



**T.C.
AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YENİ NESİL SIVI TERMOPLASTİK
ELİUM® REÇİNESİ İLE YAPIŞTIRILMIŞ
ALÜMİNYUM-FTP KOMPOZİT
YAPILARIN MOD I VE MOD II KIRILMA
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SERKAN EMEKTAR

EYLÜL

**YENİ NESİL SIVI TERMOPLASTİK ELİUM® REÇİNESİ İLE
YAPIŞTIRILMIŞ ALÜMİNYUM-FTP KOMPOZİT YAPILARIN MOD
I VE MOD II KIRILMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

Serkan EMEKTAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Danışman
Doç. Dr. Halil Burak KAYBAL**

**AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

EYLÜL 2024

Yüksek Lisans Tezi Kabul ve Onay Sayfası

Serkan EMEKTAR tarafından hazırlanan “Yeni Nesil Sıvı Termoplastik Elium® Reçinesi ile Yapıştırılmış Alüminyum-FTP Kompozit Yapıların Mod I ve Mod II Kırılma Davranışlarının İncelenmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Halil Burak KAYBAL

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Başkan: Doç. Dr. Emine Feyza Şükür

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Samsun Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Doç Dr. Harun Yaka

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Amasya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 27/09/2024

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ümit YILDIRIM

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza

Serkan EMEKTAR

Tarih

YENİ NESİL SIVI TERMOPLASTİK ELİUM® REÇİNESİ İLE YAPIŞTIRILMIŞ ALÜMİNYUM-FTP KOMPOZİT YAPILARIN MOD I VE MOD II KIRILMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Serkan EMEKTAR

AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2024

ÖZET

Fiber takviyeli termoplastik kompozitler, geri dönüştürülebilirlikleri, yeniden işlenebilirlikleri ve yüksek mukavemet/ağırlık oranları sayesinde çeşitli endüstrilerde büyük ilgi görmektedir. Bununla birlikte, termoplastik polimer matrislerinin yüksek erime viskozitesi ve lif emprenyesindeki zorluklar, bu malzemelerin kullanım alanlarını sınırlamaktadır. Diğer yandan, Elium® reçinesi gibi termoplastik monomerler, vakum infüzyonu ve reçine transfer kalıplama gibi yöntemlerle oda sıcaklığında lif emprenyesine olanak tanıyan yenilikçi çözümler sunmakta ve çeşitli üretim yöntemleri ile Elium® matrisli fiber takviyeli kompozitlerin geliştirilmesi devam etmektedir. Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmadan önce, Elium® matris kompozitlerin mekanik performanslarının tam olarak anlaşılması büyük önem taşımaktadır. Bu tez çalışması, cam, karbon ve bazalt fiber takviyeli Elium® matrisli kompozit malzemelerin alüminyum bileşenleri ile oluşturduğu yapının kırılma davranışlarını incelemektedir. Çalışma kapsamında, bu kompozit-alüminyum yapıların mekanik performanslarını değerlendirmek amacıyla çift konsollu kiriş (DCB) ve uç çentikli eğilme (ENF) testleri ile tek bindirme bağlantılı çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler, Mod-I ve Mod-II koşulları altında tabakalar arası çatlak ilerleme davranışını, çatlak oluşumu sırasında ya da ilerlemesi esnasında açığa çıkan enerji miktarını ve ara yüzeylerdeki mekanik performansı değerlendirmekte ve farklı takviye türleri arasında kıyaslamaktadır. Özellikle tek bindirme bağlantılı çekme testleri, alüminyum-kompozit ara yüzeyindeki kayma gerilmelerini ve yük taşıma kapasitelerini ortaya koymaktadır. Ayrıca, kompozitlerin kırılma hasar görüntüleri mikroskop kullanılarak analiz edilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Düşük viskozite, termofom edilebilirlik ve geri dönüştürülebilirlik gibi özellikleriyle Elium® reçinesi, yenilikçi ve sürdürülebilir kompozit sistemler için umut vadeden bir matris malzeme olarak öne çıkmaktadır. Bu araştırma, Elium® matrisli fiber takviyeli kompozitlerin kırılma mekaniklerine dair değerli bilgiler sunmakta ve bu malzemelerin hasara dayanıklı uygulamalar için uygunluğunu artırmayı hedeflemektedir. Elde edilen bulgular, sürdürülebilir kompozit malzeme geliştirme süreçlerine katkıda bulunarak, yüksek performanslı ve geri dönüştürülebilir kompozitlerin endüstriyel kullanımını desteklemektedir.

Sayfa Adedi : 55
Anahtar Kelimeler : DCB, Elium®, ENF, Kırılma mekaniği.
Danışman : Doç. Dr. Halil Burak KAYBAL

INVESTIGATION OF MODE I AND MODE II FRACTURE BEHAVIOR OF
ALUMINUM-FTP COMPOSITE STRUCTURES BONDED WITH NEW GENERATION
LIQUID THERMOPLASTIC ELIUM® RESIN

(M. Sc. Thesis)

Serkan EMEKTAR

AMASYA UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2024

ABSTRACT

Fiber-reinforced thermoplastic composites have garnered significant attention across various industries due to their recyclability, reprocessability, and high strength-to-weight ratios. However, the high melt viscosity of thermoplastic polymer matrices and challenges in fiber impregnation limit their application areas. On the other hand, thermoplastic monomers like Elium® resin offer innovative solutions by enabling fiber impregnation at room temperature through methods such as vacuum infusion and resin transfer molding, with ongoing advancements in the development of Elium® matrix-based fiber-reinforced composites via various manufacturing techniques. Fully understanding the mechanical performance of Elium® matrix composites is crucial before their widespread use in industrial applications. This thesis investigates the fracture behavior of structures composed of Elium® matrix composites reinforced with glass, carbon, and basalt fibers combined with aluminum components. To evaluate the mechanical performance of these composite-aluminum structures, double cantilever beam (DCB) and end-notched flexure (ENF) tests, along with single lap joint tensile tests, were conducted. These tests assessed interlaminar crack propagation behavior under Mode-I and Mode-II conditions, the energy released during crack initiation and propagation, and interfacial mechanical performance, allowing comparisons among different reinforcement types. In particular, the single lap joint tensile tests revealed shear stresses and load-carrying capacities at the aluminum-composite interface. Additionally, fracture damage images of the composites were analyzed using microscopy and compared across samples. With its properties of low viscosity, thermoformability, and recyclability, Elium® resin emerges as a promising matrix material for innovative and sustainable composite systems. This study provides valuable insights into the fracture mechanics of Elium® matrix composites and aims to enhance their suitability for damage-resistant applications. The findings contribute to the development of sustainable composite materials, supporting the industrial adoption of high-performance, recyclable composites.

Number of pages : 55

Keywords : DCB, Elium®, ENF, Fracture mechanics.

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Halil Burak KAYBAL

ÖN SÖZ ve TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında beni yönlendiren, bilgi ve deneyimleriyle bana ışık tutan değerli danışman hocam Doç. Dr. Halil Burak KAYBAL'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarım süresince teknik destek ve bilgi paylaşımıyla bana her konuda yardımcı olan Doç. Dr. Hasan ULUS'a minnettarım. Ayrıca, tez savunma jürime katılarak değerli yorumları ve önerileriyle çalışmama katkı sağlayan Doç. Dr. Emine Feyza ŞÜKÜR ve Doç. Dr. Harun YAKA'ya teşekkürlerimi ifade etmek isterim.

Bu çalışmanın gerçekleşmesinde büyük bir destek sağlayan Amasya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimi'ne, FMB-BAP 22-00526 numaralı proje kapsamında sağladıkları finansman ve imkanlar için teşekkür ederim.

Son olarak, hayatım boyunca maddi ve manevi hiçbir desteğini esirgemeyen, bana daima güç ve motivasyon kaynağı olan sevgili aileme, sınırsız sabır ve sevgisi için nişanlım Ebru'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Onların varlığı, bu süreci başarılı bir şekilde tamamlamamda en büyük itici güç olmuştur.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİSİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	4
2.1. Kompozit Malzemeler.....	4
2.2. Kompozit Malzemelerin Takviye Türlerine Göre Sınıflandırılması.....	5
2.2.1. Fiber takviyeli kompozitler.....	6
2.2.2. Partikül takviyeli kompozitler.....	9
2.2.3. Tabakalı kompozitler.....	9
2.2.3. Karma kompozitler.....	9
2.3. Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	10
2.3.1. Metal matrisli kompozitler.....	10
2.3.2. Seramik matrisli kompozitler.....	10
2.3.3. Polimer matrisli kompozitler.....	11
2.4. Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri.....	13
2.4.1. Elle Yatırma yöntemi.....	14
2.4.2. Püskürtme yöntemi.....	14
2.4.3. Reçine transfer kalıplama yöntemi.....	15

	Sayfa
2.4.4. Fiber sarma yöntemi.....	16
2.4.5. Vakum torbalama yöntemi.....	16
2.4.6. Otoklav bağlama yöntemi.....	17
2.5. Yapıştırma Bağlantıları.....	18
2.5.1. Yapıştırma bağlantılarında oluşan gerilmeler.....	19
2.6. Kompozit Malzemelerde Kırılma Mekaniği.....	21
2.6.1. Mod-I kırılma mekaniği testi.....	23
2.6.2. Mod-II kırılma mekaniği testi.....	24
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	25
3.1. Malzemelerin Temini.....	25
3.2. Kompozit Malzemelerin Üretimi.....	26
3.3. Deney Numunelerin Hazırlanması.....	27
3.3.1. Yüzey hazırlama işlemleri.....	27
3.3.2. Tek taraf bindirmeli bağlantı numunelerinin hazırlanışı.....	28
3.3.3. Mod I-Çift Konsol Kiriş ve Mod II-Uç Çentik Eğilme test numunelerinin hazırlanışı.....	29
3.4. Kayma ve Kırılma Testleri ile Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi.....	30
3.5. Kırılma Hasarı İncelemeleri.....	33
4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	34
4.1. Tek Bindirme Bağlantılı Kompozit Numunelerin Çekme Testi Sonuçları.....	34
4.2. Mod I - Çift Konsol Kiriş Testi Sonuçları.....	35
4.3. Mod II- Uç Çentikli Eğilme Deneyi Sonuçları- ENF Testi.....	38
4.4. Numune Hasar Görüntülerinin İncelenmesi.....	41
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	44
KAYNAKLAR.....	47
ÖZGEÇMİŞ.....	55

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Elium® 4 mm'lik dolgusuz reçine mekanik özellikleri.....	13

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Kompozit fazları.....	4
Şekil 2.2. Kompozit malzemelerin takviye türlerine göre sınıflandırılması.....	5
Şekil 2.3. Cam fiber.....	6
Şekil 2.4. Karbon fiber.....	7
Şekil 2.5. Karbon fiber ve kullanım alanları.....	7
Şekil 2.6. Bazalt fiber.....	8
Şekil 2.7. Aramid fiber.....	8
Şekil 2.8. Tabakalı kompozit malzeme.....	10
Şekil 2.9. Termosetlerin çapraz bağlama sonrası şematik görünümü.....	12
Şekil 2.10. Termoplastiklerin şematik yapısı.....	12
Şekil 2.11. Metil metakrilat (MMA) monomeri.....	13
Şekil 2.12. Elle yatırma yöntemi.....	14
Şekil 2.13. Püskürtme yöntemi.....	15
Şekil 2.14. Reçine Transfer kalıplama yöntemi.....	16
Şekil 2.15. Fiber sarma yöntemi.....	16
Şekil 2.16. Vakum torbalama yöntemi	17
Şekil 2.17. Otoklav yöntemi şematik gösterimi.....	18
Şekil 2.18. Yapıştırma bağlantı tipleri.....	19
Şekil 2.19. Gerilme tipleri.....	20
Şekil 2.20. Kırılma modları (I) Mod I, ayrılma kırılması (II) Mod II, kesme kırılması (III) Mod III, yırtma kırılması.....	23
Şekil 2.21. DCB test numunesi.....	24
Şekil 2.22. ENF test numunesi.....	24

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. 200 g/m ² (a) cam fiber, (b) karbon fiber ve (c) bazalt fiber örnekleri.....	25
Şekil 3.2. Elium [®] 188 reçine.....	25
Şekil 3.3. Fiber malzeme örnekleri.....	26
Şekil 3.4. VARI yöntemi ile kompozit üretim aşamaları.....	27
Şekil 3.5. Tek taraflı bindirmeli bağlantılı test görüntüsü.....	28
Şekil 3.6. DCB test görüntüleri.....	29
Şekil 3.7. ENF test görüntüleri.....	30
Şekil 3.8. Kayma ve kırılma testlerinin uygulanması.....	33
Şekil 4.1. Kompozit numunelerin çekme testleri sonuçları a) Kuvvet-yer değiştirme eğrileri b) Kaymagerilmeleri.....	35
Şekil 4.2. Kompozit-kompozit numunelerin çift konsol kiriş deney sonucu kuvvet- yer değiştirme eğrileri.....	36
Şekil 4.3. Kompozit-metal numunelerin çift konsol kiriş deney sonucu kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	37
Şekil 4.4. Kompozit-kompozit numunelerin uç çentikli eğilme deney sonucu kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	38
Şekil 4.5. Kompozit-metal numunelerin uç çentikli eğilme deney sonucu kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	39
Şekil 4.6. Kompozit-alüminyum numunelerin uç çentikli eğilme deney sonucu kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	39
Şekil 4.7. Uç Çentik Eğilme testi tabakalar arası kırılma tokluğu enerjileri bar grafikleri a) Kompozit-Kompozit yapı b) Kompozit-Alüminyum yapı.....	39
Şekil 4.8. Tek bindirme bağlantılı kompozit yapıların çekme testi sonrası hasar yüzeyleri görüntüsü.....	42
Şekil 4.9. Mod I- çift konsol kiriş testi sonrası alüminyum yüzeylerindeki hasar görüntüleri.....	43

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİSİ

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, yanda açıklamaları verilmek üzere aşağıda listelenmiştir.

