



**YAPISAL ONARIMDA KULLANILAN
MATRİSLERDE KARBON MATERYAL
KULLANIMININ İNCELENMESİ
Yüksek Lisans Tezi**

Togay YILDIRIM

Eskişehir 2025

**YAPISAL ONARIMDA KULLANILAN MATRİSLERDE KARBON
MATERYAL KULLANIMININ İNCELENMESİ**

Togay YILDIRIM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Tuğba ARAS

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Temmuz 2025

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Togay YILDIRIM'ın “YAPISAL ONARIMDA KULLANILAN MATRİSLERDE KARBON MATERYAL KULLANIMININ İNCELENMESİ” başlıklı çalışması 31/07/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye (Tez Danışmanı) : Doç. Dr. Tuğba ARAS

Üye : Doç. Dr. Sinem BAŞKUT

Üye : Doç. Dr. Hakan Can SÖYLEYİCİ

Prof. Dr. Harun BÖCÜK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

31/07/2025

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Yüksek Lisans ğrencisi Togay YILDIRIM, “YAPISAL ONARIMDA KULLANILAN MATRİSLERDE KARBON MATERYAL KULLANIMININ İNCELENMESİ” başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı
Doç. Dr. Tuğba ARAS

ÖZET

YAPISAL ONARIMDA KULLANILAN MATRİSLERDE KARBON MATERYAL KULLANIMININ İNCELENMESİ

Togay YILDIRIM

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı
Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Temmuz 2025

Danışman: Doç. Dr. Tuğba ARAS

Bu tez çalışmasında, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozit yapılarda uygulanan ıslak serim tamir yönteminde, matrise grafen oksit (GO) katkısının mekanik performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, el yatırması yöntemiyle yapılan tamirlerde GO katkısı sayesinde mukavemet özelliklerini geliştirerek, bu yöntemin prepreg temelli tamirlerle karşılaştırılabilir düzeye getirilmesidir.

Bu bağlamda, %0,3, %0,5 ve %2,5 oranlarında sentezlenmiş GO, el yatırması reçinesine ilave edilerek tamir işlemleri gerçekleştirilmiş; katkısız el yatırması ve prepreg onarımlarıyla karşılaştırmalı gerilme mukavemeti testleri yapılmıştır. Elde edilen bulgulara göre, katkısız el yatırması tamiri 282 MPa, prepreg tamiri ise 391 MPa gerilme mukavemeti göstermiştir. %0,3 GO katkısında %26 oranında daha düşük performans sergileyerek prepreg tamir performansına anlamlı düzeyde yaklaşmıştır. Ancak %2,5 oranındaki GO katkısında, yapıda aglomerasyon oluşmuş ve mukavemet %56 oranında azalmıştır. En çarpıcı bulgu, %0,5 oranında GO katkısı içeren numunenin, prepreg tamirine kıyasla yalnızca %0,8 daha düşük mukavemet göstermesi olmuştur.

Bu sonuç, el yatırması yöntemiyle yapılan tamirlerin, doğru oranda GO katkısı ile prepreg düzeyine çıkarılabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, GO katkısının belirli oranlarda kullanılması el yatırması yöntemiyle yapılan tamirlerin etkinliğini önemli ölçüde artırabilmektedir. Ancak sahada uygulanabilirlik açısından, GO'nun reçineye önceden, kontrollü şekilde katılması gerektiği belirlenmiştir. Bu çalışma, havacılık ve uzay uygulamalarında CFRP yapıların daha güvenilir ve maliyet etkin şekilde onarılmasına katkı sağlayabilecek yeni bir yaklaşım sunmaktadır.

Anahtar Sözcükler: Grafen oksit, CFRP, Islak serim yöntemi, Kompozit tamir uygulamaları, Yapısal onarım



ABSTRACT

ANALYZING THE USE OF CARBON MATERIALS IN MATRICES USED IN STRUCTURAL REPAIR

Togay YILDIRIM

Department of Materials Science and Engineering

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, July 2025

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Tuğba ARAS

In this thesis, the influence of graphene oxide (GO) incorporation into the matrix on the mechanical performance of wet lay-up repair techniques applied to carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite structures was investigated. The study aims to enhance the strength of wet lay-up repairs with GO reinforcement, making performance comparable to prepreg repairs.

For this purpose, synthesized GO was added to the hand lay-up resin at concentrations of 0.3%, 0.5%, and 2.5%, and repair processes were carried out accordingly. The tensile strength of the GO-modified samples was then compared with those of unmodified hand lay-up and prepreg-repaired specimens. The results showed that the unmodified hand lay-up repair exhibited an average tensile strength of 282 MPa, while the prepreg repair reached 391 MPa. The sample containing 0.3% GO demonstrated a 26% lower performance compared to prepreg repair, showing clear improvement. However, the inclusion of 2.5% GO led to significant agglomeration within the matrix, resulting in a 56% reduction in strength. The most remarkable finding was observed in the sample containing 0.5% GO, which exhibited only a 0.8% reduction in tensile strength compared to the prepreg repair, effectively approaching its performance level.

These findings suggest that optimized GO reinforcement can enhance the mechanical efficiency of hand lay-up repairs. For field use, GO must be pre-mixed into the resin, since on-site dispersion may compromise integrity. This study offers a promising approach for improving the reliability and cost-effectiveness of CFRP structural repairs in aerospace and aviation applications.

Keywords: Graphene oxide, CFRP, Wet lay-up method, Composite repair applications, Structural repair



TEŞEKKÜR

Tez çalışmaları boyunca bana yardımlarını esirgemeyen, süreçte hep destek olan ve bana yol gösteren tez danışmanım Doç. Dr. Tuğba ARAS'a, çalışmalarım sırasında tamir süreçlerinde değerli yardımlarını esirgemeyen Sedat ACER'e ve İsmail SÜNNETCİ'ye, test süreçlerinde destek olan Ramis Koray KILINÇ'a ve Adem ATUK'a ayrı ayrı teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın gerçekleştirilmesine imkan sağlayan Eskişehir Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği bölümüne ve Türk Havacılık Uzay Sanayi A.Ş.'ye saygılarımı arz ederim.

Hayatımın her döneminde beni destekleyen sevgili eşim Hatice Seçil Yıldırım'a, anneme, babama, kardeşime ve oğluma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Togay YILDIRIM

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programıyla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Togay YILDIRIM

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	VI
TEŞEKKÜR	VIII
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	IX
İÇİNDEKİLER	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
ŞEKİLLER DİZİNİ	XIII
GÖRSELLER DİZİNİ	XV
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XVI
1. GİRİŞ	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	4
2.1. Matris Fazına Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	4
2.1.1. Seramik matrisli kompozitler	4
2.1.2. Metal matrisli kompozitler	5
2.1.3. Polimer matrisli kompozitler.....	5
2.2. Takviye Fazına Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	6
2.2.1. Parçacık takviyeli kompozitler.....	7
2.2.2. Fiber takviyeli kompozitler	7
2.2.3. Yapısal takviyeli kompozitler	9
2.3. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	10
2.3.1. El yatırması yöntemi	10
2.3.2. Püskürtme yöntemi	11
2.3.3. Reçine transfer yöntemi	11
2.3.4. Vakum infüzyon yöntemi.....	12

2.3.5. Prepreg el ile serim yöntemi	14
2.3.6. Pultrüzyon yöntemi	16
2.3.7. Filaman sarma yöntemi	17
2.3.8. Otomatik fiber serim yöntemi	17
3. POLİMER MATRİS KOMPOZİT MALZEMELERİN TAMİR	
YÖNTEMLERİ	19
3.1. Kompozit Malzemelerde Hata türleri	19
3.2. Kompozit Malzemelerde Havacılık Sektöründe Kullanılan Tamir	
Yöntemleri.....	20
4. GRAFEN OKSİT	23
4.1. Grafen Oksit Kullanım Alanları.....	23
4.2. Grafen Oksit Sentez Yöntemleri.....	24
5. ALAN YAZIN ÇALIŞMALARI VE ARAŞTIRMANIN AMACI.....	25
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	29
6.1. Kullanılan Ekipman ve Cihazlar	29
6.2. GO Sentezi	30
6.3. Kompozit Plaka Tamirlerinin Deneysel Uygulamaları	31
6.4. Polimer Matris Kompozit Plakaların Üretimi	32
6.4.1. Plakalardan kat kaldırma işlemi.....	34
6.4.2. Tamir İşlemleri	34
6.4.3. Prepreg tamiri.....	34
6.4.3.1. El yatırması tamiri	35
6.4.3.2. GO katkılı el yatırması tamiri.....	36
6.5. Gerilme Mukavemeti Testi.....	37
7. TARTIŞMA.....	39
7.1. Karakterizasyon	39
7.2. Prepreg ve Islak Serim Tamir Yöntemi ile Onarılan CFRP Numunelerin	
Kalınlık ve Gerilme Performanslarının Değerlendirilmesi	43
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	47
KAYNAKÇA.....	48

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 6.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler.....	29
Tablo 6.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan cihaz ve ekipmanlar	30
Tablo 6.3. Tamir uygulamaları deney tasarım tablosu.....	32



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Takviye tiplerine göre seramik matrisli kompozitler(Chawla, 1993)	4
Şekil 2.2. a) Termoplastik, b) Termoset zincir yapısı(Naskar, 2017)	5
Şekil 2.3. Kompozit malzemelerin takviye türlerine göre sınıflandırılması(Ameta vd., 2013)	6
Şekil 2.4. Simetrik ve simetrik olmayan lamina görseli(J. Zhang vd., 2011)	9
Şekil 2.5. Dengeli ve dengeli olmayan lamina görseli (Yan vd., 2017)	9
Şekil 2.6. Sandviç yapılı kompozit (William D. Callister and David G. Rethwish, 2018)	10
Şekil 2.7. El yatırması yöntemi ile polimer matrisli kompozit üretimi(Durgun, 2014) .	11
Şekil 2.8. Püskürtme yöntemi ile polimer matris kompozit üretimi (Campbell, 2004) .	11
Şekil 2.9. Reçine transfer yöntemi ile polimer kompozit üretimi a) kalıp üstüne serim işlemi b) sıkıştırma ve vakumlama işlemi c) Reçine enjeksiyon ve kurlenme işlemi d) kalıptan çıkarma işlemi(Govignon vd., 2022)	12
Şekil 2.10. Vakum infüzyon metodu için gerekli serim planı(EXPO-NET Resin Flow Mesh Products, 2021)	13
Şekil 2.11. Reçine infüzyon yöntemi ile reçine emdirme işlemi (SP Systems Guide to Composites, 2015)	14
Şekil 2.12. Prepreg üretimi şematik gösterimi(Introduction and characteristics of carbon fiber prepreg, 2023)	15
Şekil 2.13. Prepreg kullanılan kompozitlerin serim planı(Wu and Young, 2022)	15
Şekil 2.14. a) Otoklav dıştan görünüm b) Otoklav içten görünüm c) otoklav çalışma prensini şematik gösterim(Econoclave® - Standard Models, 2025) d) Örnek bir kurlenme profili (Kubit vd., 2020)	16
Şekil 2.15. Pultruzyon üretim yönteminin şematik gösterimi(Riedel, 2012)	17
Şekil 2.16. Filaman sarma yöntemi şematik gösterimi(Ma vd., 2019).....	17
Şekil 3.1. Civatalı tamir uygulama örnekleri (Things to Consider When Conducting Composites Repair, 2020).....	21

Şekil 3.2. Kademeli tamir uygulaması (ASTM D8131/D8131M-23 Standard Practice for Tensile Properties of Tapered and Stepped Joints of Polymer Matrix Composite Laminates, 2023)	22
Şekil 3.3. Scarf tamir uygulaması (ASTM D8131/D8131M-23 Standard Practice for Tensile Properties of Tapered and Stepped Joints of Polymer Matrix Composite Laminates, 2023)	22
Şekil 6.1. Otoklav kürleme reçetesi	34
Şekil 6.2. GO'in reçineye eklenme prosedürü	37
Şekil 6.3. Test kuponu boyutsal ölçüleri	37
Şekil 7.1. Grafit ve GO FT-IR Spektrumları	40
Şekil 7.2. a) Grafit ve b) GO'e ait EDX grafikleri	42
Şekil 7.3. Grafit ve GO'e ait XRD grafiği	43
Şekil 7.4. Prepreg (PP) tamir yöntemi için a) Kompozit yapının kalınlığı ve b) Ölçülen gerilme mukavemeti değerleri	44
Şekil 7.5. Islak Serim (EY) tamir yöntemi için a) Kompozit yapının kalınlığı ve b) Ölçülen gerilme mukavemeti değerleri	44
Şekil 7.6. Islak Serim (EY) tamir yöntemi için %0,3 GO katkılı a) Kompozit yapının kalınlığı ve b) Ölçülen gerilme mukavemeti değerleri	45
Şekil 7.7. Islak Serim (EY) tamir yöntemi için %0,5 GO katkılı a) Kompozit yapının kalınlığı ve b) Ölçülen gerilme mukavemeti değerleri	45

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 2.1. Otomatik fiber serim metoduna ait bir görsel(Automated Fiber Placement - Cailabs, 2025)	18
Görsel 3.1. a) Fiber/matris ayrılma hatası b) Matris çatlağı c) Delaminasyon d) Fiber kırılması hataları görselleridir (Loukil, 2013)	19
Görsel 3.2. Çatlak başlatıcı olan bazı boşlukların mikroskop görüntüleri (Maragoni vd., 2017)	20
Görsel 6.1. GO sentezi ait bazı reaksiyon basamakları.....	31
Görsel 6.2. Prepreg serim uygulaması	32
Görsel 6.3. Vakum paketine alınmış otoklav a girmeye hazır plaka deney plakaları görseli.....	33
Görsel 6.4. Plaka üzerinden kademeli kat kaldırma işlemi.....	34
Görsel 6.5. Tamir uygulanacak katların şablonun çizilmesi.....	35
Görsel 6.6. Kuru kumaşın reçine ile ıslatılması ve spatula yardımıyla emdirilmesi.....	35
Görsel 6.7. Reçine emdirilmiş kumaşların şablona uygun şekilde kesilmesi	36
Görsel 6.8. Islatılmış olan kumaşların serim planına göre uygun şekilde yerleştirilmesi	36
Görsel 6.9. Test kuponu kesimi öncesi ve sonrası plaka görselleri	38
Görsel 6.10. Test cihazına bağlanmış test kuponu görseli	38
Görsel 7.1. 10.000X büyütme oranına ait Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri a) Grafit ve b) GO	41

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

\$	: Amerikan doları
M\$/kg	: Kilogram ağırlığı 1 Milyon Amerikan doları
k\$/kg	: Kilogram ağırlığı bin Amerikan doları
C	: Karbon Elementi
Si	: Silisyum Elementi
GO	: Grafen Oksit
FAA	: Amerikan Federal Havacılık İdaresi
Prepreg	: Reçinesi önceden emdirilmiş polimer matrisli fiber takviyeli malzeme
PEKK	: Polieterketonketon
PA	: Poliamid
PMA	: Polimetil akrilat
FRP	: Fiber takviyeli polimer kompozit
CFRP	: Karbon fiber takviyeli
BMI	: Bismaleimide
WC	: Tungsten karbür
TiC	: Titanyum karbür
ThO ₂	: Toryum dioksit
Ud	: Tek Yönlü
Biax	: Birbirlerinden 90 ° zıt iki açı
Triax	: Birbirine 90 ° zıt iki açı ve birine 45 °
RTM	: Reçine transfer kalıplama metodu
De-gas	: Reçine içinde bulunan gazların vakum yardımıyla çıkarılması
PE	: Polietilen
KMnO ₄	: Potasyum permanganat
H ₂ SO ₄	: Sülfirik asit
H ₃ PO ₄	: Fosforik asit
NIST	: Amerikan Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü
H ₂ O ₂	: Hidrojen peroksit
mL	: Mililitre

FT-IR	:	Fourier dönüşümlü kızılötesi
SEM	:	Taramalı Elektron Mikroskobu
EDX	:	Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
XRD	:	X-Işını Kırınımı
PP	:	Prepreg numuneleri
EY	:	El yatırması numuneleri
IPA	:	İzopropil Alkol



1. GİRİŞ

İnsanlık tarihi malzemelerin gelişimine göre sınıflandırılmıştır. Taş devrinden başlayarak sıralayacak olursak taş devri, bakır devri, tunç devri ve demir devri olarak ilerler.

Yaşadığımız 21. yy.'a bir malzemeyle isim vermek isteyecek olursak kompozit malzemeler ve yarı iletken malzemeler öne çıkacaktır. Kompozit malzemeler bu yüzyıl içerisinde sunmuş olduğu çeşitli avantajlar sayesinde çok farklı sektörlerde kullanılmaya başlanmıştır. Bunlar sırasıyla havacılık, gemi inşaat sanayi, sportif ürünler, savunma sanayi, uzay sanayi, inşaat sanayi vb. sektörlerdir.

Kompozit malzemeler bir veya daha fazla malzemenin istenilen özelliklerini koruyarak bir araya getirilmesi ilkesi ile oluşturulduğundan, ortaya çıkan yeni malzeme sektörde bulunan sorunları giderici veya performans artırıcı bir sonucun ortaya çıkmasını sağlamıştır. Bu durumda sektörlerde yeni ürünlerin oluşmasını tetikleyerek hızla ilerleme kaydetmelerini sağlamıştır.

