modülü (TPa)	1

Grafen bilinen en ince malzeme olarak bilinmektedir, kuvvetli karbon bağları sayesinde, grafeni bilinen en güçlü malzemelerden yapmaktadır. Şekil 3.3.'de verildiği gibi, grafenin diğer malzemeler ile kıyaslanması verilmektedir ve grafiklere bakıldığında açıkça özelliklerinin iyi olduğu görülmektedir. Ek olarak grafen, kolayca esneyebilir ve farklı formlarda olan birçok malzemenin yüzeyini kolayca kaplayabilmektedir. Bu nedenleri ele aldığımızda grafen, akademi ve sanayide önemli değişikliklere yol açabilecek bir materyal olarak görülmektedir (Adams, 2011; Şener vd, 2014).



Şekil 3.3. Grafenin diğer malzemeler ile kıyaslanması. (Adams, 2011)

Kompozitlerin imalatında kullanılan nano partiküller içinde grafen, araştırmacıların ve kompozit üreticilerinin dikkatini çekmiştir. Takviye maddesi olarak az miktarda kullanılması, nanokompozitlerin malzemelerin özelliklerini önemli ölçüde etkileyerek artmasını sağlamaktadır. Grafen ile güçlendirilmiş polimer matrisli nanokompozitlerin üretimi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır ve bu yöntemler polimer matriste grafen dağılımını ve kompozitin nihai özelliklerini etkilemektedir (Zhang, 2014).

Son çalışmalar, grafit nano paletlerinin veya grafenin, mükemmel düzlem içi mekanik, yapısal, termal ve elektriksel özelliklerine bağlı olarak nanokompozitlerde olumlu etkiler görebilmek için uygulanabilir ve kayda değer bir katkı maddesi olarak kullanılabileceğini vurgulamıştır (Singh, 2011).

Halihazırda önemli sayıda araştırma farklı araştırmacı grupları tarafından, grafen takviyeli epoksi nanokompozitler üzerinde yapılmıştır. Saf grafenden farklı olarak, epoksi nanokompozitlerdeki epoksi ve fiber maddeleri arasındaki arayüzey etkileşimini iyileştirmek amacıyla, grafenin yüzeyini işlevselleştirmek için farklı kimyasallar ile fonksiyonelleştirilmiş gruplar mevcuttur. Ayrıca, nanoyapılı malzemelerin yüzeyine farklı fonksiyonel grupların katkı malzemesi olarak

kullanılması nanokatkinin matris içindeki topaklanmasının önüne geçmektedir (Alexopoulos vd, 2017; Mindivan vd, 2020).

Aynı zamanda, in situ polimerizasyon yöntemiyle hazırlandığında grafenin bir polimerik matris içinde eşit olarak dağılabileceği de rapor edilmiştir (Wang vd, 2012; Qian vd, 2014). İn situ polimerizasyon, nanodolgu bazlı polimer nanokompozitlerin imalatında eriterek karıştırma ve çözelti karıştırma yöntemlerine göre önemli bir avantaj sağlayarak kusurları en aza indirgemenin yanı sıra daha güçlü geliştirme etkileri sağladığını belirtmiştir (Ma vd, 2017).

Grafenin epoksi nanokompozitlerin üzerindeki etkisi Li vd. (2013) tarafından araştırılmıştır. Nanokompozitlerin mekanik özelliklerindeki önemli artışın sebebi, nanopartiküllerin saf epoksiye göre daha iyi yük transferi ve güçlü arayüzey bağı etkileşimine yol açtığına bağlamışlardır.

Başka bir çalışmada ise Sherif vd. (2019), grafen nanopartikülleri ile güçlendirilmiş epoksi nanokompozitleri imal etmek için farklı dispersiyon teknikleri üzerinde çalışmışlardır. Grafen içeriğinin ağırlıkça %1,0 oranında olan nano kompozit malzemenin çekme mukavemeti ve akma mukavemetinin sırasıyla %11–19 ve %35–41 aralığında arttığını belirtmişlerdir.

Pokharel vd. (2015), saf grafen nanopartikülü ve işlevselleştirilmiş grafen ilave edilmiş, matrisi poliüretan olan nanokompozitlerin çekme özelliklerini karşılaştırdılar. Saf grafenli nanokompozit plaka ile karşılaştırıldığında, fonksiyonelleştirilmiş grafen levhalar (ağırlıkça %2,0), çekme mukavemetinde %17 ve elastikiyet modülünde %213'lük yüksek iyileşme olduğunu gözlemlemişlerdir.

Han vd. (2019), karbon nanotüp ve grafen nanoplatler ile güçlendirilmiş epoksi kompozit yapıştırıcıların mekanik performansını incelemiş ve karşılaştırmışlardır. Buna göre sonuçlar, grafen nanopaletlerin düşük kısmının, karbon nanotüplere göre kesme mukavemeti ve elastikiyet modülünde daha iyi bir artışa katkıda bulunduğunu göstermiştir. Benzer şekilde, saf matris ile karşılaştırıldığında modifiye edilmiş grafen

takviye edilmiş polipropilen nanokompozitlerin çekme modülünde %100'den fazla artış gözlemlenmiştir.

Kulkarni vd. (2017), polietilen, oksit-polipropilen, oksit-polietilen, oksit blok polimer, grafen takviyeli epoksi nanokompozitlerin eğilme özelliklerini araştırdı. Sonuçlar, ağırlıkça %0.018 grafende saf epoksi ile karşılaştırıldığında, nanokompozitlerin eğilme mukavemetinde ve elastikiyet modülünde sırasıyla %15,8 ve %21,7'lik bir iyileşme gösterdiğini gözlemlenmiştir.

Namdev vd. (2021), yaptığı bir çalışmada karbon fiber/epoksi kompozitlerin içerisine farklı oranlarda grafen ilavesi yaparak ürettiği kompozitlerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Yaptığı çalışmalar sonrasında ilave edilen grafenin çekme eğilme direncini arttırdığını ancak %0,5 oranından sonra grafen nanopartiküllerin yapı içerisinde aglomere olduğu ve dayanımı düşürdüğünü bildirmişlerdir.

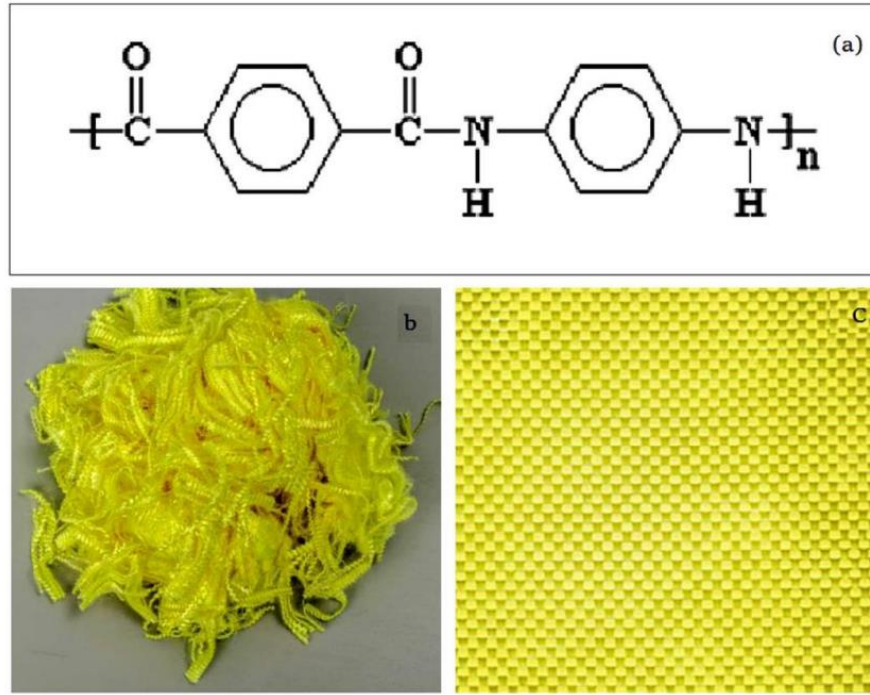
Wu vd. (2019), yaptığı bir çalışmada aramid/epoksi kompozitlerin içerisine farklı oranlarda grafen oksit ilave ederek ürettiği kompozitlerin eğilme direnci ve eğilme modülünü arttırdığını ve matris ile aramid fiber arasında arayüzey bağını güçlendirdiğini belirtmişlerdir.

BÖLÜM 4

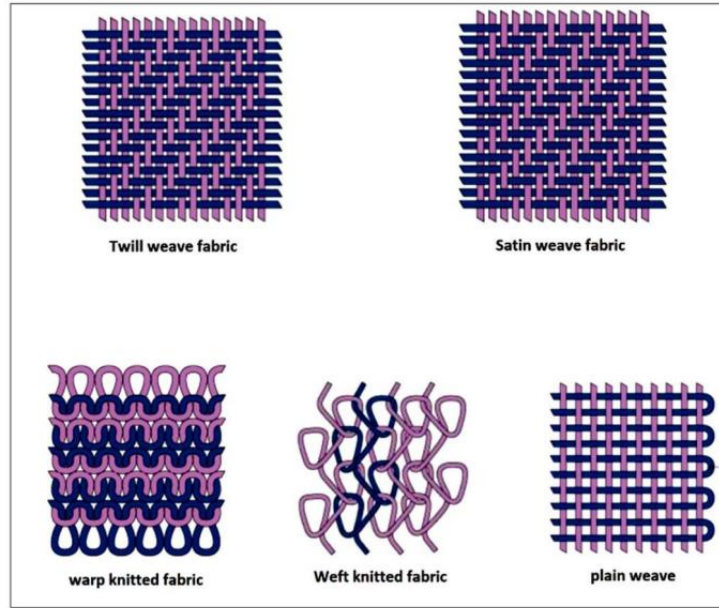
ARAMİD FİBER

Aramid kelimesi bir çeşit naylon olan aromatik poliamid maddesinden gelmektedir. Aramid lifleri yüksek mukavemete sahip sentezlenen ilk organik liflerdir. Aramid fiber, iki aromatik halka arasında en az %85 oranında amid bağı içeren bir lif türüdür. Aramid fiberleri 1960'ların son yıllarında piyasaya sürülmeye başlanmıştır. Bunlardan en çok ticari olarak bilinen Kevlar (DuPont) ve Twaron' (Teijin) dur. Bu markaların dışında Technora, Heracron, Nomex ve Teijinconex, aramid liflerinin diğer ticari adlarıdır. Genel olarak aramid fiber meta aramid ve para aramid olmak üzere iki gruba ayrılır. Aramid türü kimyasal bağın konumuna bağlıdır. Para aramidlerde lifin uzun yönünde hizalanmış bağlara sahipken meta aramidler, zikzak deseninde bağlara sahiptir. Bağ yönünün ve türünün farklı olmasından dolayı para aramidler daha yüksek mukavemete sahiptir. Aramid fiberler iplik ve dokuma kumaş şeklinde ticari olarak kullanılmaktadır (Mittal vd, 2018).

Aramid fiberinin özellikle çekme dayanımı standart çelikten yaklaşık olarak 5 kat daha fazladır. Araştırmalara göre 1 metre boyunda 1 kilogram ağırlığında bir aramidten yapılmış halat, aynı ölçü ve ağırlıktaki bir çelikten yapılmış halattan 5 kat daha fazla yük taşıyabilir. Aramid fiberlerin yüksek çekme mukavemeti değerleri göstermektedir. Ayrıca bu malzemeler balistik amaçlı uygulamalarda da kullanılmaktadır. Bunların yanında sürtünme ve aşınmaya da çok dayanıklılık sergileyen aramid fiberler, basmada aynı performansa sahip değillerdir (Onuk vd. 1993; Rajadurai vd, 2017).



Şekil 4.1. Kullanılan aramid fiberin; (a) moleküler yapısını, (b) iplikleri ve (c) dokuma kumaşı. (Dharmavarapu vd, 2021)



Şekil 4.2. Aramid fiber kumaşların dokuma tipleri. (Dharmavarapu vd, 2021)

En yaygın kullanılan aramid fiberlerden olan kevlar fiberin “kevlar 129” ve “kevlar 149” olarak iki türü bulunmaktadır. Yüksek darbe dayanımı göstermesinden dolayı özellikle balistik koruma istenen uygulama alanlarında kevlar 149 kullanılır. Bu

nedenden dolayı çoğunlukla kurşun geçirmeye karşı dayanıklı başlık ve kurşun geçirmeye dayanıklı yelek gibi uygulamalarda kullanılmaktadır (Özek, 2005). Çizelge 4.1’de bazı fiberlerin mekanik değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Bazı fiberlerin karşılaştırılması. (Barut, 2015)

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Elastite Modülü (Gpa)
S-cam	2,49	4750	89
Karbon	2	2900	525
Kevlar 129	1,44	2860	64
Kevlar 149	1,44	3750	136

Aramid elyaflar iyi termal kararlılığa ek olarak mükemmel mekanik özelliklere sahiptir (Kumar vd, 2010). Yüksek tokluk özelliğinin yanı sıra aşınma ve kesme direnci iyidir. İletken olmayan bu fiberler kimyasal çözünmeye dirençlidir, ancak normal koşullar altında belirli asitlere, bazlara ve kloro karşı hassastır, yüksek sıcaklıklara ve neme maruz kaldığında hidrolitik bozulma gösterebilir. Yüksek sıcaklıklarda kumaş bütünlüğünü korur. Ultraviyole ışınlarına maruz kaldığında bozulmaya karşı hassastır (Herbert vd, 2012; Bakar vd, 2014).

Aramid fiberinin kullanım alanları;

- Balistik koruma uygulamaları
- Askeri kasklar
- Otomotiv sanayisi
- Kurşun geçirmez yelekler.
- Koruyucu giysiler
- Motosiklet koruma giysileri
- Avcılık giysi ve aksesuarları
- Yelkenliler ve yatlar için yelken direği
- Hava araçları gövde parçaları
- Tekne gövdesi
- Endüstri ve otomotiv uygulamaları için kemer ve hortum

4.1. ARAMİD FİBERLERİN AVANTAJLARI

Aramid'in başlıca avantajları yüksek mukavemet ve düşük ağırlıktır. Grafit gibi, hafif negatif bir aksenel termal genişleme katsayısına sahiptir, bu da aramid laminatların boyutlarda termal olarak kararlı hale getirilebileceği anlamına gelir. Grafitten farklı olarak darbe ve aşınma hasarlarına karşı çok dayanıklıdır. Epoksi gibi diğer malzemelerle birleştirildiğinde su geçirmez hale getirilebilir. Esnekliğini koruyan kauçuk ile kompozit olarak kullanılabilir. Kimyasallara karşı çok iyi dirençle birlikte yüksek çekme modülü ve düşük kırılma uzaması, çeşitli uygulamalarda farklı kompozit yapısal parçalar için doğru seçim olmasını sağlar. Yaklaşık 3620 MPa çekme mukavemetine ve 1.44 g/cm³ yoğunluğa sahip bir elyafır. Bu yoğunluk, 2.54 g/cm³lük cam elyafından nispeten daha küçüktür. Aramid, cam ve karbon fiberlerin aksine kriyojenik sıcaklıklara (-196 °C) kadar gücünü ve esnekliğini korur. Ayrıca, aramid elyaf, cam elyafa benzer bir gerilme mukavemeti sergiler, ancak modülü en az iki kat daha büyük olabilir. Aşınma ve kesilmeye karşı iyi bir dirence sahip olması erime noktasının olmaması, termal bozulmaya ve yanıcılığa karşı dayanıklı olması diğer avantajları arasında gösterilebilir (Sinmazçelik vd, 2011; Deopura vd, 2015; Wu vd, 2015; Dharmavarapu vd, 2021).