Simgeler

Açıklama

-

-

Kısaltmalar

Açıklama

Al

Alüminyum

ASTM

Amerikan Test ve Malzeme Kurumu

BF

Bazalt fiber

CF

Cam fiber

DCB

Çift konsol kiriş

ENF

Uç çentik eğilme

ETP

Fiber takviyeli polimerlerin

FRECs

Fiber takviyeli Elium® kompozitler

G

Birim şekil değiştirme enerjisi yayılım hızı

ILSS

Interlaminar kayma mukavemeti

KF

Karbon fiber

MMA

Metil Metakrilat

SBS

Kısa kiriş kayma

TSK

Termoset matris fiber takviyeli kompozitlere

1. GİRİŞ

Son yıllarda otomotiv, havacılık ve yenilenebilir enerji yapılarında kullanılan fiber takviyeli polimerlerin (ETP) çoğu, termoset matris fiber takviyeli kompozitlere (TSK) dayanmaktadır. Termoset matrisler, metalik muadillerine kıyasla daha yüksek mukavemet ve sertlik sundukları için çok yaygın hale gelmiştir ve bu da yapısal mühendislerin ağırlık azaltma ile operasyonel maliyetleri daha verimli hale getiren daha hafif bileşenler oluşturmaya olanak tanımaktadır (Reis vd., 2020). Ayrıca, mükemmel yapışma, korozyon direnci, solventlere ve aşındırıcılara karşı direnç ve ısıya karşı direnç gibi özellikler de gözlemlenmiştir (Rhodes, 2009). Ancak, TSK'lerin karmaşık onarım prosedürleri vardır ve geri dönüşüm zorlukları nedeniyle önemli miktarda hurda üretirler. Çevre mevzuatının dünya çapında giderek daha katı hale geldiği düşünüldüğünde, atık yönetiminin önemli bir sorun haline geldiği açıktır. Kompozitlerin geri dönüşümü ile ilgili mevcut kayda değer araştırmalara rağmen, bu süreçler yüksek sıcaklık ve basınç nedeniyle safsızlıklar ve fiber hasarı ile kirlenmeye maruz kalabilir ve yüksek işletme maliyeti nedeniyle sınırlı verimlilik göstermiştir (Rybicka vd., 2016; Lopez vd., 2012; Li vd., 2016; Pimenta vd., 2011). Ayrıca, TSK yapıları darbe hasarına karşı kolayca zarar görebilir ve bu durum, özellikle farklı yönlerdeki katmanlar arasındaki uyumsuzluk nedeniyle eğilme uyumlarında oluşan delaminasyonlara yol açarak mukavemetlerini, özellikle de basma yükleri altında, önemli ölçüde etkileyebilir (de Moura vd., 2000; 2002). Aslında, standart karbon fiber/epoksi kompozitlerin en büyük zayıflığının, termoset matrisin kırılgan doğası nedeniyle delaminasyona karşı zayıf dirençle ilgili olduğu gözlemlenmiştir (de Moura vd., 2008). Bu nedenle, kompozit bilimi araştırmaları, daha yüksek matris tokluğuna sahip kompozit sistemlerin üretimine odaklanmıştır (Bigg, 1994; Sun vd., 1988). Bu bağlamda, en kritik arayüzlere daha tokluklu bir faz eklenerek hibritleştirme yöntemleri uygulanmıştır (Sevkat vd., 2013). Bu yaklaşım, Fernandes (2014), ve de Moura (2015) tarafından, kırılma tokluğunu artırmak amacıyla tek yönlü karbon fiber-epoksi kompozit laminatında mantar katmanları ekleyerek uygulanmıştır. Hibritleştirmenin, gözlemlenen kırılma modunun kırılgan moddan çok sünek bir moda değişmesiyle, monolitik karbon-epoksi laminatına göre avantajlı olduğu doğrulanmıştır. İnterlaminar kırılma enerjisini artırmak için tabakalar arasına termoplastik olmayan dokumasız örtüler yerleştirilerek başarılı sonuçlar elde edilmiştir (İnal vd., 2021). Epoksi reçine bazlı TSK'lerin darbe hasar toleransını artırmak için termoset katmanlar arasına bir termoplastik film eklenmesiyle yapılan benzer deneyler

önemli bir başarı göstermiştir (Sonnenfeld vd., 2017). Luo Yu ve ekibi (1994), bismaelimid matris bazlı kompozit laminatların arayüzüne yumuşak bir epoksi yapıştırıcı tabakası ekleyerek interlaminar ve intralaminar kırılma tokluğunu artırmıştır. Bu işlem "interleafing" olarak bilinir ve fiber takviyeli kompozitlerde darbe direncini önemli ölçüde artırdığı bulunmuştur (Master, 1991; Shivakumar vd., 2009; Akangah vd., 2010). Alternatif olarak, daha tokluklu ve daha sünek matrisler kullanan yeni nesil kompozit sistemleri geliştirilmiştir ve bu sistemlerde termoplastik polimerler matris fazını oluşturmak için kullanılır (Botelho vd., 2003).

Akrilik reçinelerin yığın polimerizasyonunun incelenmesi 1940'larda başlamış olup, akrilik kompozitlerin reaktif işlenmesi üzerine çok az çalışma bildirilmiştir (Van Rijswijk vd., 2007). TP-FRP alanına olan artan ilgi, sürekli fiber takviyesi ile büyük kompozit yapılarının oda sıcaklığında yerinde polimerizasyon yoluyla üretilmesine uygun sıvı TP akrilik reçinelerden oluşan Elium® ailesinin geliştirilmesine yol açmıştır. Viskoziteleri 100 mPa s kadar düşük olan bu akrilik reçineler, yukarıda bahsedilen birinci nesil reaktif reçinelere göre daha maliyet etkin olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, bu reçinelerin reçine infüzyonu yoluyla büyük ölçekli bileşenlerin üretimi için uygunluğu ve termopreform edilebilirlikleri ve geri dönüştürülebilirlikleri son zamanlarda gösterilmiştir (Murray vd., 2017; 2020; Cousins vd., 2018). Bu nedenle, Elium® matris kompozitlerinin endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak benimsenmeden önce mekanik performansının anlaşılması önemlidir.

Yerinde polimerize edilmiş akrilik matrisli kompozitlerin özellikleri üzerine yayınlanmış çalışmaların çoğu, sıvı reçine infüzyon tekniğini kullanmıştır (Matadi Boumbimba vd., 2017; Bhudolia vd., 2017; 2018; Obande vd., 2019); ancak reçine transfer kalıplama (RTM) (Bhudolia vd., 2018; Murray vd., 2019; Bhudolia vd., 2020; Obande vd., 2021) yaş serme ve pres kalıplama yöntemleri de (Baley vd. 2018) kullanılmıştır. Farklı fiber takviyeli yeni geliştirilen Elium® kompozitlerinin mekanik performansı, literatürde darbe tepkisi (Matadi Boumbimba vd., 2017; Bhudolia vd., 2021; Gohel vd., 2021; Bhudolia vd., 2021), eğilme mukavemeti (Bhudolia vd., 2019; Bhudolia vd., 2019), çekme mukavemeti (Haggui vd., 2017; Chilali vd., 2016), yorulma davranışı (Haggui vd., 2018; Bhudolia vd., 2020) ve indentasyon davranışı (Cadieu vd., 2019; Cadieu vd., 2019) gibi konularda araştırılmıştır.

Ayrıca, FRECs'in (Fiber Takviyeli Elium® Kompozitler) interlaminar mekanik özelliklerinin, örneğin interlaminar kayma mukavemeti (ILSS), mod-I kırılma tokluğu (GIC) ve mod-II kırılma tokluğu (GIIC) karakterizasyonu ile ilgili çalışmalar da yapılmıştır. Kısa kiriş kayma (SBS) testleri kullanılarak deneysel olarak belirlenen FRECs'in ILSS değerlerinin yaklaşık olarak 40 MPa ile 58 MPa arasında değiştiği görülmektedir (Obande vd., 2019; Nash vd., 2019; Bhudolia vd., 2019; Davies vd., 2018; Mamalis vd., 2018). FRECs'in GIC değerini belirlemek için çift konsollu kiriş (DCB) testleri yapılmış ve GIC değerinin yaklaşık olarak 1,0 kJ/m² ile 2,5 kJ/m² arasında değiştiği bulunmuştur (Obande vd., 2019; Shanmugam vd., 2019; Han vd., 2022; Pini vd., 2017; Bhudolia vd., 2018). Barbosa ve arkadaşları (Barbosa vd., 2019), FRECs'in mod-II kırılma tokluğunu uçtan çentikli kırılma (ENF) testi kullanarak belirlemişler ve GIIC'in yaklaşık olarak 1,3 kJ/m² olduğunu bulmuşlardır. Çift konsollu kiriş (DCB) testleri ve uçtan çentikli eğilme (ENF) testleri genellikle mod I (çatlak açılma modu) ve mod II (çatlak kayma modu) yüklemeleri altındaki delaminasyon davranışlarını karakterize etmek için kullanılır ve mod III, mod II ile tutarlıdır (Cheng vd., 2019; Nourani vd., 2016; Harper vd., 2008).

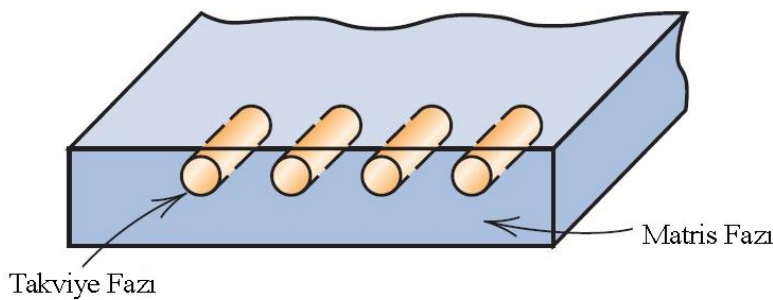
Bu araştırma, vakum torbalama yöntemiyle üretilen metil metakrilat (MMA) esaslı termoplastik Elium® matrisli fiber takviyeli kompozitlerin kırılma davranışlarını kapsamlı bir şekilde incelemeyi hedeflemektedir. Numune yapıları, kompozit-alüminyum kombinasyonu şeklinde oluşturulmuş olup, fiber takviye elemanları sırasıyla cam, karbon ve bazalt fiberlerden seçilmiştir. Çalışma kapsamında, bu numunelere tek bindirme bağlantılı çekme testi, Mod-I tabakalar arası ayrılma ve Mod-II kayma testleri uygulanmıştır. Testler sırasında, polimer matrisli kompozitlerin tabakaları arasında oluşan çatlak ilerleme mekanizmaları analiz edilmiş ve çatlak oluşumu ile eksenel yönde ilerlemesi sırasında açığa çıkan enerji değerlendirilmektedir. Ayrıca, tek bindirmeli test sonuçları, alüminyum-kompozit ara yüzeyindeki kayma gerilmelerini ve yük taşıma performanslarını da ortaya koymuştur. Bu kapsamda elde edilen bulgular, fiber takviyeli Elium® matris kompozitlerin kırılma mekaniği üzerine değerli veriler sunmakta ve bu malzemelerin hasara dayanıklı uygulamalarda kullanım potansiyelini artırmaya yönelik önemli katkılar sağlamaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler; birden fazla inorganik ya da organik malzemenin bir araya gelmesi ile oluşmaktadır (Agarwal vd., 1980). Bir kompozitin tasarım hedefi, tek bir malzeme tarafından sergilenmeyen özelliklerin bir kombinasyonunu elde etmek ve bileşen malzemelerin her birinin en iyi özelliklerini birleştirerek daha üstün nitelikte malzeme üretmektir (Fidan, 2015). Bu malzemelerin tasarımında, ileri teknoloji malzemeler geliştirmek için çeşitli polimerler, seramikler ve metaller bir araya getirilmektedir. Böylece sertlik, tokluk, ortam ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi mekanik özelliklerin optimum kombinasyonları geliştirilerek malzeme üretilmektedir.

Kompozit malzemeler, yapay olarak yapılan çok fazlı malzemelerdir. Kompozit malzemeler; birbirinden kimyasal olarak farklı ve bir arayüzle ayrılan takviye ve matris fazından oluşmaktadır (Callister vd., 2015) (Şekil 1). Bu malzemeler, bir veya daha fazla süreksiz fazın sürekli bir matris içinde dağıtılmasıyla üretilmektedir. Süreksiz faz, kuvvetlendirici veya takviye edici malzeme olarak kullanılır ve genellikle sürekli fazdan daha üstün özelliklere sahiptir (Kalemtaş, 2014). Bu takviye fazı, malzemeye güç ve sertlik katar ve genellikle matristen daha güçlü ve serttir. Fiber veya partikül şeklinde olan takviye fazları, matrisin görevini üstlenen sürekli fazın özelliklerini artırır. Matris, fiberleri uygun yönde ve aralıkta tutarak malzemenin bütünlüğünü sağlar ve dış etkenlere karşı koruma sağlar (Campbell, 2010).



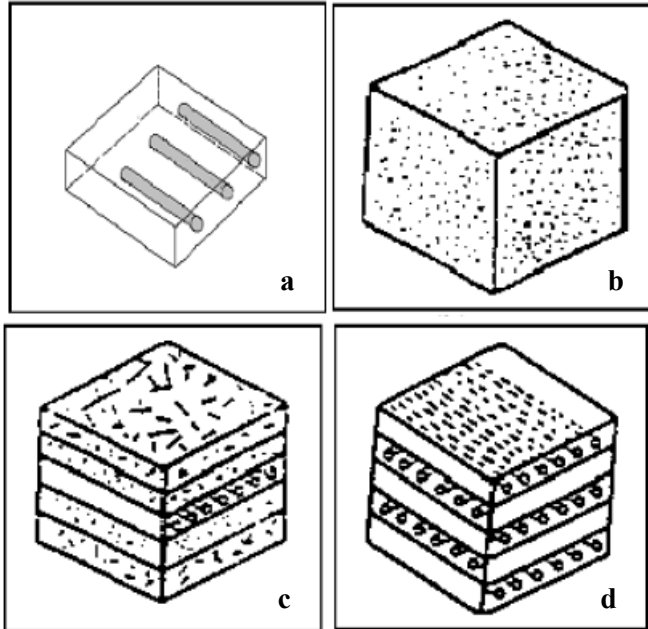
Şekil 2.1. Kompozit fazları (Callister,2015)

Çeşitli üretim yöntemleri, kompozit malzemelerin geniş bir sınıflandırmaya tabi tutulmasına olanak tanımaktadır. Temelde, matris ve takviye elemanından oluşan kompozit malzemeler, bu malzemeleri temel alarak genellikle iki ana kategori altında sınıflandırılmaktadır.