Örneğin; 1969 yılında tanıtılan Boeing 747 yolcu uçağında 1 milyonun üzerinde bağlayıcı kullanılırken, 2009 yılında tanıtılan Boeing 787 Dreamliner yolcu uçağında ise birkaç 100 bin bağlayıcı kullanılmıştır(*Aerospace Fastening in the 21st Century*, 2012). Kullanılan polimer matrisli kompozit malzemeler sayesinde bağlayıcı miktarı azaltılmıştır. Uçağın yapımında hem bağlayıcı miktarının azalması kaynaklı hem de yapısal malzeme olarak ağırlıkça %50 oranında polimer matrisli kompozit kullanımı ağırlığında ciddi bir azalma meydana gelmesini sağlamıştır (Boeing 787 Aircraft Rescue and Firefighting Composite Structure, 2013). Bu sayede aynı yakıt miktarı ile uçak daha uzun mesafe ya da daha fazla faydalı yük taşıyabilir hale gelmiştir ve sektörde maliyetlerin azalmasına katkı sağlamıştır. Örneğin;1 M\$/kg taşıma maliyetiyle başlayıp 2.7 k\$/kg kadar düşen insanlığın uzay yolculuğunda kompozit malzemelerin kullanımının etkisi büyüktür (Jones, 2018; *SpaceX-Falcon 9 Rocket*, 2025). Başka bir örnek olarak, çok düşük ısı genleşme katsayısına sahip olan siyanat ester matrisli kompozitlerin uzay kamera sistemlerinde mikronluk değişimlerin kilometrelerce odak sapmasına neden olduğu uzay gibi yüksek sıcaklık değişime sahip olan bir ortamda ısı değişimlerden etkilenmeyerek görüntünün daha stabil olmasını sağlaması verilebilir Bunun yanında, sporcular için yüksek mukavemet ve düşük ağırlık oranına sahip karbon fiber kompozit malzemelerden üretilmiş sportif ürünler, kompozit malzemelerin sunmuş olduğu faydalara verilebilecek sayısız örneklerden bazılarıdır.

Kompozit malzemeler arasında en yaygın olarak polimer matrisli kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozit malzemeler, sunmuş olduğu avantajların yanında bazı dezavantajlara da sahiptir. Anizotropik yapıları ve kompleks hata mekanizmalarından dolayı kompozit malzemeler, metallere göre kıyasla daha düşük hata toleransına sahiptirler. Kullanım sırasında bu malzemeler darbeler, üretim hataları ve çevresel koşullar nedeniyle çeşitli hatalar meydana getirebilir. Delaminasyon ve matris çatlağı gibi hatalar yapısal bütünlüğü ciddi ölçüde azaltır ve bu tip malzemeler metaller gibi stresi hataların etrafında dağıtamazlar. Bu durum, kompozitleri çok küçük hataların büyüyerek oluşan ciddi deformasyonlara karşı daha hassas hale getirir(Abrate Serge, 1998).Bu nedenle özellikle havacılık ve uzay sektöründe bu hatalar tespit edildikleri anda tamir edilmeleri ya da kullanılan ürünlerin yenisiyle değiştirilme ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Ancak ekonomik anlamda değerlendirildiğinde, her an her parçanın değiştirilmesi çok mümkün olmadığından hataları gidermek amacı ile parçalara tamir işlemi uygulanmaktadır. Yapılan tamir işlemlerinde ise ana yapı ile aynı ya da benzer malzemeler kullanılarak bütünlüğün korunması hedeflenmektedir. Buradaki temel amaç ise yapıda performans farkının oluşmasının önüne geçmektir. Ancak reçine emdirilmiş takviye malzemesi (prepreg) gibi özel prosesler gerektiren malzemeler ,sahada uygulanacak tamirlerde her zaman kullanılamamaktadır. Onun yerine uygulama açısından daha basit olan ve kompleks ekipman gerektirmeyen el yatırması yöntemi tercih edilmektedir. Bu yöntem tercih edildiğinde ise yöntemin getirdiği stabil olmayan yapısal dağılım nedeniyle mekanik performansta düşüş meydana geldiği görülmekte ve yapılan çalışmalarda bunu doğrular niteliktedir(Sonat vd., 2023). El yatırması yönteminde ortaya çıkan performans boşluğunun giderilmesi ihtiyacı bulunmaktadır.

Nanoteknolojideki son gelişmeler, grafen oksit gibi nano katkı maddelerinin yapıya dahil edilmesiyle kompozit malzemelerin özelliklerini geliştirme potansiyelini ortaya çıkarmıştır. Grafen oksit (GO), yüksek mekanik özellikleri, geniş yüzey alanı ve polimer matrislerle güçlü arayüzey etkileşimleri oluşturma kabiliyeti ile kompozit malzemelerin performansını artırmak için umut verici bir katkı maddesi olarak ortaya çıkmıştır. Çalışmalar, GO dahil edilmesinin polimer matrislerin mukavemetini, rijitliğini ve dayanıklılığını önemli ölçüde artırabildiğini ve onları mekanik ve çevresel bozulmaya karşı daha dirençli hale getirdiğini göstermiştir (S. J. Lee vd., 2022; Pathak vd., 2016; Rafiee vd., 2009).

Yapılan araştırmalar sonucunda, GO ıslak serim tamir yönteminde matrise entegre edilmesi, ıslak serim tamirler ile orijinal prepreg malzemeler arasındaki performans boşluğunu kapatma potansiyeli sunmaktadır. Grafen oksit, polimer matrisi ile takviye elyafları arasındaki yük transferini iyileştirerek onarılan bölümlerin mekanik özelliklerinin artmasını sağlayabilir.

Bu  alışma, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) yapılar da ıslak serim tamir yönteminde matris yapısına GO eklemenin etkisini araştırılması amaçlamaktadır. Tamir uygulanan bölümlerin mekanik özelliklerini geliştirerek, performansın prepreg onarımlarinkine yaklaştırılabileceği varsayılmaktadır. Bu yaklaşım ile havacılık ve uzay uygulamalarında CFRP yapıların güvenilirliğini ve uzun ömürlülüğünü sağlayan, daha verimli ve etkili bir onarım tekniğinin ortaya konulması amaçlanmaktadır. Böylelikle çalışmanın sonuçları, kompozit tamir metodolojilerinde önemli ilerlemelere yol açabilir ve sonuçta havacılık endüstrisinde daha güvenli ve daha uygun maliyetli bakım uygulamalarına katkıda bulunabilir.

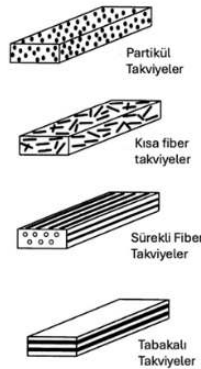
2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler iki veya daha fazla malzemenin, arzu edilen mekanik ve fiziksel özelliklerinin korunarak, birbirleri arasında kimyasal bileşik oluşturmada bir araya getirilmesiyle oluşan malzemelerdir. Genellikle, bir matris ve bir takviye fazından meydana gelir. Kullanılan malzemelerin yapıdaki oranlarına, boyutlarına ve dizilimlerine göre farklı özellikler elde edilebilir. Kompozit malzemeleri ele aldığımızda matris fazına ve takviye fazına göre iki ayrı başlıkta sınıflandırabiliriz. Matris fazına göre sınıflandırıldığında, Seramik Matrisli Kompozitler, Metal Matrisli Kompozitler ve Polimer Matrisli Kompozitler olarak sınıflandırılır. Takviye fazına göre sınıflandırdığımızda ise Fiber, Dolgulu, Whisker, Flake, Partikül, Lamina ve Sandviç olarak sınıflandırılabilir.

2.1. Matris Fazına Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

2.1.1. Seramik matrisli kompozitler

Seramik malzemeler birbirleriyle kuvvetli iyonik bağ yapan, mükemmel fiziksel ve mekanik özelliklere sahip malzemelerdir. Yüksek erime sıcaklığı ve yüksek korozyon direncine sahip, metallere kıyasla düşük yoğunluğa sahip, yüksek sıcaklıklarda stabilitesini koruyabilen malzemelerdir. Ancak kırılgan yapıları nedeniyle mekanik ve termal mekanik yükler altında dirençleri düşüktür. Bu zayıf özelliğini gidermek amacı ile seramik matrisli kompozit geliştirme ihtiyacı doğmuştur.



Şekil 2.1. Takviye tiplerine göre seramik matrisli kompozitler(Chawla, 1993)

Seramik matrisli kompozitler partikül yapılı, whisker yapılı, sürekli fiberli ve lamina formda bulunabilir. Seramik matrisli kompozitler genellikle takviye fazının kısaltması / matris fazının kısaltması şeklinde isimlendirilirler. Örneğin C/C şeklinde bir tanımlama varsa karbon fiber takviyeli karbon matris bir seramik kompoziti ifade eder. C/SiC ise Karbon fiber takviyeli Silisyum karbür malzemesini ifade eder. Matris fazı içine eklenen bu takviyeler kırılma direnci, yırtılma tokluğu, uzama ve termal şok dayanımı gibi, seramiklerin zayıf olduğu özelliklerde performans artışı göstermektedir.

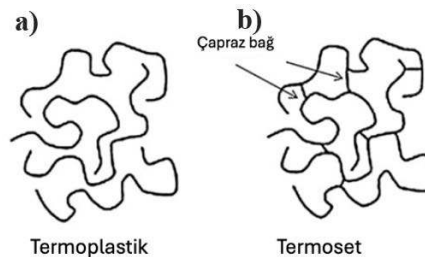
2.1.2. Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitler, metal veya metal alaşımının matris olarak kullanıldığı malzemelerdir. Matris olarak genellikle alüminyum alaşımları, titanyum alaşımları, magnezyum alaşımları ve bakır alaşımları kullanılır. Takviye fazı olarak ise Alüminyum oksit, Silisyum Karbür ve Bor Nitrür gibi malzemeler kullanılır. Metal matrisli kompozitler parçacık takviyeli, whisker veya kısa fiber takviyeli, kesintisiz fiber takviyeli ve lamina takviyeli yapıda bulunabilirler.

Metaller ile kıyaslandığında yüksek aşınma direnci, yüksek yorulma direnci, düşük genleşme katsayısı, iyi mukavemet ve yüksek spesifik modül özellikleriyle öne çıkmaktadır.

2.1.3. Polimer matrisli kompozitler

Polimer matrisli kompozitler, en yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Termoplastik ve Termoset polimerler olmak üzere farklı türü bulunan polimerler genellikle matris olarak kullanılır. Seramik ve Metal matris kompozitlere kıyasla daha ekonomiktirler. Düşük yoğunluk, yüksek mukavemet sağladıkları için ağırlığın önemli olduğu uygulamalarda sıkça tercih edilirler.



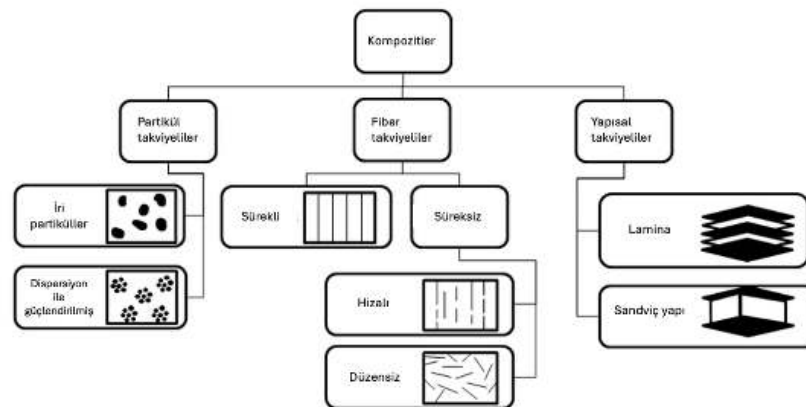
Şekil 2.2. a) Termoplastik, b) Termoset zincir yapısı(Naskar, 2017)

Termoplastik malzemeler, polimer zincirler arasında Van der Waals bağları kurarlar. Bu sayede ısı uygulandığında polimer zincir yapılarında bozulma gerçekleşmez. Isı ile şekillendirilebilir ve kaynak işlemi uygulanabilir. Polimer matris kompozitlerde, termoplastik malzeme tercih edildiğinde yapıda olan hatalar ısı uygulandığında giderilebilmektedir. En çok polieter keton keton (PEKK), poliamid (PA), poli(metil akrilat) PMA gibi malzemeler matris olarak tercih edilmektedirler. Her ne kadar tekrar işlem görebilir özellikleri nedeniyle avantajlı olarak gözüксе de hem kompozit oluşturma prosesinde hem de hammadde olarak termoset matrislere kıyasla daha pahalı olduklarından daha az tercih edilmektedirler.

Termoset malzemeler, birbirleriyle kovalent bağ yaparak çapraz bağ oluştururlar. Bu nedenle tersinir olmayan bir reaksiyona sahiptirler. Termal olarak daha stabildirler. Özellikle, Fiber takviyeli kompozitleri (FRP) iyi derecede ıslatabilme özellikleriyle öne çıkarlar. Çoğu zaman kompleks proses gereksinimleri olmaz. Daha ekonomik olmaları nedeniyle yaygın olarak tercih edilirler. Hataya karşı dirençleri daha düşüktür, hata tespit durumunda tahribatlı tamir işlemine gereksinim duyulur. Yaygın olarak Polyester, Vinylester, Epoksi ve bismaleimide (BMI) reçineleri kullanılmaktadır.

2.2. Takviye Fazına Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler takviye fazlarına göre üç ana sınıfa ayrılmışlardır(William D. Callister and David G. Rethwish, 2018) Bunlar sırasıyla Parçacık takviyeli, Fiber takviyeli ve Yapısal takviyeli kompozitlerdir.



Şekil 2.3. Kompozit malzemelerin takviye türlerine göre sınıflandırılması(Ameta vd., 2013)

2.2.1. Parçacık takviyeli kompozitler

İri parçacıklı ve dispersiyonla güçlendirilmiş kompozitler olmak üzere iki gruba ayrılır.

İri parçacıklı kompozitler; üç matris grubunda da kullanılır. Bazı polimer matrisli kompozitlere dolgu malzemesi olarak parçacık eklenir. Özellikle reçinenin içine eklenerek vizkozite artışı sağlanır, uygulama kolaylığı elde edilir ve yapıdaki hacmi daha ucuz bir malzemeyle doldurmuş olur. Örneğin, Tungsten karbür (WC) ve Titanyum karbür (TiC), kobalt veya nikel matrisli kompozitler kesici takım olarak kullanılmaktadırlar. Karbür parçacıklar kesici yüzey özelliği sağlar ancak aşırı derecede kırılabilirler ve kendi başlarına kesim işlemi sırasındaki yüklere dayanamazlar. Metal matris ise yapıya süneklik katarak kırılabilirliği azaltır ve yapıya tokluk sağlar. Dispersiyonla güçlendirilmiş kompozitler; Metaller ve metal alaşımları, çok sert ve inert bir malzemenin ince parçacıklarının homojen dispersiyonla dağılımıyla güçlendirilebilir ve sertleştirilebilir. Disperse olmuş faz, metalik veya ametalik olabilir. Güçlendirme mekanizması, çökeltme sertleşmesinde olduğu gibi, matris içindeki parçacıklar ve dislokasyonlar arasındaki etkileşimler ile oluşur. Dispersiyonun güçlendirme etkisi, çökeltme sertleşmesi kadar belirgin değildir; ancak, güçlendirme yüksek sıcaklıklarda ve uzun süreler boyunca korunur, çünkü dağılmış parçacıklar matris fazı ile tepkimeye girmeyecek şekilde seçilir. Dispersiyonla sertleştirilmiş alaşımlar için, çökeltelerin büyümesi veya çökelti fazının çözünmesi sonucunda, ısıtım sırasında mukavemet artışı kaybolabilir.

Örneğin; Nikel alaşımlarının yüksek sıcaklık mukavemeti, yaklaşık %3 hacim oranında toryum dioksit (ThO_2) parçacıkların eklenmesiyle önemli ölçüde artırılabilir; bu malzeme torya-dağılmış nikel olarak bilinir. Aynı etki, alüminyum–alüminyum oksit sisteminde de üretilir. Çok ince ve yapışkan bir alümina kaplaması, kalınlığı 0,1 ila 0,2 μm olan son derece küçük alüminyum pullarının yüzeyinde oluşur ve bunlar bir alüminyum metal matris içinde dağılır; bu malzeme sinterlenmiş alüminyum tozu olarak adlandırılır (William D. Callister and David G. Rethwish, 2018)).

2.2.2. Fiber takviyeli kompozitler

Teknolojik olarak en önemli kompozit tipi fiber takviyeli kompozitlerdir. Malzeme maruz kalacağı yüke göre fiber yönlerini değiştirerek tasarlanabilme özelliği

ile ön plana çıkar. Her üç ana malzeme tipinde de fiber form oluşturulabilir. Sürekli ve süreksiz fiber olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Süreksiz fiberler ise yönlendirilmiş ve rastgele fiberler olmak üzere ikiye ayrılır.

Sürekli fiberler, matris içerisinde kesit olmadan bütün halde bulunurlar. Yapıda herhangi bir süreksizlik bulunmadığından uygulanan yük fiber boyunca iletilir. Bu sayede malzeme uygulanan yük yönüne ve kullanım alanına göre tasarlanabilir. Örölmüş kumaş formunda veya dikilmiş formda bulunabilirler. Dikilmiş formda olan fiberler tek eksenli (Ud), çift eksenli (Biax) ve üç eksenli (Triax) olarak bir araya getirilebilirler. Sürekli fiber malzemeler, anizotropik özellik gösterir. Fiber yönünde mukavemeti yüksek, fibere dik yönde olan yönlerde mukavemeti oldukça düşüktür. Fibere dik yönde olan kuvvetlere yalnızca matris malzemesi direnç gösterir.

Süreksiz ve yönlendirilmiş fiberler ile üretilen kompozitlerin üretimi sürekli fiberlere kıyasla daha kolay ve hızlıdır. Basınçlı kalıplama, enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon üretim metotları ile kolaylıkla üretilebilmektedirler. Belirli bir yönde yönlendirilerek sürekli fiberlerin sağlamış olduğı mukavemet değerini %90 ile %50 bir oran aralığında yakalanabilmektedir(William D. Callister and David G. Rethwish, 2018).