4.2. ARAMİD FİBERLERİN DEZAVANTAJLARI

Aramid elyaflar nem içermesinden dolayı cam fiber veya grafit kompozitlere göre oksijene karşı daha hassastır. Epoksi sistemler gibi neme dayanıklı matrislerle birlikte kullanılmalıdır. Sıkıştırma özellikleri de düşüktür. Aramid elyafların özel makineler (örn. kesme için özel makaslar, özel matkap uçları) olmadan kesilmesi ve taşlanması genellikle zordur. (Sun vd, 2014; Jinasena, 2016).

4.3. ARAMİD FİBER YÜZEY İŞLEMLERİ

Aramid fiberlerin kimyasal eylemsizlik, yüksek kristallik ve düzgün yüzey özelliklerine sahip olmasından dolayı matris ile fiber arasında ara yüzey bağı zayıftır. Yüzey uyumluluğunu geliştirmek amacıyla aramid fiberlere yüzey modifikasyon işlemleri uygulanır. Aramid fiberlere uygulanan başlıca yüzey işlemler; Alkali işlemi,

silan işlemleri, asitilasyon işlemleri ve benzoilasyon işlemidir. Yapılan yüzey işlemleri mekanik özellikleri artıran ikinci faz katkılarının matrise yapışmasını, matris üzerindeki partikül dağılımını ve çapraz bağlanmayı artırır (Dong vd, 2013; Dharmavarapu vd, 2021).

BÖLÜM 5

LİTARETÜR ARAŞTIRMASI

Fiber takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalarda fiber ile matris arasında oluşan ara yüzeyini geliştirmek amacıyla nano boyutlara sahip çeşitli dolgu malzemeleri kullanılmaktadır. Tezin bu bölümünde yapılan literatür incelemelerinden bazı örnekler sunulmuştur.

AF Ávila vd. (2012), yaptığı bir çalışmada karbon fiber/epoksi kompozitine farklı oranlarda grafen ilave ederek eğilme özelliklerini incelemişlerdir. Yaptığı çalışma sonucunda ilave edilen grafenin eğilme direnci üzerine etkisi olduğunu en yüksek eğilme direncini %0,5 grafen ilavesi ile elde edildiğini daha yüksek oranlarda ilave edilen grafenin yapı içinde homojen dağıtılamadığı ve aglomerasyona neden olduğunu vurgulamışlardır.

Alsaadi vd. (2019), yaptığı bir çalışmada epoksi/kevlar kompozitler ve epoksi/karbon/kevlar kompozitlerde ilave edilen grafenin mekanik özelliklere etkisini inceledikleri çalışmada çekme, eğilme darbe, özelliklerini geliştirdiklerini vurgulamışlardır.

Pathak vd. (2016), yaptıkları bir çalışmada karbon fiber ve grafen oksit takviyeli epoksi hibrit kompozitlerde grafen oksitin mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada %0,3 grafen oksit ilave edilerek üretilen hibrit kompozitlerin eğme mukavemetinin arttığını vurgulamışlardır.

Wu vd. (2018), yaptıkları çalışmada aramid fiber epoksi kompozitlerin içerisine farklı oranlarda grafen oksit ilave ederek hibrit kompozitler oluşturmuşlardır. Yaptıkları çalışma sonunda eğme dayanımını ve eğme modülünü arttırdığını bildirmişlerdir.

Manigandan vd. (2017) yaptıkları bir çalışmada kevlar epoksi kompozit içerisine farklı oranlarda grafen ilavesi yaparak hibrit kompozitler üretmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonrasında %5' e kadar grafen ilave edilen hibrit kompozitlerin çekme dayanımının arttığını vurgulamışlardır.

Bulut (2017), bazalt lif/epoksi matrisli kompozit malzemelere grafen nano partikül takviyesi yaparak mekanik özellikleri çekme, üç nokta ve darbe testi yaparak araştırmıştır. Epoksi içerisine ağırlıkça %0,1, 0,2 ve 0,3 oranında grafen ekleyip ardından karıştırarak numuneler oluşturulmuştur. %0,1 katkı oranlı numunesinde epoksi ve fiber arasındaki ara bağlanma kuvvetinin arttığını ve mekanik özelliklerin gelişme gösterdiğini gözlemlemiştir.

Shokrieh vd. (2013), çalışmasında epoksiye grafit ve grafen nano partikülleri ilave ederek nanokompozitleri üzerinde etkisini ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışmanın sonucunda grafenin grafitte göre nanokompozitlerin mekanik özelliklerinin iyileşmesinde daha çok katkı göstermiştir. Çalışmada ağırlıkça %1 oranında grafen katkısının nanokompozitlerin çekme mukavemeti sonucunda %15,7, %1 grafit eklenmesinin sonucunda ise %14'lük bir artış olduğunu söylemiştir.

Ferik (2021), çalışmasında kevlar, cam ve karbon elyaf kumaşları kullanılarak, elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit plakalar üretmiştir. Ayrıca aynı üretim parametrelerini kullanarak, elyaflar ile üretilen kompozit plakalar toplam kompozit kütle bazında %0,5 karbon nanotüp ilavesi ile hibrit kompozit plaka olarak üretmiştir. Üretilen kompozit plakaların mekanik özelliklerini incelemiştir. Yapılan mekanik testler sonucunda kompozit malzemeye ilave edilmiş karbon nanotüp katkısının malzeme performanslarına olan etkisi çekme testinde cam elyaf takviyeli kompozit malzemede %14 artış göstermiştir. Üç nokta eğme testinde kevlar elyaf takviyeli kompozit malzemede %15 artış göstermiştir. Düşen ağırlık darbe testinde de cam elyaf takviyeli kompozit malzemede %11 ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemede %120'lik bir artış gösterdiğini belirtmiştir.

Kılıçtekin (2020), çalışmasında vakum infüzyon üretim tekniği ile nano alümina nano partikülü katkılı 3,5 ve 7 katkılı kevlar – karbon elyaf takviyeli Hibrit kompozit

malzemeler üretmiştir. Malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için ise yakma, çekme ve darbe çentik testi uygulamıştır. Yapılan deney sonuçların neticesinde ve SEM görüntülerinin sonucunda, katman sayısının mekanik özelliklere olumlu katkı yaptığını belirtmiştir.

Can (2019), yaptığı çalışmada fonksiyonellendirilmiş alümina ve slika nanopartikül ve cam – kevlar elyaf katkılı hibrit kompozitlerin mekanik özellikleri belirlemek için darbe davranışlarını incelemiştir. Farklı oranlar ve katlarda katkı elamanı kullanmıştır. Nanopartikül katsının oranın artması ile test sonuçlarında olumlu etki olduğunu belirtmiştir.

Çetinkal (2019), yaptığı çalışmada vakum infüzyon ve el yatırma yöntemlerini kullanarak sandviç kompozit plakalar üretmiştir. Kompozitlerin mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testi, basma testi ve tabakalar arası kırılma tokluğu metodlarını kullanmıştır. Yapılan deneyler neticesinde vakum infüzyon yöntemi ile üretilen malzemeler, elle yatırma yöntemine ile üretilen malzemelere göre yaklaşık 1,5 – 2 kat daha dayanıklığı olduğunu belirtmiştir.

Bağatır (2018), yaptığı çalışmada kompozit malzemeye farklı oranlarda grafen nano partikül ilave ederek kompozit plakalar üzerindeki etkisini incelemiştir. Saf Epoksi cam fiber, karbon fiber ve aramid fibere farklı oranlarda ilave etmiştir. Mekanik özelliklerini belirlemek için çekme tesitine tabii tutmuştur. Grafen katkısının sonuçlara önemli ölçüde katkı sağladığını belirtmiştir. En düşük çekme mukavemetini katkısız epoksi maleme olmuş. Fiber katkısı yaparak hepsinin sonucun saf epoksiye göre daha iyi olduğunu gözlemlemiştir. Fiber ve grafen takviyeli kompozitlerde ise en iyi çekme mukavemeti değerini karbon fiberli kompozit, en düşük çekme mukavemetini gösteren ise aramid ve fiber takviyeli kompozit malzeme olduğunu belirtmiştir.

Kuilla vd. (2010), yaptıkları çalışmada grafenle ilgili yapılmış son gelişmelere ve grafen katkılı nanokompozitlerin üretilmesine değinmişlerdir. Grafen, grafen oksiti modifikasyonuna, bunların kullanımına ve farklı polimer esaslı matrislere sahip nanokompozitlerin imalatında grafenin ayrıntılı kullanımı ayrıntılı olarak incelemiştir. Grafenin nanokompozitlere önemli ölçüde etki ettiğini belirtmiştir.

Dindar (2019), yaptığı çalışmasında e-cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlere karbon nanotüp ve nano kili reçineye ağırlıkça %0,5 oranında katkı yaparak kompozit malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki özelliklerini incelemiştir. Çekme deneyi sonucuna göre elyaf takviyeli kompozitlere nanopartikül ilavesi yapılması sonuçları olumlu etkilediğini belirtmiştir.

Zhou vd. (2008), karbon elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitlerde karbon nanofiber kullanmış ve mekanik özelliklerini geliştirmek için bu çalışmayı yapmışlardır. Epoksi matrise ağırlıkça %1, %2 ve %3 oranlarında karbon nanofiber ilavesi yapmışlardır. Yaptıkları test sonuçlarına göre karbon nano elyaf katkısının sayesinde çekme mukavemeti %11, eğilme mukavemetinde %22 ve yorulma mukavemetinde de önemli ölçüde artışa katkı sağladığını ifade etmişlerdir.

Khakzad F. (2017), yaptığı çalışmasında grafen ve cam elyaf katkılı epoksi matrisli nanokompozit malzemelerin özelliklerini incelemiştir. Deney numuneleri vakum infüzyon yöntemi ile üretmiştir. Kompozit plakara (%0,15-0,25-0,35-0,45-0,75) oranlarında grafen katkısı yapmıştır. Grafen katkısının genel olarak katkısız numuneye göre sonuçlarda iyileşme gösterdiğini gözlemiştir. Çekme testi sonucuna göre en iyi mukavemeti %31,29 ile %0,45 grafen katkılı numune, üç nokta eğme testinde %34,74 ile %0,25 grafen katkılı numunelerin olduğunu belirtmiştir.

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. MATERYAL

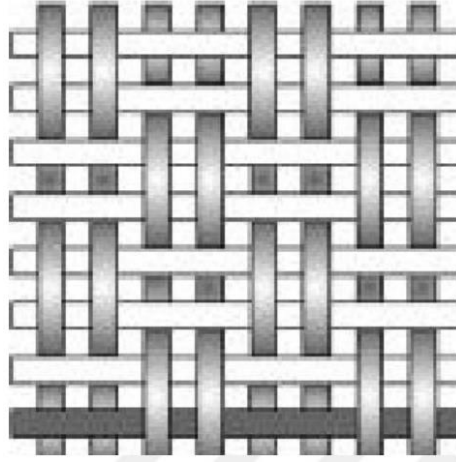
Bu çalışmada matris malzemesi olarak Dost kimya firmasından ticari olarak temin edilen ve teknik özellikleri Çizelge 6.1.'de verilen Hexion marka epoksi (MGS Laminasyon L160) ve bu reçinenin kürleşmesi için sertleştirici olarak ise MGS H160 kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak' da yine aynı firmadan ticari olarak temin edilen ve teknik özellikleri Çizelge 6.2'de verilen aramid (Twaron® 1680 dtex Type 2040) fiber kumaşlar kullanılmıştır. Üretilecek Kompozitlerin izotropik bir yapı sergilemesi için Şekil 6.1'de şematik görüntüsü verilen basket tipi örgü kevlar kumaş kullanılmıştır.

Çizelge 6. 1. Epoksi reçine ve sertleştirici teknik özellikleri.
(“<https://www.kompozitshop.com>” 22.06.2022)

MGS Laminasyon L160 Epoksi Reçine Teknik Özellikleri	
Yoğunluk	1,13 gr/cm ³
Viskozite	700-900 mPas
Çalışma sıcaklığı	-60 °C / +50 °C (Isıl işlem uygulanmadan)
MGS H160 Sertleştirici Teknik Özellikleri	
Yoğunluk	0,96 – 1,00 gr/cm ³
Viskozite	10-50 mPas
Çalışma sıcaklığı	-60 °C / +50 °C (Isıl işlem uygulanmadan)

Çizelge 6.2. Çalışmada kullanılan Aramid fiber kumaş malzemesinin teknik özellikleri. (“<https://www.kompozitshop.com>” 22.06.2022)

410gr Aramid CT 736 Kumaşının Teknik Özellikleri	
Kumaş Yapısı	12,7 x 12,7 ± 0,3
Yüzey Alan Ağırlığı	410 g/m ² ± 4 %
Kumaş Kalınlığı	620 µm ± 15 %
Örgü Tipi	Basket 2/2
Gerilme Direnci	Warp> 3100 N/cm Weft> 3320 N/cm
Yoğunluk	1,44 gr/cm ³



Şekil 6.1. Aramid kumaş örgü tipi. (Kurukaya 2019)

Hibrit kompozit malzeme üretebilmek için grafen takviye edilmiştir. Kullanılan grafenin teknik özellikleri Çizelge 6.3.’de verilmiştir. Reçine içerisine grafenin homojen dağıtılması için mekanik karıştırıcı kullanılmıştır.

Çizelge 6.3. Çalışmada kullanılan grafen teknik özellikleri.
(“<https://www.nanokar.com>” 22.06.2022)

Grafen Nanoparikülün Teknik Özellikleri	
Safılık	99.9+%
Boyut	5 nm
Yüzey Alanı	170 m ² /g
Çap	18 µm

Bu çalışma 3 aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada reçine ve kevlar kumaşlar vakum destekli el yatırma yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. Bu işlemin hemen ardından plakalara vakum sistemi uygulanmıştır. Vakum yapılmasının amacı, plakaların kalınlığının eşit olması ve reçinenin elyaflara homojen bir şekilde dağılmasıdır.