1. Takviye elemanına göre
2. Matris malzemesine göre

2.2. Kompozit Malzemelerin Takviye Türlerine Göre Sınıflandırılması

Kompozit yapılar, içerdikleri malzeme sayısında sınırlama olmaksızın çeşitli malzemelerin kombinasyonu ile oluşturulabilir. Takviye malzemeler, kompozit materyallerin temel bileşenlerinden biridir ve bu malzemeler, yük taşıma fonksiyonlarıyla matrisin dayanıklılığını ve rijitliğini artırmaya yönelik önemli bir rol oynar. Bu nedenle Şekil 2.2’de görüldüğü gibi; kullanılan takviye elemanlarının şekil ve konumuna göre yapılan sınıflandırmalar, kompozit yapıların özelliklerini belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Kompozit malzemeler takviye türlerine göre genellikle fiber takviyeli, parçacık takviyeli, karma ve tabakalı olmak üzere dört ana başlık altında toplanmaktadır.



Şekil 2.2. Kompozit malzemelerin takviye türlerine göre sınıflandırılması (a) fiber takviyeli kompozitler, (b) parçacık takviyeli kompozitler, (c) karma kompozitler, (d) tabakalı kompozitler (Şahin, 2008)

2.2.1. Fiber takviyeli kompozitler

Cam fiber

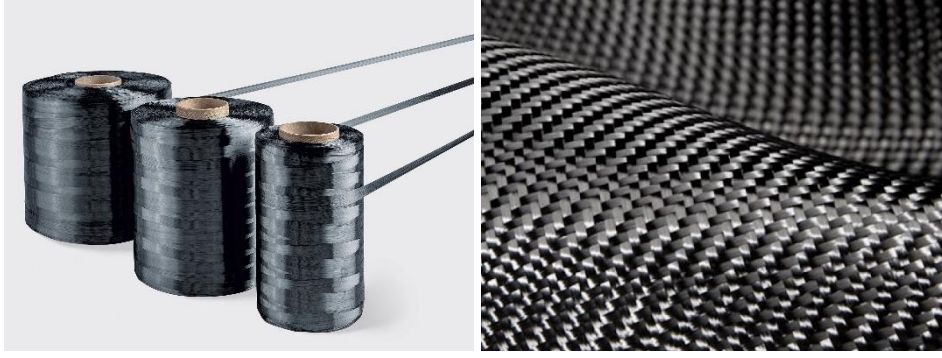
Cam fiberler, camın eritilip ince liflere dönüştürülmesiyle elde edilen inorganik malzemelerdir. Bu fiberler, dayanıklı, hafif ve ısıya karşı dayanıklı özelliklere sahiptir. Genellikle yapı malzemeleri, otomotiv sektörü, elektronik eşyalar ve endüstriyel uygulamalarda kullanılırlar. Cam fiberler, plastiklerin ve kompozit malzemelerin mukavemetini artırmak için takviye malzemesi olarak kullanılır ve aynı zamanda bu malzemelerin kullanımı ağırlığın azaltılması, dayanıklılığın artırılması, yangın direnci ve akustik düzenleme gibi birçok avantaj sağlar.



Şekil 2.3. Cam fiber

Karbon fiber

Karbon fiber, karbon atomlarının yüksek oranda düzenli bir şekilde dizilmesinden oluşan ve yüksek sıcaklık altında polimerleştirilerek elde edilen ince ve uzun liflerdir. Bu liflerin çapları genellikle insan saçının çapından daha incedir. Karbon fiberler, özellikle yüksek mukavemet ve hafiflik gibi üstün mekanik özelliklere sahip olmalarıyla bilinirler.



Şekil 2.4. Karbon fiber

Karbon fiberler; Şekil 2.5'te görüldüğü gibi havacılık, otomotiv, uzay endüstrisi, spor ekipmanları, denizcilik ve yapı malzemeleri gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılır. Yüksek mukavemetleri ve hafiflikleri sayesinde, karmaşık yapıların ve yüksek performanslı parçaların üretiminde tercih edilirler.



Şekil 2.5. Karbon fiber ve kullanım alanları

Bazalt fiber

Bazalt fiber, bazalt kayalarının eritilip liflere dönüştürülmesiyle elde edilen bir lif malzemesidir. Doğal olarak bulunan bazalt kayaları, yüksek sıcaklık altında eritilir ve

ardından ince liflere dönüştürülür. Son ürün, yüksek mukavemet, ısıya dayanıklılık ve kimyasal direnç gibi özelliklere sahip olabilir. Bazalt fiberler, genellikle kompozit malzemelerin takviye lifi olarak kullanılır.



Şekil 2.6. Bazalt fiber

Aramid fiber

Aramid fiber, “aromatik polamid lifler” olarak bilinen ve yüksek çekme modülü ve mukavemete sahip olan bir sentetik organik fiber türüdür. Bu fiberler, gelişmiş kompozit materyallerde takviye malzemesi olarak kullanılır ve eşit ağırlıkta cam fiberlerden çok daha iyi mekanik özellikler sunar. Ayrıca, aramid lifler yüksek sıcaklıklara ve alevlere karşı dayanıklıdır ve bu özelliklerini yüksek sıcaklıklarda da korur (Ertekin, 2017).



Şekil 2.7. Aramid fiber

2.2.2. Partikül (parçacık) takviyeli kompozitler

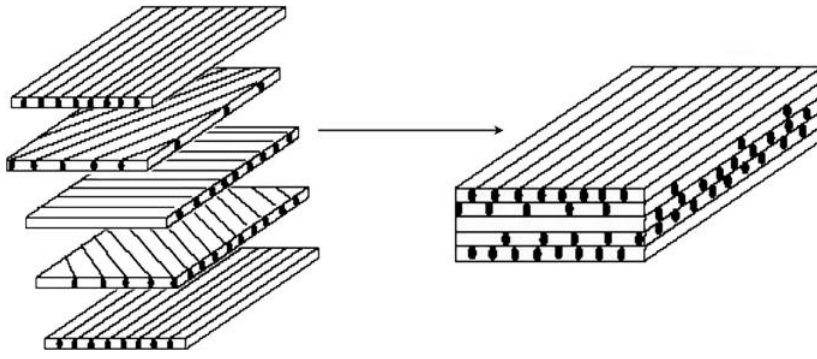
Parçacık takviyeli kompozitler, içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunmasıyla oluşur. Mukavemetleri parçacıkların sertliğine bağlıdır. Plastik matris içinde bulunan metal parçacıklar en yaygın olanıdır. Metal parçacıklar, ısı ve elektrik iletkenliği sağlar. Metal matris içinde seramik matris içeren yapıların sertlikleri ve yüksek sıcaklık dayanımları yüksektir. Bu tür yapılar, kollar, kulplar, elektrik parçaları, muhafazalar gibi küçük parçaların üretiminde kullanılır.

2.2.3. Karma kompozitler

Karma veya hibrid kompozitler, farklı tip takviye liflerinin veya partiküllerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Bu malzemelerin amacı; farklı özellikleri bir araya getirerek tek bir malzemedeki, daha az istenen özelliklerin etkilerini azaltırken daha iyi niteliklerinden faydalanılmasına izin vererek optimum performansı elde etmektir (Harris, 1999; Şahin,2008). Karma kompozitlerin özellikleri, kullanılan takviye malzemelerinin türüne, dağılımına ve matris malzemesine bağlı olarak değişir. Örneğin, karbon fiberlerin yüksek mukavemet ve düşük ağırlık sağlayan özellikleri, cam fiberin maliyet etkinliği ve darbe dayanımı gibi özelliklerle birleştirilebilir. Bu şekilde, karma kompozitler, tek tip takviye malzemesi kullanılan geleneksel kompozitlere kıyasla daha geniş bir özellik yelpazesine sahip olabilir.

2.2.4. Tabakalı kompozitler

Tabakalı kompozit yapılar, en eski ve en çok kullanılan kompozit türüdür. Bu malzemeler; farklı tipteki iki ya da daha fazla levhanın üst üste ya da farklı yönlerde bir araya getirilmesiyle elde edilir (Akbulut,1994). Her katmanın farklı özelliklere sahip olması, kompozitin belirli mukavemet, rijitlik, termal veya elektriksel özellikler gibi gereksinimlere uygun hale getirilmesini sağlar. Tabakalı kompozitler, düşük maliyetle birlikte yüksek dayanım veya hafiflik sağlarken, aşınma direnci, korozyon ve estetik görünüm gibi önemli özelliklerin birçoğu, içerdiği tabakaların özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (İpek, 2015).



Şekil 2.8. Tabakalı kompozit malzeme

2.3. Kompozit Malzemelerin Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozitler, içerdikleri matris malzemesinin türüne bağlı olarak seramik, metal ve polimer olmak üzere olmak üzere üç ayrı kategoriye ayrılmaktadır.

2.3.1. Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitler, alüminyum, magnezyum ve titanyum gibi metallerin matris malzemesini kullanarak oluşturulan malzemelerdir. Bu kompozitlerin takviye malzemesi ise karbon ve silikon karbür gibi malzemelerdir. Tasarım kriterlerine göre, metal takviye malzemeleri kullanılarak malzemenin özellikleri arttırılmaktadır. Metallerin elastik sertliği ve mukavemeti, tasarımın gereksinimlerine uygun olarak değiştirilebilmektedir (Kaw, 2006). Metal matrisli kompozitler, mukavemet, yüksek sertlik ve düşük yoğunluk özellikleri nedeniyle havacılık ve havacılık dışı uygulamalarda kullanılmaktadır. (İpek, 2015; Chawla, 2012). Son zamanlarda, vakumlu infiltrasyon yöntemi, ekonomik olması, sade ve ileri teknolojiye ihtiyaç duymaması nedeniyle metal matrisli kompozit üretiminde tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir (Lai, Chung, 1994).

2.3.2. Seramik matrisli kompozitler

Seramik matrisli kompozitler, yüksek mukavemet, sertlik gibi avantajlara sahiptir. Ancak, düşük kırılma tokluğu nedeniyle çekme ve darbe testlerinde istenilen performansı göstermekte zorlanabilirler (Kaw, 2006).

Seramik matrisli kompozitler, yüksek sıcaklıklarda çalışmanın gerekli olduğu alanlarda özellikle diğer matrisli kompozitlerin kullanılmadığı alanlarda uygulanmaktadır. Bu kompozitler, özellikle oksitleyici ve yüksek sıcaklık ortamlarında işlev gören kesici takım uçları gibi uygulamalarda yaygındır (Kaw, 2006).

2.3.3. Polimer matrisli kompozitler

Polimerler, monomer adı verilen küçük molekül birimlerinin uzun zincirler halinde bir araya gelmesi ile oluşan organik bileşiklerdir. Polimer matrisli kompozit malzemeler, düşük yoğunlukları, kolay elde edilebilirlikleri, yüksek sıcaklık dayanımı ve elektrik iletkenliğine sahip olmamaları gibi özelliklerle bilinir (Harris, 1999). Bunun yanında yüksek aşınma ve korozyon direnci sayesinde kompozit üretimlerinde en çok tercih edilen ana faz malzemelerden biridir. Bu özellikler, endüstriyel uygulamalarda, özellikle uçaklar, savaş helikopterleri, roketler, uzay araçları ve otomotiv sektörü gibi alanlarda geniş bir kullanım alanı bulmalarına olanak tanır (Sur, 2008).

Polimer kompozit malzemeler, matris malzemesi olarak kullanılan polimerlere göre üç kategoriye ayrılır: termoplastikler, termosetler ve elastomerler (Deniz, 2005).

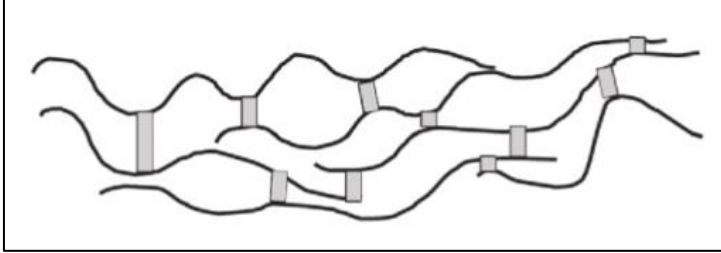
Elastomerler

Elastomerler, uzun zincir moleküllerinin çapraz bağlarla birbirine bağlandığı bir yapıya sahiptir. Bu polimerler, düşük gerilmeler karşısında geniş elastik deformasyon gösterme özelliğine sahiptir. Birçok polimer, %500'e kadar uzayabilir ve ardından eski haline dönebilir. Özellikle kauçuk, bu özellikleriyle tanınan ve yaygın kullanılan bir elastomerik polimerdir (Deniz, 2005).

Termosetler

Düşük viskoziteleri ve düşük moleküler ağırlıkları sebebiyle termoset malzemeler, kompozitlerin başlangıç malzemesi olarak kullanılır. Genellikle kimyasal olarak bir sertleştirici yardımıyla kompozit parça üretiminde sıkça kullanılan bir matris elemanıdır. Sertleşme sonrası çapraz bağlarla birbirine bağlanan moleküller 3 boyutlu bir ağ yapısı oluşturur (Mallick, 2008).