Süreksiz ve yönlendirilmemiş fiberler üretim esnasında oldukça kolaylık sağlarlar. Ekstrüzyon, basınçlı kalıplama, ekstrüzyon gibi yöntemlerle hızlı ve ekonomik olarak üretilebilirler. Yapıda fiberlerin dağılımı rastgele olduğundan malzemeler izotropik özellik göstermektedir.

En yaygın olarak kullanılan fiberler karbon, cam elyaf ve aramidtir. Cam elyaflar, genellikle düşük maliyetleri nedeniyle tercih edilirler. İyi mekanik özellik gösterip, çevresel etkilere karşı dirençlidir. Yaygın olarak yatçılık, rüzgâr ve inşaat sektöründe kullanılır.

Karbon elyaflar, yüksek yapısal stabiliteye ve mukavemete sahip olmalarının yanı sıra düşük ağırlık oranları sayesinde havacılık, otomotiv gibi yüksek performans ve hafifliğin ön planda olduğı sektörlerde tercih edilir. Ayrıca termal iletkenlik ve iyi elektriksel özellikler sağlarlar.

Aramid fiberler, yüksek darbe dayanımı ve yüksek tokluk özellikleriyle ön plana çıkarlar. Bu özelliklerinden ötürü enerji emiliminin ve esnekliğin gerekli olduğı balistik ve sportif ürünlerde tercih edilirler. Neme karşı hassasiyetleri yüksektir.

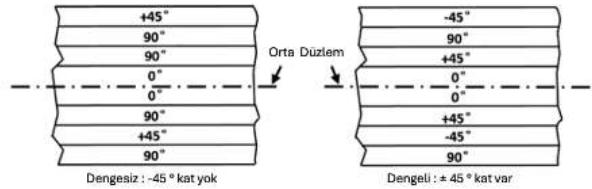
2.2.3. Yapısal takviyeli kompozitler

Kompozit malzemeler, lamina ve sandviç olmak üzere iki farklı yapıdan oluşur.

Lamina yapılar, belirli bir elyaf yönelime sahip birden fazla elyaf takviyeli katmanının (kat) istiflenmesiyle oluşturulur. Bu katmanlı yapı, tasarımcıların mukavemeti, sertliği ve belirli yükleme koşullarına karşı direnci optimize etmelerini sağlayarak özel mekanik özelliklere göre yapıları tasarlamasına olanak tanır. Lamina yapılar, liflerin tek bir yönde yönlendirildiği tek yönlü veya liflerin çeşitli açılarda yerleştirildiği çok yönlü olabilir. Laminaların mekanik davranışı, katların yönü, kalınlığı ve istifleme sırasına göre belirlenir.

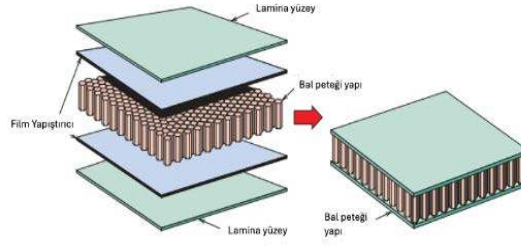


Şekil 2.4. Simetrik ve simetrik olmayan lamina görseli(J. Zhang vd., 2011)



Şekil 2.5. Dengeli ve dengeli olmayan lamina görseli (Yan vd., 2017)

Kompozit yapılarda, her bir kat içindeki elyafın oryantasyonu kompozitin mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkiler. 0° yönelimli katlar, yük eksenini boyunca sertlik ve mukavemet sağlarken, $\pm 45^\circ$ yönelimler kayma mukavemetini artırır ve 90° yönelimler enine mukavemeti artırır. Dengeli laminantlar hem pozitif hem de negatif açılarda yönlendirilmiş katlar içererek tüm yönlerde eşit mekanik özellikler sağlar. Ayrıca laminantların yönelimleri orta merkeze göre simetrik ve dengeli olması tercih edilir. Bu sayede artık gerilmeler en aza indirilir. Termal veya nem değişikliklerinden kaynaklanan eğrilmeleri önler.



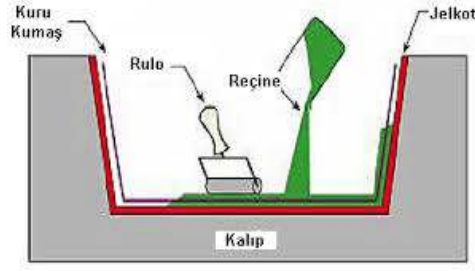
Şekil 2.6. Sandviç yapılı kompozit (William D. Callister and David G. Rethwish, 2018)

Sandviç yapılar, hafif, düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemeye bağlanmış iki güçlü, sert dış laminadan oluşan yapılardır. Minimum ağırlıkla yüksek bükülme sertliği sağlar. Tipik olarak köpük, bal peteği veya balsa ağacından yapılan çekirdek malzeme kayma mukavemeti sağlarken, lamina yapılar çekme ve basınç yüklerini taşır. Sandviç yapılar, üstün yapısal verimlilikleri nedeniyle havacılık, denizcilik ve rüzgâr endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır

2.3. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

2.3.1. El yatırması yöntemi

El yatırması metodunda, fiberler öncelikle kalıba veya düz bir yüzeye yerleştirilir. Üretilcek olan parça kompleks bir şekle sahip ise kumaşı ıslatmak zor olacağından kumaş serimi için düz yüzey tercih edilir. Sürekli ve süreksiz fiberler bu metotta kullanılabilir. Reçine eğer çift komponentli ise uygun serim sıcaklığında serim işlemi öncesinde karışım oluşturulur. Tek komponentli bir reçine kullanılıyorsa da uygun proses sıcaklığına getirilir. Reçine hazırlandıktan sonra reçine kumaşın üzerine dökülür ve bir rulo ya da spatula yardımıyla kumaşın reçineyi emmesi sağlanır. Düz yüzeyde ıslatılmış olan kumaşlar ise emdirme işleminden sonra kalıba taşınır ve bir spatula yardımıyla bastırılarak kalıba oturtulur. Serim işlemi sırasında katmanlar arasında kalan havayı azaltmak ve fazla reçineyi almak adına birkaç katta bir vakum torbası ile sıkıştırma işlemi uygulanır. Daha sonrasında bir ısı kaynağı kullanarak ya da oda sıcaklığında kürlenme işlemine bırakılır. Kürlenme vakum altında veya açık atmosferde gerçekleştirilebilir.

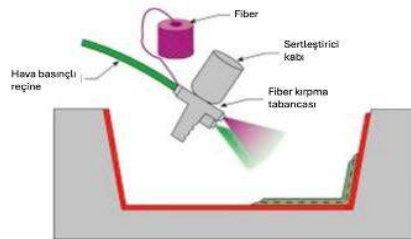


Şekil 2.7. El yatırması yöntemi ile polimer matrisli kompozit üretimi (Durgun, 2014)

Her ne kadar rulo yardımıyla ve sıkıştırma işlemi uygulanarak yapı içerisinde kalan hava azaltılmaya çalışılsa da el yatırması ile üretilen parçalar diğer metotlara kıyasla yüksek miktarda porozite içerir ayrıca reçine/fiber oranı ve dağılımı homojenlik göstermeyebilir.

2.3.2. Püskürtme yöntemi

Püskürtme metodu el yatırması metoduyla büyük benzerlik gösterir. Bu yöntemdeki temel farklılık iplik halinde bulunan fiberler, bir tabancanın ucuna beslenir. Tabancanın ucunda önceden belirlenmiş olan boyutlarda kesilir. Aynı zamanda tabancanın ucunda bulunan reçine haznesinden reçine kesilmiş olan fiberler ile kalıp yüzeyine püskürtülür. Püskürtülen bu reçine ve fiberler el yatırması yöntemindeki gibi bir rulo veya spatula ile yüzeye boşluk kalmayacak şekilde oturtulur. Yapısal uygulamalarda tercih edilmeyen bir metottur.

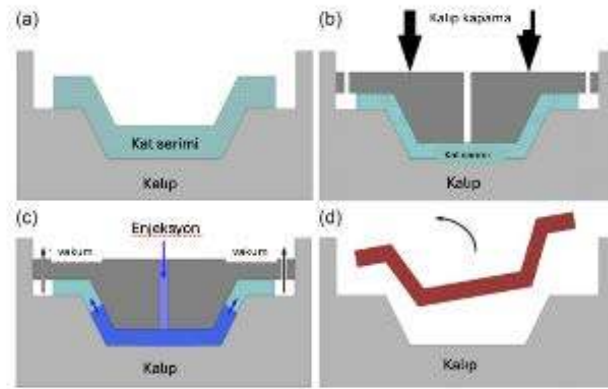


Şekil 2.8. Püskürtme yöntemi ile polimer matris kompozit üretimi (Campbell, 2004)

2.3.3. Reçine transfer yöntemi

Reçine transfer yönteminde (RTM) genellikle sürekli fiberler kullanılır. Fiberler kalıp üzerine daha önceden belirlenmiş olan yönlerde yerleştirilir. Bazı uygulamalarda ise kumaşlar bağlayıcı malzeme içerir ve reçine transfer kalıbı içerisinde kumaşların

kaymasını önlemek adına ön ısıtma işlemi uygulanarak kumaşlara şekil verilir. Bu işleme ise preform işlemi denir. Sürecin paralelinde kullanılacak olan reçineye de-gas işlemi uygulanır. Kullanılacak olan reçinede gerek karıştırma işleminden kaynaklanan gerekse reçinenin üretim sürecinden gelen mikro hava keselerini gidermek amacı ile bu işlem uygulanır. RTM metodu vakum altında gerçekleştirildiğinden, bu hava kesecikleri yapıda porozite hatası olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle de-gas işlemi önemli bir süreçtir. De-gas işlemi uygulanmış reçine açık atmosfere maruz bırakılmamalıdır.



Şekil 2.9. Reçine transfer yöntemi ile polimer kompozit üretimi a) kalıp üstüne serim işlemi b) sıkıştırma ve vakumlama işlemi c) Reçine enjeksiyon ve kürlenme işlemi d) kalıptan çıkarma işlemi (Govignon vd., 2022)

Kalıba serim işlemi tamamlandıktan sonra üst kalıp kumaşlar üzerine kapatılır ve kalıp vakuma alınır. Vakum işlemi uygulanmış kalıba de-gas işlemi uygulanmış reçine enjekte edilir. Enjeksiyon işlemi sonrasında kontrollü ısıtma ve soğutma profiline sahip olan bir kürlenme profilinde kalıp içerisinde kürlenme işlemi uygulanır. Kürlenme işlemi uygulandıktan sonra üst kalıp çıkartılır ve parça kalıptan sökülür.

RTM prosesi ile yüksek kalitede, homojen reçine /fiber oranına sahip ve düşük porozite ihtiva eden parçalar üretilir. Performans gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Bu metot ile hem iç hem dış yüzeyde yüksek kalitede parçalar üretilebilir. Dişi ve erkek kalıp ihtiyacı olduğundan kalıp üretim maliyeti yüksektir.

2.3.4. Vakum infüzyon yöntemi

RTM yönteminde kalıp üretim maliyetlerinin ve tezgah maliyetinin yüksek olması ve üretilecek olan büyük parçalarda böyle bir kalıbın üretilemeyecek olması sebebiyle RTM ile benzer sonuçlar veren ancak yat, rüzgar türbin kanadı gibi büyük parçaların

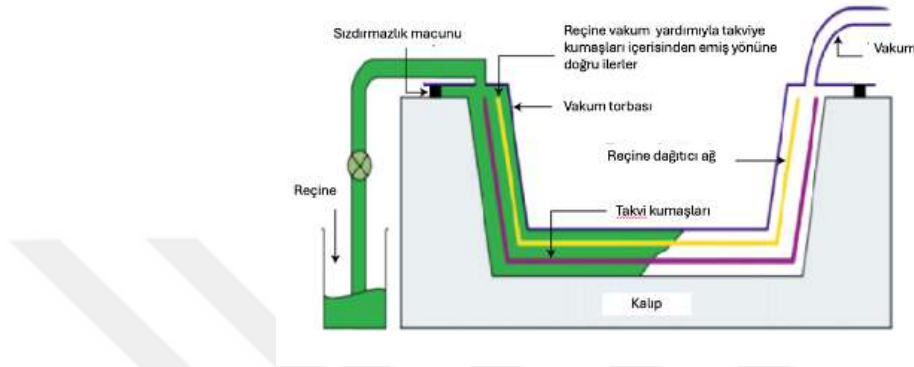
Şekil 2.10. Vakum infüzyon metodu için gerekli serim planı(EXPO-NET Resin Flow Mesh Products, 2021)



Şekil 2.10. Vakum infüzyon metodu için gerekli serim planı(EXPO-NET Resin Flow Mesh Products, 2021)

13

uygulanır. Vakum işlemi uygulandıktan sonra vakum kaçağı testi uygulanır. Eğer herhangi bir kaçak tespit edilmez ise sistemdeki vakum yardımıyla yapı içerisine reçine emdirme işlemi kullanılır. Daha sonrasında, bir ısı kaynağı kullanılarak kürleme işlemine geçilir. Genellikle kalıplar kendiliğinden ısıtmalıdır. Kalıplar ısıtılmalı değilse ısı battaniyelerinin kullanımı tercih edilir.

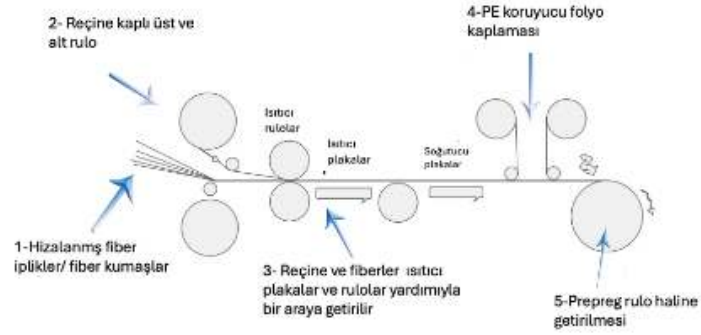


Şekil 2.11. Reçine infüzyon yöntemi ile reçine emdirme işlemi (SP Systems Guide to Composites, 2015)

Reçine infüzyon metodu porozite oranı düşük, maliyet avantajı yüksek bir yöntemdir. Performans ihtiyacı duyulan parçalarda kullanılabilmektedir. Rüzgâr ve yatçılık sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Yavaş yavaş havacılık sektöründe de kullanılmaya başlanmaktadır. Parça kalitesinde RTM yöntemi ile kıyaslandığında ise sadece kalıp yüzeyinde hassas düzlemsellik elde edilebilmektedir. Reçine infüzyon yönteminin sunmuş olduğu en büyük avantaj kumaşların serim işleminin çok kısa süre içerisinde yapılabilmesidir.

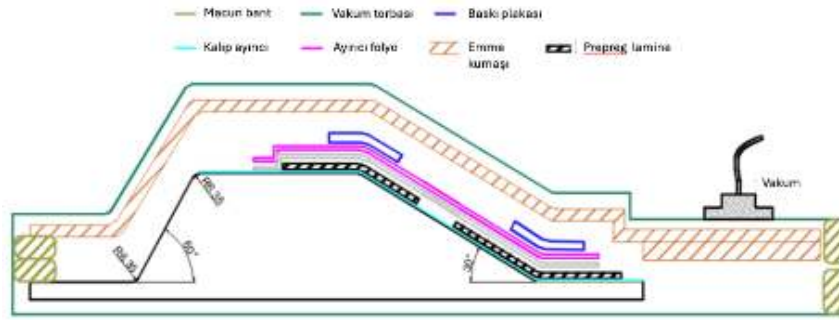
2.3.5. Prepreg el ile serim yöntemi

Prepreg serim yönteminde önceden reçinesi emdirilmiş prepreg kumaşlar kullanılır. Prepreg kumaşlara uygun koşullar altında reçinesi emdirilir ve -18 ° C'de dolaplarda saklanarak reaksiyonun ilerlemesi durdurulur. Ürünlerin sevkiyatı ise soğuk zincir bozulmadan gerçekleştirilir. Kullanılacağı zaman dolaptan çıkartılır ve oda sıcaklığına geldiğinde, kullanıma hazır hale gelir. Üretici tarafından serim işlemi için belirli bir süre tanımlanır. Bu süre dolmadan serim işleminin tamamlanması gerekmektedir.



Şekil 2.12. *Prepreg üretimi şematik gösterimi(Introduction and characteristics of carbon fiber prepreg, 2023)*

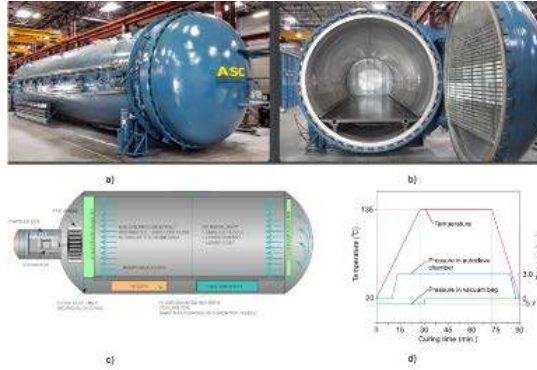
Oda sıcaklığına ulaşmış ve uygun ölçülerde kesilmiş olan prepregler, tasarım doğrultusunda el ile kalıp yüzeyine serilir. Proses gerekliklerince genellikle 1 ile 3 kat arasında bir vakum torbasına alınarak sıkıştırma işlemi uygulanır. Bu işlemin amacı prepregler arasındaki hava boşluklarını minimuma indirmek ve prepreglerin kalıbın şeklini alması sağlanmaktadır. Serim işlemi tamamlandıktan sonra parça yüzeyine ayırıcı folyo serilir.