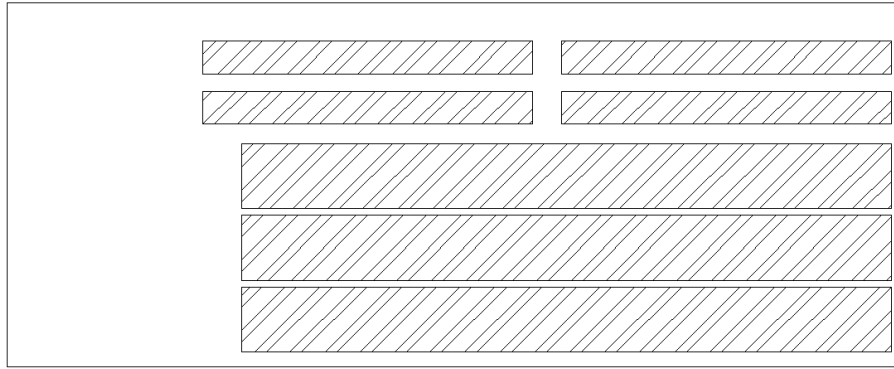
Çalışmanın ikinci aşamasında ise matris reçine içerisine %0,25, %0,50, %1 ve %2 oranlarında grafen mekanik karıştırıcı yardımıyla 4 farklı bileşime sahip reçine-grafen karışımı elde edilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında anlatıldığı gibi aynı ölçülere sahip kalıp üzerine serilen kumaşlara el yatırma ve vakum sistemiyle nano partikül karıştırılan reçine emdirilerek hibrit kompozitler elde edilmiştir. Çalışmanın son aşamasında ise üretilen bu kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiştir.

6.2. KOMPOZIT PLAKALARIN ÜRETİLMESİ

Bu çalışmada aramid elyaf ve grafen takviyeli hibrit kompozit plakaların üretilmesi için el yatırma ve vakum sistemi bir arada kullanılmıştır. Plakadan çıkacak numuneler şekil 4.3.’de ki gibi kesim planı yapılmıştır ve kumaşın boyuna karar verilmiştir. Kumaşlar 135 mm X 345 mm boyutlarında aramid fiber kesme makası ile kesilmiştir Şekil 6.2’de fiber makasının ve elyaf fiberin görüntüsü verilmiştir. Bu ölçüler numune ölçülerin kesim planı yapılarak ve kesme payları dikkate alınarak belirlenmiştir. Her bir plaka için 5 kat kumaş kullanılmıştır.



Şekil 6.2. Aramid kumaş ve aramid makası.



Şekil 6.3. Numune kesim planı.

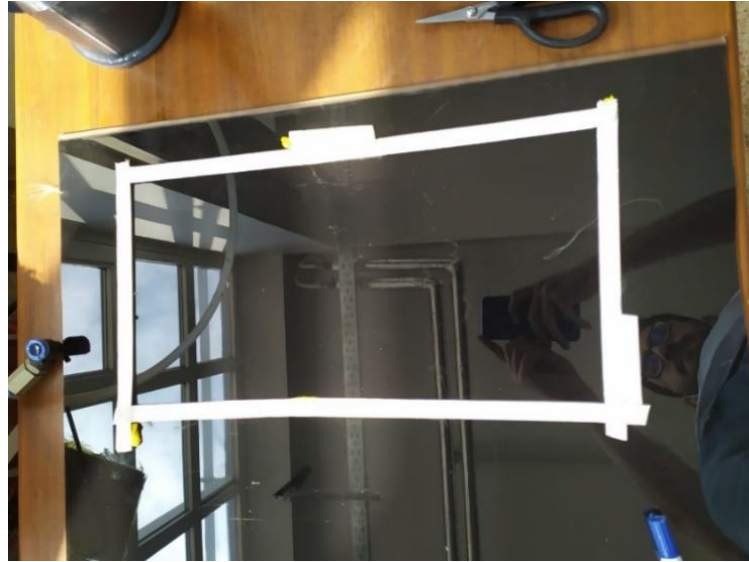
6.2.1. Vakum Destekli El Yatırma Sisteminin Hazırlanması

Elyaf kumaşların kesimin ardından, el yatırma ve vakum pres sisteminin hazırlanacağı ve numunelerin yüzey kalitesinin iyi olmasını sağlayacak uygun boyutta pleksi cam levha temin edilmiştir. İşleme geçmeden önce pleksi cam levhanın üzeri temizlenmiştir.



Şekil 6.4. Pleksi cam levha.

Temizleme işleminden sonra, levha üzerine istenilen plaka boyutlarından daha büyük bir alana sızdırmazlığı sağlamak ve üretime imkân vermek için çift taraflı bant kullanılarak üretim alanı oluşturulmuştur (Şekil 6.4.). Oluşturan bu alana chelox marka kalıp ayırıcı silikon sprej uygulanmıştır ve 5 dakika bekletilmiştir. Bu işlem ile kompozit plakaların pleksi cam yüzeyden daha kolay ayrılması ve kompozit plakaların yüzey kalitesine artırmak hedeflenmiştir.



Şekil 6.5. Sızdırmazlık bantları.

El yatırma ve vakum yapılacak sistem hazırlandıktan sonra reçine hazırlama işlemine geçilmiştir. Reçinenin kürleşme süresi hızlı olduğundan dolayı önce kumaş kesimi ve plaka hazırlama işlemi yapılmıştır.

Hazırlanan kompozit plakaların matrisi olan reçine hazırlanırken, kullanılacak miktarı bulabilmek için hesaplamalar yapılmıştır. Numune için kullanılan elyafların toplam ağırlığı belirlenmiştir ve çıkan ağırlığın iki katı miktarda epoksi hazırlanmıştır. Epoksinin içerisinde sertleştirici ve reçine, tedarikçi firmanın verdiği talimatlara göre %75 reçine %25 sertleştirici olacak şekilde içinde bulunmaktadır.

6.2.2. Epoksi Reçine Hesabı

135 mm X 345 mm boyutlarındaki aramid elyafların ağırlığı hassas terazi ile ölçülmüştür.

5 adet aramid elyaf ağırlığı: 105 gr

Kullanılacak epoksinin miktarı için numunenin içerişindeki toplam elyafların ağırlığının iki olacak şekilde hesaplanır.

Toplam elyaf ağırlığı x 2 = 105 x 2 = 210 gr

Reçine ve sertleştirici miktarı belirlenirken tedarikçi firma talimatlarına uyulmuştur ve ağırlıkça %75 reçine ve %25 sertleştirici oralarında hesaplanmıştır.

$$210 \times \frac{75}{100} = 157,5 \text{ gr reçine}$$

$$210 \times \frac{25}{100} = 52,5 \text{ gr sertleştirici}$$

6.2.3. Grafen Katkılı Kompozit Numuneler İçin Grafen Oran Hesabı

5 farklı oranda grafen nanopartikül kullanılacaktır. Oranlar; %0,25, %0,5, %1, %2 şeklindedirGrafen katkı oranları Çizelge 4.4.'de tablo olarak verilmiştir.

%0,25 grafen katkı kompozit plaka için örnek grafen miktarı hesabı

$$208 \times \frac{0,125}{100} = 0,52 \text{ gr Grafen Nanopartikül}$$

Çizelge 6.4. Grafen katkı oranları.

Grafen katkı oranı	Elyaf ağırlığı	Grafen miktarı
%0,25	208 gr	0,52 gr
%0,5	211 gr	1,010 gr
%1	210 gr	2,1 gr
%2	214 gr	4,28 gr



Şekil 6.6. Grafenin tartılması.

Matris malzemesi için ve katkı maddesinin miktarları hesaplanmasından sonra karıştırma işlemine geçilmiştir. Sertleştiricisi daha sonra eklenmek üzere 157,5gr gram reçineye grafen nanopartiküller ağırlıkça sırası ile %0.25, %0,5, %1, %2, oranında karıştırılmıştır. Katkisız numune için reçine ve sertleştirici gerekli ölçümlerden sonra 2 dakika boyunca tahta karıştırıcı ile karıştırma kabında karıştırılmıştır.

Katkılı numune için ise karıştırma işlemi arnica marka 1200W'lık mutfak robotu ile yapılmıştır Şekil 6.7.'de karıştırıcının resmi verilmiştir. Belirlenen ölçüde reçine ve grafen karıştırıcının haznesine koyulmuştur. İlk olarak oda sıcaklığında karıştırma robotunun 1. Devrinde 1 dakika karıştırma 1 dakika dinlenme şeklinde 10 dakika karıştırılmıştır. İkinci karıştırma aşamasında robotun 2. Devrinde 1 dakika karıştırma 2 dakika dinlenme şeklinde 5 dakika karıştırılmıştı, toplamda ise 15 dakika karıştırma

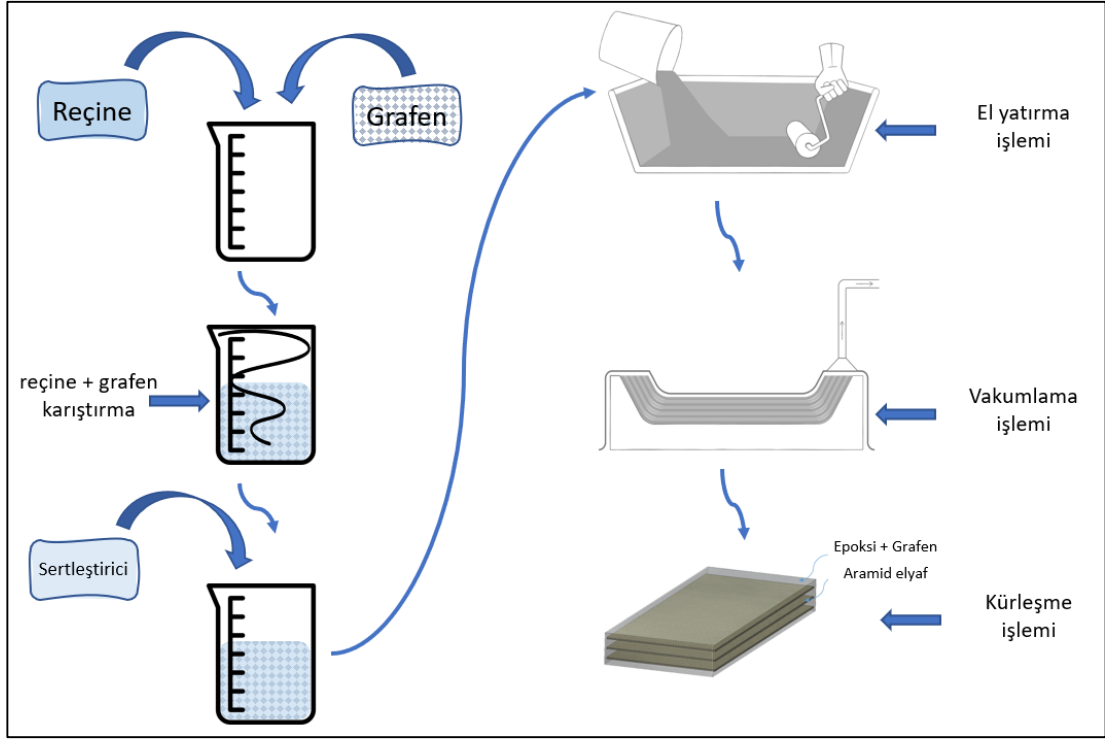
işlemi gerçekleştirilmiştir. Grafen ile reçine karıştırıldıktan sonra sertleştirici ilave edilerek 2 dakika daha el ile karıştırılmıştır.



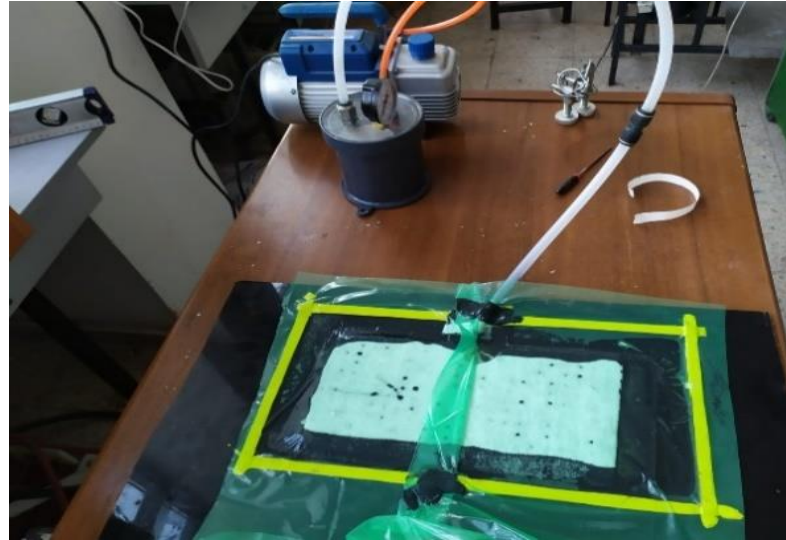
Şekil 6.7. Reçine ve grafen karıştırma işlemi.

6.2.4. Epoksi Reçinenin Sisteme Verilmesi

Hazırlanan ve üstüne kalp ayırıcı sıkılan pleksi cam plakanın üzerine, kesilen aramid kumaşlar aralarına fırça yardımı ile reçine sürülerek sırayla 5 kat aramid kumaş yerleştirilmiştir. İlk kumaşın üstüne epoksi sürüldükten sonra ters çevrilerek diğer tarafına da epoksi sürülmüştür. Kapta kalan fazla reçine kumaşların üstüne dökülmüştür. Daha sonra vakum sistemi için kumaşların üzerine sırasıyla ayırıcı kumaş, delikli kumaş ve vakum battaniyesi koyulmuştur. Sızdırmazlığı sağlamak için ve vakum yapabilmek için en son vakum torbası yerleştirildi. Vakum kaçakları kontrol edilerek Şekil 6.9.'daki gibi vakumlama işlemine geçildi. Kompozit plakanın hazırlanışının adımları şematik olarak Şekil 6.8.'de verilmiştir.

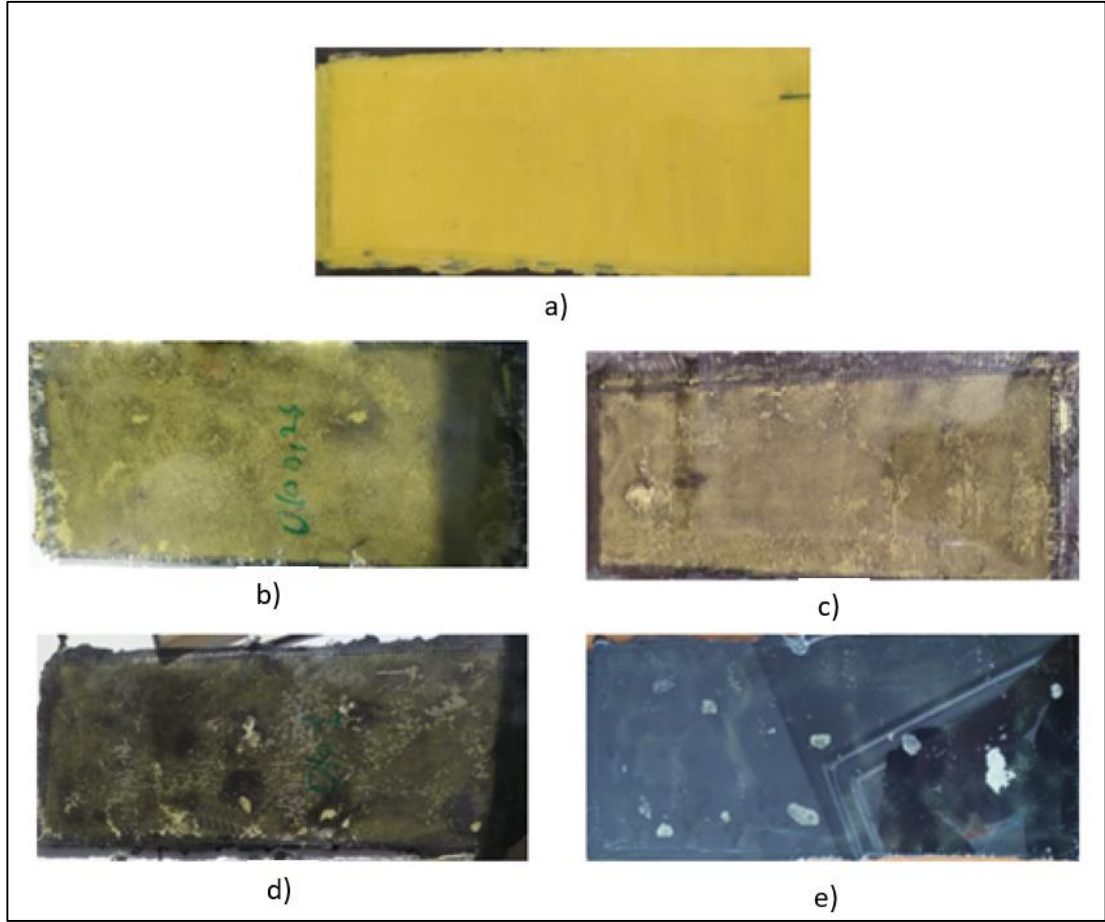


Şekil 6.8. Kompozit plakanın hazırlanışının adımları şematik gösterim.