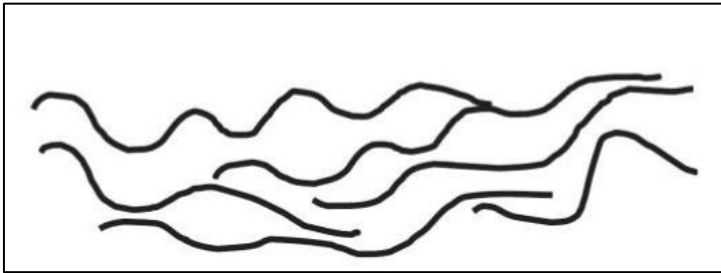
Epoksi reçineler nispeten iyi mekanik ve fiziksel özelliklerinden dolayı kompozit malzemelerin matris malzemesi olarak sıklıkla tercih edilmektedir. Şekil 2.4 termosetlerin kimyasal sertleştirme sonrası çapraz bağ yapısını şematik olarak göstermektedir.



Şekil 2.9. Termosetlerin çapraz bağlama sonrası şematik görünümü (Biron, 2013)

Termoplastik

Termoplastikler, en basit moleküler yapıya sahip olup, kimyasal olarak bağımsız makromoleküllerden oluşur. Isıtıldıklarında yumuşarlar veya erirler, bu sayede şekillendirilebilir, biçimlendirilebilir ve kaynak yapılabilirler. Soğuduklarında ise katılaşırlar. Birden fazla ısıtma ve soğutma döngüsüne maruz kalsalar bile, ciddi bir zarar görmeden tekrar işlenebilirler ve geri dönüştürülebilirler (Biron, 2013).

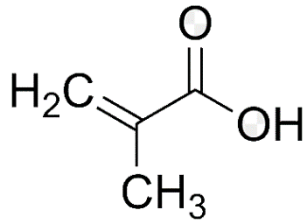


Şekil 2.10. Termoplastiklerin şematik yapısı (Biron, 2013).

Metil Metakrilat Esaslı Elium® Termoplastik Reçine

Elium® 188 kompozit malzeme üretiminde kullanılan bir reçine türüdür. Benzoil Peroksit, Elium® termoplastik reçinenin polimerizasyon başlangıcı olarak kullanılan kimyasal bileşimidir. Elium® reçinesi, ARKEMA tarafından geliştirilen düşük viskoziteli bir sıvı reçinedir. Elium® reçinesi ile üretilen parçalar termoplastik özellik gösterir. Bu nedenle,

şekillendirildikten sonra yapıştırıcı veya kaynak kullanılarak kolayca yüzeylere tutturulabilir. Ayrıca, sonradan ısıyla şekillendirilebilme özellikleri taşır ve kompozit/kompozit veya kompozit/metal birleşimleri için yeni imkanlar sunar. En önemlisi, parça kullanım ömrünü tamamladığında geri dönüştürülebilir, bu da sürdürülebilir bir malzeme kullanımını destekler (ARKEMA, 2014; Kazemi vd., 2019;). Bu termoplastik reçine, infüzyon prosesi için uygundur ve istenilen kürleşme miktarına bağlı olarak Elium® reçinenin sertliği ayarlanabilmektedir (Murray vd.,2021). Sertleşme süresi, ortam sıcaklığına ve laminatın boyutuna bağlı olarak değişiklik gösterir Elium® 4 mm'lik dolgusuz reçine mekanik özellikleri, ARKEMA'nın teknik verilerine dayalı olarak Çizelge 2.1'de detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 2.11. Metil metakrilat (MMA) monomeri

Çizelge 2.1. Elium® 4 mm'lik dolgusuz reçine mekanik özellikleri

Reçine	Sertleştirici	Karıştırma oranı	Yoğunluk (gr/cm ³)	Çekme Gücü (MPa)	Çekme Modül (MPa)	Basma Gücü (MPa)	Kırılma Tokluğu K _{1c} (MPa m ^{0.5})	Eğilme Modül (MPa)	T _g (Cam Geçiş Sıcaklık) /°C
Elium® 188	Benzoyl Peroxide	2%	1.01	76	3300	130	1.2	3250	120

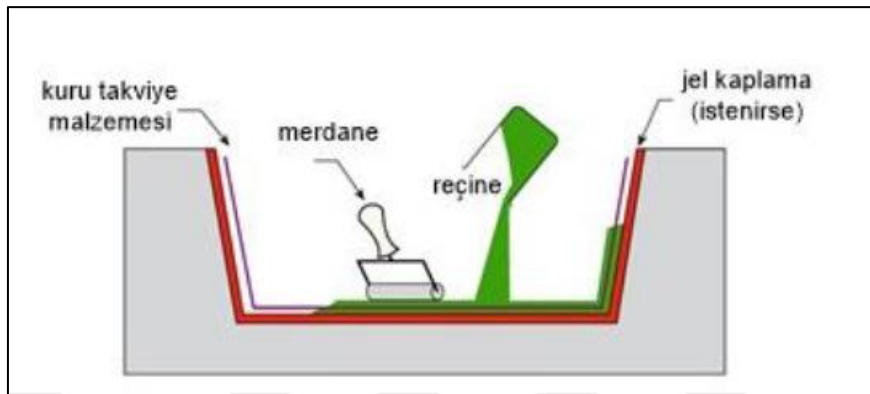
2.4. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemeler, geleneksel malzemelere kıyasla üstün mekanik özellikler sunar ve bu nedenle üretim yöntemleri büyük önem taşır. Bu bağlamda, çeşitli üretim teknikleri geliştirilmiştir. En yaygın kullanılan yöntemler arasında el yatırma, püskürtme, reçine transfer kalıplama, fiber sarma, vakum torbalama, otoklav yöntemleri bulunmaktadır.

2.4.1. Elle yatırma yöntemi

Elle yatırma yöntemi, polimer kompozit malzemelerin üretiminde en basit ve yaygın kullanılan yöntemdir. Bu yöntem, özellikle düşük hacimli üretimler ve prototip çalışmalarında tercih edilir. Şekil 2.7 'de görüldüğü gibi bu teknikte, takviye elemanı olan fiber kalıp içerisine elle yerleştirilerek üzerine reçine uygulanmaktadır. Kuru fiber takviyeler katmanlar halinde istenilen kalınlığa ve mekanik özelliklere göre kalıp üzerine yerleştirilir. Kullanılacak reçine karışımı, fırça, rulo veya sprej tabancası kullanılarak fiber katmanlarının üzerine uygulanır ve her fiber katmanının tamamen reçine ile doyurulması sağlanır. Tüm fiber ve reçine katmanları uygulandıktan sonra, kompozit malzeme belirli bir süre boyunca kurlanmaya bırakılır. Reçine tamamen sertleştikten sonra, kompozit parça kalıptan dikkatlice çıkarılır.

Elle yatırma yöntemi, düşük maliyetli, esnek ve kontrollü bir üretim süreci sunar. Dezavantajları arasında zaman alıcı olması ve kalite kontrol zorlukları bulunur, ancak doğru uygulama ile yüksek kaliteli kompozit parçalar üretilebilir.



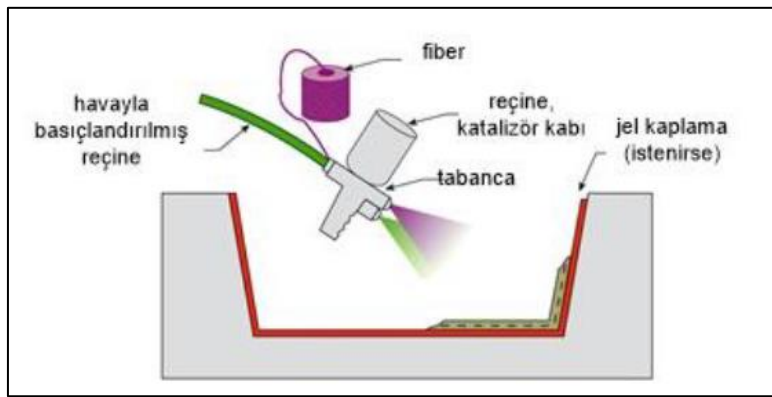
Şekil 2.12. Elle yatırma yöntemi (Leblebiciler, 2022)

2.4.2. Püskürtme yöntemi

Elle yatırma yönteminin ekipman kullanılarak gerçekleştirilen şeklidir. Polimer kompozit üretiminde yaygın ve etkili olan bu yöntem; hızlı üretim ve büyük yüzeylerin kaplanması için idealdir. Şekil 2.8'de görüldüğü gibi bu yöntemde ilk olarak, kompozit parçanın üretileceği kalıp hazırlanır. Kalıp, bitmiş parçanın kalıptan kolayca çıkarılması için ayırıcı ajan ile kaplanır. Reçine ve cam fiberi, püskürtme tabancası aracılığıyla kalıp yüzeyine

püskürtülür. Bu işlem sırasında, tabanca, reçine ve fiberi karıştırarak kalıp yüzeyine eşit bir şekilde dağıtır. Kullanılan takviye malzemesi, tabanca içerisinde yer alan kırpıcı tarafından kırılmaktadır. İstenilen kalınlığa ulaşılan kadar püskürtme işlemi tekrarlanır. Her püskürtme katmanından sonra, hava ceplerini çıkarmak ve malzemenin sıkılaşmasını sağlamak için rulo ile sıkıştırma yapılabilir. Püskürtme işlemi tamamlandıktan sonra, malzeme belirli bir süre boyunca kürlenmeye bırakılır. Reçine tamamen sertleştikten sonra, kompozit parça kalıptan dikkatlice çıkarılır ve gerekli son işlemler yapılır.

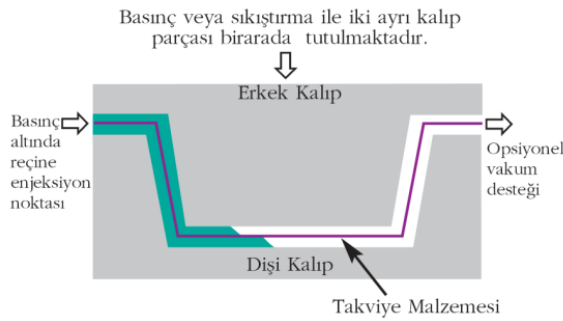
Püskürtme yöntemi, düşük maliyet, hızlı üretim gibi avantajlara sahipken; kalınlık kontrolü, oluşan hava cepleri nedeniyle yüzey kalitesinin düşük olması gibi dezavantajları vardır (Mazumdar, 2001).



Şekil 2.13. Püskürtme yöntemi (Deniz, 2005)

2.4.3. Reçine Transfer kalıplama yöntemi

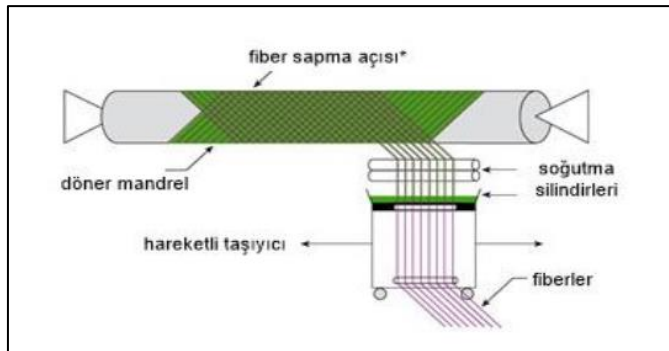
Reçine transfer kalıplama yöntemi, kompozit malzemelerin üretiminde sunduğu yüksek performans ve kalite ile dikkat çeken bir teknolojidir. Bu yöntemin doğru uygulanması, üretilen parçaların özelliklerini ve performansını doğrudan etkiler. Bu yöntem, genellikle yüksek performanslı, hafif ve güçlü kompozit malzemelerin üretiminde tercih edilir. RTM, otomotiv, havacılık, denizcilik ve spor ekipmanları gibi çeşitli endüstrilerde kullanılır. Bu yöntem, önceden kesilmiş veya şekillendirilmiş takviye malzemelerinin, erkek ve dişi kalıp arasında yerleştirilip kapatıldığı bir kapalı kalıplama tekniğidir (Şekil 2.9). Reçine, kalıp içine basınç altında pompalanarak takviye malzemesine nüfuz eder. Ayrıca, vakum işlemi kullanılarak kalıp içindeki hava çıkarılır ve reçinenin takviye malzemesine daha iyi işlemesi sağlanır. Bu teknik, karmaşık şekilli parçaların üretimini mümkün kılar (Açıkbaş, 2016).



Şekil 2.14. Reçine Transfer kalıplama yöntemi (Açıkbaş,2016)

2.4.4. Fiber sarım yöntemi

Fiber sarım yöntemi, reçineyle emprenye edilmiş fiberin, belirli bir açıda dönen bir mandrel üzerine sarılmasıyla gerçekleştirilen bir işlemdir (Şekil 2.9). Bu yöntem nispeten yavaş olmasına rağmen, fiberlerin yönelimi kısmen kontrol edilebilir. Hazırlanan yapı, fırında veya otoklavda kürlendikten sonra mandrelden çıkarılır. Fiber sarma yöntemi, basınçlı kaplar, roket parçaları ve endüstriyel depolama tankları gibi yuvarlak veya silindirik şekilli nesnelerin üretiminde yaygın olarak kullanılır (Mazumdar, 2001).