Şekil 2.13. *Prepreg kullanılan kompozitlerin serim planı(Wu and Young, 2022)*

Bu yöntemde reçine daha önceden optimize edildiği için deliksiz ayırıcı folyo kullanılır. Daha sonrasında otoklav içerisinde uygulanacak olan basıncı homojen dağıtmak ve torba yüzeyinde de takım yüzeyine yakın bir yüzey elde etmek adına baskı plakası diye adlandırılan parça geometrisi ile uyumlu takımlar yerleştirilir. Daha sonrasında vakumun tüm yüzey boyunca yayılmasını sağlayan emme kumaşı tüm yüzey kaplanacak şekilde yerleştirilir. Vakum torbalama işlemi uygulanır ve otoklav

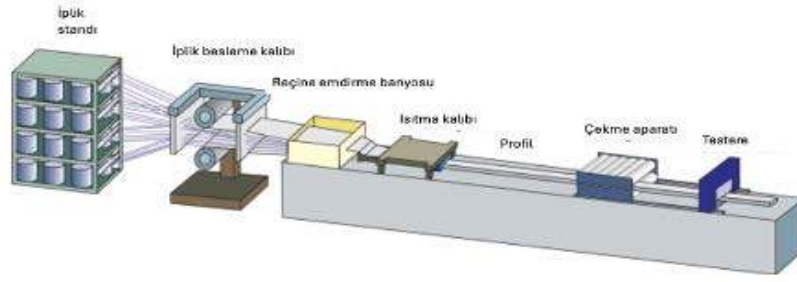
içerisine yerleştirilir. Otoklav içerisinde vakumun yanında tüm yüzeye inert bir gaz ile basınçlandırma işlemi uygulanır. Aynı zamanda uygun ısı profili uygulanarak kürlenme reaksiyonunun gerçekleşmesi sağlanır.



Şekil 2.14. a) Otoklav dıştan görünüm b) Otoklav içten görünüm c) otoklav çalışma prensini şematik gösterim(Econoclave® - Standard Models, 2025) d) Örnek bir kürleme profili (Kubit vd., 2020)

2.3.6. Pultrüzyon yöntemi

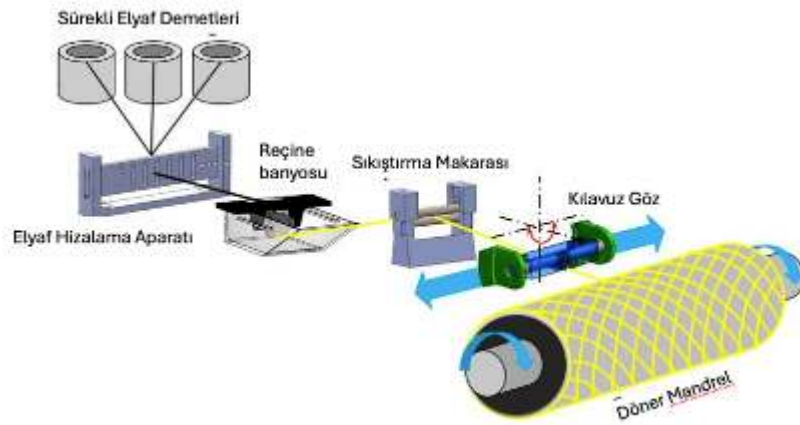
Pultrüzyon üretim yönteminde, rulo halde bulunan fiberler reçine banyosuna yönlendirilir. Bu banyoda fiberlerin reçine ile ıslanması sağlanır. Reçine ile ıslanmış olan fiberler ön şekil verme kalıbına girerler. Burada fiberler bir araya getirilerek, final şekle benzer bir formdan geçerler aynı zamanda fazla reçineleri alınır. Daha sonrasında final geometrinin bulunduğu kalıba geçilir. Burada ısı uygulanarak reçinenin kürlenmesi sağlanır. Kalıp çıkışında ise profil şeklinde polimer matrisli kompozit üretimi tamamlanmış olur. Tüm bu süreçte hat bir çekicinin profili çekmesiyle gerçekleşmektedir. Uygun ölçülere gelen profiller çekiciden sonra bulunan bir kesici yardımıyla uygun ölçüde kesilirler. Üretim yöntemi olarak ekstrüzyon yöntemine benzemektedir. Bu yöntem ile sadece profil olan parçalar üretilebilir.



Şekil 2.15. Pultrüzyon üretim yönteminin şematik gösterimi(Riedel, 2012)

2.3.7. Filaman sarma yöntemi

Filaman sarma metodunda, rulo halinde bulunan fiberler bir reçine banyosuna daldırılır. Nümerik kontrol ile programlanmış olan ve açısız sarıma göre dönen bir mandrel dönüş hareketi sayesinde çekilir. Ayrıca yine nümerik kontrolle programlanmış olan sağa sola hareket edebilen ve mandrelin yüzeyine belirli bir açıda fiberlerin yerleşimini sağlayan bir kafa sayesinde, fiberlerin yerleşimi sağlanır. Sarım işlemi tamamlandıktan sonra oda sıcaklığında veya bir fırın içerisinde kurlenme işlemi tamamlanır. Kurlenme işleminden sonra kompozit parça, mandrel üzerinden sökülerek kullanıma hazır hale getirilir.



Şekil 2.16. Filaman sarma yöntemi şematik gösterimi(Ma vd., 2019)

2.3.8. Otomatik fiber serim yöntemi

Otomatik fiber serim metodunda, prepreg filamentler veya bantlar nümerik kontrollü bir robot sayesinde bir kalıp üzerine serilir. Elle prepreg serim metodunda

olduğu gibi torba ile sıkıştırma işlemine ihtiyaç duyulmaz. Bunun için sıkıştırma ruloları kullanılır. Serim işlemi tamamlandıktan sonra final torbalama işlemi uygulanır ve parça otoklav içinde kürlenir. Çok hassas bir metottur. Ancak bazı kompleks geometriye sahip tasarımlarda uygulanamayabilir.

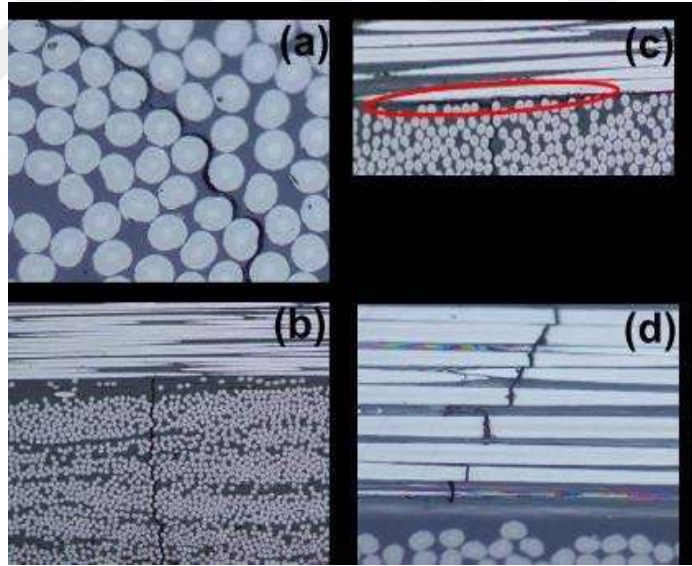


Görsel 2.1. *Otomatik fiber serim metoduna ait bir görsel(Automated Fiber Placement - Cailabs, 2025)*

3. POLİMER MATRİS KOMPOZİT MALZEMELERİN TAMİR YÖNTEMLERİ

3.1. Kompozit Malzemelerde Hata türleri

Anizotropik yapıları ve kompleks hata mekanizmalarından dolayı kompozit malzemeler metallere göre kıyasla daha düşük hata toleransına sahiptirler. Kullanım sırasında bu malzemelerde darbeler, üretim deformasyonları ve çevresel koşullar nedeniyle çeşitli hatalar meydana gelmektedir. Delaminasyon ve matris çatlağı gibi hatalar yapısal bütünlüğü ciddi ölçüde azaltır ve metaller gibi oluşan stresi hataların etrafında dağıtamazlar. Bu durum, kompozitleri çok küçük hataların büyüyerek oluşan ciddi deformasyonlara karşı daha hassas hale getirir. Kompozit yapılarda yaygın olarak bulunan hatalar ise delaminasyon, matris çatlağı, fiber kırılması ve boşluklardır.

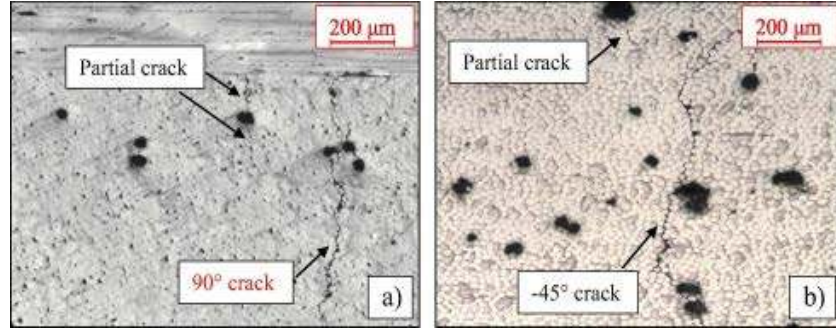


Görsel 3.1. a) Fiber/matris ayrılma hatası b) Matris çatlağı c) Delaminasyon d) Fiber kırılması hataları görselleridir (Loukil, 2013)

Delaminasyon, iki katmanın darbe ya da üretim hataları sonucunda birbirinden ayrılması sonucu meydana gelen hatadır. Bu hata yük altında, yük taşıma kapasitesini düşürerek katastrofik hatalara yol açar.

Matris çatlakları, polimer matris içerisinde oluşan çatlaklardır. Bu çatlaklar büyüyerek delaminasyon veya fiber kırığı gibi hatalara neden olabilir. Bu çatlaklar yapıdaki sertliğin ve mukavemetin düşmesine neden olur.

Fiber kırılması, kompozit yapı içerisindeki elyafların kırılması ile meydana gelir. Bu durum malzemenin gerilme mukavemetini ve yük taşıma kapasitesini büyük ölçüde azaltır. Fiber kırılması genellikle darbelerden veya aşırı yüklerden kaynaklanır.

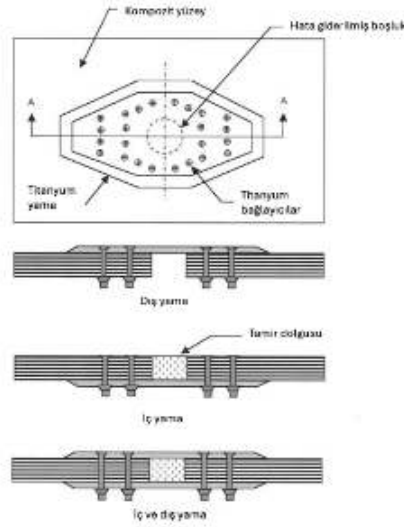


Görsel 3.2. Çatlak başlatıcı olan bazı boşlukların mikroskop görüntüleri(Maragoni vd., 2017)

Boşluklar, kompozit malzeme içinde gerilim yoğunlaştırıcı ve çatlak başlatıcı olarak davranan, hava veya boşluklardır. Boşluklar, özellikle çevrim yükleri altında malzemenin mukavemetini ve dayanıklılığını azaltır.

3.2. Kompozit Malzemelerde Havacılık Sektöründe Kullanılan Tamir Yöntemleri

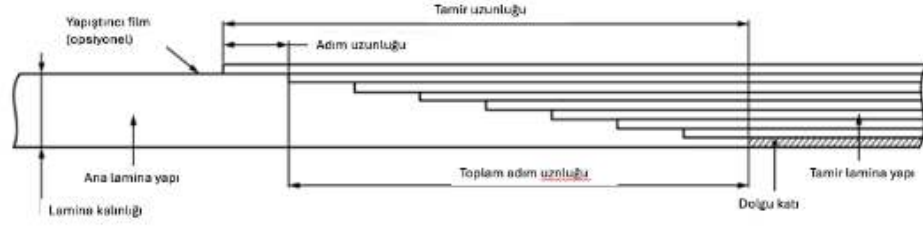
CFRP'lerin kritik uçak yapılarında kullanımı arttıkça, yapısal bütünlüğü korumak ve servis ömrünü uzatmak için etkili tamir tekniklerine duyulan ihtiyaç da artmaktadır. Hasarlı CFRP yapılarının tamir edilmesi, hava araçlarının güvenliğini ve performansını korumak için gereklidir. Havacılık endüstrisi, her biri kendi avantajları ve sınırlamaları olan çeşitli tamir yöntemleri geliştirmiştir. Yapısal tamirler; Civatalı ve Yapıştırırmalı olmak üzere iki ana grupta değerlendirilebilir.



Şekil 3.1. Civatalı tamir uygulama örnekleri (*Things to Consider When Conducting Composites Repair, 2020*)

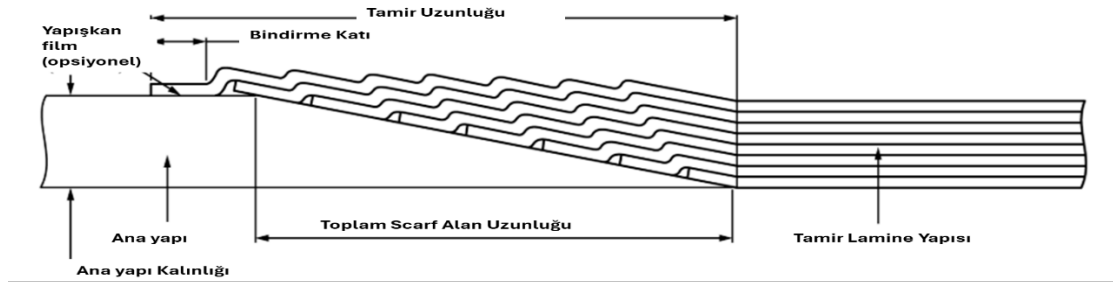
Civatalı tamirler, saha koşullarında uygulanması daha kolay olan tamir yöntemidir ve yapıştırırmalı onarımlar için gereken yüzey hazırlığının uygulanması gerekmez. Bu yöntem sırasında bir yama, mekanik bağlantı elemanları kullanılarak yerleştirilir ve anında yapısal destek sağlar. Ancak, bağlantı elemanlarının kullanılması civata deliklerinin etrafında gerilim yoğunlaşmaları yaratarak onarılan alanı potansiyel olarak zayıflatabilir ve yapının genel mukavemetini etkileyebilir. Ayrıca, civatalı onarımlar önemli ölçüde ağırlık ekleyebilir ve uçağın aerodinamik performansını etkileyebilir.

Yapıştırırmalı tamirler, hasarlı alanın üzerine elyaf ve reçine matrisinden oluşan bir yamanın ilgili bölgeye yapıştırılmasıyla oluşturulan tamirlerdir. Bu yöntem, düşük ağırlık ilavesi ve aerodinamik performansı daha az etkilemesi nedeniyle tercih edilir. Çünkü uçak yüzeyi üzerindeki hava akışını bozabilecek ek bağlantı elemanları kullanılmaz. Bununla birlikte, yapıştırırmalı tamirler, optimum yapışma ve mekanik performans elde etmek için yüzey hazırlığı ve kontrollü kürleme koşulları gerektirir. Yapışma kalitesi, yüzey kirliliği, uygun olmayan kürlenme ve onarım sırasındaki çevresel koşullar gibi faktörlerden etkilenebilir. Yapıştırırmalı tamirler kademeli tamirler ve scarf tamirler olarak ikiye ayrılır. Her iki tamir yöntemi de tamir işlemi uygulanan alan ile hasarsız yapı arasında yumuşak bir geçiş sağlamak ve stres konsantrasyonlarını azaltmak için tasarlanmış tekniklerdir.



Şekil 3.2. Kademeli tamir uygulaması (ASTM D8131/D8131M-23 Standard Practice for Tensile Properties of Tapered and Stepped Joints of Polymer Matrix Composite Laminates, 2023)

Kademeli tamirler, her bir kademenin altta yatan kompozit malzemeye bağlandığı bir dizi üst üste binen adım veya katman oluşturmayı içerir. Bu yöntem ile yüklerin etkili bir şekilde dağıtılması ve stres yoğunlaşmalarının en aza indirilmesi hedeflenir. Ancak kat kaldırma işlemleri yüksek el becerisi gerektirir. Bu teknikte katmanlar ile açılan tamir bölgesi yüksek geometrik uyumluluk gösterir.



Şekil 3.3. Scarf tamir uygulaması (ASTM D8131/D8131M-23 Standard Practice for Tensile Properties of Tapered and Stepped Joints of Polymer Matrix Composite Laminates, 2023)

Scarf tamirleri, tamir yamasının yapıştırılması için açılı bir yüzey oluşturularak hasarlı bölgeye kadar katmanların kaldırılmasıyla yapılan tamir yöntemidir. Bu teknik daha geniş bir yapıştırma alanı ve kalınlıkta daha yumuşak bir geçiş sağlar, bu da stres konsantrasyonlarını azaltmaya ve onarımın yük taşıma kapasitesini artırmaya yardımcı olur. Scarf tamirleri oldukça etkilidir ancak en iyi performansı sağlamak için dikkatli bir hazırlık ve hizalama gerektirir.

4. GRAFEN OKSİT

Grafen oksit (GO), tek katmanlı karbon atomlarından oluşan grafen yapısının oksijen içeren fonksiyonel gruplarla (hidroksil, epoksit, karboksil vb.) fonksiyonlandırılmış bir türevidir. Bu oksijenli gruplar sayesinde GO, suda disperse edilebilir hale gelir ve yüzey modifikasyonlarına açık bir yapı kazanır. Ancak bu gruplar aynı zamanda grafenin elektriksel iletkenliğini önemli ölçüde düşürür. Grafen oksit, genellikle grafitin oksidatif yöntemlerle işlenmesi sonucu elde edilir ve tek katmanlı grafen üretiminde öncü bir malzeme olarak kullanılır.