Şekil 6.9. Vakumlama işlemi.

15 dakika boyunca 710 mmhg basınçla vakum yaptırılarak epoksinin homojen bir şekilde aramid kumaşa nüfuz etmesi sağlanmıştır. Vakum pompası kapatıldıktan sonra vakum torbası altında 24 saat boyunca kürleşmesi beklenmiştir. Hazırlanan kompozit plakalar şekil 6.10.'da gösterilmiştir. Çizelge 6.5.'de üretilen kompozit plakalar sırası ile tablo halinde verilmiştir.



Şekil 6.10. a) katkısız, b) %0,25 katkılı, c) %0,5 katkılı d) %1 katkılı, e) %2 katkılı.

Çizelge 6.5. Üretilen nanokompozit plakalar.

	Takviye Elamanı	Matris Elamanı
Kompozit plaka 1	Aramid Elyaf	Epoksi Reçine
Hibrit kompozit plaka 2	Aramid Elyaf + %0,25 Grafen	Epoksi Reçine
Hibrit kompozit plaka 3	Aramid Elyaf + %0,5 Grafen	Epoksi Reçine
Hibrit kompozit plaka 4	Aramid Elyaf + %1 Grafen	Epoksi Reçine
Hibrit kompozit plaka 5	Aramid Elyaf + %2 Grafen	Epoksi Reçine

6.3. DENEY NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

Su jeti, yüksek basınçlı ve yüksek hızlı su kullanarak malzemeleri hassas bir şekilde kesim yapabilen bir makinedir. Su jeti ucundaki 0,28 mm çapındaki nozul sayesinde dar toleranslarda kesim yapmaktadır.

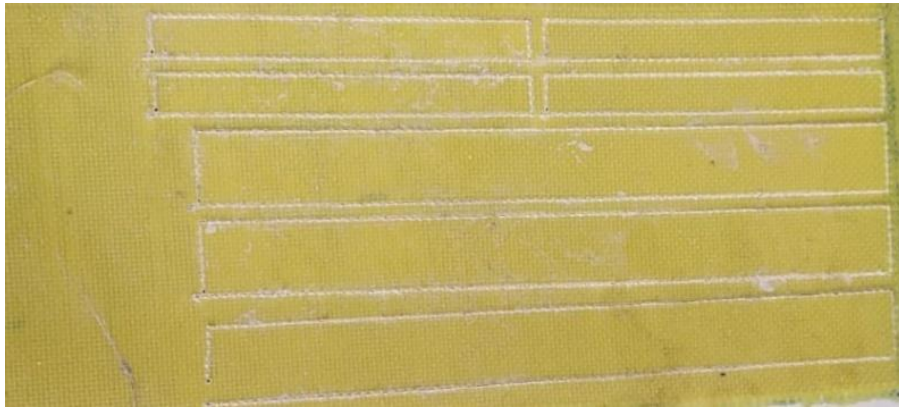
Su jetinin avantajları;

- Özel parça imalarında verimli bir yöntemdir.
- Kesilen parçada herhangi bir meydana gelmemektedir.
- Kesilen parçada ısı oluşmadığı için mekanik özelliğinde olumsuz değişiklik gözlemlenmez.



Şekil 6.11. Su jeti ile kesim işlemi.

Üretilen kompozit plakalar şekil 6.11.'de ki gibi su jeti makinası ile ASTM D3039 standartlarına göre çekme test numunleri ve ASTM 790 üç nokta eğme test numuneleri kesilmiştir. Su jeti ile kesilen katkısız numuneler şekil 6.12.'de verilmiştir. Numuneler 127,7 mm x 12,7 mm x 3,2± mm boyutlarında kesilmiştir.



Şekil 6.12. Su jeti ile kesilen kompozit plaka.

6.4. ÜRETİLEN KOMPOZİT MALZEMELERE UYGULANAN MEKANİK TESTLER

Üretimi tamamlanan kompozit plakaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için üç nokta eğme ve çekme testleri yapılmıştır. Yapılan testler çizelge 6.6.'da verilmiştir.

Çizelge 6.6. Uygulanan testler.

Deney Adı	Deney Standartları	Numune boyutları (mm)	Açıklık Mesafesi (mm)	Deney Hızı (mm/dk)
Üç Nokta eğme Deneyi	ASTM D790	127 x 12.7 x 3.2	50	1
Çekme Deneyi	ASTM D3039	250 x 25 x 3.2	-----	2

6.5. ÜRETİLEN KOMPOZİTLERİN MİKRO YAPI İNCELEMELERİ

Üretilen Kompozitlerin mikro yapılarını gözlemlemek için Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi metalaografi laboratuvarında bulunan stereo mikroskop kullanılmıştır. Mikroskop cihazının görüntüsü Şekil 6.16.'da verilmiştir.



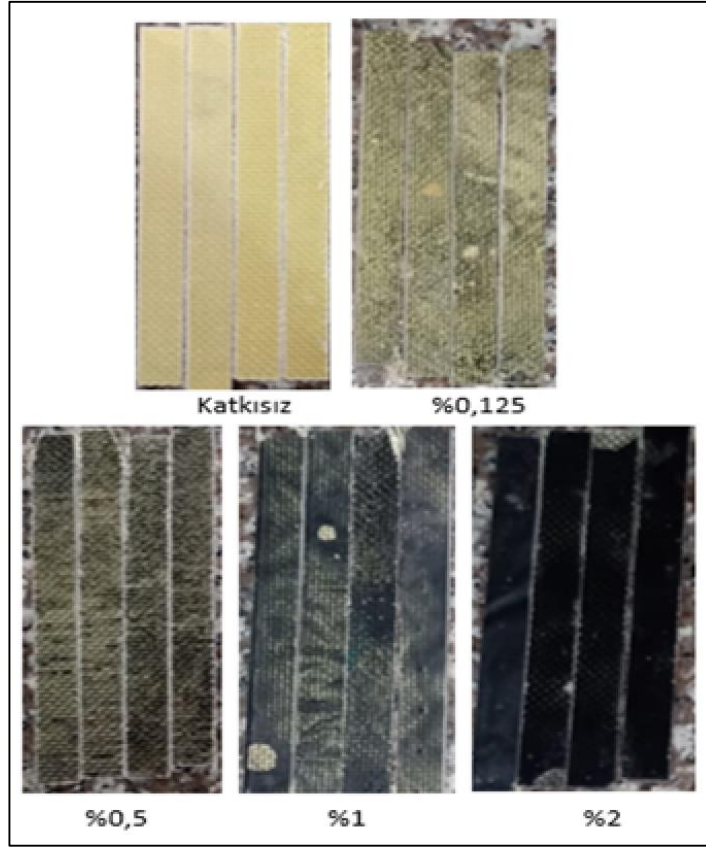
Şekil 6.13. Stereo mikroskop cihazı.

6.6. ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ

Eğme testi genelde malzemelerin eğilme modülünü, eğilme gerilmesini ve şekil değiştirmesini bulmak için kullanılır. Malzeme yatay olarak iki temas noktasına yerleştirilir ve malzemenin çökmesini sağlamak için malzememin ortasından bir veya iki orta temas noktasından malzeme üzerine belirli bir kuvvet uygulanır. Eğilme deneylerinde bir noktadan kuvvet uygulanırsa üç nokta eğme testi, iki noktadan kuvvet uygulanırsa dört nokta eğme testi denir.

Eğilme deneyinin yaygın amaçları, eğilme dayanımını ve eğilme modülünü ölçmedir. Eğilme direnci, numunenin çekme ve basma tarafındaki en dışardaki lifte oluşan maksimum gerilme olarak tanımlanır. Eğilme modülü ise gerilme ve birim şekil değiştirmesinin eğrisinin eğiminden hesaplanır. Bu değerler, malzemenin eğilme kuvvetlerine karşı olan mukavemetini değerlendirmek için kullanılmaktadır.

Üç nokta eğme testleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Margem Laboratuvarında bulunan Zwick/Roell Z600 marka cihazında ASTM D790 standartlarına göre yapılmıştır. Uygun boyutlarda kesilen numunelere 1 mm/dk çene ilerleme hızında ve üç tekrar şeklinde oda sıcaklığında yapılmıştır. Şekil 6.16.'de test cihazının deney esnasındaki görüntüsü verilmiştir. Mandren çapı 20 mm, ortalama L: 30,5 mm'dir. Şekil 6.14.'de ki gibi üç nokta eğme testi için numuneler hazırlanmıştır. Şekil 6.14'de eğme testi yapılan numunelerin ve Şekil 6.15.'de test cihazının görüntüleri verilmektedir.



Şekil 6.14. Üç nokte eğme testi numeleri.

$$\sigma L = \frac{3P \times L}{2b \times d^2} \quad (6.1)$$

Eğilme direncini hesaplararken Eşitlik (6.1)'deki formülüzasyon kullanılmıştır.

σL = Eğilme direnci, P = Eğme yükü (N), L = destek noktaları arasının mesafesi (mm), B = Numune genişliği (mm), D = Numune Kalınlığı (mm). Denklemden P' nin sabit karşılığı defarmasyon ölçüsü 13 mm olarak alınmıştır (Suarsana 2021).

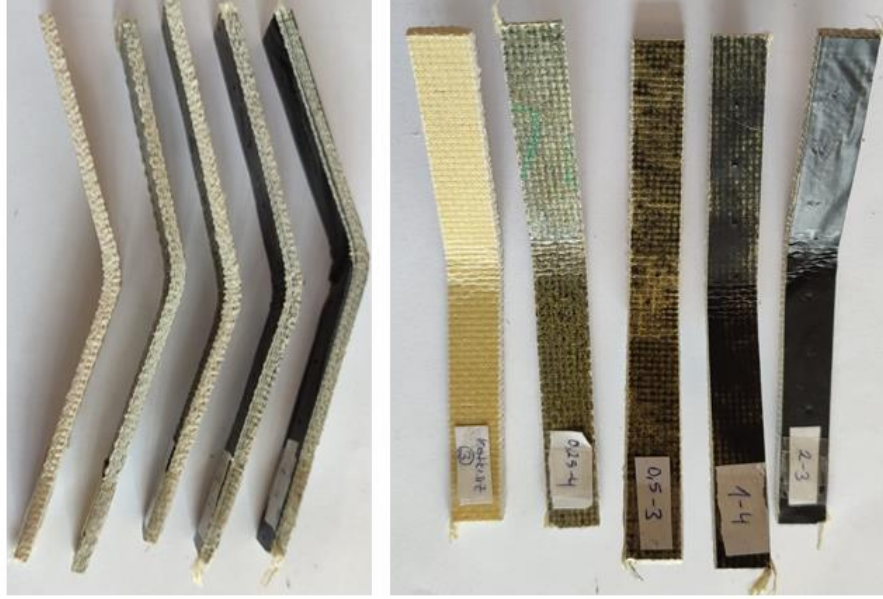
$$EL = \frac{\sigma \delta \times d}{L^2} \quad (6.2)$$

Eğilmede maksimum sehimini hesaplararken eşitlik (6.2)'deki formülüzasyon kullanılmıştır. EL = Eğim sehimini (mm/mm), δ = Numenin eğim sapma miktarı (mm), L = destek noktaları arasının mesafesi (mm), D = Numune Kalınlığı (mm). Denklemden δ 'nin sabit karşılığı P = 300 N olarak sabit alınmıştır (Suarsana 2021).

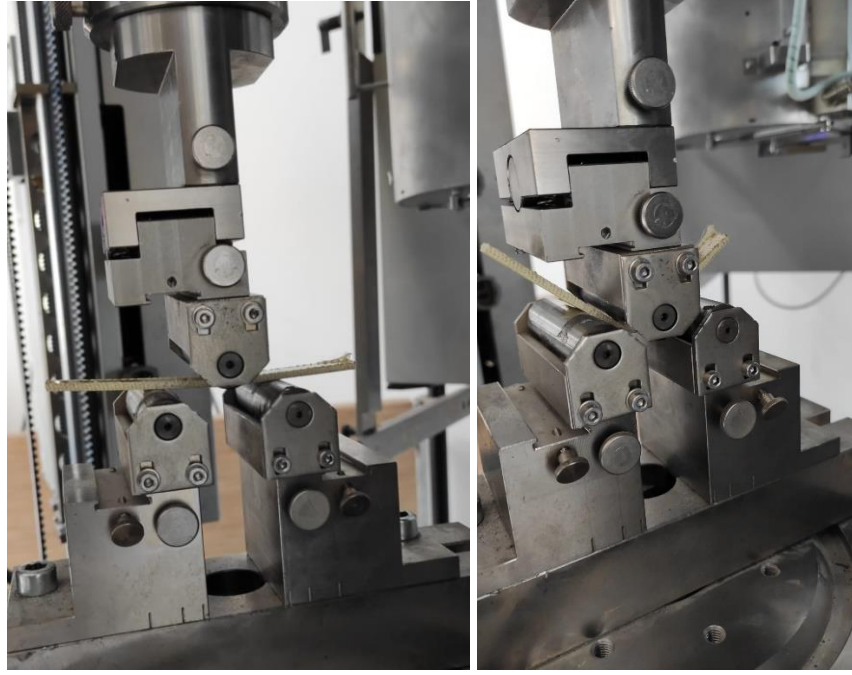
$$E_L = \frac{L^3 \times m}{4b \times d^3}$$

(6.3)

Malzemenin elastikiyet modülünü hesaplamak için eşitlik (6.3)'teki formül kullanılmıştır. E_L = Eğilme elastik modülü (GPA), L = destek noktaları arasındaki mesafesi (mm), B = numune genişliği (mm), D = numune kalınlığı (mm), m = sehim eğrisinin tanjant açısı (Suarsana 2021).



Şekil 6.15. Eğme tesinten sonra numune görüntüleri.