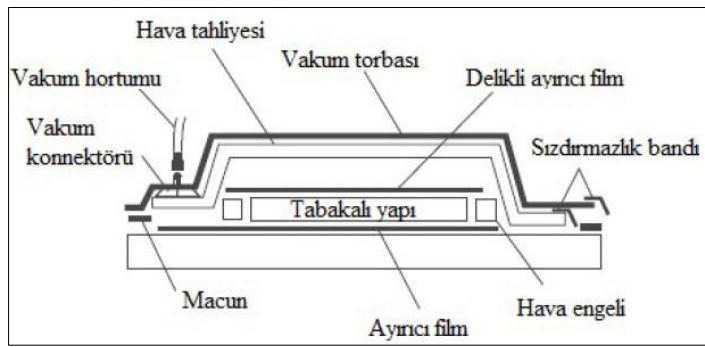


Şekil 2.15. Fiber sarma yöntemi (Leblebiciler, 2022)

2.4.5. Vakum torbalama yöntemi

Elle yatırma yönteminin daha gelişmiş versiyonu olan bu yöntem, yüksek kaliteli kompozit parçaların üretilmesini sağlar ve özellikle büyük ve karmaşık şekilli parçalar için uygundur. Elle yatırma yönteminde fiber ve reçine oranı standart olarak sağlanamaz ve kompozit parçanın kalıp ile temas etmeyen yüzeyinde deformasyonlar oluşabilir. Ayrıca, fiber ve reçine karışımının tüm yüzeye düzgün şekilde yapışmadığı durumlar da olabilir. Bu nedenle

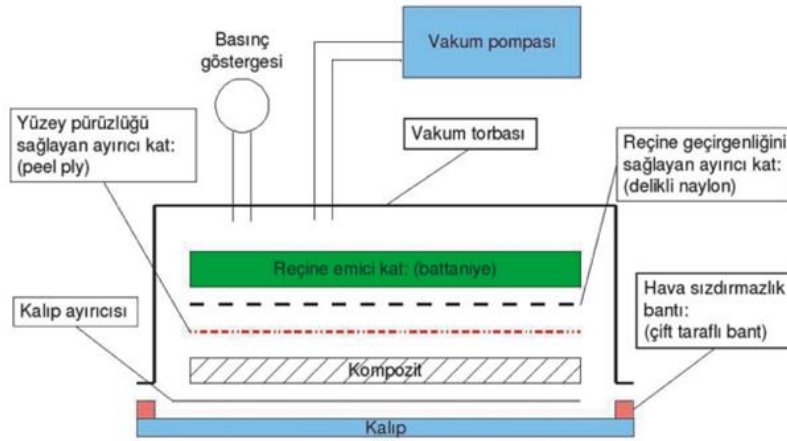
sorunları çözmek ve daha homojen bir fiber -reçine oranı elde etmek için vakum torbalama yöntemi kullanılır. Bu yöntemde, fiber ve reçine laminasyonu negatif basınç kullanılarak sıkıştırılır. Bu işlem, hava geçirmez bir kaplama (genellikle naylon) ve kalıp yüzeyinden oluşan bir düzenek ile gerçekleştirilir. İçerideki hava vakum pompası ile çekilir ve oluşan negatif basınç, reçine ve fiber karışımını baskı altında tutar. Bu sayede, reçinenin homojen bir şekilde dağılması sağlanır ve fazla reçine kontrol edilir. Ortamda sağlanabilecek maksimum basınç 1 atm olup, bu basınç reçinenin kürleşme süresince devam etmelidir (Bayraktar, 2016).



Şekil 2.16. Vakum torbalama yöntemi (Barbero, 2017)

2.4.6. Otoklav yöntemi

Otoklav bağlama yöntemi, polimer kompozitlerin üretiminde sıkça kullanılan ve yüksek kaliteli, yüksek performanslı parçalar elde etmeyi sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem, özellikle havacılık, uzay, otomotiv ve denizcilik gibi endüstrilerde tercih edilir. Otoklav bağlama yönteminde kompozit, otoklav adı verilen basınçlı bir kabin içinde yüksek sıcaklık ve basınç altında reçine ile kürlenmektedir. Bu yöntemle, kompozit malzemelerin fiber /reçine oranı artırılarak performanslarının iyileştirilmesi amaçlanır. Benzer şekilde, vakum yönteminde olduğu gibi, kompozit malzeme sızdırmaz bir torba içinde basınca maruz bırakılabilir. Bu süreçte, basınç ve sıcaklık düzenli bir şekilde uygulanabilmesi için otoklav adı verilen cihaz kullanılır. Otoklav, malzeme üzerinde bir atmosfer basıncının üzerinde kontrollü basınç ve sıcaklık sağlar. Bu yöntemle, kompozit malzeme kalıbının içine gaz sıkıştırılarak uygulanır ve yüksek kaliteli ürünler elde edilir. Ancak, bu yöntem maliyetli olup genellikle yüksek kalite ve performans gerektiren durumlarda tercih edilir (Şahin, 2008).

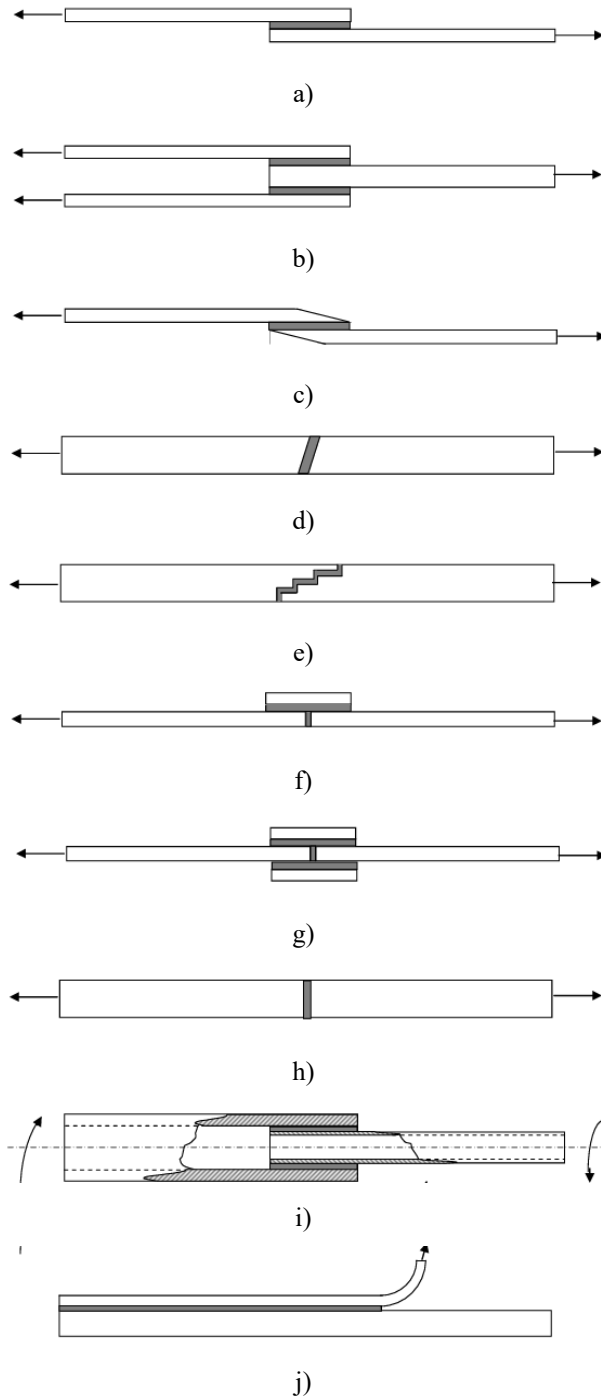


Şekil 2.17. Otoklav yöntemi şematik gösterimi (<https://avdesodrone.com/>)

2.5. Yapıştırma Bağlantıları

Yapısal mühendislik tasarımı, yükleme durumlarında yükleri ve gerilmeleri doğru bir şekilde belirleyebilme üzerine kuruludur. Genellikle yükleme sistemi bir fonksiyonla tanımlanır, ancak mühendisler en uygun maliyetli ve etkili çözümleri bulmak için en iyi malzeme ve tasarım tekniklerini kullanmalıdır. Bu süreç, teknolojiye sürekli ilerlemeyi ve yapısal yük ve gerilmeleri, modern mühendislik uygulamaları için daha da önemli hale getirir (Ekrem, 2015; Adin, 2007).

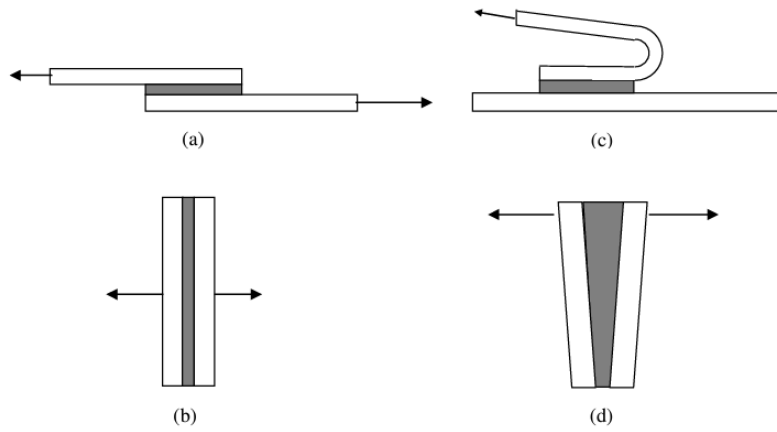
Yapıştırma bağlantısının tasarımı; malzemenin kendisine etkiyen dış yüklere karşı davranışını belirlemede önemli bir faktör oynamaktadır (Petrie,1975). Bu nedenle yapıştırma yoluyla elde edilecek malzemelerin bağlantı biçimleri; gerilme ve yükler dikkate alınarak özel olarak tasarlanmalıdır (Adin, 2007). Şekil 2.18’de yapıştırma bağlantı tipleri gösterilmektedir.



Şekil 2.18.Yapıştırma bağlantı tipleri (a) Tek taraflı bindirme bağlantısı, (b) çift taraflı bindirme bağlantısı, (c) Pahlı bindirme bağlantısı, (d) açılı bindirme bağlantısı, (e) kademeli bağlantı, (f) Tek taraflı takviyeli alın bağlantısı, (g) Çift taraflı takviyeli alın bağlantısı, (h) alın bağlantısı, (i) silindirik bindirmeli bağlantı, (j) soyulma (Ekrem, 2015).

2.5.1. Yapıştırma bağlantılarında oluşan gerilmeler

Yapıştırıcı bağlantılarında dört temel yükleme gerilimi türü vardır. Bunlar Şekil 2.19’da görüldüğü gibi, kesme, çekme, ayrılma, soyulmadır (Petrie, 2006).



Şekil 2.19. Gerilme tipleri: (a) kesme, (b) çekme (c) soyulma, (d) çekme-makaslama (Adin, 2007).

Kesme gerilmesi

Kesme yükleri, yapı üzerinde eşit bir şekilde dağılır ve bu, bağlantı ömrünü uzatarak maliyet etkinliği sağlar (Şekil 2.19.a). Bu tür yüklemelerde, yapısal alanın tamamına yükün etkisi yayılır. Bu nedenle, bağlantılar mümkün olduğunda yükün büyük bir kısmını kesme yükü olarak taşıyacak şekilde tasarlanmalıdır (Ekrem, 2015).

Çekme gerilmesi

Bu tür yüklemelerde, kuvvetler bağlantı düzlemine dik yönde etki etmektedir (Şekil 2.19.b). Bu durum gerilmenin yapısal alana eşit şekilde dağılmasını sağlar. Ancak, kuvvetlerin ekseninden sapması durumunda, gerilmenin bu şekilde yayılma avantajı kaybolur ve bağlantının bozulma riski artar. Ayrıca, yapıştırılan malzemenin kalın olması önemlidir; aksi takdirde, maruz kaldığı yükler nedeniyle malzeme belirgin şekilde eğilirse, gerilme dağılımı eşit olmayabilir (Adin, 2007; Ekrem, 2015).

Soyulma gerilmesi

Bu tür gerilmelerin meydana gelmesi için, yapıştırılan malzemelerden biri ya da her ikisi de esnek olmalıdır (Şekil 2.19.c). Bu tür yüklemelerde, bağlantı sınırlarında oluşan gerilmeler çok yüksek olabilir. Bağlantı geniş değilse veya yük düşük değilse, yapıştırma bağlantısı

hızla bozulabilir. Bu nedenle, bu tür yüklemelerden mümkün olduğunca kaçınılmalıdır (Adin, 2007).

Çekme-makaslama gerilmesi

Bu tür yükleme genellikle eksenden sapmış çekme kuvvetleri veya momentlerin etkisidir. Önceki gerilmelerin aksine, bu gerilme yapısal alana eşit dağılmaz ve bağlantının bir tarafında yoğunlaşır (Şekil 2.19.d). Bu gerilmelere karşı koymak için geniş bir yapısal alan gereklidir. Çekme veya kesme gerilmelerine göre bu alan daha büyük olduğu için, bu tür bağlantılarda maliyet artmaktadır (Adin, 2007).

2.6. Kompozit Malzemelerde Kırılma Mekanikliği

Malzemelerde kırılma mekanikliği, malzemenin çatlamaya, çatlamaların yayılmasına ve kırılmasına ilişkin davranışlarını inceleyen bir alandır. Bir malzemenin içerisinde bulunan çatlakların malzemedeki dayanıma etkisi kırılma mekanikliğinin konusudur. Kırılma mekanikliğinin temel amacı, malzemedeki oluşan çatlakların başlangıcını ve ilerlemesini araştırmaktır.

Kompozit malzemelerde katmanlar arası ayrılma veya “delaminasyon hasarı” kompozit yapılarda karşılaşılan ve genellikle uzun vadede malzemenin performansını önemli ölçüde etkileyen bir tür hasardır (Argüelles vd., 2008). Bu hasarın oluşumu, genellikle malzemeye etkiyen yükler gibi çeşitli etkenlere bağlı olarak, katmanların ayrılması sonucu meydana gelirler. Ayrılma sonucu oluşan kırılma hasarı, çatlakların açısı, konumu ve uzunluğuna bağlı olarak farklı biçimlerde gözlemlenir. Çatlakların başlama ve ilerleme süreçleri, bu özelliklere bağlı olarak çeşitlilik gösterir (Kaya, 2022). Çatlakların bu süreçlerinin araştırılması için farklı yükleme modları kullanılmaktadır (Yıldız, 2022).