4.1. Grafen Oksit Kullanım Alanları

Grafen oksit, yüzeyde yer alan fonksiyonel grupların varlığı ve yüksek yüzey alanı sayesinde çeşitli endüstriyel ve bilimsel uygulamalarda tercih edilmektedir. Bunlar;

Enerji Depolama Sistemleri, GO, lityum-iyon pillerde anot malzemesi olarak, süperkapasitörlerde ise elektrot modifikasyonu amacıyla kullanılmaktadır Yüksek özgül yüzey alanı ve iyon transfer kapasitesi bu alandaki etkinliğini artırır (Zhu vd., 2011)

Kompozit Malzemeler, GO, polimer matrislerle birlikte kullanıldığında mekanik dayanımı, ısı iletimini ve termal kararlılığı artırarak kompozitlerin performansını yükseltir (Shivakumar vd., 2020; J. Zhang vd., 2011).

Çevresel uygulamalar, GO, su arıtımında ağır metal iyonlarının ve organik kirleticilerin adsorpsiyonu için etkili bir adsorban olarak kullanılmaktadır. Ayrıca antibakteriyel özellikleri sayesinde dezenfeksiyon sistemlerinde de değerlendirilmektedir (Q. Zhang vd., 2020).

Elektronik ve Sensör Teknolojileri, GO'nun yüzeyinde bulunan oksijenli gruplar, biyosensörlerin seçiciliğini artırmak için kullanılır. Aynı zamanda düşük maliyetli, esnek elektronik cihazların geliştirilmesinde de rol oynar (J. Lee vd., 2016; Loh vd., 2010).

Biyomedikal uygulamalar, GO, ilaç taşıyıcı sistemler, doku mühendisliği, biyogörüntüleme uygulamalarında kullanılmak üzere fonksiyonlaştırılmaktadır (Arnold vd., 2025).

4.2. Grafen Oksit Sentez Yöntemleri

Grafen oksit sentezi genellikle kimyasal oksidasyon yöntemlerine dayanır. Bu yöntemler grafitin katmanlı yapısına oksijenli gruplar ekleyerek GO üretimini sağlar:

Hummers Yöntemi en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu yöntemde grafit, potasyum permanganat (KMnO_4) ve sülfürik asit (H_2SO_4) karışımı ile oksitlenir. Hızlı ve yüksek verimli bir yöntemdir ancak çevresel açıdan bazı toksik yan ürünler ortaya çıkabilir(Hummers and Offeman, 1958).

Modified Hummers Yöntemi, Klasik yönteme göre daha az zararlı ve çevreci reaktifler kullanılarak geliştirilmiş versiyonudur (Özellikle fosforik asit (H_3PO_4) ilavesi ile daha kontrollü ve güvenli bir oksidasyon sağlanır (Marcano vd., 2010).

Brodie Yöntemi,Bu yöntemde grafit, nitrik asit ve potasyum klorat kullanılarak oksitlenir. Yüksek derecede oksijenlenmiş GO üretimi sağlansa da işlem süresi uzun ve güvenlik riski yüksektir(Poh vd., 2012).

Staudenmaier Yöntemi,Brodie yöntemine benzer şekilde çalışır ancak daha kontrollü oksidasyon sağlar. Daha fazla asidik ortam kullanılır ve GO'nun homojenliği daha iyidir (Poh vd., 2012).

5. ALAN YAZIN ÇALIŞMALARI VE ARAŞTIRMANIN AMACI

Yapıştırma onarımları ıslak serim veya prepreg onarımları olarak gerçekleştirilebilir.

Prepreg onarımlar, reçine matrisi ile önceden emdirilmiş olan kompozit elyaflardan oluşan prepreg malzemeler kullanılarak gerçekleştirilir. Bu malzemeler erken kürlenmeyi önlemek için düşük sıcaklıklarda saklanır ve uygulamadan önce oda sıcaklığına getirilir. Tamir süreci, prepreg malzemenin gerekli şekilde kesilmesi hasarlı alanın üzerine serilmesi ve uygun yapışmayı sağlamak için basınç uygulanması ile gerçekleştirilir. Tamir daha sonra gerekli mekanik özellikleri elde etmek için tipik olarak bir otoklav veya taşınabilir bir ısıtma battaniyesi aracılığıyla ısı kullanılarak kürlenir. Prepreg onarımları yüksek performanslarıyla bilinir çünkü malzemeler kontrollü koşullar altında üretilir ve tutarlı elyaf dağılımı ve reçine içeriği sağlar. Bununla birlikte, kürleme işlemi sırasında özel ekipman ve hassas sıcaklık ve basınç kontrolü gerektirirler.

Islak serim tamiri, reçine emdirilmiş kumaşın hasarlı alan üzerine manuel olarak uygulanması ve ardından kürlenmesi ile gerçekleştirilen bir tamir metodudur. Bu yöntem, basitliği ve çeşitli onarım senaryolarına uyarlanabilirliği nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Islak serim tamirleri, kapsamlı ekipmana ihtiyaç duyulmadan yerinde gerçekleştirilebilir ve bu da onları saha tamirleri için daha uygun hale getirir. Alan yazın çalışmaları incelendiğinde, farklı kompozit malzemeler ve tamir yöntemleri kullanılarak, tamir uygulanan bölümlerin mekanik özellikleri araştırmacılar tarafından incelenmiştir.

Abanilla ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, dış güçlendirmede kullanılan ıslak serim grafit/epoksi kompozitlerin dayanıklılığını karakterize ederek nem alımının fiber-matris bağlanması ve genel hizmet ömrü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışma, ıslak serim tamirlerinin, uzun vadeli dayanıklılığı ve mekanik bütünlüğü korumanın zorluklarını vurgulamıştır (Abanilla vd., 2005).

Bir başka çalışmada Kumar ve Safiulla kompozit tamirleri için ıslak serim metoduna odaklanılarak çeşitli kompozit parçalar ve yapılar üzerinde çalışmışlardır. Islak serme onarımlarının maliyet açısından optimize edilebileceği, ancak elyaf hizalaması ve reçine içeriğindeki tutarsızlıklar nedeniyle mekanik performansta, kalite

kontrol zorluğu ve yüksek operatör bağımlılığı genellikle yetersiz kaldığı vurgusu yapılmıştır.(Kumar and Safiulla, 2015).

2017 yılında yayınlanan NIST destekli “Kompozit Tamir Teknoloji Yol haritası” adlı teknik kılavuzda, prepreg ve el yatırması yöntemleri genel olarak değerlendirilmiş el yatırması yöntemiyle yapılan tamirlerin değişken bir kaliteye sahip olduğu, prepreg tamirlerin bu değişkenliğin göstermediği belirtilmiştir. Çift vakumlu el yatırması uygulamalarının el yatırması performansını prepreg performansına yakınlatacağı belirtilmiştir (Staudenmann, 2017).

FAA tarafından 2017 yılında yürütülen “Round Robin Evaluation of CACRC Bonded Repairs” adlı çalışmada, çeşitli bakım merkezlerinde ve farklı teknik uzmanlar tarafından yapılan prepreg ve el yatırması tamirleri detaylı olarak test etmiştir. Elde edilen bulgulara göre el yatırması tamirlerinde teknisyenler arasında farklılık gözlemlendiği bildirilmiştir. Prepreg yöntemiyle yapılan tamirlerin genel olarak daha tutarlı ve güvenilir performans sergilediği bildirilmiştir (Round Robin Evaluation of CACRC Bonded Repairs, 2017).

Bunun yanında Sonat ve çalışma arkadaşları, sahada uygulanan CFRP laminatların hata davranışını ıslak serim ve prepreg teknikleri kullanarak karşılaştırmıştır. Islak serim tamirlerinin uygun olmasına rağmen, daha az kontrollü kürlenme ve reçine dağılımı nedeniyle prepreg onarımlarına kıyasla genellikle daha düşük mekanik performans ve dayanıklılıkla sonuçlandığını bulmuşlardır. Prepreg tamirlerinin, istenen mekanik özelliklere ulaşmada daha yüksek güvenilirlik ve tutarlılık nedeniyle, kritik CFRP uygulamalarında tercih edilen birincil yöntem olduğunu vurgulamışlardır. Çalışma, saha uygulamaları için otoklav dışı kürlenme tekniklerinin önemini ve prepreg malzemelerin yapısal bütünlüğü korumadaki faydalarını araştırmacılar ile paylaşılmıştır(Sonat vd., 2023).

Nanoteknolojideki son gelişmeler, grafen oksit gibi nano katkı maddelerinin dahil edilmesiyle, kompozit malzemelerin özelliklerini geliştirme potansiyelini ortaya çıkarmıştır. Grafen oksit, olağanüstü mekanik özellikleri, geniş yüzey alanı ve polimer matrislerle güçlü arayüzey etkileşimleri oluşturma kabiliyeti ile kompozit malzemelerin performansını artırmak için umut verici bir katkı maddesi olarak ortaya çıkmıştır. Çalışmalar, GO’ın dahil edilmesinin polimer matrislerin mukavemetini, rijitliğini ve dayanıklılığını önemli ölçüde artırabildiğini ve onları mekanik ve çevresel bozulmaya karşı daha dirençli hale getirdiğini göstermiştir (S. J. Lee vd., 2022) .

Bu bilgi ışığında, Rafiee ve çalışma arkadaşları yalnızca %0,1 oranında grafen içeren epoksi nanokompozitlerin çekme dayanımında yaklaşık %40'lık (kontrol gruba göre) ve elastik modülünde yaklaşık %31'lik artış sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca çentik çatlağı direncinde (Mode I fracture toughness) sağlanan yaklaşık %53'lük artış, GO'nun polimer matris içindeki etkin yük aktarım mekanizması sayesinde kompozitin kırılma tokluğunu önemli ölçüde yükseltebildiğini göstermektedir (Rafiee vd., 2009).

2016 yılında Pathak ve arkadaşları GO, karbon fiberler ve epoksi reçine içeren hibrit kompozitler üzerinde çalışmışlardır. GO'nun matris içinde homojen dağılımına bağlı olarak gerilme mukavemeti, modül ve toklukta önemli gelişmeler olduğu ve GO'in takviye edici etkisi sayesinde CFRP kompozitlerinin yapısal özelliklerini geliştirdiği gözlemlenmiştir (Pathak vd., 2016).

Bir başka çalışmada ise Jiang ve arkadaşları karbon lif yüzeyine uygulanan elektrokimyasal oksidasyon sonrası grafen oksit (GO) kaplamalı CFRP kompozitlerin mekanik performansını incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan GO, karbon lifleri üzerine güçlü kimyasal bağlarla tutunarak arayüz etkileşimini güçlendirmiştir. Ara-yüzey kayma mukavemeti (ILSS) yaklaşık %59,4 artış göstermiştir. Basınç mukavemeti ise %12,8 oranında yükselmiştir, Mikroyapısal analizlerde GO tabakasının düzgün bir dağılım sağladığı ve lif-matris aralığını kuvvetli kimyasal etkileşimle desteklediği belirtilmiştir (Jiang vd., 2017).

2019 yılında ise Hung ve arkadaşları 0,25 wt% ve 0,5 wt% GO katkısının oda ve kriyojenik sıcaklıklarda CFRP kompozitlerin eğilme dayanımı ve modülünü yaklaşık %20–54 oranında artırdığını; ancak daha yüksek GO konsantrasyonlarında aglomerasyon nedeniyle mekanik performansın düştüğünü belirtmiştir. Ayrıca orijinal CFRP'lerde kriyojenik ortamda eğilme dayanımı ve modülünde sırasıyla %8,74 ve %10,63'lük düşüş yaşanırken, GO katkısı bu düşüşleri %1,15 ve %2,09 seviyelerine kadar sınırlamıştır (Hung vd., 2019).

Gerçekleştirilen çalışmalardan da görüldüğü üzere, GO dahil edilmesinin kompozit yapıların mukavemetini, rijitliğini ve dayanıklılığını önemli ölçüde artırabildiğini ve onları mekanik ve çevresel bozulmaya karşı daha dirençli hale getirdiğini göstermiştir (Su vd., 2014). Bunun yanında, GO'in değişen konsantrasyonlarında olumsuz etkilere de sebebiyet vereceği rapor göstermiştir (Zeinedini and Shokrieh, 2024)

Bu bilgiler ışığında, bu tez çalışmasında, CFRP yapılarda ıslak serim tamir yönteminde matris yapısında GO varlığının etkisinin, mekanik özellikler üzerinde yapacağı etkinin araştırılması amaçlanmaktadır. Tamir uygulanan bölümlerin mekanik özelliklerinin geliştirilerek, performansın prepreg onarımlarinkine yaklaştırılabileceği ön görülmektedir. Bu yaklaşım ile havacılık ve uzay uygulamalarında CFRP yapıların güvenilirliğini ve uzun ömürlülüğünü sağlayan, daha verimli ve etkili bir onarım tekniğinin ortaya konulması amaçlanmaktadır. Böylelikle çalışmanın sonuçları, kompozit tamir metodolojilerinde önemli ilerlemelere yol açabilecek ve sonuçta havacılık endüstrisinde daha güvenli ve daha uygun maliyetli tamir uygulamalarına katkıda bulunabilecektir.



6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Kullanılan Ekipman ve Cihazlar

Deneyisel çalışmalarda kullanılan malzemeler Tablo 6.1.'de cihaz ve ekipmanlar Tablo 6.2.'de belirtilmiştir.

Tablo 6.1. Deneyisel çalışmalarda kullanılan malzemeler

Malzeme adı	Malzeme açıklama	Tedarikçi firma
Grafit	≥ %98 saflıkta grafit	Sigma-Aldrich
H ₂ O ₂	%30 derişimde hidrojen peroksit çözeltisi	Sigma-Aldrich
NaOH	≥ %99 saflıkta Sodyum hidroksit	TEKKİM
H ₂ SO ₄	%95-98 derişimde sülfirik asit çözeltisi	TEKKİM
NaNO ₃	≥ %99 saflıkta sodyum nitrat	Sigma-Aldrich
KMnO ₄	≥ %99 saflıkta potasyum permangat	ISOLAB
HCl	≥ %37 derişimde Hidroklorik asit çözeltisi	ISOLAB
IPA	Izopropil alkol	TEKKİM
A4000RP	Delikli ayırıcı folyo	Airtech
WRIGTHLON5200	Deliksiz ayırıcı folyo	Airtech
GS213-3	Macun bant	Airtech
FREEKOTE NC770	Kalıp ayırıcı	Henkel
Airweave N10	Emme Kumaşı	Airtech
M21/40%/285T2/ AS4C-6K 2x2 Twill	Prepreg	Hexcel
FM300K	Film yapıştırıcı	Cytec
G0807 7 1000	Kuru karbon kumaş	Hexcel
EA9396	Epoksi reçine	Henkel

Tablo 6.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan cihaz ve ekipmanlar

Cihaz Adı	Cihaz Firması	Açıklamalar
NICOLET iS10	Thermo Fisher Scientific	Fourier dönüşümlü kızılötesi (FT-IR) spektrumları, 400 ile 4000 cm ⁻¹ dalga boyu aralığında ölçümler alınmıştır.
JSM 5600	JEOL	Taramalı elektron mikroskobu. Analizler sırasında uygun hızda tarama ve uygun büyütme (10.000k X) seviyeleri kullanılarak incelemeler yapılmıştır.
JSM 5600	JEOL	SEM cihazına entegre Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX) analizi gerçekleştirilmiştir.
RINT-2000	Rigaku	X-Işını Kırınımı. Ölçümler, Cu-K α (λ = 1.5406 Å) radyasyonu kullanılarak 35 kV tüp voltajında ve 1°/dk tarama hızıyla, 5°–70° 2 θ aralığında gerçekleştirilmiştir.
FE60RLX	FE Powertools	580 devir/dk hızda GO süspansiyon karıştırma işlemleri mikser ucu kullanılarak yapılmıştır.
Kurutma fırını	Istaş	40 °C de süspansiyon kurutma işlemleri ve 75°C de el yatırması reçinesi kürlleme işlemleri uygulanmıştır.
Otoklav	Sistemteknik	7 bar basınç altında 180 °C prepreg kürlleme işlemleri uygulanmıştır.

6.2. GO Sentezi

Matris yapısında GO varlığının etkisinin, mekanik özellikler üzerinde yapacağı etkinin araştırılması amacıyla, öncelikli olarak GO sentezi gerçekleştirilmiştir.

GO sentezi, klasik Hummers yöntemine belirli modifikasyonlar uygulanarak gerçekleştirilmiştir (Hummers and Offeman, 1958). Bu kapsamda, 5 g grafit ve 2,5 g sodyum nitrat, 115 mL derişik sülfürik asit içerisine alınmış ve buz banyosunda manyetik karıştırma yardımıyla yaklaşık 40 dakika süreyle homojen bir karışım elde edilene dek karıştırılmıştır. Belirtilen sürenin ardından, ekzotermik reaksiyon sebebiyle karışıma yavaş ve kontrollü biçimde toplam 15 g KMnO₄ ilave edilmiş ve 1 saat daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. KMnO₄ eklenmesiyle birlikte çözeltide kahverengimsi-yeşil bir renk değişimi gözlenmiştir.

Bu işlem sonrasında reaksiyon ortamının sıcaklığı 35 °C'ye ulaştıktan sonra karışıma 500 mL deiyonize su dikkatlice eklenmiş ve bu işlem sırasında sıcaklık yaklaşık 90 °C'ye kadar yükselmiştir. Sıcaklık artışının 90 °C'yi geçmemesi için gerekli kontroller sağlanmıştır. Sonrasında çözelti, su banyosu yardımıyla soğutularak yaklaşık 30 dakika daha karıştırılmıştır. Bu işlem tamamlandıktan sonra, 40 °C'ye getirilen

karışıma 10 mL oranında %30'luk H_2O_2 çözeltisi takribi 5 dakika sürecek şekilde damla damla eklenmiştir. Bu süre sonunda çözeltinin renginde açık kahveden sarıya geçiş gözlemlenmiştir.