Şekil 6.16. Üç nokta eğme testi.

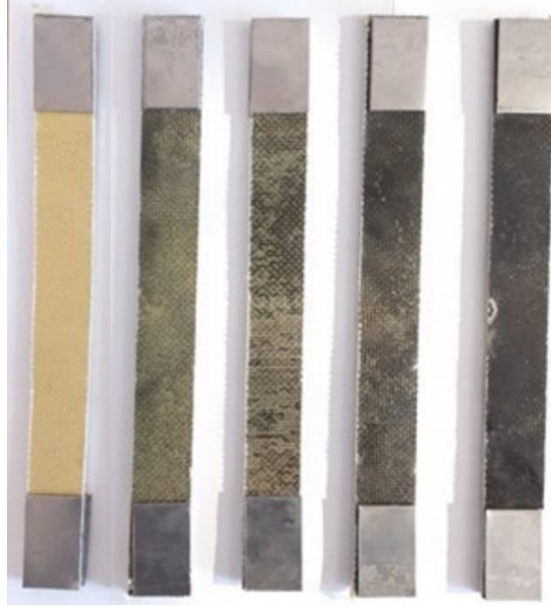
6.7. ÇEKME TESTİ

Çekme deneyi en basit prensipte test numunesinin bir ucunun alt çeneye ve diğer ucunun üst çeneye yerleştirilerek yapılan bir deneydir. Makina tarafında çeneler çekilerek bir kuvvet uygulanır, bu da test numunesinin kademli olarak uzamasına ve boyun vermesine sebep olur ve sonuç olarak numune kopar. Test sırasında, kuvvet uzama verileri kaydedilerek, test numunesine uygulanan gerilme kuvvetleri altında nasıl bir şekilde deforme olduğu gözlemlenir. Çekme deneyi sonucunda malzemenin bazı mekanik özellikleri belirlenir.

- Elastisite modül
- Poisson oranı
- Akma mukavemeti
- Maksimum çekme mukavemeti
- Süneklik ve tokluk özellikleri

Kompozit malzemeler Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü Margem Laboratuvarında bulunan Zwick/Roell Z600 marka cihazında ASTM D3039

standartlarına göre çekme testi yapılmıştır. Numuneler 250 mm x 25 mm x 2,5±0,2 mm boyutlarına göre su jeti ile kesilmiştir. Uygun boyutlarda kesilen numunelere 2 mm/dk çene ilerleme hızında ve üç tekrar şeklinde oda sıcaklığında yapılmıştır. Hazırlanan çekme numuneleri Şekil 6.17.'da verilmiştir. Şekil 6.18.' de numunelerin çekme testinden sonraki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.17. Çekme Test Numuneleri.



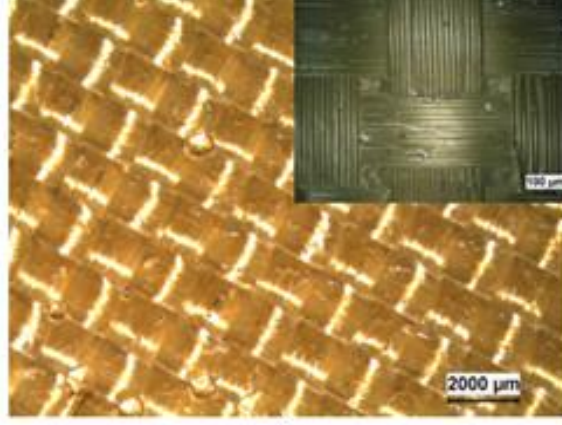
Şekil 6.18. Numunelerin çekme testinden sonra görüntüleri.

BÖLÜM 7

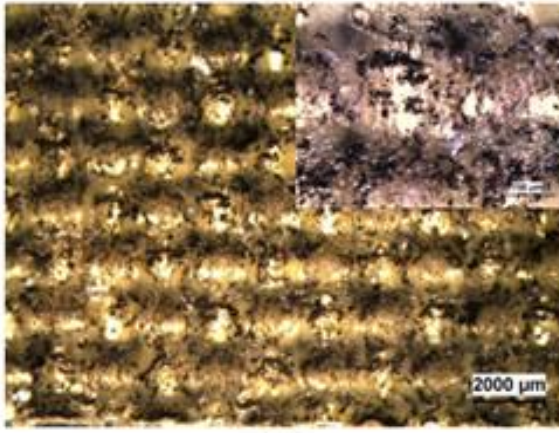
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1. ÜRETİLEN KOMPOZİTLERİN MİKRO YAPI İNCELEMELERİ

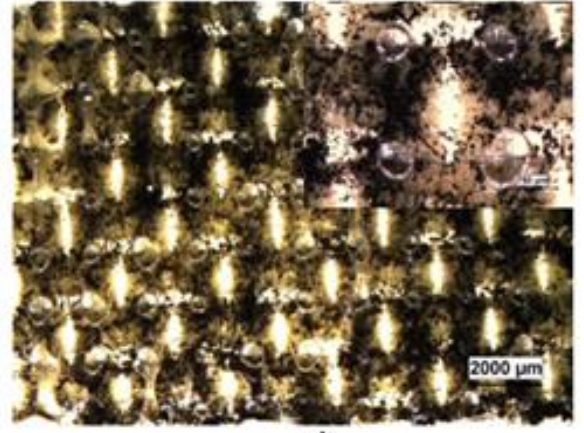
Aramid fiber dokuma kumaş epoksi içerisine %0, %0.25, %0,5, %1 ve %2 oranlarında grafen nanopartikül ilave edilerek elde edilen kompozitlerin stereo mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 7.1' de verilmektedir.



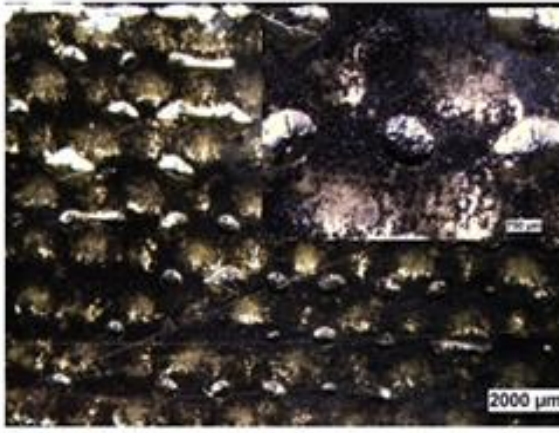
a)



b)



c)



d)



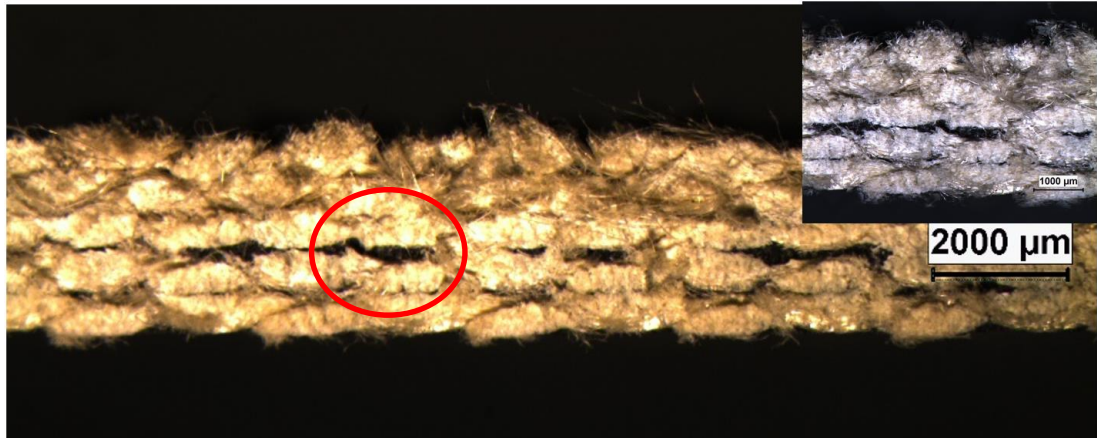
e)

Şekil 7.1. a) epoksi aramid fiber kompozit b) %0,25 katkı c) %0,5 katkı d) %1 katkı e) %2 katkı.

Yukarıda verilen mikroyapı resimleri incelendiğinde aramid kumaşın basket tipi (a= katkısız) olduğu, matrisin aramid kumaşı tamamen kapladığı görülmektedir. Epoksi aramid kompozite farklı oranlarda grafen ilave edilerek üretilen kompozitlerin mikro yapı resimleri incelendiğinde ilave edilen grafenin kompozit tabakanın belirli

bölgelerinde toplandığı ve bu bölgelerde aglomere olduğu görülmektedir. %2 grafen ilave edilen kompozitte (şekil.2e) yapının matris olan epoksinin renginin tamamen siyahlaşmasına ve tüm bölgelerde aglomere olmasına neden olmuştur. Nano kompozitlerde görülen en büyük problem ilave edilen nano partiküllerinin yüzey enerjisinin fazla olması ve aralarında vander wals bağlarının kuvvetli olmasından dolayı topaklanma eğiliminde olmasıdır. Topaklanmanın olması takviye elamanın yapı içerisinde homojen olarak dağıtılamamasına sebep olmaktadır. Bu durum nano kompozitlerin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir (Fu vd, 2019; Alsaadi vd, 2021).

Üretilen kompozitlerin katmanları arasını daha net görebilmek amacıyla hazırlanan numunelerin dikey görüntüsü Şekil 7.2.'de verilmektedir.



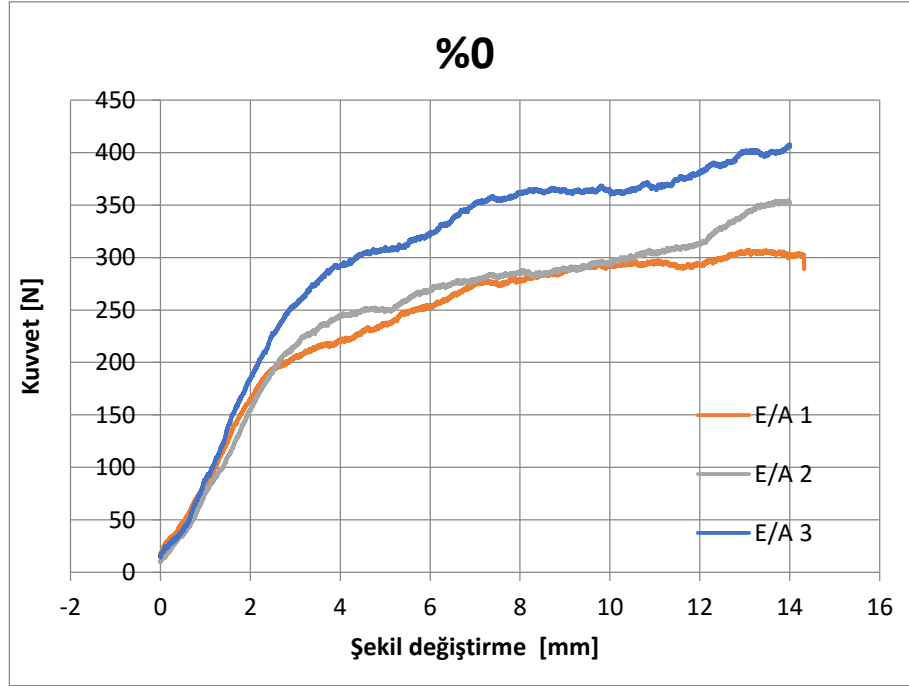
Şekil 7.2. Hibrit kompozitler levhalar arası mikroskop görüntüsü.

Şekil 7.2. incelendiğinde aramid fiber kumaşların katmanları net bir şekilde görülmektedir (5 katman). Ayrıca katmanlar arasında şekilde gösterildiği gibi belirli bölgelerde boşlukların olduğu görülmektedir.

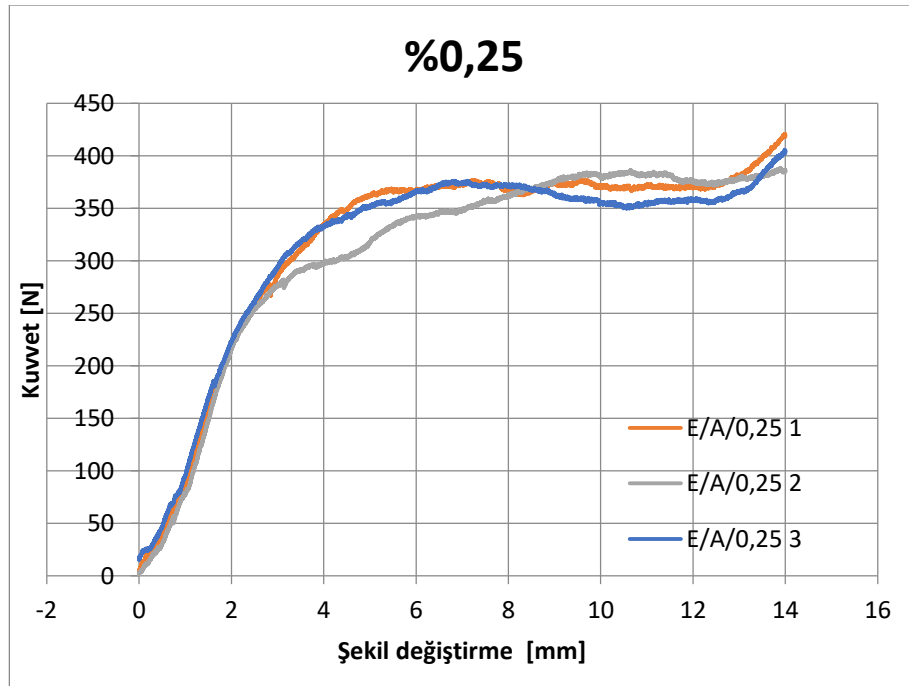
7.2. ÜÇ NOKTA EĞME TESTİ

Aramid fiber dokuma kumaş epoksi içerisine %0, 0.25, %0,5, %1 ve %2 oranlarında grafen nanopartikül ilave edilerek elde edilen kompozitlerin gerilme ve şekil değiştirme grafikleri Şekil 7.3., 7.4., 7.5., 7.6. ve 7.7.' de sırası ile verilmektedir. Bu değerler ile eşitlik 6.1, eşitlik 6.2 ve eşitlik 6.3'te verilen formüller kullanılarak

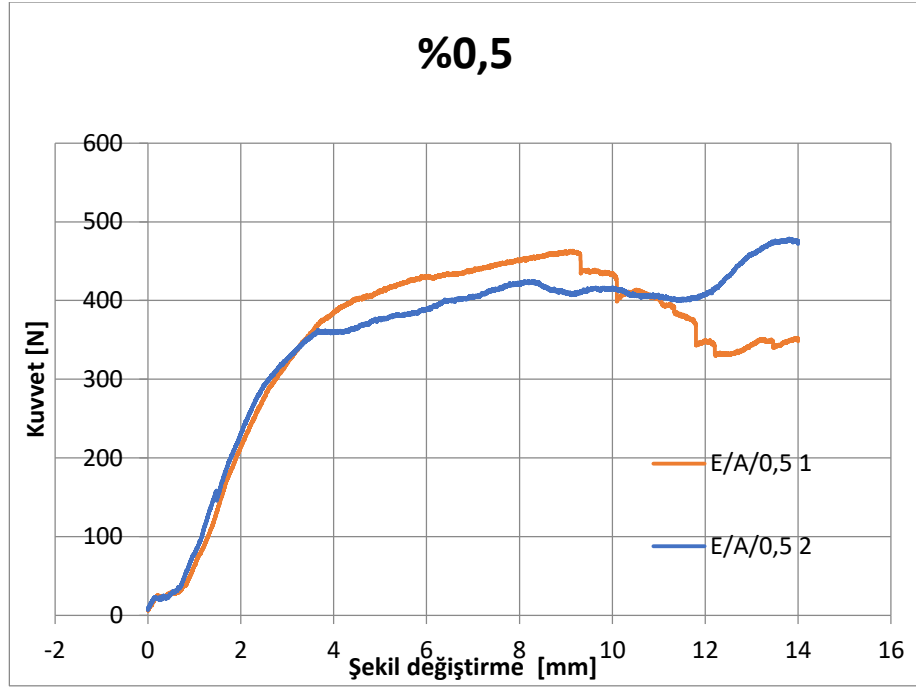
hesaplanan eğilme direnci, eğilme uzama, eğilme modülü ve değerleri Tablo 7.1’de verilmektedir. Bu değerler kullanılarak ile oluşturulan eğilme mukavemeti ve eğilme modül grafiği şekil 7.8.’de verilmektedir.