Şekil 2.10’da görüldüğü gibi, kompozit malzemenin maruz kaldığı yüklemeye bağlı olarak malzemedeki kırılma modları; Mod I (çekme modu), Mod II (kayma modu), Mod III (yırılma modu) veya bu modların kombinasyonları delaminasyon çatlakları oluşumuna neden olmaktadır (Darıcık vd., 2017). Bu kırılma modları, malzemenin tasarımı ve davranışını anlamak, çatlakların yayılma özelliklerini değerlendirmek ve malzemenin güvenilirliğini belirlemek için kullanılır. Kompozit malzemelerde, bu kırılma modları, özellikle çeşitli yüklemelere ve çevresel

koşullara maruz kaldıkları karmaşık yapıları nedeniyle önemlidir. Malzemenin delaminasyon çatlağının başlamasına karşı gösterdiği direnç; malzemenin karakteristik özelliği olarak kabul edilir ve bu özellik, “kırılma tokluğu” olarak adlandırılır. Tabakalar arası kırılma tokluğu, çatlak yayılım hızını ifade eden “kritik şekil değiştirme enerjisi” (G_c) ile ölçülür (O'Brien, 1998; Ulus, 2019). Kompozit katmanları arasındaki çatlağın ilerlemesi için harcanan enerjinin bir ölçüsü olan “ G_{IC} ” değeri, matris/ fiber arayüzeyinde oluşan deformasyon ve kırılma davranışıyla ilgili bilgi sağlar. Bu değer, çatlakların ilerlemesi sürecinde matris ve fiber arasındaki etkileşimleri anlamamıza yardımcı olur (Ulus, 2019).

$$G_I = \frac{3P\delta}{2w(a + |\Delta|)}$$

G_I : Birim şekil değiştirme enerjisi yayılım hızı, mJ/mm²

P: Yük, N

δ : Yük uygulama noktaları arası açıklık, mm

w: Numune genişliği, mm

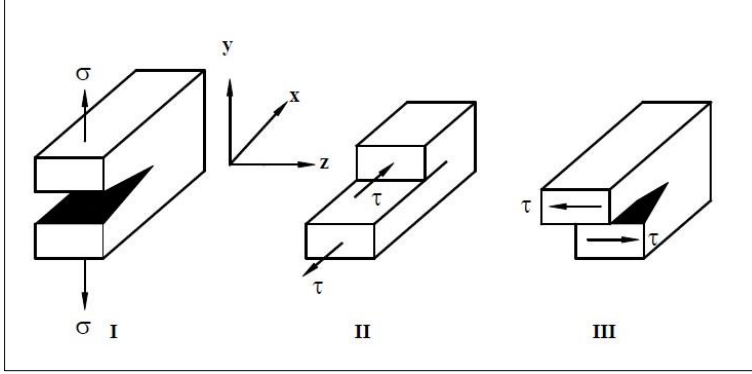
a: Toplam delaminasyon çatlağı uzunluğu, mm

Δ : Düzeltme faktörü

$C=\delta/P$: Kompliyans, mm/N

Şekil 2.20-I’de görüldüğü gibi Mod I açılma ya da çekme modunda kırılma yüzeyleri birbirine dik ve zıt yönde ayrılmaktadır. Bu kırılma modu diğerlerine göre daha sık rastlanılan ve malzeme dayanımı açısından daha kritik olan moddur. Mod II; kırılma yüzeylerinin x-z düzlemi üzerinde yer aldığı kayma modudur (Şekil 2.20-II). Mod III modu ise; kırılmanın x-y ve x-z düzlemlerinde ters simetrik ilerlediği yırtılma modudur (Dincer, 2013), (Şekil 2.20-III).

Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (ASTM) malzemelerin özelliklerini belirlemek, kalite kontrolünü sağlamak ve standart test yöntemleri oluşturmak amacıyla bir dizi malzeme test standartları belirleyen bir kuruluştur. ASTM “Mod I, Mod II ve Mod III” yüklemeleri altında tabakalar arası “kırılma tokluğunu” ölçmek için spesifik test yöntemleri geliştirmiştir (Hojo, 1995).



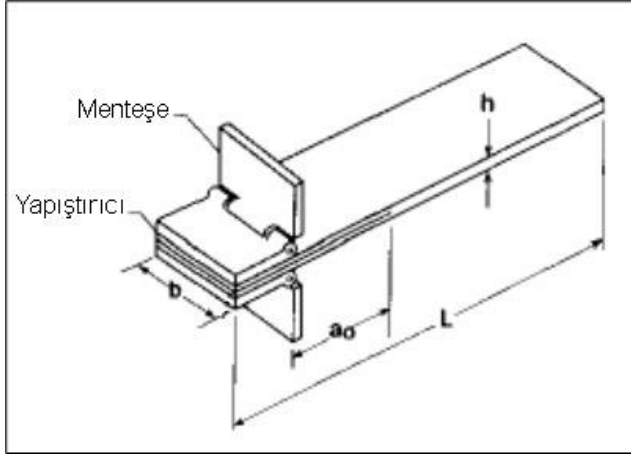
Şekil 2.20. Kırılma modları (I) Mod I, ayrılma kırılması (II) Mod II, kesme kırılması (III) Mod III, yırtma kırılması

2.6.1. Mod- I kırılma mekaniği testi

Delaminasyona yatkınlık, birçok gelişmiş lamine kompozit yapının en önemli zayıflıklarından biridir. Bir lamine kompozit malzemenin interlaminar kırılmaya karşı direncinin bilinmesi, ürün geliştirme ve malzeme seçimi için yararlıdır. Ayrıca, numune geometrisinden veya yük uygulama yönteminden bağımsız olarak Mod I interlaminar kırılma tokluğunun ölçülmesi, bu malzemelerden yapılan kompozit yapıların hasar tolerans analizlerinde kullanılan tasarım izinlerini belirlemek için yararlıdır (ASTM D5528, 2007).

DCB (Çift Konsol Kiriş) Testi

Çift Konsol Kiriş (DCB) testi, mod I açma kuvvetlerine maruz kalan yapışkan bağlantıların kırılma direncini (GI) ölçmeye yönelik yöntemlerden biridir (Monteiro vd., 2015). Çift konsol kiriş testleri, basit üretimleri, uygulama kolaylıkları ve iyi tanımlanmış standart test prosedürleri nedeniyle yapıştırıcıların kırılma karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılan tekniktir (O'Brien, 1998). ASTM standardı D5528'e göre çift konsol kiriş test numunesi geometrisi Şekil 2.21'de gösterilmektedir (Standart, 2007). Bu test, çift konsol kiriş (DCB) numunesi kullanılarak tek yönlü fiber takviyeli polimer matrisli kompozit laminatların açılma modu-I interlaminar kırılma tokluğunu (G_{Ic}) belirlemek için kullanılır.



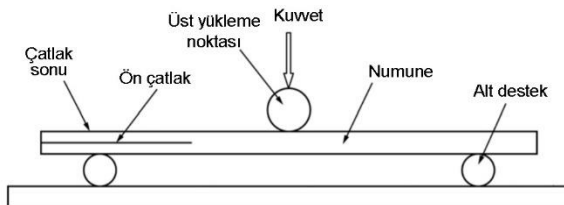
Şekil 2.21. Çift Konsol Kiriş test numunesi (Standart, 2007)

2.6.2. Mod- II kırılma mekaniği testi

ENF (Uç Çentikli Eğilme) testi

Birleştirilmiş bağlantıların mod II kırılma tokluğunu (G_{II}) ölçmek için en yaygın kullanılan testlerden biri Uç Çentikli Eğilme testidir (Russell ve Street, 1987). Bu test, malzemenin kayma modunda çatlak ilerleme direncini ve enerji serbest bırakma oranını belirlemek amacıyla yapılır. Barrett ve Foschi (1977) bu testi ahşap kirişlerin kırılma karakterizasyonu için geliştirip kullanmıştır. Uç çentikli eğilme testlerinde karşılaşılan en önemli sorun dengesiz çatlak yayılımıdır (Blackman ve diğerleri, 2006). Bu karmaşıklık nedeniyle ENF testinde çatlak uzunluğunun deneysel olarak ölçülmesi sırasında DCB ve SLJ testleriyle karşılaştırıldığında sorunlar ortaya çıkmaktadır (de Moura, 2006).

ASTM D7905'e göre ENF test numunesinin geometrisi Şekil 2.22'de gösterilmektedir.

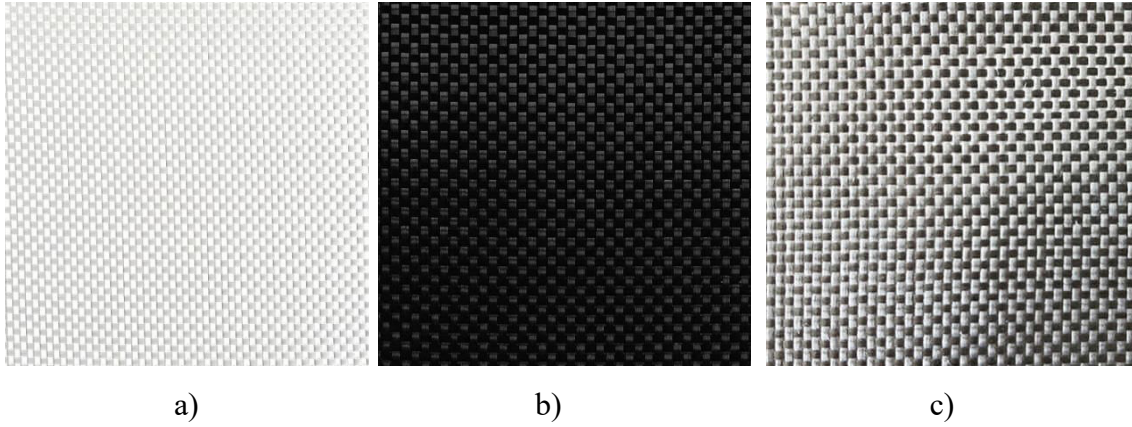


Şekil 2.22. Uç Çentikli Eğilme test numunesi (Standart, 2007)

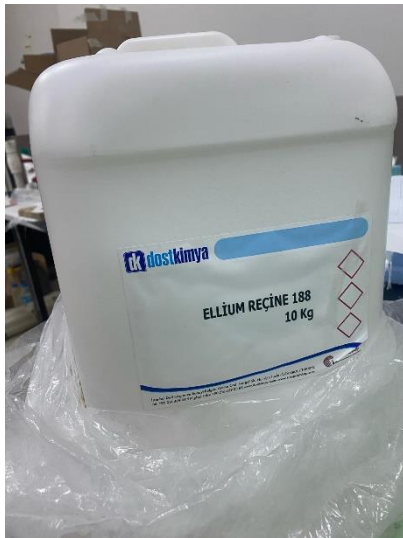
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Malzemelerin Temini

Bu çalışmada 0/90 derece oryantasyona sahip 200 g/m² dokuma ağırlığındaki cam, karbon, bazalt fiber takviyeleri Dost Kimya Ltd.'den tedarik edilmiştir. Ayrıca kompozit malzemelerin matris bileşeni olan Elium® 188 reçinesi ve sertleştiricisi Benziot Peroksit yine Dost Kimya Ltd.'den tedarik edilmiştir (Şekil 3.1). Çalışmada havacılık endüstrisinde kullanılan 6000 serisi alüminyum metal plakalar (Al-6061) Özen Metal firmasından satın alınmıştır.



Şekil 3.1. Benzer fiziksel özelliklere sahip fiberlerin temsili görüntüleri a) Cam b) Karbon c) Bazalt fiber (Dost Kimya)



Şekil 3.2. Elium® 188 reçine

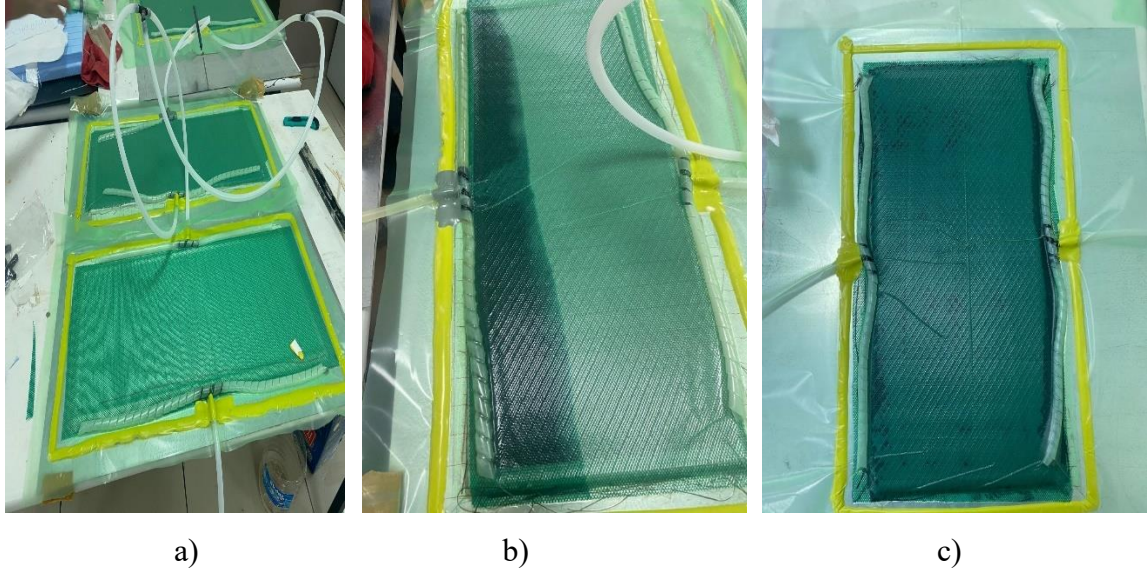
3.2. Kompozit Malzemelerin Üretimi

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin üretimi vakum destekli reçine infüzyon metodu ile gerçekleştirilmiştir. Birbirine yakın fiziksel özellikteki cam, karbon ve bazalt fiber takviyeleri belirli ölçülerde kesilip ayrı ayrı düz bir kalıp üzerine serilmiştir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Fiberlerin kesim işlemlerine ait görüntüler

Üretim için gerekli; ayırıcı film, soyma kumaşı, dağıtıcı file, vakum bandı, spiral boru gibi sarf malzemeler Bölüm 2 de vurgulanan üretim yöntemine göre takviye elemanlarının altına ve üstüne yerleştirilmiş, sonrasında kalıp üzerine serilmiş fiber yığınları vakum altına alınmıştır. Diğer yandan Elium® reçinenin hazırlanması gerçekleştirilmiş; üretici firma önerisi üzerine kütlece %3 oranında Hidrojen Peroksit (H_2O_2) kürleştirici Elium® reçineye katılmıştır. Karışım bir vakum pompası yardımıyla 15 dk boyunca mekanik karıştırıcı ile karıştırıldıktan sonra 20-30 dakika arası vakum fırın içinde oda sıcaklığında vakuma alınmıştır. Buradaki prosesin amacı mekanik karıştırma işlemi sırasında oluşan hava kabarcıklarını minimize etmek ve uçuculuk oranı yüksek olan Elium® reçinenin kürleşmesi sırasındaki çekme / büzüşme payını azaltmaktır. Bir vakum pompası yardımıyla hazırlanan reçinenin vakum altındaki bölgeye girişi ve fiberler tarafından emdirilmesi sağlanmıştır (Şekil 3.4). Fiberlerin üzerindeki fazla reçinenin de dışarı tahliyesine imkan verilmiştir. Fiberlere Elium® reçinesi emdirildikten sonra katılaşması için oda sıcaklığında 24 saat bekletilmiş ve 80 derecede 4 saat post kür işlemi uygulanmıştır. İşlem sonunda 300 x 300 x 4 mm ebatlarında cam, karbon ve bazalt takviyeli Elium® matrisli kompozit plakaların üretimi tamamlanmıştır.