Reaksiyon tamamlandıktan sonra elde edilen süspansiyon, oda sıcaklığında 24 saat boyunca karıştırılmıştır. Bu sürecin ardından, çözelti 1:1 oranında seyreltilerek süzme işlemi yapılmıştır. Elde edilen katı ürün, önce %10'luk hidroklorik asit çözeltisi ile yıkanarak metal iyonlarından arındırılmış, daha sonra nötr pH seviyesine ulaşana dek deiyonize su ile yıkama işlemine devam edilmiştir. Nihai ürün, 70 °C sıcaklıkta kurutularak saf GO elde edilmiştir. Sentez sürecine ilişkin seçilmiş aşamalar Şekil 6.1'de sunulmaktadır.



Görsel 6.1. GO sentezi ait bazı reaksiyon basamakları

Elde edilen GO'nin Fourier dönüşümlü kızılötesi (FT-IR) spektrumları, Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) analizi ve SEM cihazına bütünleşmiş Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDX) ve yapısal özelliklerin belirlenmesi için X-Işını Kırınımı (XRD) analizi yapılmıştır.

6.3. Kompozit Plaka Tamirlerinin Deneysel Uygulamaları

Bu çalışmada, farklı oranlarda grafen oksit (GO) katkısının epoksi reçine içerisine dispersiyonu sağlanarak, elde edilen kompozit malzemeyle prepreg tamirine yakın gerilme dayanımı performansı elde edilmesi amaçlanmaktadır.

Bu amaçla, Tablo 6.1.'de de görüldüğü üzere, farklı tamir türleri seçilerek, uygun reçine ve elyaf türleri kullanılmış ve değişen oranda GO katkısı kullanılarak çalışmalara başlanmıştır.

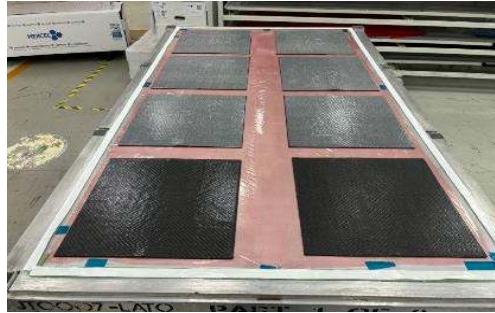
Tablo 6.3. Tamir uygulamaları deney tasarım tablosu

Tamir Türü	Reçine tipi	Elyaf türü	GO yüzdesi
Prepreg tamiri (PP)	M21/40%/285T2/ AS4C	Carbon 6K-2x2 twill	-
El yatırması tamiri-2,5 (EY-2,5)	EA9396	Hexcel G0807 7 1000	%2,5
El yatırması tamiri-0,5 (EY-0,5)	EA9396	Hexcel G0807 7 1000	%0,5
El yatırması tamiri-0,3 (EY-0,3)	EA9396	Hexcel G0807 7 1000	%0,3
El yatırması tamiri (EY)	EA9396	Hexcel G0807 7 1000	-

6.4. Polimer Matris Kompozit Plakaların Üretimi

Havacılık sektöründe kompozit malzemeler kullanılırken yüksek performans ve düşük hata toleransı nedeniyle genellikle prepreg serim metodu tercih edilmektedir. Bu nedenle bu çalışma sırasında tamir öncesi ana yapıyı oluşturacak polimer matrisli kompozit yapı için Hexcel M21/40%/285T2/ AS4C-6K 2x2 twill malzemesi tercih edilmiştir.

Prepreg serim işlemlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla, temiz oda içerisinde düz bir metal takım üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Serim işlemi öncesinde panellerin yüzeye yapışmasını önleme adına Henkel FREKOTE NC 770 uygulanmıştır. Serim işlemleri Simetri ve kompozit yapıdaki dengeyi bozmamak adına dengeli bir şekilde aynı yönde serilmiştir. Her iki kat seriminden sonra ara vakum işlemi uygulanmış ve katların birbirlerine daha iyi tutunmaları hedeflenmiştir. Plakalar toplam 8 prepreg malzeme serilerek üretilmiştir. Plaka ölçüleri 400 mm x 400 mm olacak şekilde hazırlanmıştır. Görsel 6.2 deneysel süreçlere ait gerçek görseldir ve prepreg işlemine ait serim işlemini göstermektedir.



Görsel 6.2. Prepreg serim uygulaması

Serim işlemi tamamlandıktan sonra prepreg malzemelerin üzerine reçinenin yapıdan ayrılmasını engellemek ve homojen bir basınç uygulayabilmek amacıyla ilk önce deliksiz ayırıcı folyo yerleştirilmiş ve sonrasında Airtech N10 hava geçirgen kumaş serimi yapılmıştır. Daha sonrasında üzerine vakum torbası serilerek vakum işlemi uygulanmıştır. Görsel 6.3 vakum işlemine ait görseldir.



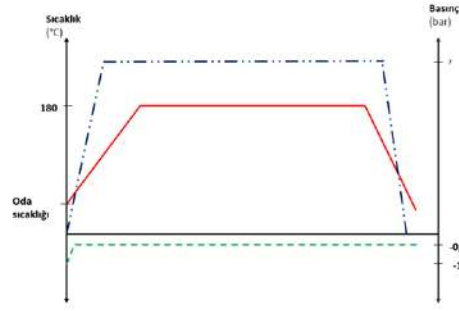
Görsel 6.3. Vakum paketine alınmış otoklav a girmeye hazır plaka deney plakaları görseli

Vakum işleminde tam vakum olarak -900 mbar basınç vakum uygulanmıştır. Vakum torbası paketi içerisinde herhangi bir hava kaçağı olmadığından emin olmak adına kaçak testi uygulanmıştır. Bu test esnasında vakum motoru ile paket arasındaki bağlantı kesilmiş ve 10 dk boyunca en fazla 20mbar basınç düşüşü olup olmadığı gözlenmiş ve herhangi bir kaçak tespit edilmemiştir. Şekil 6.3'te vakum paketine alınmış ve kürlenemeye hazır plaka görselleri bulunmaktadır.

Test sonrası vakum torbalama işlemi uygulanmış takım otoklav içerisine yerleştirilmiştir.

Prepreg işlemi için belirlenen reçineye ait otoklav kürlenme prosedürü;

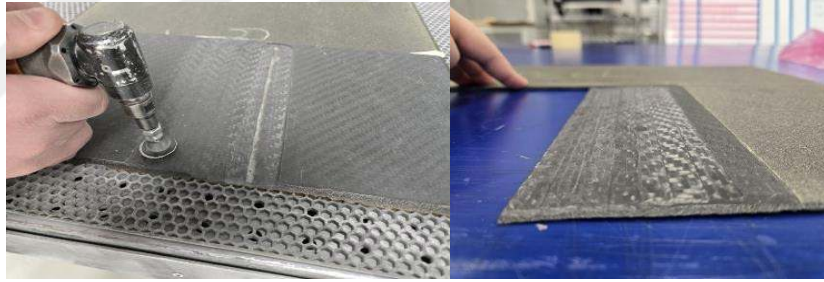
1. 1 bar basınç altında tam vakum uygulanır.
2. Otoklav basıncı 7 bar değere çıkarılır.
3. Otoklav basıncı yaklaşık 1 bar'a ulaştığında, vakum değerini -0.2 bar güvenlik seviyesine düşürülür.
4. Ortam sıcaklığından 180°C $\pm$ 5°C'ye ısıtma hızını ayarlanır. Bu ayar, parçanın gerçek ısınma hızının dakikada 1–2°C arasında olmasını sağlamalıdır.
5. 180°C $\pm$ 5°C sıcaklıkta 120 dakika $\pm$ 5 dakika boyunca kürlenme sürdürülür.
6. Soğutma hızı dakikada 2–5°C olacak şekilde ayarlayarak parçayı soğutulur.
7. Parça 60°C (140°F) veya daha düşük sıcaklığa ulaştığında otoklav basıncı boşaltılır.



Şekil 6.1. Otoklav kürleme reçetesi

6.4.1. Plakalardan kat kaldırma işlemi

Kürleme işlemi tamamlanan plakalar tamir işlemini simüle etmek için ortadan kesilmiş ve Görsel 6.4'te belirtildiği gibi 10 mm'lik adımlar halinde kaldırılmıştır. Kaldırma işlemi sırasında basınçlı havalı dairesel zımpara makinesi ve 80 grid zımpara kullanılmıştır. Ayrıca bindirme katı için ise yüzey sadece pürüzlendirilmiştir.



Görsel 6.4. Plaka üzerinden kademeli kat kaldırma işlemi

6.4.2. Tamir İşlemleri

Bu çalışmada tamir işlemi prepreg tamiri ve el yatırması tamiri olmak üzere iki farklı metot kullanılmıştır. GO katkılı tamirler el yatırması metodu ile gerçekleştirilmiştir.

6.4.3. Prepreg tamiri

Kat kaldırma işlemi uygulanmış olan plaka serim takımına yerleştirilmiştir. Kompozit plaka ile prepreg katları arasında yapışmayı sağlanması adına merdiven adımlarına ve serim yapılacak olan bölgeye kadar Cytec FM300K film yapıştırıcı uygulanmıştır. Daha sonrasında ana yapıyla aynı olan Hexcel M21/40%/285T2/ AS4C-

6K 2x2 Twill prepreg malzemesi ile serim işlemi yapılmıştır. Her iki serim katında bir olası hava boşluklarını azaltmak ve yapışmayı artırmak adına ara vakum işlemi uygulanmıştır. Serim işlemi tamamlandıktan sonra ana yapı üretimiyle aynı 6.1 bölümünde bahsedilen kurlenme prosedürü uygulanmıştır.

6.4.3.1. El yatırması tamiri

El yatırması tamir uygulamasında takviye kumaşı olarak Hexcel G0807 7 1000 malzemesi kullanılmıştır. Matris fazı için ise Henkel EA9396 AERO kullanılmıştır. Reçine emdirme işlemi öncesinde Görsel 6.5'te olduğu gibi serim katlarına göre şablon çıkarılmıştır.



Görsel 6.5. Tamir uygulanacak katların şablonun çizilmesi



Görsel 6.6. Kuru kumaşın reçine ile ıslatılması ve spatula yardımıyla emdirilmesi

Takviye kumaşına reçine Görsel 6.6 da olduğu gibi spatula yardımıyla reçine emdirilmiştir. Reçine emdirilmiş kumaşın her iki yüzeyi koruyucu folyo ile kaplanmış

daha sonrasında tamir planına uygun şekilde Görsel 6.7’deki gibi kesilmiştir. Her iki folyo da serim işlemi öncesinde yüzeyden kaldırılmıştır.



Görsel 6.7. *Reçine emdirilmiş kumaşların şablona uygun şekilde kesilmesi*

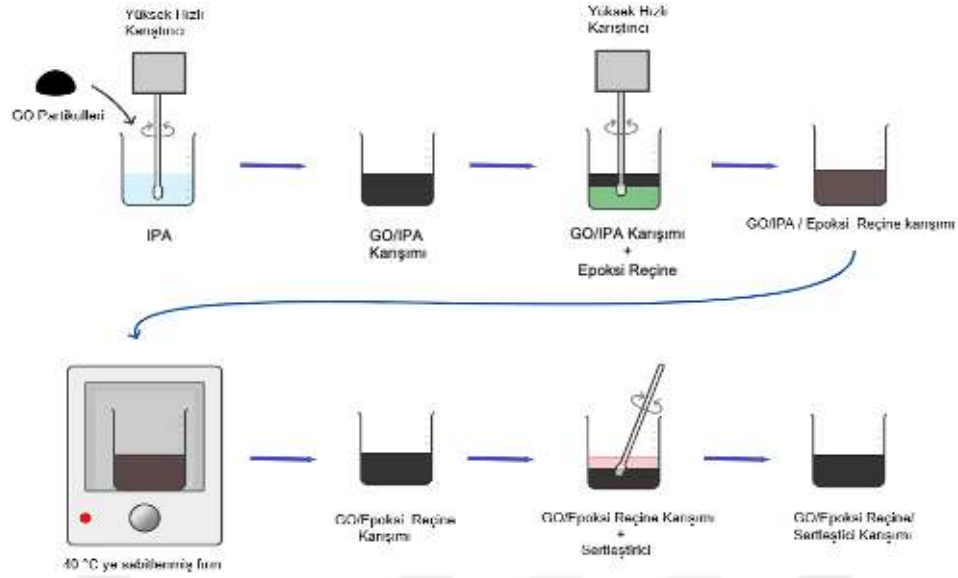
Reçine emdirilmiş olan katlar serim planına uygun şekilde sırasıyla Görsel 6.8 deki gibi yerleştirilmiştir. Vakum paketine uygulanmış ve 75 °C de 2 saat kürlenmiştir.



Görsel 6.8. *Islatılmış olan kumaşların serim planına göre uygun şekilde yerleştirilmesi*

6.4.3.2. GO katkılı el yatırması tamiri

Sentezlenen GO Şekil 6.2’deki gibi IPA içinde yüksek hızlı karıştırıcı kullanılarak süspansiyon oluşturulmuştur. IPA içerisinde GO’in tabakalarına ayrılması ve 2 boyutlu yapı oluşturması hedeflenmiştir. Daha sonrasında karışım sertleştirici eklenmemiş olan EA9396 Aero reçinesi ile yüksek hızlı karıştırıcı kullanılarak karıştırılmıştır. Alkolün yapıdan uçurulması için karışım 12 saat boyunca 40 °C ‘de bekletilmiştir. Yapıdan alkol buharlaştırılarak uzaklaştırılmıştır. GO reçine karışımı sonrasında sertleştirici ile karıştırılmış ve 6.2.3.2 de belirtilen prosedür uygulanmıştır.

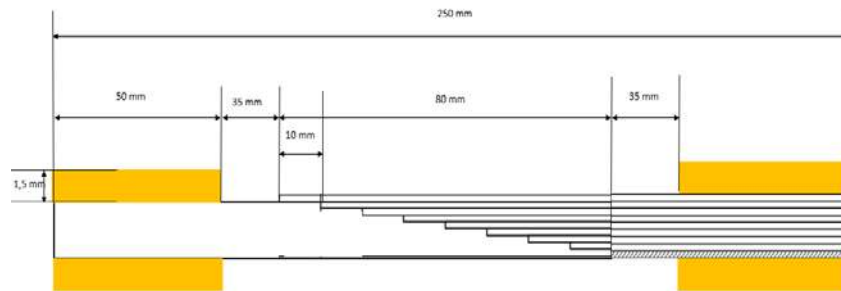


Şekil 6.2. GO'in reçineye eklenme prosedürü

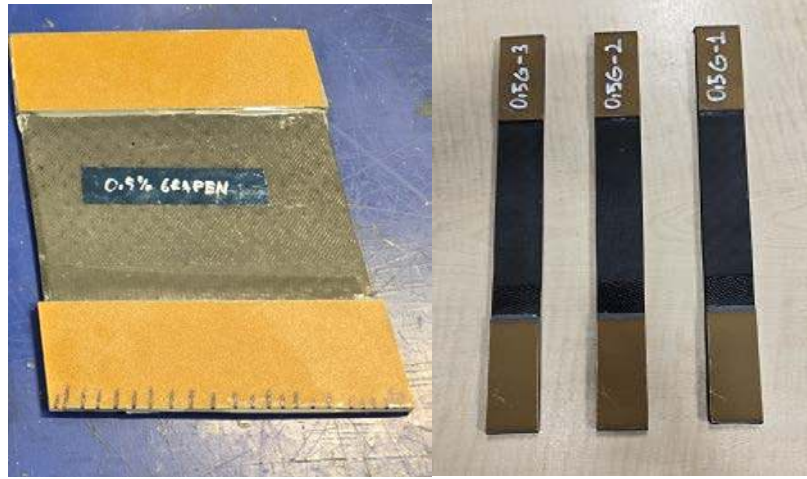
6.5. Gerilme Mukavemeti Testi

Tamir işlemi uygulanan plakaların her birine gerilme testi uygulaması için 1,5 mm kalınlığında 50 mm genişliğinde tabler yapıştırılmıştır. Yapıştırma işlemi için Henkel Ea9394 kullanılmıştır.

Tab yapıştırma işlemi uygulanmış 400 x 400 mm büyüklüğündeki plakalardan 25mm genişliğinde 250 mm uzunluğunda test kuponları Şekil 6.3 teki gibi 3 eksen freze yardımıyla kesilerek çıkartılmıştır.



Şekil 6.3. Test kuponu boyutsal ölçüleri



Görsel 6.9. Test kuponu kesimi öncesi ve sonrası plaka görselleri

Test işlemleri sırasında Instron 5985 cihazı kullanılmıştır. Çekme testi için ASTM D8131 standardı referans alınmıştır. Çekme testi Görsel 6.10 daki gibi 2 mm/dak hızda gerçekleştirilmiştir.



Görsel 6.10. Test cihazına bağlanmış test kuponu görseli

7. TARTIŞMA

7.1. Karakterizasyon

Elde edilen GO'nın FT-IR spektrumları, SEM analizi ve SEM cihazına bütünleşmiş EDX ve XRD analizi yapılmıştır.

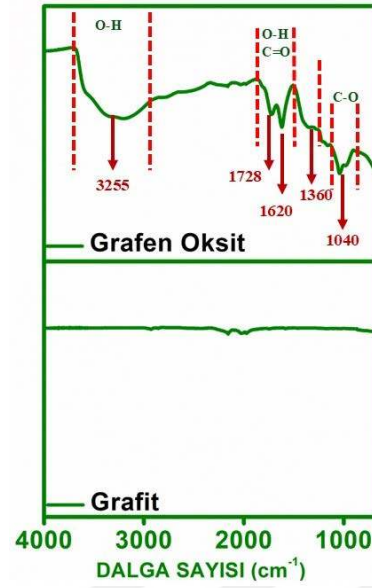
Grafit ve grafen oksit (GO) örneklerine ait FTIR spektrumları Şekil 7.1'de sunulmaktadır. Grafit spektrumunda, yapısal olarak oldukça saf ve oksijen içeriği düşük bir karbon formu olması nedeniyle karakteristik fonksiyonel grup bantlarına rastlanmamaktadır.