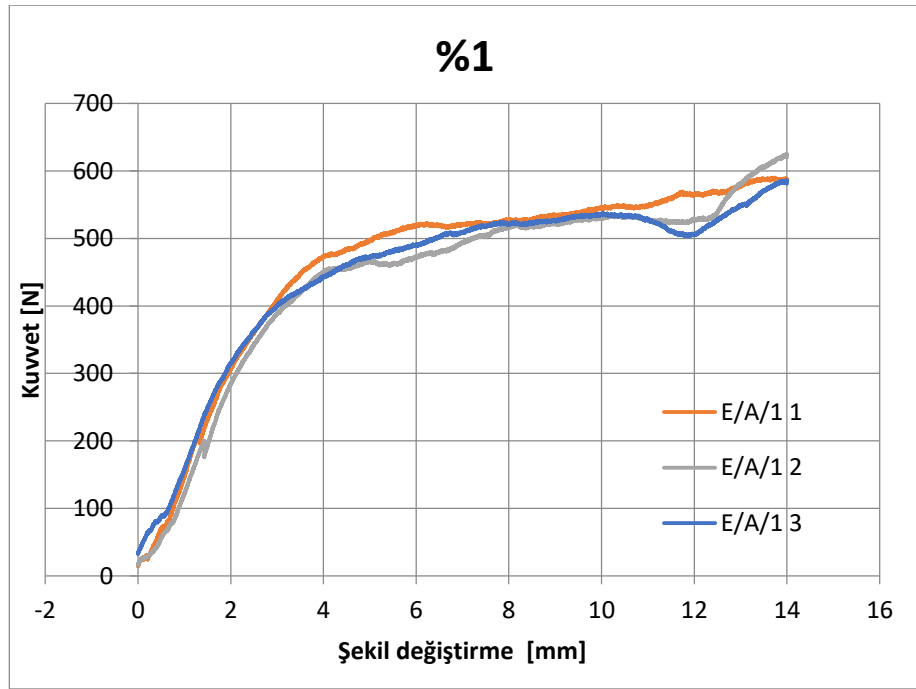
Şekil 7.3. %0 Katkılı kompozitin gerilme - şekil değişirme grafiği.



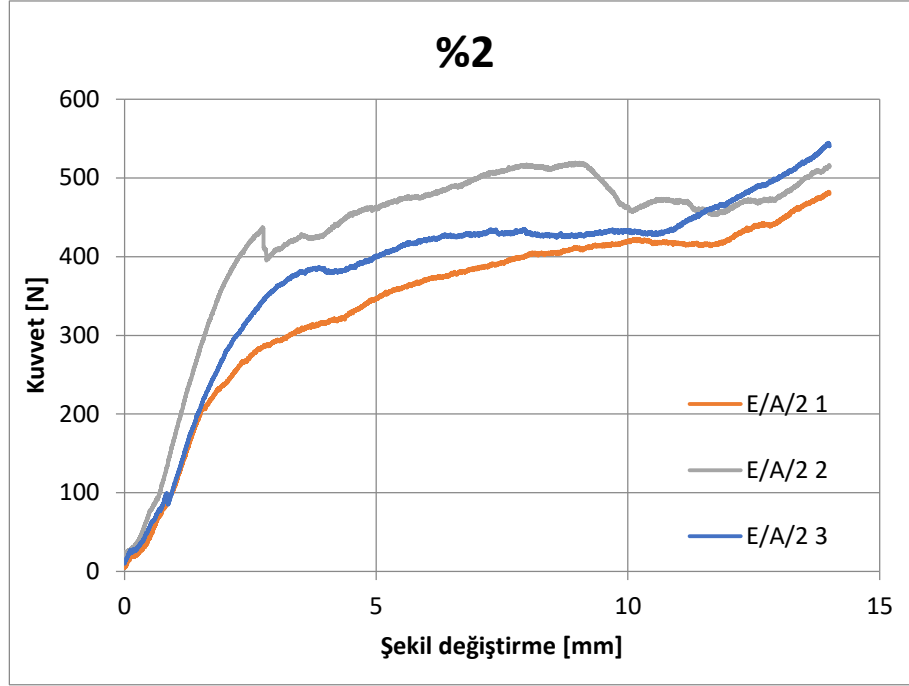
Şekil 7.4. %0,25 Katkılı kompozitin gerilme - şekil değişirme grafiği.



Şekil 7. 5. %0,5 Katkılı kompozitin gerilme - şekil değışirme grafiği.



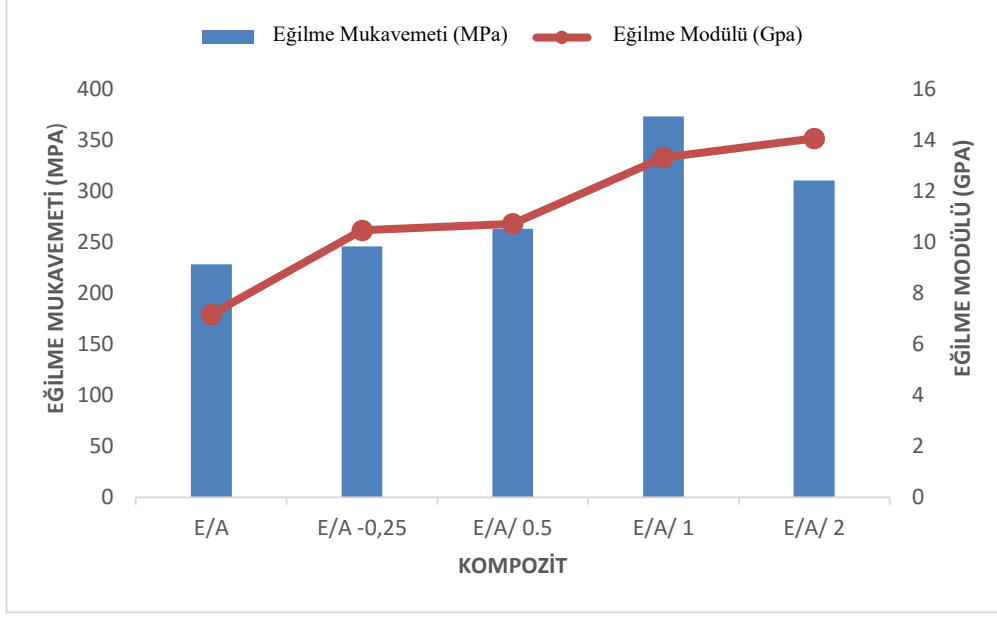
Şekil 7.6. %1 Katkılı kompozitin gerilme - şekil değışirme grafiği.



Şekil 7. 7. %2 Katkılı kompozitin gerilme - şekil değişirme grafiği.

Çizelge 7.1. Eğilme direnci, eğilme uzama, eğilme modülü değerleri.

Kompozit	Eğilme Direnci (MPa)	Eğilme Uzaması (mm/mm)	Eğilme Modülü (MPa)
Epoksi/ Aramid	228,47	0,015296	7163,16
Epoksi /Aramid/ 0.25% Grafen	246,04	0,003844	10468,30
Epoksi /Aramid/ 0.5% Grafen	263,12	0,003198	10726,06
Epoksi /Aramid/ 1% Grafen	373,35	0,002409	13317,77
Epoksi /Aramid/ 2% Grafen	310,60	0,002164	14068,11

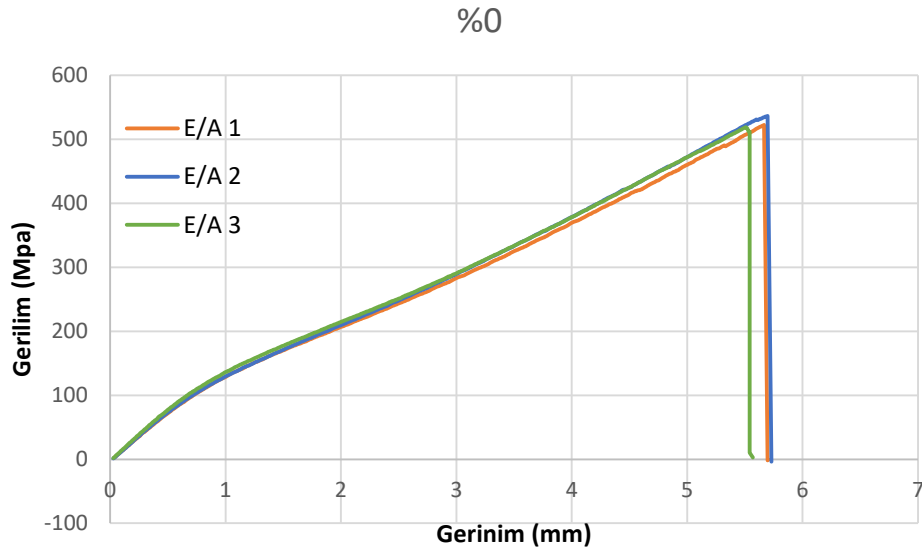


Şekil 7.8. Eğilme direnci ve eğilme modül grafiği.

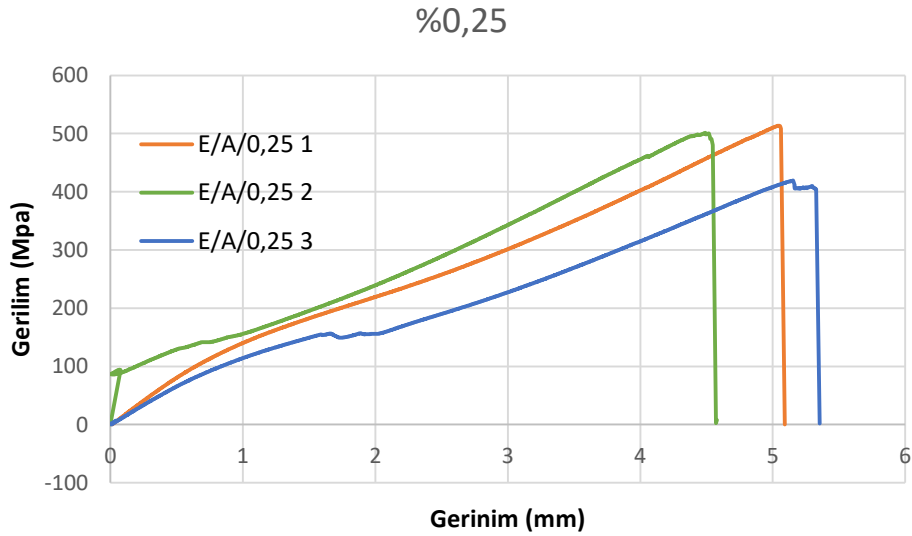
Şekil 7.8.'de maksimum eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde, katkısız aramid/epoksi kompozitin maksimum eğilme direnci 228 MPa değerine sahipken, %0,25 grafen ilave edilen kompozitte bu değer, 246 MPa, % 0.5 ilave edilen kompozitte 263 MPa, %1 ve % 2 ilave edilen kompozitlerde ise sırasıyla bu değerler 373 MPa ve 310 MPa olarak hesaplanmıştır. En yüksek eğilme direnci %1 grafen ilave edilen kompozitte elde edilmiştir. Katkısız kompozite göre bu oran yaklaşık %64 artmıştır. Yapılan hesaplamalar sonrası ilave edilen grafen ile eğilme direnci artmaktadır. Bu artışın temel nedeni ilave edilen grafenin matris olan epoksi ile takviye elemanı olan aramid arasında oluşan ara yüzey bağı arttırmasıdır. Önceki yapılan çalışmalarda da nano boyutlara sahip ilave edilen dolgu malzemelerinin matris ile fiber arasındaki arayüzey bağı arttırdığı böylelikle matrisden fibere olan yük transferini kolaylaştırarak dayanımı arttırdığını vurgulamışlardır (Wu vd, 2019; Kumar vd, 2010; Islam vd, 2015) %2 ilave edilen kompozitin ise eğilme direncinde bir düşüş yaşanmaktadır. Bu düşüşün nedeni Şekil 7.1'de verilen mikro yapı resimlerinden de anlaşılacağı üzere ilave edilen grafenin belirli bölgelerde aglomere olduğu ve mekanik özellikleri düşürmektedir.

7.3. ÇEKME TESTİ

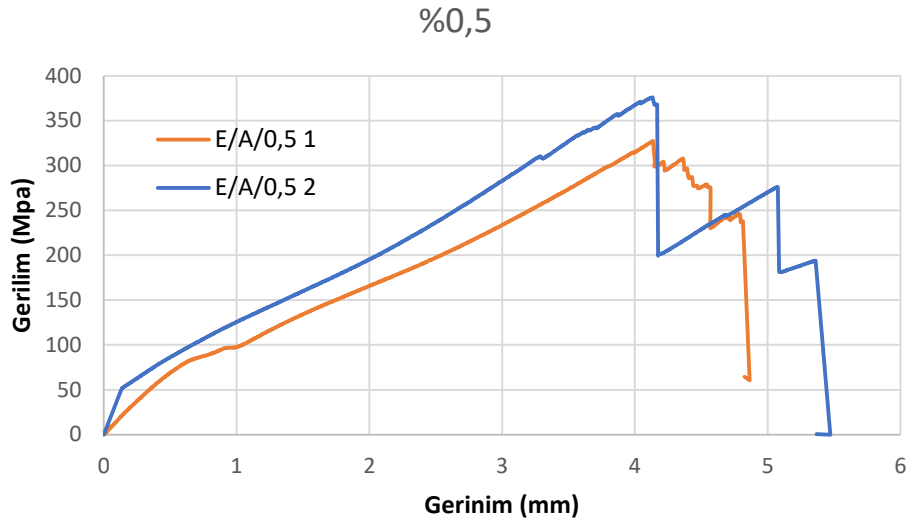
Çekme testi sonucunda maksimum çekme gerilmesi ve maksimum birim şekil değıştirme değeri test sonuçlarına göre belirlenmiş ve incelenmiştir. Şekil 7.9., Şekil 7.10., 7.11., 7.12., ve 7.13.' de sırası ile gerilim-gerinim grafikleri verilmiştir. Şekil 7.14'de maksimum çekme gerilme – elastisite modülü grafiği ve bu grafiğin değeri Çizelge 7.2.'de tablo olarak verilmiştir.