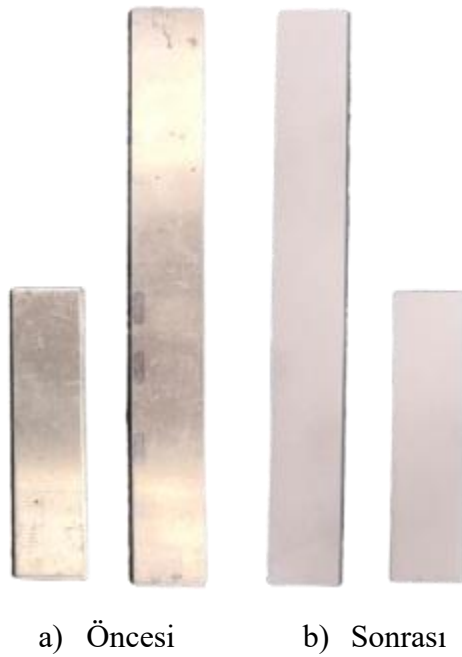


Şekil 3.4. VARI yöntemi ile kompozit üretim aşamaları a) Vakum ortamının kurulumu b) Vakum altında reçinenin fiberler üzerinde dağılımı c) Vakum altında reçinenin fiberler tarafından tamamen emilimi

3.3. Deney Numunelerin Hazırlanması

3.3.1. Yüzey hazırlama işlemleri

Birbirine bağlı kompozit-alüminyum bileşenlerin mekanik performansı, bağlanan yüzeylere uygulanan ön işleme bağlıdır. Kompozit-alüminyum yapıştırma bağlantılarında, bileşenlerin farklı doğası nedeniyle hem alüminyum hem de karbon, bazalt ve cam kompozit yüzeyler için iki farklı yüzey hazırlama prosedürü kullandık. İlk olarak kompozit yüzeyleri, sırasıyla 180 ve 320 kum zımpara kâğıdı ile zımparalanarak hazırlandı. Burada, ASTM D2093 'e göre 180 numaralı kum zımpara kâğıdı uygulanarak reçine zengin yüzeyin kaba aşındırma ile çıkarılması ve ardından 320 kum zımpara kâğıdı ile örtüşme alanlarının ince aşındırılması hedeflendi (Kaybal vd., 2024). Yapışkanla mekanik kilitlemenin etkinliğini artırmak amacıyla zımparalama işlemleri yapışkanın enine yönünde uygulanmıştır. Alüminyum yapışkan yüzeylerinin hazırlanması için ise üç aşamalı prosedürler kullanılmıştır. İlk aşamada, 90°C sıcaklıkta 15 dakika boyunca banyoda ultrasonik olarak alkali temizleme işlemi uygulanmıştır. Ardından, yüksek mekanik kilitleme ve yapışma performansı için ince bir alüminyum oksit tabakasıyla kaplanmış pürüzlü bir yüzey oluşturmak amacıyla, ASTM D2651 ve ASTM D3933 standartlarına uygun olarak sülfürik asit aşındırma ve fosforik asit anotlama (hibrit yüzey işlemi) kullanılmıştır (Ulus vd., 2022). Alüminyum bileşenlerinin yüzey hazırlama işlemleri öncesi ve sonrası görüntüleri Şekil 3.5'te verilmiştir.

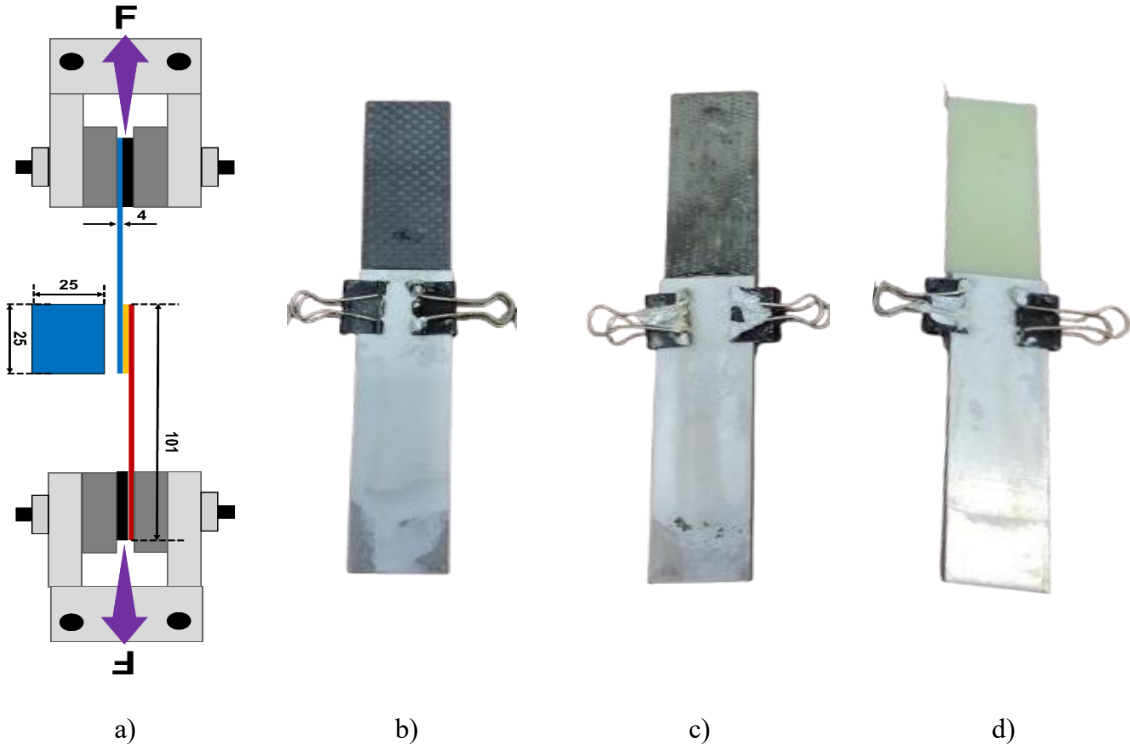


Şekil 3.5. Sülfirik asit aşındırma ve fosforik asit anotlama yüzey işlemleri öncesi ve sonrası alüminyum bileşenlerine ait yüzey görüntüleri

3.3.2. Tek taraf bindirmeli bağlantı numunelerinin hazırlanışı

Bu tez çalışmasında, numunelerin kayma testleri için tek taraf bindirmeli bağlantı modeli kullanılmıştır. Bağlantı modeli, yapının bir bileşeni fiber takviyeli kompozit malzeme diğer bileşeni alüminyum plaka olacak şekilde kurgulanmıştır. Tek taraflı bindirme testleri için hem kompozit hem de alüminyum bileşenler $4 \times 25 \times 101 \text{ mm}^3$ ebatlarında hazırlanmıştır. Yüzey hazırlama işlemlerinden sonra, Elium® yapıştırıcı için yapıştırıcı ve sertleştirici maddeler ağırlıkça 100:3 oranlarında karıştırıldı. Yapıştırıcılar yaklaşık 10 dakika mekanik olarak karıştırılarak homojen bir karışım elde edildi ve ardından karışım içindeki hava kabarcıklarından arındırılmak için 15 dk süreyle oda sıcaklığında vakumlu fırın içerisinde bekletilmiştir. Hava kabarcıklarından arındırıldıktan sonra karışım spatula kullanılarak kompozit/alüminyum $25 \times 25 \text{ mm}^2$ alana sahip örtüşme bölgelerine uygulanmıştır. Daha sonra, sabit yapışkan kalınlığı oluşturmak için $0.22 \text{ }\mu\text{m}$ çapında küre kristalitler serpildi. Yapıştırıcıların örtüşme yapışkanları üzerine kontrolsüz bir şekilde çıkmasını önlemek amacıyla yapışkanın jelleşmesi beklenip, örtüşen yapışkanlar klipslerle sabitlendi. Kurlleme işlemi 24 saat oda sıcaklığında (RT) ve 8 saat 100°C 'de gerçekleştirildi (Kaybal vd., 2024) ve böylece Şekil 3.6'da görüldüğü gibi; numune boyutları ve karbon fiber (KF), bazalt fiber

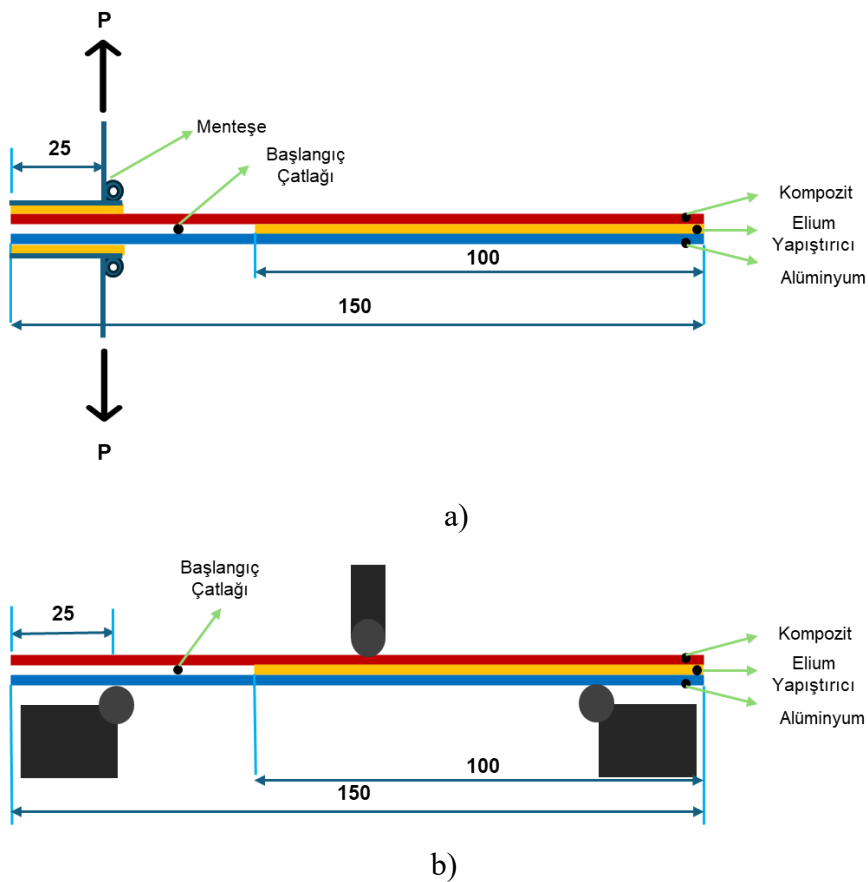
(BF) ve cam fiber (CF) kompozit numunelerin alüminyum (Al) ile olan tek bindirmeli bağlantı numunelerinin hazırlama işlemleri tamamlanmıştır. Kırılmeden sonra örtüşme kenarlarındaki taşan yapıştırıcılar törpülenerek çıkarılmıştır.



Şekil 3.6. Tek taraflı bindirmeli bağlantılı numune görüntüleri a) Numune konfigürasyonu b) Karbon-Alüminyum (KF-Al), c) Bazalt-Alüminyum (BF-Al) d) Cam-Alüminyum (CF-Al)

3.3.3. Mod I-Çift Konsol Kiriş ve Mod II-Uç Çentik Eğilme test numunelerinin hazırlanışı

Mod I ve Mod II tabakalar arası kırılma özelliklerinin tespiti için yapay delaminasyon içeren çift konsol kiriş ve uç çentik eğilme test numuneleri kullanılmıştır. Üretimi yapılan çift konsol kiriş ve uç çentik eğilme numunelerin ölçüleri ($150 \times 25 \times 4 \text{ mm}^3$), numune içerisindeki liflerin yerleşimi ve numunelerde bulunması gereken ön çatlaklar ASTM D5528-01 test standartına uygun olarak hazırlanmıştır. Bu kırılma testi numuneleri hazırlanırken orta ara yüzeye kalınlığı $12 \text{ }\mu\text{m}$ olan PET film tabakası yerleştirilmiştir. Böylece numunelerde başlangıç çatlakları oluşturulmuştur. Yapay delaminasyon görevi görecektir bu film tabakası, Elium® matrise yapışmaması için, yüzeyleri kalıp ayırıcı ile kaplanmıştır. Kırılma testinde kullanılacak numunelerin ölçüleri Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Kırılma testlerine ait numunelerin geometrik ölçüleri a) Çift konsol kiriş testi numunesi b) Uç çentik eğilme testi numunesi

3.4. Kayma ve Kırılma Testleri ile Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Yapıştırıcı ile güçlü, ekonomik ve güvenli bir bağlantı sağlamak, yapıştırıcının taşıyabileceği en yüksek yükün belirlenmesi için yapılan güvenilir testlere ve yapışma bağlantısının gerilme analizlerine dayanır. Yapışma bağlantılarının dayanıklılığı, yapıştırılan parçaların boyutları, kalınlıkları, elastikiyet modülleri, yapıştırıcının kayma modülü, yapıştırma işleminin uygulanış biçimi, yüzeylerin ön hazırlığı, yapışma uzunluğu ve bağlantıların maruz kalacağı çevresel koşullar gibi faktörlere bağlıdır.