Buna karşılık, GO spektrumu incelendiğinde, yapının oksijen içeren çeşitli fonksiyonel gruplarla fonksiyonlandırıldığını açıkça göstermektedir. GO spektrumunda yaklaşık 3255 cm^{-1} civarında geniş bir pik gözlenmiş olup, bu bant hidroksil ($-\text{OH}$) gruplarına karşılık gelmektedir. Bu geniş bant, GO yüzeyinde bol miktarda bulunan hidroksil gruplarının varlığını doğrulamaktadır.

Yaklaşık 1728 cm^{-1} bölgesinde gözlenen belirgin pik, karboksil ($\text{C}=\text{O}$) gruplarına işaret etmektedir. Bu pik, özellikle kenar bölgelerdeki oksijenli fonksiyonel grupların göstergesi olarak kabul edilmektedir. 1620 cm^{-1} civarında gözlenen pik ise, $\text{C}=\text{C}$ aromatik halkaların gerilme titreşimlerine karşılık gelmektedir ve GO yapısında kısmen korunan sp^2 hibritleşmiş karbon iskeletinin varlığını göstermektedir.

Ayrıca, $1360\text{--}1040\text{ cm}^{-1}$ aralığında gözlemlenen pikler, sırasıyla epoksi ($\text{C}-\text{O}-\text{C}$) ve alkoksi ($\text{C}-\text{O}$) gruplarına karşılık gelmekte olup, GO yapısının hem bazal düzleminde hem de kenarlarında çeşitli oksijenli grupların mevcudiyetini desteklemektedir.

Bu sonuçlar, grafitin oksidasyonu sonucu oluşan grafen oksidin yüzeyinin hidrofilik özellik kazandığını ve yapısına çok sayıda oksijenli fonksiyonel grup eklendiğini göstermektedir. FTIR spektrumları, grafitin kimyasal olarak modifiye edilerek grafen okside dönüştürüldüğünü ve bu dönüşümün başarılı bir şekilde gerçekleştiğini doğrulamaktadır.



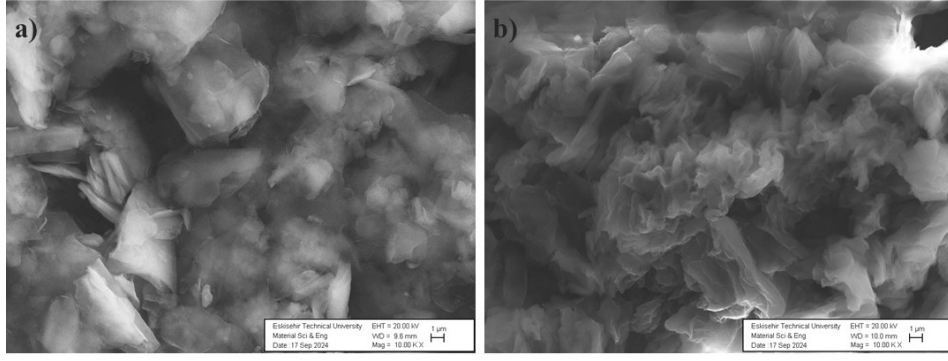
Şekil 7.1. Grafit ve GO FT-IR Spektrumları

Görsel 7.1, grafit (a) ve GO (b) örneklerine ait SEM görüntülerini içermektedir. 10.000X büyütme oranında SEM görüntüleri alınarak, alınan görüntüler, iki malzeme arasındaki mikroyapısal farklılıkları doğrudan karşılaştırmaya olanak sağlamıştır.

Görsel 7.1'a. incelendiğinde grafen örneğine ait oldukça düzgün, keskin kenarlı ve tabakalı bir yapı dikkat çekmektedir. Yüzey, büyük ölçüde homojen olup, yaprak benzeri yapılar üst üste yığılmış bir biçimde düzenlenmiştir.

Görsel 7.1b. incelendiğinde ise GO'ye ait belirgin bir morfolojik düzensizlik gözlemlenmektedir. Yüzey yapısının daha kıvrımlı olduğu ve katmanlar arası boşlukların artmış olup, yüzey alanının genişlediği, tabakaların birbirinden kısmen ayrıldığı ya da kırıldığı bölgeler tespit edilebilmektedir. Bu düzensizlik, GO'ın üretimi sırasında yapılan kimyasal oksidasyon işlemi sonucunda yapıya entegre edilen oksijenli fonksiyonel gruplardan kaynaklanmaktadır. Fonksiyonel gruplar hem tabakalar arası hidrojen bağları hem de yüzey pürüzlülüğü oluşturarak grafen oksidin hem yapısal hem de mekanik özelliklerini değiştirmektedir.

Sonuç olarak, Grafit ve GO arasında mikroyapısal düzende farklılaşma açıkça görülmektedir. Bu da GO'ın başarılı bir şekilde sentezlendiğini doğrulamaktadır.



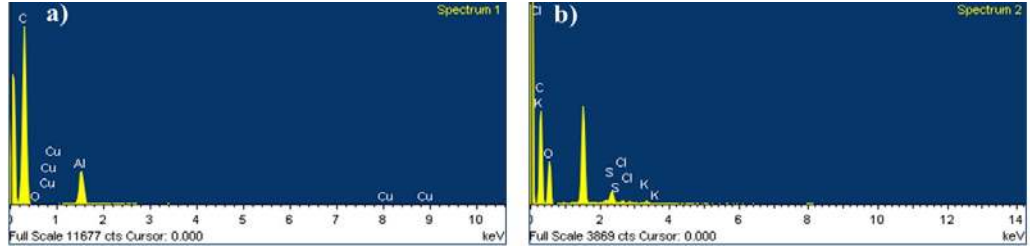
Görsel 7.1. 10.000X büyütme oranına ait Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri a) Grafit ve b) GO

Ayrıca grafit ve GO'nin kimyasal bileşimlerini incelemek amacıyla gerçekleştirilen EDX analizlerinden elde edilen spektrumlar Şekil 7.2'da sunulmuştur. Bu analiz, her iki malzemenin yüzeyindeki elementel dağılımı niteliksel ve yarı nicel olarak ortaya koymuş; GO sentez sürecinin başarıyla gerçekleştiğini doğrulamıştır.

Grafite ait EDX spektrumunda (Şekil 7.2), yüksek yoğunluklu ve keskin bir karbon (C) piki dikkat çekerken, oksijen (O) piki oldukça düşük düzeydedir. Bu sonuç, grafit örneğinin yüksek saflıkta karbon yapısı içerdiğini göstermektedir. Nicel değerlere göre grafit, %96,43 oranında atomik karbon ve %3,57 oranında oksijen içermektedir. Bu yapı, grafenin iki boyutlu sp^2 hibritleşmiş karbon atomlarından oluşan, düzenli ve kristalin yapısını desteklemektedir.

Öte yandan, GO'e ait spektrumda karbon pikinin zayıfladığı, oksijen pikinin ise belirgin şekilde arttığı gözlemlenmektedir. GO, %64,46 oranında atomik karbon ve %34,96 oranında atomik oksijen içeriğiyle, oksijenli fonksiyonel grupların (hidroksil, epoksit ve karboksil) yapıya başarıyla entegre edildiğini göstermektedir. Bu dönüşüm, grafen oksidin yapısal ve kimyasal özelliklerini doğrudan değiştirmiştir. Artan oksijen içeriği, GO'yu daha hidrofilik hâle getirerek özellikle yüzey modifikasyonu gerektiren uygulamalarda —örneğin kompozit malzeme üretimi veya polimer matrislerle etkileşim gibi alanlarda— önemli avantajlar sağlamaktadır.

EDX analizinden elde edilen bu veriler, sentez süreci sonucunda grafitin kimyasal olarak başarılı bir biçimde oksitlendiğini ortaya koymakta ve literatürde tanımlanan GO özellikleriyle uyumlu bir dönüşümü doğrulamaktadır (Akhtar vd., 2024).



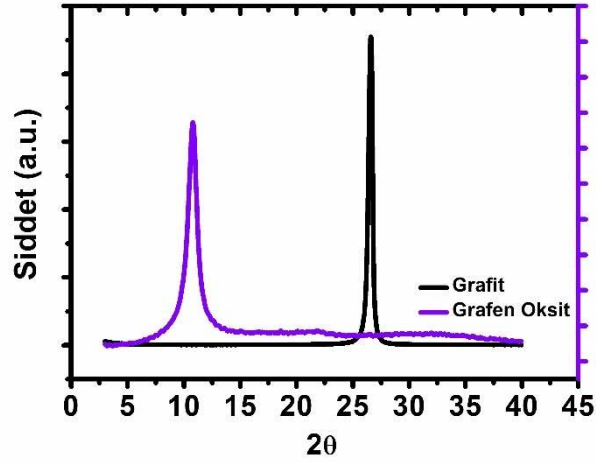
Şekil 7.2. a) Grafit ve b) GO'e ait EDX grafikleri

Bunun yanında, grafit ve GO örneklerine ait XRD desenleri Şekil 7.3'te sunulmuştur. Grafit örneğine ait XRD deseninde, yaklaşık $2\theta \approx 26,5^\circ$ açısında gözlenen keskin ve yoğun pik, (002) düzlemine karşılık gelmekte olup, grafitin kristalin yapısının tipik bir göstergesidir. Bu pik, grafitin düzgün katmanlar hâlinde dizilmiş, yüksek düzenlilik gösteren sp^2 hibritleşmiş karbon atomlarından oluştuğunu göstermektedir.

GO'e ait desen incelendiğinde ise, kristalin yapının önemli ölçüde bozulduğu ve yeni bir difraksiyon piki oluştuğu gözlemlenmektedir. GO için yaklaşık $2\theta \approx 10,5^\circ$ civarında belirgin bir pik ortaya çıkmıştır. Bu pik, (001) düzlemine karşılık gelmekte olup, grafen oksidin katmanlar arası mesafesinin (d-aralığı) arttığını göstermektedir. Bu artış, oksijenli fonksiyonel grupların (hidroksil, epoksi, karboksil) grafen katmanları arasına yerleşmesi sonucu meydana gelen şişme etkisinden kaynaklanmaktadır. Katmanlar arası mesafedeki bu artış, Bragg denklemi ($n\lambda=2d\sin\theta$) uyarınca, difraksiyon açısının düşmesine neden olmaktadır.

Bununla birlikte, GO spektrumunda grafitte ait $26,5^\circ$ civarındaki (002) pikin kaybolduğu veya ciddi şekilde zayıfladığı görülmektedir. Bu durum, grafitin oksidasyonu sonucunda yapının düzenli kristal formunun bozulduğunu ve daha amorf bir yapıya dönüştüğünü göstermektedir. GO'teki bu yapısal düzensizlik, yüzeyde ve katmanlar arasında rastgele dağılmış oksijenli fonksiyonel gruplarla ilişkilendirilmektedir.

Bu veriler, grafitin başarılı bir şekilde oksitlendiğini ve grafen oksit formuna dönüştürüldüğünü güçlü bir şekilde desteklemektedir. XRD analizinden elde edilen bulgular, FTIR verileriyle de uyumlu olup, grafen oksit yapısının hem kimyasal hem de kristal yapısal açıdan önemli değişikliklere uğradığını ortaya koymaktadır.

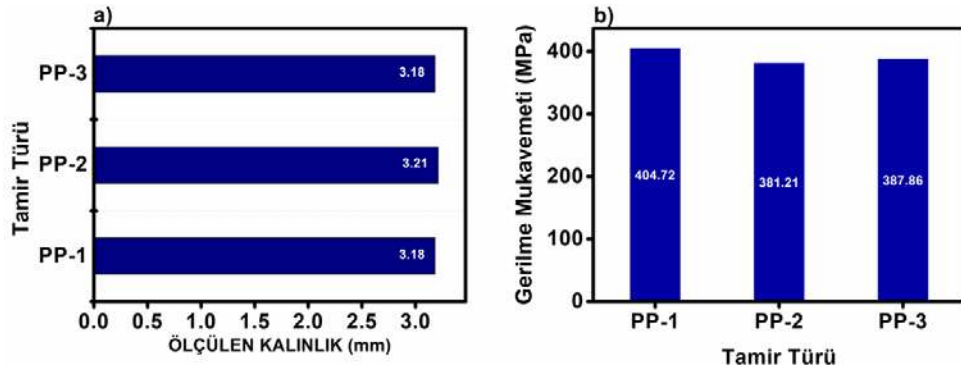


Şekil 7.3. Grafit ve GO'e ait XRD grafiği

7.2. Prepreg ve Islak Serim Tamir Yöntemi ile Onarılan CFRP Numunelerin Kalınlık ve Gerilme Performanslarının Değerlendirilmesi

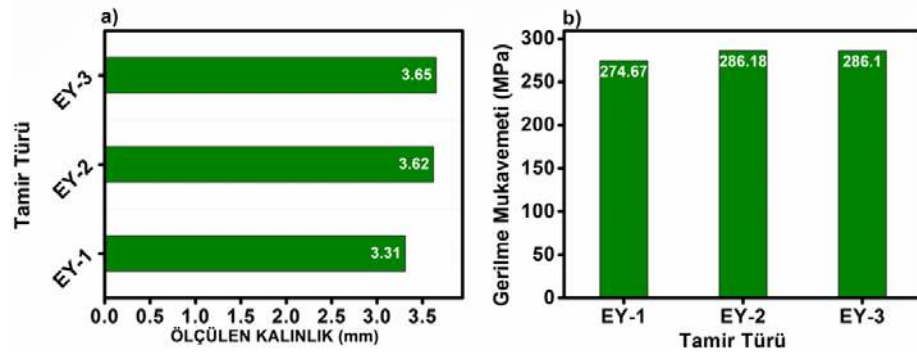
Bu tez çalışmasında, CFRP yapıların onarımında yaygın olarak kullanılan prepreg ve ıslak serim yöntemlerinin mekanik performansları karşılaştırmalı olarak incelenmiş, özellikle ıslak serim yöntemiyle uygulanan tamirlerde GO katkısının etkisi araştırılmıştır. Araştırmanın temel amacı, GO katkısının matris yapısına entegre edilmesiyle ıslak serim onarımlarının mekanik özelliklerinin iyileştirilerek, prepreg temelli onarımlara yakın bir performans sergilemesinin mümkün olup olmadığını ortaya koymaktır.

Referans alınan prepreg tamir yöntemiyle elde edilen kompozit yapının kalınlığı yaklaşık 3,19 mm olup, elde edilen maksimum gerilme mukavemeti ortalama 391,26 MPa olarak ölçülmüştür (Şekil 7.4). Bu değer, çalışma kapsamında kıyaslama için esas alınan üst sınırı temsil etmektedir.



Şekil 7.4. Prepreg (PP) tamir yöntemi için a) Kompozit yapının kalınlığı ve b) Ölçülen gerilme mukavemeti değerleri

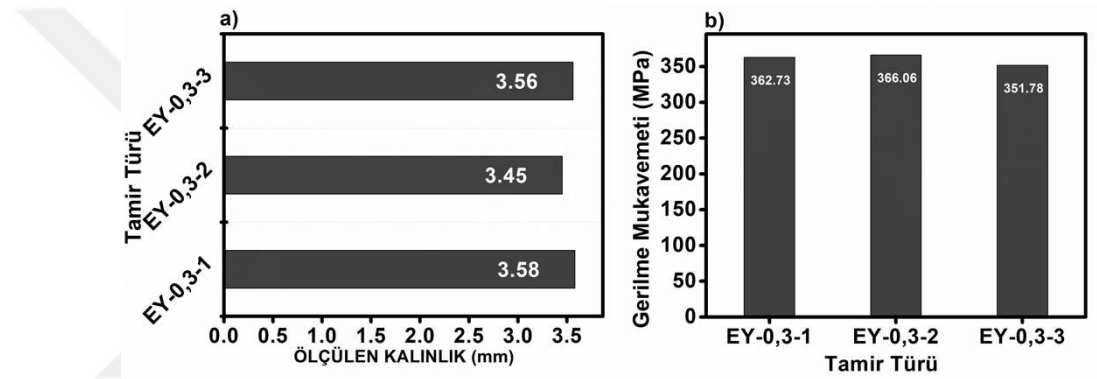
Islak serim yöntemiyle onarılmış numunelerde ise GO katkısının oranına bağlı olarak gerilme mukavemetinde anlamlı değişiklikler gözlemlenmiştir. GO katkısı içermeyen ıslak serim örneğinde (kontrol grubu), kalınlık yaklaşık 3,53 mm olup, elde edilen maksimum gerilme mukavemeti ortalama 282,32 MPa'dır (Şekil 7.5).



Şekil 7.5. Islak Serim (EY) tamir yöntemi için a) Kompozit yapının kalınlığı ve b) Ölçülen gerilme mukavemeti değerleri

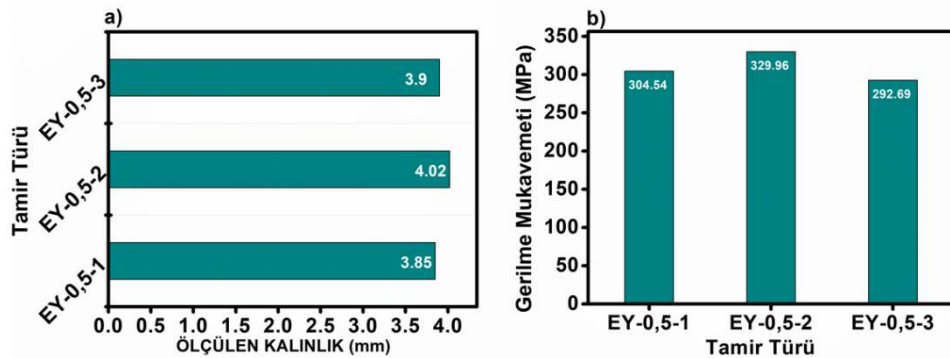
Bu değer, prepreg yöntemiyle elde edilen mukavemetin oldukça altında kalmakta ve ıslak serim yönteminin sınırlayıcı yönlerini yansıtmaktadır. Bu amaçla, GO katkısının matris yapısına entegre edilmesiyle ıslak serim onarımlarının mekanik özelliklerini iyileştirilerek, prepreg temelli onarımlara yakın bir performans sergilemesinin mümkün olup olmadığını araştırılmıştır.