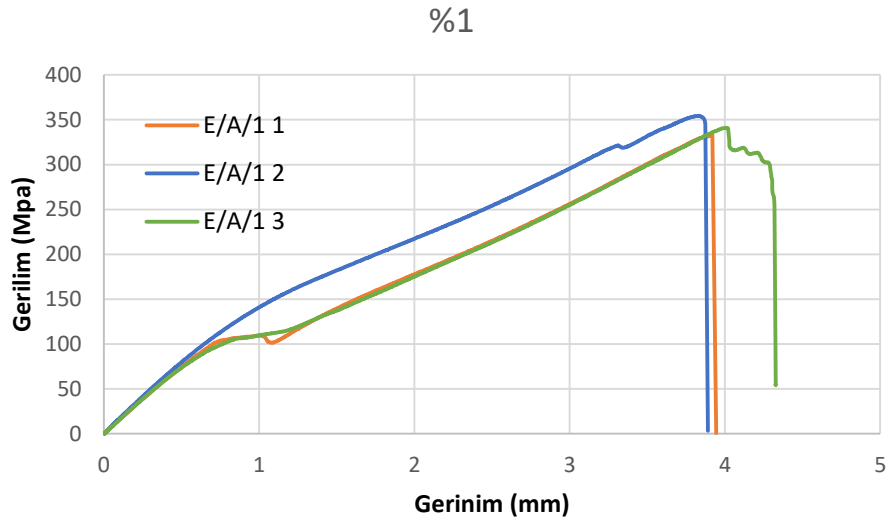
Şekil 7.9. %0 Katkılı kompozitin gerilim - gerinim grafiği.



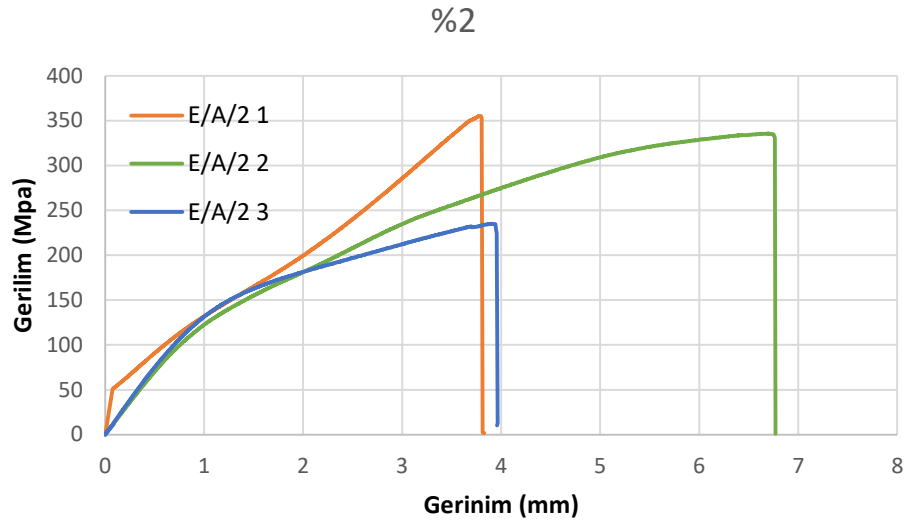
Şekil 7.10. %0,25 Katkılı kompozitin gerilim - gerinim grafiği.



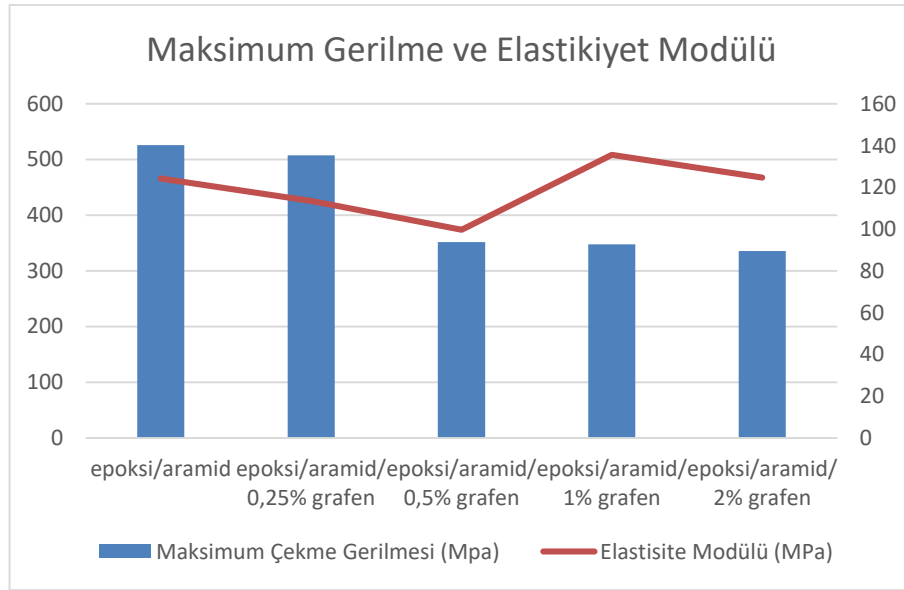
Şekil 7.11. %0,5 Katkılı kompozitin gerilim - gerinim grafiği.



Şekil 7.12. %1 Katkılı kompozitin gerilim - gerinim grafiği.



Şekil 7.13. %2 Katkılı kompozitin gerilim - gerinim grafiği.

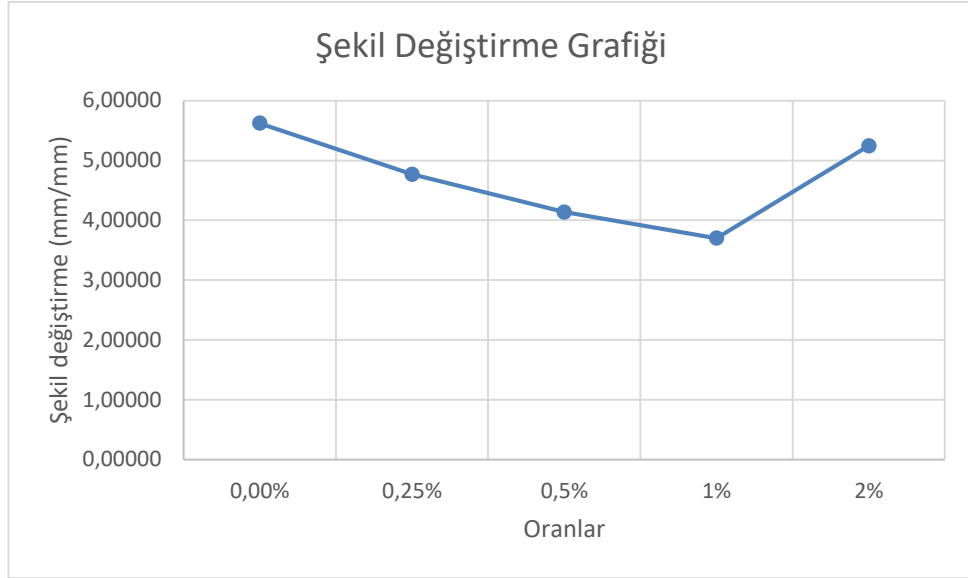


Şekil 7.14. Maksimum gerilme ve elastisite modülü grafiği grafiği.

Çizelge 7.2. Maksimum gerilme ve elastisite modülü değeleri.

Kompozitler	Maksimum Gerilme (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Epoksi/ Aramid	526,03	124,19
Epoksi /Aramid/ 0.25% Grafen	507,5	113,46
Epoksi /Aramid/ 0.5% Grafen	351,7	99,7
Epoksi /Aramid/ 1% Grafen	347,65	135,57
Epoksi /Aramid/ 2% Grafen	335,4	124,64

Şekil 7.15’de maksimum şekil değiştirme grafiği ve bu grafiğin değerleri Çizelge 7.3.’de tablo olarak verilmiştir.



Şekil 7.15. Şekil değiştirme grafiği.

Çizelge 7.3. Şekil değiştirme değerleri.

Kompozitler	Şekil değiştirme (mm/mm)
Epoksi/ Aramid	5,62367
Epoksi /Aramid/ 0.25% Grafen	4,77000
Epoksi /Aramid/ 0.5% Grafen	4,13600
Epoksi /Aramid/ 1% Grafen	3,70050
Epoksi /Aramid/ 2% Grafen	5,24650

Yapılan çekme testleri sonrasında en yüksek çekme dayanımı grafen ilave edilmeyen kompozitte elde edilirken %0,25 ilave edilen kompozitte bu değer az oranda düşmektedir. Ancak %0,5 ve üzeri grafen ilave edilen kompozitlerde çekme dayanımı belirgin bir şekilde düşmektedir. İlave edilen grafen oranının çekme dayanımını arttırması beklenmektedir. Ancak üretim esnasında ilave edilen grafenin belirli bölgelerde yoğun halde toplanması ve bu bölgelerde aglomere olmasından dolayı çekme dayanımını düşürmektedir. Eğme direncinde artış gözlemlenirken çekme

dayanımındaki bu düşüşün nedeni, eğme testinde numunenin yük uygulanan bölgesinde basma gerilmesine numunenin dış yüzeyinde çekme gerilmesine maruz kalırken, çekme testinde ise dik bir gerilmeye maruz kalmasından dolayı düşüşe neden olduğu düşünülmektedir.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Grafen ve Aramid Takviyeli Epoksi Matrisli Hibrit Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi başlıklı bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

- Aramid takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin içerisine farklı oranlarda grafen ilave ederek kompozit plakalar başarılı bir şekilde üretilmiştir.
- Yapılan mikro yapı incelemelerinde aramid/epoksi kompozit içerisine ilave edilen grafen miktarı arttıkça, grafenin belirli bölgelerde aglomere olduğu görülmüştür.
- Aramid/Epoksi kompozit içerisine farklı oranlarda ilave edilen grafenin kompozitin eğme özelliklerine etki ettiği, grafen miktarı arttıkça katkısız kompozite göre eğme dayanımını ve eğme modülünü arttığı en yüksek eğme dayanımının %1 grafen ilave edilen kompozitte olduğu görülmüştür.
- Çekme testleri sonrası en yüksek çekme dayanımının katkısız kompozitte olduğu, ilave edilen grafen miktarının artması ile yapıda aglomerasyonun olduğu bu aglomerasyon sonrasında çekme dayanımının düştüğü görülmüştür.

Daha sonra yapılacak çalışmalar için öneriler;

- Grafenin matris içerisinde daha homojen dağıtılabilmesi amacıyla farklı karıştırıcılar ve farklı devir hızlarda karışım yapılabilir.

- Grafen malzemesinde oluşan aglomerasyonu engellemek amacıyla grafen malzemesine çeşitli yüzey işlemleri uygulanabilir.
- Epoksi matris ile fiber arasındaki ara yüzey bağını geliştirmek amacıyla fiberlere çeşitli kimyasallar ile yüzey modifikasyonları yapılabilir.
- Farklı reçineler (matris) kullanılarak matris türünün mekanik özelliklere etkisi incelenebilir.

KAYNAKLAR

Abdellaoui, Hind, et al. "Mechanical behavior of carbon/natural fiber-based hybrid composites." **Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites.** Woodhead Publishing, 103-122 (2019).

Adams, J., "Thomson Reuters Global Research Report": *United Kingdom, Leeds Evidence* (2011).

Alexopoulos, Nikolaos D., et al. "Fracture related mechanical properties of low and high graphene reinforcement of epoxy nanocomposites." *Composites Science and Technology* 194-204 (2017).

Alsaadi, Mohamad, et al. "Effect of graphene nano-platelets on mechanical and impact characteristics of carbon/Kevlar reinforced epoxy hybrid nanocomposites." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 235.23 7139-7151 (2021).

Andrew, J. Jefferson, et al. "Parameters influencing the impact response of fiber-reinforced polymer matrix composite materials: A critical review." *Composite Structures* 224 111007. (2019).

Arıcasoy, O. "Kompozit sektör raporu." *İstanbul Ticaret Odası* 4: 22. (2006).

Ávila, A. F., et al. "Bending investigation on carbon fiber/epoxy composites nano-modified by graphene." *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 34 269-275. (2012).

B.L. Deopura and N.V. Padaki. "Synthetic textile fbres: polyamide, polyester and aramid fbres." *In Textiles and Fashion*, pp. 97–114. Woodhead Publishing (2015).

Bakar, Noor Haznida, et al. "Mechanical properties of kevlar reinforcement in kenaf composites." *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 465. Trans Tech Publications Ltd, (2014).

Balaji, K. V., et al. "Surface treatment of Basalt fiber for use in automotive composites." *Materials Today Chemistry* 17 100334. (2020).

Balguri, P. K., Samuel, D. H., & Thumu, U. "A review on mechanical properties of epoxy nanocomposites" *Materials Today: Proceedings*, 44, 346-355. (2021).

Batra, N. K., and Iti Dikshit. "Evaluation of mechanical properties of polytherimide reinforced carbon/glass/aramid hybrid composites." *Materials Today: Proceedings* 33: 1472-1476. (2020).

Bedeloğlu A., "Taş M. Grafen ve Grafen Üretim Yöntemleri" *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Afyonkarahisar, 16(3): 544-554. (2016).

Bulut, Mehmet. "Mechanical characterization of Basalt/epoxy composite laminates containing graphene nanopellets." *Composites Part B: Engineering* 122: 71-78. (2017).

Bulut, Yasemin, and Ümit Halis Erdoğan. "Selüloz Esaslı Doğal Liflerin Kompozit Üretiminde Takviye Materyali Olarak Kullanımı." *Tekstil ve Mühendis* 18.82 26-35. (2011).

Can, G., "Fonksiyonellendirilmiş alümina ve silika katkılı cam-kevlar elyaf/epoksi hibrit kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).

Cavalcanti, D. K. K., Banea, M. D., Neto, J. S. S., & Lima, R. A. A. "Comparative analysis of the mechanical and thermal properties of polyester and epoxy natural fibre-reinforced hybrid composites" *Journal of Composite Materials*, 55(12), 1683-1692. (2021).

Cha, J., Kim, J., Ryu, S., & Hong, S. H "Comparison to mechanical properties of epoxy nanocomposites reinforced by functionalized carbon nanotubes and graphene nanoplatelets" *Composites Part B: Engineering*, 162, 283-288. (2019).

Chung, Deborah DL. "Composite materials: science and applications". *Springer Science & Business Media*, (2010).

Çalık, M., "Zırh tasarımında kullanılan farklı geometriye sahip kompozit kabukların balistik özellikleri". Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyonkarahisar. (2004).