%0,3 oranında GO ilavesi yapılan numunede kalınlık 3,53 mm olarak ölçülmüş ve gerilme mukavemeti ortalama 309,06 MPa seviyesine yükselmiştir. Bu sonuç, düşük oranlı GO katkısının matris içerisinde homojen dağılım göstererek lif-matris arayüzünü güçlendirdiğini ve mekanik dayanımı artırdığını düşündürmektedir (Şekil 7.6).



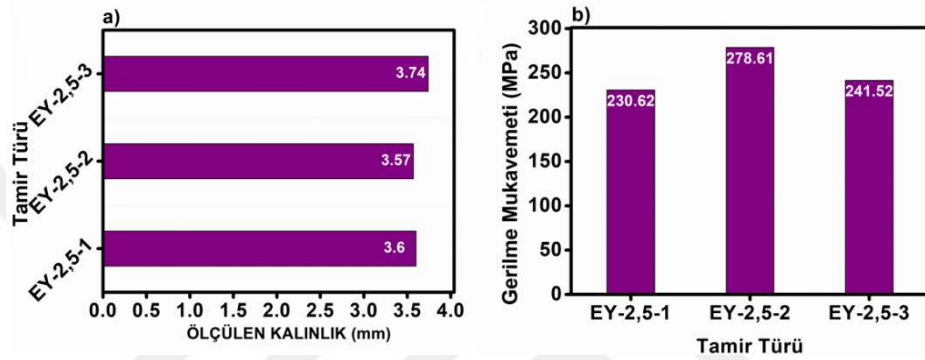
Şekil 7.6. Islak Serim (EY) tamir yöntemi için %0,3 GO katkılı a) Kompozit yapının kalınlığı ve b) Ölçülen gerilme mukavemeti değerleri

GO oranının %0,5'e çıkarılmasıyla hazırlanan numunede kalınlık 3,90 mm ve gerilme mukavemeti ortalama 360,19 MPa düzeyine ulaşmıştır. Bu değer prepreg örneğine önemli ölçüde yaklaşmıştır (Şekil 7.7).



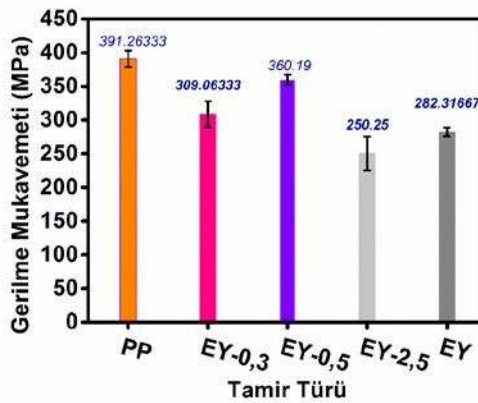
Şekil 7.7. Islak Serim (EY) tamir yöntemi için %0,5 GO katkılı a) Kompozit yapının kalınlığı ve b) Ölçülen gerilme mukavemeti değerleri

Ancak, GO oranının %2,5'e yükseltilmesi durumunda gerilme mukavemeti ortalama 250,10 MPa seviyesine gerilemiş, bu düşüş GO'nun yüksek oranda aglomerasyon eğilimi göstererek matris sürekliliğini ve lif-matris etkileşimini olumsuz etkilediğini işaret etmektedir. Bu durum, GO'nun belirli bir oranın üzerinde kullanıldığında yapısal bütünlüğe zarar verebileceğini ve mekanik performansı zayıflatabileceğini göstermektedir.



Şekil 7.7. İslak Serim (EY) tamir yöntemi için %2,5 GO katkılı a) Kompozit yapının kalınlığı ve b) Ölçülen gerilme mukavemeti değerleri

Yukarıdaki veriler ışığında, ıslak serim yönteminin GO katkısıyla iyileştirilmesi, özellikle %0,5 katkı oranında, mekanik performans bakımından prepreg onarımlarına oldukça yakın sonuçlar verebilmiştir. Bu da düşük maliyetli ve uygulaması daha esnek olan ıslak serim yönteminin, nanomalzeme katkılarıyla geliştirilerek prepreg yöntemine alternatif olabilecek düzeye taşınabileceğini ortaya koymaktadır.



Şekil 7.9 Prepreg ve İslak Serim yöntemleri için kıyaslamalı ölçülen gerilme mukavemeti değerleri

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu deneysel çalışmada el yatırması reçinesine %0,3, %0,5 ve %2,5 oranında sentezlenmiş olan GO eklenerek, katkısız el yatırması reçinesi ile tamir uygulanmış kompozit plaka ve prepreg ile tamir uygulanmış plakanın gerilme mukavemeti performansı karşılaştırılmıştır.

%0,3 ve %0,5 oranları literatür ile uyumlu olarak mukavemet artışını gözlemek adına seçilmiştir. Ayrıca literatür taramalarında GO aglomerasyon yapı içerisinde mukavemet kaybına yol açtığı belirtilmiş ve bu nedenle yapı içerisinde aglomerasyonunun oluşacağı kesinlikle bilinen %2,5 oranı seçilmiştir.

Gerilme mukavemeti test sonuçlarına göre el yatırması tamiri 282 MPa ortalama bir mukavemet sonucu göstermiştir. Prepreg tamiri ise 391 MPa gerilme mukavemeti sonucu göstermiştir. El yatırması tamiri Prepreg tamirine göre %40 düşük performans göstermiştir. %0,3 GO eklenmiş tamir ise Prepreg tamirine göre %26 düşük performans göstermiştir. %0,5 GO eklenmiş tamir ise %0,8 düşük performans göstermiştir. Bu sayede El yatırması reçine performansını Prepreg tamirine yakınlaştırmıştır. Ancak GO oranını radikal bir ölçüde %2.52e çıkardığımızda Prepreg performansına göre %56 lık bir performans düşüklüğü gözlemlenmiştir.

Elde edilen bulgular, GO katkısının belirli oranlarda kullanılması durumunda el yatırması reçinelerinin mekanik performansını anlamlı biçimde artırabileceğini ortaya koymaktadır. Ancak katkı oranının kontrolsüz artırılması durumunda, aglomerasyon kaynaklı zayıflamaların ortaya çıkabileceği de deneysel olarak doğrulanmıştır. Bu yönüyle çalışma, saha uygulamalarında GO katkısının doğrudan karıştırılarak kullanılmasının sakıncalı olabileceğini, katkının önceden optimize edilerek reçine sistemine entegre edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Bu çalışma, GO katkılı tamir sistemlerinin optimize edilmesine yönelik özgün veriler sunarak, literatürde eksikliği hissedilen "el yatırması yöntemiyle yapılan tamirlerde nanomalzeme katkısının etkisi" konusuna bilimsel bir perspektif kazandırmaktadır. Ayrıca, yapısal onarımlarda düşük maliyetli ve sahada uygulanabilir alternatif tamir yöntemlerinin geliştirilmesine yönelik önemli bir temel oluşturmaktadır.

KAYNAKÇA

- Abanilla, M. A., Li, Y., and Karbhari, V. M. (2005). Durability characterization of wet layup graphite/epoxy composites used in external strengthening. *Composites Part B: Engineering*, 37, 200-212. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2005.05.016>
- Abrate Serge. (1998). *Impact on Composite Structures*.
- Aerospace Fastening in the 21st Century. (2012). <https://www.assemblymag.com/articles/90348-aerospace-fastening-in-the-21st-century>
- Akhtar, M. S., Jutt, D. S. R., Aslam, S., Nawaz, R., Irshad, M. A., Khan, M., Khairy, M., Irfan, A., Al-Hussain, S. A., and Zaki, M. E. A. (2024). Green synthesis of graphene oxide and magnetite nanoparticles and their arsenic removal efficiency from arsenic contaminated soil. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73734-9>
- Ameta, G., Brown, C., Lubell, J., and Lipman, R. (2013). A survey of standards for product lifecycle management of structural composites. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, 2 A. <https://doi.org/10.1115/DETC2013-12655>
- Arnold, A. M., Singh, J., and Sydlik, S. A. (2025). The Role and Future of Functional Graphenic Materials in Biomedical and Human Health Applications. *İçinde Biomacromolecules*. American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.4c01431>
- ASTM D8131/D8131M-23 Standard Practice for Tensile Properties of Tapered and Stepped Joints of Polymer Matrix Composite Laminates. (2023). ASTM International. https://doi.org/10.1520/D8131_D8131M-23
- Automated Fiber Placement - Cailabs. (2025). <https://www.cailabs.com/industrial-laser-processing/laser-additive-manufacturing/automated-fiber-placement/>.
- Boeing 787 Aircraft Rescue and Firefighting Composite Structure. (2013). https://www.boeing.com/content/dam/boeing/boeingdotcom/commercial/airports/faqs/787_composite_arff_data.pdf
- Campbell, F. C. (2004). Commercial Composite Processes: These Commercial Processes Produce Far More Parts than the High-performance Processes. *İçinde Manufacturing Processes for Advanced Composites* (ss. 399-438). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-185617415-2/50012-5>
- Chawla, K. K. (1993). Ceramic Matrix Composites. *İçinde Ceramic Matrix Composites* (ss. 1-10). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2216-1_1
- Durgun, I. (2014). *Composite Parts Production With Hand Lay Method*. <https://www.researchgate.net/publication/280080526>

- Econoclave® - Standard Models. (2025).
<https://www.aschome.com/index.php/en/products/autoclaves/available-autoclaves/8-autoclaves>.
- EXPO-NET Resin Flow Mesh Products. (2021). <https://www.expo-net.com/events-news/expo-net-resin-flow-mesh-products>.
- Govignon, Q., Bickerton, S., and Kelly, P. (2022). Liquid composite molding processes. İçinde *Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications* (ss. 101-136). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820346-0.00006-X>
- Hummers, W. S., and Offeman, R. E. (1958). 339 PREPARATION OF GRAPHITIC OXIDE Preparation of Graphitic Oxide.
- Hung, P. yan, Lau, K. tak, Qiao, K., Fox, B., and Hameed, N. (2019). Property enhancement of CFRP composites with different graphene oxide employment methods at a cryogenic temperature. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 120, 56-63. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.02.012>
- Introduction and characteristics of carbon fiber prepreg. (2023). <https://www.dsncfrp.com/Introduction-and-characteristics-of-carbon-fiber-prepreg-id63561107.html>.
- Jiang, J., Yao, X., Xu, C., Su, Y., Zhou, L., and Deng, C. (2017). Influence of electrochemical oxidation of carbon fiber on the mechanical properties of carbon fiber/graphene oxide/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 95, 248-256. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.02.004>
- Jones, H. W. (2018). *The Recent Large Reduction in Space Launch Cost*.
- Kubit, A., Trzepieciński, T., Krasowski, B., Slota, J., and Spišák, E. (2020). Strength analysis of a rib-stiffened glare-based thin-walled structure. *Materials*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/ma13132929>
- Kumar, K. V., and Safiulla, M. (2015). STUDY ON ALTERNATE RESINS FOR WET LAY UP OF CFRP LAMINATES. www.ripublication.com/ijaer.htm
- Lee, J., Kim, J., Kim, S., and Min, D. H. (2016). Biosensors based on graphene oxide and its biomedical application. İçinde *Advanced Drug Delivery Reviews* (C. 105, ss. 275-287). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.001>
- Lee, S. J., Yoon, S. J., and Jeon, I. Y. (2022). Graphene/Polymer Nanocomposites: Preparation, Mechanical Properties, and Application. İçinde *Polymers* (C. 14). MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym14214733>
- Loh, K. P., Bao, Q., Eda, G., and Chhowalla, M. (2010). Graphene oxide as a chemically tunable platform for optical applications. *Nature Chemistry*, 2, 1015-1024. <https://doi.org/10.1038/nchem.907>
- Loukil, M. S. (2013). *Experimental and Numeriacal Studies of Intralaminar Cracking in High Performance Composites*. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01750383>
- Ma, Q., Malaysia Pahang Al-Sultan Abdullah, U., Manoj Kumar, N., Quanjing, M., M Rejab, M. R., Idris, M. S., and Zhang, B. (2019). Filament winding technique: SWOT analysis and applied favorable factors Idris Mat Sahat Filament Winding Technique: SWOT Analysis and Applied Favorable Factors. İçinde *Article in*

- Maragoni, L., Carraro, P. A., Peron, M., and Quaresimin, M. (2017). Fatigue behaviour of glass/epoxy laminates in the presence of voids. *International Journal of Fatigue*, 95, 18-28. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.10.004>
- Marcano, D. C., Kosynkin, D. V., Berlin, J. M., Sinitskii, A., Sun, Z., Slesarev, A., Alemany, L. B., Lu, W., and Tour, J. M. (2010). Improved synthesis of graphene oxide. *ACS Nano*, 4(8), 4806-4814. <https://doi.org/10.1021/nn1006368>
- Naskar, M. (2017). Polymer nanocomposites for structure and construction applications. *İçinde Properties and Applications of Polymer Nanocomposites: Clay and Carbon Based Polymer Nanocomposites* (ss. 37-56). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53517-2_3
- Pathak, A. K., Borah, M., Gupta, A., Yokozeki, T., and Dhakate, S. R. (2016). Improved mechanical properties of carbon fiber/graphene oxide-epoxy hybrid composites. *Composites Science and Technology*, 135, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.09.007>
- Poh, H. L., Šaněk, F., Ambrosi, A., Zhao, G., Sofer, Z., and Pumera, M. (2012). Graphenes prepared by Staudenmaier, Hofmann and Hummers methods with consequent thermal exfoliation exhibit very different electrochemical properties. *Nanoscale*, 4(11), 3515-3522. <https://doi.org/10.1039/c2nr30490b>
- Rafiee, M. A., Rafiee, J., Wang, Z., Song, H., Yu, Z. Z., and Koratkar, N. (2009). Enhanced mechanical properties of nanocomposites at low graphene content. *ACS Nano*, 3(12), 3884-3890. <https://doi.org/10.1021/nn9010472>
- Riedel, U. (2012). 10.18 - Biocomposites: Long Natural Fiber-Reinforced Biopolymers. *Polymer Science: a Comprehensive Reference: Volume 1-10* (C. 1-10, ss. 295-315). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53349-4.00268-5>
- Round Robin Evaluation of CACRC Bonded Repairs*. (2017).
- Shivakumar, H., Renukappa, N. M., Shivakumar, K. N., and Suresha, B. (2020). The Reinforcing Effect of Graphene on the Mechanical Properties of Carbon-Epoxy Composites. *Open Journal of Composite Materials*, 10, 27-44. <https://doi.org/10.4236/ojcm.2020.102003>
- Sonat, E., Bakır, M., and Özeriç, S. (2023). Failure behavior of on-site repaired CFRP laminates. *Composite Structures*, 311. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116806>
- SP Systems Guide to Composites*. (2015).
- SpaceX-Falcon 9 Rocket*. (2025). <https://www.spacex.com/vehicles/falcon-9>
- Staudenmann, J.-L. (2017). *A Technology Roadmap for Joining and Repair of Advanced Polymer Matrix Composites CAILAC*.
- Su, Y., Kravets, V. G., Wong, S. L., Waters, J., Geim, A. K., and Nair, R. R. (2014). *Impermeable Barrier Films and Protective Coatings Based on Reduced Graphene Oxide*.
- Things to Consider When Conducting Composites Repair*. (2020). <https://www.addcomposites.com/post/composite-repair>.

- William D. Callister, Jr. , and David G. Rethwisch. (2018). *Materials Science and Engineering An Introduction: C. 10 th edition*. Wiley, Hoboken, NJ.
- Wu, K. J., and Young, W. Bin. (2022). Fabrication and quality analysis of angle composite part by vacuum-bag-only process with interleaved woven fiber/prepreg layup. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122, 3281-3297. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10049-x>
- Yan, J., Duan, Z., Lund, E., and Wang, J. (2017). Concurrent multi-scale design optimization of composite frames with manufacturing constraints. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 56(3), 519-533. <https://doi.org/10.1007/s00158-017-1750-0>
- Zeinedini, A., and Shokrieh, M. M. (2024). Agglomeration phenomenon in graphene/polymer nanocomposites: Reasons, roles, and remedies. İçinde *Applied Physics Reviews* (C. 11). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/5.0223785>
- Zhang, J., Zhang, W. H., and Zhu, J. H. (2011). An extended stress-based method for orientation angle optimization of laminated composite structures. *Acta Mechanica Sinica/Lixue Xuebao*, 27(6), 977-985. <https://doi.org/10.1007/s10409-011-0506-0>
- Zhang, Q., Hou, Q., Huang, G., and Fan, Q. (2020). Removal of heavy metals in aquatic environment by graphene oxide composites: a review. İçinde *Environmental Science and Pollution Research* (C. 27, ss. 190-209). Springer. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06683-w>
- Zhu, X., Zhu, Y., Murali, S., Stoller, M. D., and Ruoff, R. S. (2011). Nanostructured reduced graphene oxide/Fe₂O₃ composite as a high-performance anode material for lithium ion batteries. *ACS nano*, 5, 3333-3338. <https://doi.org/10.1021/nn200493r>



ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO : 0009-0000-6314-5862

Ad Soyad : Togay YILDIRIM

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2022-2025 Eskişehir Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı
- 2008-2013, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü
- 2022-Günümüz Türk Havacılık Uzay Sanayi, İleri Kompozit Üretim Müdürlüğü, Tamir ve Alt Montaj İşlemleri Şefliği
- 2016-2022 Tpi Composites,Mühendislik Direktörlüğü, Ar-Ge Birimi,
- 2015-2016 Telesetgroup,Kondanser Üretim Fabrikası, Proses Kalite Birimi