Çetinkal S., "El yatırma ve vakum infüzyon yöntemleri ile üretilmiş sandviç kompozitlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi, çekme ve kayma modlarında açığa çıkan enerjinin hesaplanması". Yüksek Lisans Tezi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir(2019).

Demir, O., "Karbon nanotüp takviyeli cam-karbon elyaf/epoksi hibrit nanokompozitlerin mekanik özellikleri ve düşük hızlı darbe davranışları" Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya (2017).

Dharmavarapu, Pratibha. "Aramid fibre as potential reinforcement for polymer matrix composites: a review." *Emergent Materials* 1-18. (2021).

Dindar B., “Elyaf takviyeli kompozitlerde nanopartikül katkısının yorulma, burkulma ve darbe davranışına etkisinin deneysel olarak incelenmesi”. Doktora Tezi. *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli (2019).

Durgun, İsmail. "El Yatırma Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi”, *7. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu* 15-16. (2014).

Fallahi, Hamed, Fathollah Taheri-Behrooz, and Amir Asadi. "Nonlinear mechanical response of polymer matrix composites: a review." *Polymer Reviews* 60.1 : 42-85. (2020).

Ferik E., “Karbon nanotüp katkısı ile katmanlı cam, karbon ve aramid elyaf takviyeli hibrit kompozit malzemelerin üretimi ve mekanik performanslarının geliştirilmesi”. Yüksek Lisans Tezi, *Bursa. Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa (2021).

Fu, Shaoyun, et al. "Some basic aspects of polymer nanocomposites: A critical review." *Nano Materials Science* 1.1: 2-30. (2019).

G. Yang, M. Park, S.-J. Park, “Recent progresses of fabrication and characterization of fibers-reinforced composites: a review”. *Compos Commun.* 14, 34–42 (2019).

Genç, Ç., ve Arıcı, A.A., “Yat imalatında kullanılan CTP malzeme ve imalat yöntemleri” *bölüm III: Infüzyon Yöntemi. Gemi ve Deniz Teknolojisi Dergisi*, 178, 28-31. (2008).

Gholampour, A., & Ozbakkaloglu, T. “A review of natural fiber composites: Properties, modification and processing techniques, characterization, applications”. *Journal of Materials Science*, 55(3), 829-892. (2020).

Gustin, Jeremy, et al. "Low velocity impact of combination Kevlar/carbon fiber sandwich composites." *Composite structures* 69.4: 396-406. (2005).

Hossain, Md Milon, et al. "Carbon/Kevlar reinforced hybrid composite: impact of matrix variation." *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering and Renewable Energy*, Chittagong, Bangladesh. (2015).

Islam, Md Ekramul, et al. "Characterization of carbon fiber reinforced epoxy composites modified with nanoclay and carbon nanotubes." *Procedia Engineering* 105: 821-828. (2015).

İnternet: Arami Elyaf Teknik Özellikleri
<https://www.kompozitshop.com/aramidkeklar-kumas-410-grm2-basket-sc-balistik>. (2022).

İnternet: Epoksi (Reçine ve Sertleştirici) Teknik Özellikleri
<https://www.kompozitshop.com/mgs-laminasyon-epoksi-seti-l160h160>. (2022).

İnternet: Grafen Teknik Özellikleri <https://www.nanokar.com/incele/nano-grafen-74.html>. (2022).

Jia, Z., Li, T., Chiang, F. P., & Wang, L. "An experimental investigation of the temperature effect on the mechanics of carbon fiber reinforced polymer composites". *Composites Science and Technology*, 154, 53-63. . (2018).

Jin, Fan-Long, Xiang Li, and Soo-Jin Park. "Synthesis and application of epoxy resins: A review." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 29: 1-11. (2015).

Jinasena, Isuru Indrajith Kosala. "Electrospun nano-mat strengthened aramid fibre hybrid composites: improved mechanical properties by continuous nanofibres". *Diss. University of the Witwatersrand, Faculty of Engineering and the Built Environment, School of Mechanical, Industrial & Aeronautical Engineering*, (2016).

Karadurmuş M., "Epoksi reçine ile hazırlanan kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek lisans tezi. *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Samsun (2017).

Khakzad F. "Grafen katkılı cam/epoksi nanokompozit plakaların mekanik özelliklerinin incelenmesi". Yüksek Lisans Tezi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. (2017).

Kılıçtekin S, "Farklı tabakalarda nanoalümina katkılı karbon – kevlar hibrit kompozitlerin mekanik özelliklerinin ve darbe tokluğunun araştırılması". Yüksek Lisans Tezi. *İstanbul Aydın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*. İstanbul (2020).

Kocaman, S. "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. (2019).

Kuilla, T., Bhadra, S., Yao, D., Kim, N. H., Bose, S. and Lee, J.H., "Recent advances in graphene based polymer composites", *Progress in Polymer Science*, 35(11), 1350–1375. (2010).

Kumar, A., Sharma, K., & Dixit, A. R. E"ffects of various functional groups in graphene on the tensile and flexural properties of epoxy nanocomposites: a comparative study". *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 1-11. (2022).

Kumar, Sunil, et al. "Behavior of kevlar/epoxy composite plates under ballistic impact." *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 29.13: 2048-2064. (2010).

Kurt H., "Hafifletilmiş zırh optimizasyonu ve tasarımı". Yüksek Lisans Tezi. *İstanbul Teknik Üniversitesi, Savunma Teknolojileri Anabilim Dalı*. (2019).

Kurukaya O., "Çok işlevli kompozit malzemeler kullanılarak yapısal enerji depolama bataryalarının geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. (2019).

Li, Mi, et al. "Recent advancements of plant-based natural fiber-reinforced composites and their applications." *Composites Part B: Engineering* 200: 108254. (2020).

Lin, Jiawei, et al. "Two-stage interface enhancement of aramid fiber composites: Establishment of hierarchical interphase with waterborne polyurethane sizing and oxazolidone-containing epoxy matrix." *Composites Science and Technology* 193: 108114 (2020).

Maley, Joel Andrew. "An investigation into low-cost manufacturing of carbon epoxy composites and a novel "mouldless" technique using the vacuum assisted resin transfer moulding (VARTM) method". *Diss. Carleton University*, (2008).

Manigandan, S., et al. "Experimental analysis of graphene nanocomposite on Kevlar." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 225. No. 1. IOP Publishing, (2017).

Markandan, Kalaimani, Jit Kai Chin, and Michelle TT Tan. "Recent progress in graphene based ceramic composites: a review." *Journal of Materials Research* 32.1: 84-106 (2017).

Maurya, Manish, Sudhir Kumar, and Vivek Bajpai. "Assessment of the mechanical properties of aluminium metal matrix composite: A review." *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 38.6: 267-298. (2019).

Mindivan, Ferda, Meryem Göktaş, and Ali S. Dike. "Mechanical, thermal, and micro-and nanostructural properties of polyvinyl chloride/graphene nanoplatelets nanocomposites." *Polymer Composites* 41.9: 3707-3716. (2020).

Mourad, Abdel Hamid I., et al. "Impact strengthening of laminated kevlar/epoxy composites by nanoparticle reinforcement." *Polymers* 12.12: 2814. (2020).

Namdev, Anurag, Amit Telang, and Rajesh Purohit. "Effect of graphene nano platelets on mechanical and physical properties of carbon fibre/epoxy hybrid composites." *Advances in Materials and Processing Technologies*: 1-14. (2021).

Neves, Anna Carolina C., et al. "Comparative mechanical properties between biocomposites of Epoxy and polyester matrices reinforced by hemp fiber." *Journal of materials research and technology* 9.2: 1296-1304 (2020).

Oliwa, Rafał. "The mechanical properties of Kevlar fabric/epoxy composites containing aluminosilicates modified with quaternary ammonium and phosphonium salts." *Materials* 13.17: 3726. (2020).

Özek, T., "Polimer matrisli kompozitlerin mekaniksel özelliklerinin incelenmesi". Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyonkarahisar. (2005).

Pathak, Abhishek K., et al. "Improved mechanical properties of carbon fiber/graphene oxide-epoxy hybrid composites." *Composites Science and Technology* 135: 28-38. (2016).

Pihtili, Hasim. "An experimental investigation of wear of glass fibre-epoxy resin and glass fibre-polyester resin composite materials." *European polymer journal* 45.1: 149-154. (2009).

Prashanth, Sachhidan, et al. "Fiber reinforced composites-a review." *J. Mater. Sci. Eng* 6.03: 2-6. (2017).

Priyanka, P., A. Dixit, and H. S. Mali. "High-Strength Hybrid Textile Composites with Carbon, Kevlar, and E-Glass Fibers for Impact-Resistant Structures. A Review." *Mechanics of Composite Materials* 53.5: 685-704. (2017).

Randviir, Edward P., Dale AC Brownson, and Craig E. Banks. "A decade of graphene research: production, applications and outlook." *Materials Today* 17.9: 426-432. (2014).

Safri, Syafiqah Nur Azrie, et al. "Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review." *Composites Part B: Engineering* 133: 112-121. (2018).

Sathishkumar, T. P., S. Satheeshkumar, and Jesuarockiam Naveen. "Glass fiber-reinforced polymer composites-a review." *Journal of reinforced plastics and composites* 33.13: 1258-1275. (2014).

Shaari, Norazean, Aidah Jumahat, and M. Khafiz M. Razif. "Impact resistance properties of Kevlar/glass fiber hybrid composite laminates." *Jurnal Teknologi* 76.3 (2015).

Shokrieh, M. M., et al. "Flexural fatigue behavior of synthesized graphene/carbon-nanofiber/epoxy hybrid nanocomposites." *Materials & Design* (1980-2015) 62: 401-408. (2014).

Singh, Virendra, et al. "Graphene based materials: past, present and future." *Progress in materials science* 56.8: 1178-1271. (2011).

Sinmazçelik, Tamer, et al. "A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods." *Materials & Design* 32.7: 3671-3685. (2011).

Sun, Zhi, Xiaozhi Hu, and Haoran Chen. "Effects of aramid-fibre toughening on interfacial fracture toughness of epoxy adhesive joint between carbon-fibre face

sheet and aluminium substrate." *International Journal of Adhesion and Adhesives* 48: 288-294. (2014).

Suryanarayana, C., and Nasser Al-Aqeeli. "Mechanically alloyed nanocomposites." *Progress in Materials Science* 58.4: 383-502. (2013).

Şenel, Mahmut Can, Mevlüt Gürbüz, and K. O. Ç. Erdem. "Grafen takviyeli alüminyum matrisli yeni nesil kompozitler." *Mühendis ve Makine*, Samsun 56.669: 36-47. (2015).

Taraghi, Iman, Abdolhossein Fereidoon, and Ali Mohyeddin. "The effect of MWCNTs on the mechanical properties of woven Kevlar/epoxy composites." *Steel Compos. Struct* 17.6: 825-834. (2014).

Tareq, Md Sarower, et al. "Investigation of the flexural and thermomechanical properties of nanoclay/graphene reinforced carbon fiber epoxy composites." *Journal of Materials Research* 34.21: 3678-3687. (2019).

Tuncer C., "CaCO₃, SiO₂ ve grafen nano partikül katkısının tabakalı cam elyaf kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi". Yüksek Lisans Tezi. *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. (2018).

Valença, Silvio Leonardo, et al. "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. (2015).

Veerakumar, Vigneshwaran Gnanakkan Samuel, Balasivanandha Prabu Shanmugavel, and Sivasankaran Harish. "On the influence of the functionalization of graphene nanoplatelets and glass fiber on the mechanical properties of GFRP composites." *Applied Composite Materials* 28.4: 1127-1152. (2021).

Wang, F., Wu, Y., & Huang, Y. "Novel application of graphene oxide to improve hydrophilicity and mechanical strength of aramid nanofiber hybrid membrane". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 110, 126-132. (2018).

Westman, Matthew P, Fifield, Leonard S, Simmons, Kevin L, Laddha, Sachin, and Kafentzis, Tyler A. Natural Fiber Composites: A Review. *United States: N. p., doi:10.2172/989448* (01.06.2022) (2010).

Wetzel, Bernd, Frank Hauptert, and Ming Qiu Zhang. "Epoxy nanocomposites with high mechanical and tribological performance." *Composites science and technology* 63.14: 2055-2067. (2003).

Wu, L. F., J. G. Zhu, and H. M. Xie. "Investigation of residual stress in 2D plane weave aramid fibre composite plates using Moiré interferometry and hole-drilling technique." *Strain* 51.6: 429-443. (2015).

Wu, Yinqiu, et al. "Enhanced flexural properties of aramid fiber/epoxy composites by graphene oxide." *Nanotechnology Reviews* 8.1: 484-492. (2019).

Xia, Dong, and Li Jing Wang. "Sulfuric acid treatment of aramid fiber for improving the cationic dyeing performance." *Advanced Materials Research*. Vol. 627. Trans Tech Publications Ltd, (2013).

Yahaya, R., et al. "Effect of layering sequence and chemical treatment on the mechanical properties of woven kenaf–aramid hybrid laminated composites." *Materials & Design* 67: 173-179. (2015).

Yahaya, R., et al. "Mechanical performance of woven kenaf-Kevlar hybrid composites." *Journal of Reinforced Plastics and composites* 33.24: 2242-2254. (2014).

Yang, Guijun, Mira Park, and Soo-Jin Park. "Recent progresses of fabrication and characterization of fibers-reinforced composites: A review." *Composites Communications* 14: 34-42. (2019).

Yılmaz, H. , Altın, Y. , Bedeloğlu, A. "Grafen Takviyeli Epoksi Nanokompozitlerin Özelliklerinin İncelenmesi". *Politeknik Dergisi* 24: 1719-1727. (2021).

Yi, Xiao-Su, Shanyi Du, and Litong Zhang. "Composite Materials Engineering", *Fundamentals of Composite Materials* Volume 2. Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, (2018).

Yin, Lianpeng, et al. "Reinforcing effect of aramid fibers on fatigue behavior of SBR/aramid fiber composites." *Polymer Testing* 80: 106092. (2019).

Zhandarov, S., et al. "Investigation of load transfer between the fiber and the matrix in pull-out tests with fibers having different diameters." *Journal of adhesion science and technology* 15.2: 205-222. (2001).

Zhang, Bo, et al. "Surface and interface modification of aramid fiber and its reinforcement for polymer composites: A review." *European Polymer Journal* 147: 110352. (2021).

Zhang, Weiwei, et al. "High-transparency polysilsesquioxane/glycidyl-azide-polymer resin and its fiberglass-reinforced composites with excellent fire resistance, mechanical properties, and water resistance." *Composites Part B: Engineering* 219: 108913. (2021).

Zhang, Wenqing, et al. "Improving interfacial and mechanical properties of carbon nanotube-sized carbon fiber/epoxy composites." *Carbon* 145: 629-639. (2019).

ÖZGEÇMİŞ

Ömer ŞEN, ilk ve orta öğretimini İstanbul'da tamamladı. İnönü Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi Makina Ressamlığı bölümünden mezun oldu. 2014 yılında Kastamonu Üniversitesi Endüstri Ürünleri Tasarımı Ön lisans bölümünden 2016 yılında iyi derece ile mezun oldu. Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2019 yılında iyi derece ile mezun oldu. 2019 yılında Karabük Üniversitesi Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu yüksek lisans programına devam etmektedir.