Yapıştırma bağlantılarının dayanıklılığı, bağlantı bölgesindeki gerilme dağılımına bağlıdır. Bu dağılımı etkileyen en önemli faktörler, bağlantının geometrisi ve yapıştırıcı ile yapıştırılan malzemenin mekanik özellikleridir. Yapıştırma bağlantıları tasarlanırken

gerilme dağılımları en aza indirilir; ancak soyulma ve makaslama gibi gerilmeler azaltılırken, kayma ve basma gibi gerilmeler en yüksek düzeye çıkar. Çalışmamızda ilk olarak Elium® 188 termoplastik yapıştırıcı ile birleştirilmiş karbon, bazalt ve cam fiber takviyeli kompozit/alüminyum yapıların kayma testleri gerçekleştirilmiştir. Kayma testleri Shimadzu AGS-X 10 kN üniversal test cihazında 2 mm/dk çekme ve eğilme hızlarında olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Kompozit/Al yapıların kayma testlerine ait görüntü Şekil 3.8a’da verilmiştir. Her bir numune türünden beş numune kayma testine tabi tutulmuş ve ortalama test sonuçları dikkate alınmıştır. Çekme testi sırasında, her bir numuneye uygulanan kuvvet (P) ve yer değiştirme (δ) değerleri, bilgisayardaki test arayüzeyi tarafından anlık olarak kaydedilmektedir. Test sonrasında bu veriler, 1 nolu denklem kullanılarak kayma gerilmelerinin hesabında kullanılmıştır (Owens ve Leesullivan, 2000).

$$\tau = P / b.l \quad (1)$$

Burada, P ; uygulanan kuvveti, b ; bağlantının genişliği ve l ; bindirme uzunluğunu temsil etmektedir.

Karbon, bazalt ve cam fiber takviyeli kompozitlerin alüminyum ile oluşturduğu yapıların kırılma davranışlarını incelemek amacıyla mod I ve mod II ara tabaka kırılma tokluğu enerjisi testleri gerçekleştirilmiştir. Kırılma testleri, 2 mm/dak yer değiştirme hızına sahip Shimadzu AGX-10 kN cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Test ile, yapıların kuvvet-deplasman eğrileri yanında mod I ve mod II tabakalar arası kırılma tokluğu enerjileri de tespit edilmiştir. Numunelerin mod-I kırılma tokluğu testi kullanılarak kırılma tokluğu enerjisi, G_{IC} , DIN EN 6033:2016-02 standardına dayalı olarak belirlenmiştir. Bu test yöntemine göre, ara tabaka kırılma tokluğu enerjisi, iki katman arasındaki bir ara tabaka çatlağında birim çatlak büyümesini üretmek için gerekli olan birim plaka genişliği başına düşen enerjidir (Sapanci, 2019). Mod I testi için tabakalar arası kırılma tokluğu enerjisi (G_{IC}) değerleri, Denklem 2’de verilen ifadeden hesaplanmıştır. Test sırasında alınan görüntü Şekil 3.8b’ de verilmiştir.

$$G_{IC} = \frac{A}{a.w} 10^6 \quad (2)$$

Burada G_{IC} J/m² cinsinden kırılma tokluğu enerjisini, A; Joule cinsinden toplamda yayılan çatlak uzunluğuna ulaşmak için gereken enerji, a; mm cinsinden uzanan çatlak uzunluğunu, W; mm cinsinden numune genişliğini ifade etmektedir.

Üretilen test kuponlarının Mod-II ara tabaka kırılma tokluğu enerjisi, G_{IIC} , DIN EN 6034:2016-02 standardına göre belirlenmiştir. Bu test yönteminde, tabakalar arası kırılma tokluğu enerjisi, iki katman arasındaki çatlakın, üç nokta eğme testi ile çatlak ucuna uygulanan kayma kuvvetleri ile birim çatlak büyümesi oluşturmak için gerekli olan birim plaka genişliği başına düşen enerjidir (Sapanci, 2019). Uç çentik eğilme testi tabakalar arası kırılma tokluğu enerjisi denklem 3 'e göre hesaplanmıştır.

$$G_{IIC} = \frac{9 \times P \times a^2 \times d \times 1000}{2 \times w \left(\frac{1}{4L^3} + 3a^3 \right)} \quad (3)$$

Burada, G_{IIC} ; J/m² biriminde Mod II kırılma tokluğu enerjisini, D; çatlak delaminasyon başlangıcında mm cinsinden yer değiştirme miktarını, P; çatlak başlamasına neden olan kritik kuvveti (N), A; mm cinsinden başlangıç çatlak uzunluğunu, W; numune genişliğini (mm) ve L; destekler arası açıklığı (mm) tensil etmektedir. Şekil 3.8c uç çentik eğilmesi testi sırasında alınan görüntüyü göstermektedir.



a)



b)



c)

Şekil 3.8. Kayma ve kırılma testlerinin uygulanması a) Tek bindirmeli bağlantılı kayma testi b) Mod I-Çift konsol kiriş testi c) Mod II-Uç çentik eğilme testi

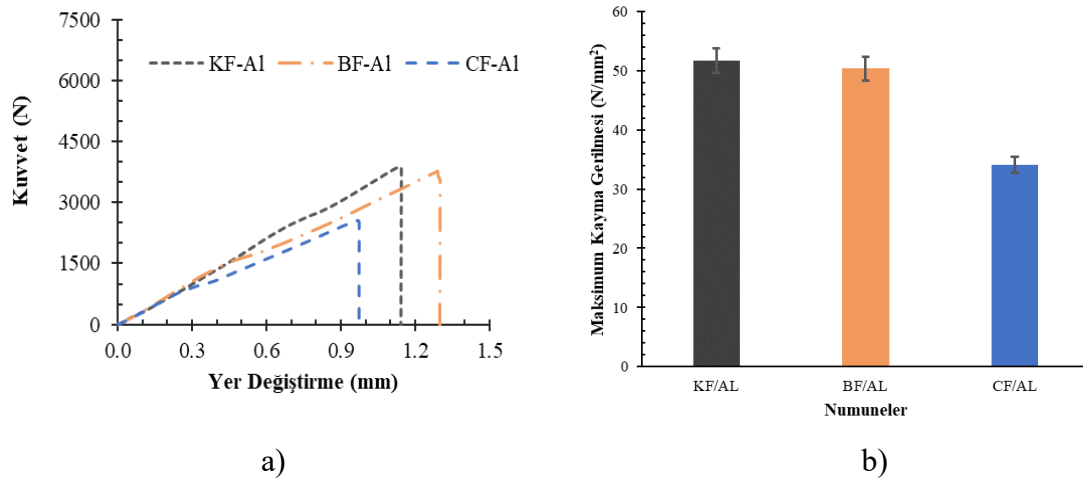
3.5. Kırılma Hasarı İncelemeleri

Kompozit/alüminyum yapıların kayma ve kırılma testleri sonrası elde edilen hasar görüntüleri Canon 105 mm Makro lensli Canon EOS 6D kamera kullanılarak değerlendirilmiştir.

4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Tek Bindirme Bağlantılı Kompozit Numunelerin Çekme Testi Sonuçları

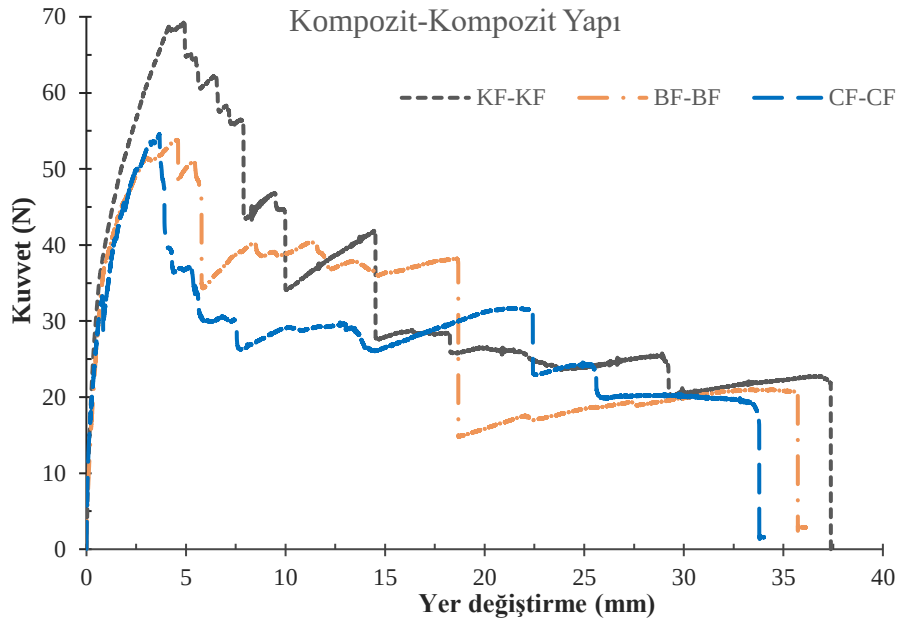
Karbon, bazalt ve cam fiber kompozit malzemelerin alüminyum plakalar ile Elium® yapıştırıcısı kullanılarak gerçekleştirdikleri tek bindirmeli bağlantılara ait çekme testleri sonuçları Şekil 4.1’de verilmiştir. Numunelerin, kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde KF-Al kompozit yapının yük taşıma performansının diğer numunelere göre daha fazla olduğu görülürken, aynı bağlantı konfigürasyonunda kompozit yapıdaki şekil değişimi BF-Al den sonra ikinci büyük değerine ulaşmıştır (Şekil 4.1a). Elium® yapıştırıcısının kompozit/alüminyum bağlantılarında gösterdiği performans BF-Al yapılarda KF-Al yapılara göre düşüş gözlenmiştir. KF-Al bağlantının yük taşıma kapasitesi 3879 N olarak bulunurken, % 2.7 düşüş ile BF-Al tek bindirmeli yapıda 3776 N olarak tespit edilmiştir. Diğer yandan, Elium® yapıştırmasının en düşük yük taşıma kapasitesi CF-Al tek bindirmeli yapıştırma bağlantısında 2558 N olarak ölçülmüştür. Bu değer ile birlikte, karbon takviyeli yapıya göre neredeyse % 34 oranda yük kaybı yaşanırken, bu oran bazalt takviyeli yapıya göre %32 kayıp olarak kayıtlara geçmiştir. Yapıştırılmalı numunelerin kayma gerilmeleri sonuçları incelendiğinde, yük taşıma kapasiteleriyle doğru orantılı olarak değiştiği görülmektedir (Şekil 4.1b). Kompozit yapıların kayma gerilmeleri KF-Al, BF-Al ve CF-Al için sırasıyla 51.72, 50.34 ve 34.11 N/mm² olarak hesaplanmıştır. Karbon ve bazalt takviyeli alüminyum bağlantıların kayma gerilmelerinin neredeyse birbirleriyle benzer olduğu gözlenirken, cam takviyeli bağlantıda nispeten daha düşük bir kayma gerilmesi tespit edilmiştir. Seong ve ark. karbon kompozit ve alüminyum ile gerçekleştirdikleri tek bindirme bağlantılarının gerilme değerlerini farklı birleştirme basınçları altında 18.5 – 24 MPa aralığında değiştiğini gözlemişlerdir (Seong, et al.,2008). FM73m model yapıştırıcıların kullanıldığı çalışmada, bağlantı gerilmelerinin Elium® matrise göre epey düşük performans gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4.1. Kompozit numunelerin çekme testleri sonuçları a) Kuvvet-yer değiştirme eğrileri b) Kayma gerilmeleri

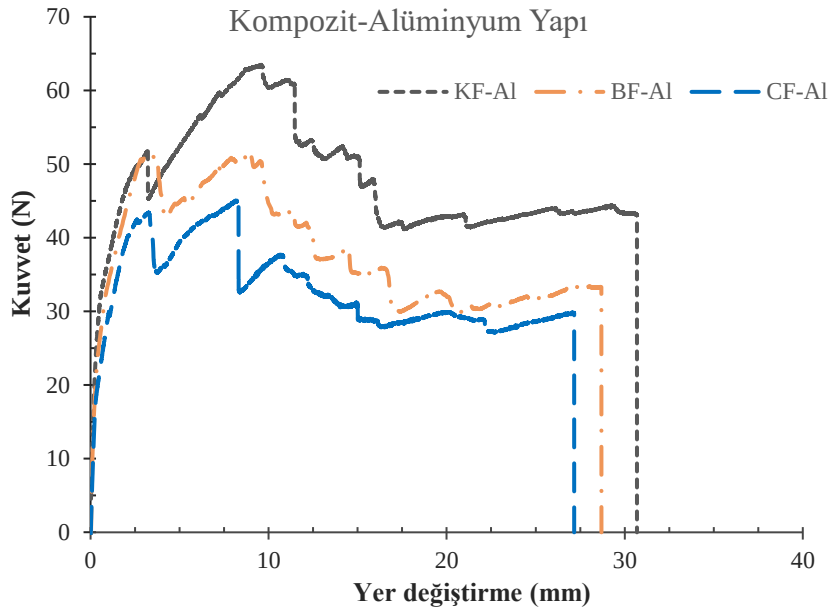
4.2. Mod I- Çift Konsol Kiriş Testi Sonuçları

Karbon, bazalt ve cam fiber kompozit malzemelerin kompozit malzemeler ile Elium® yapıştırıcısı kullanılarak gerçekleştirdikleri Mod I çift konsol kiriş testleri sonuçları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Numunelerin, kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde KF-KF kompozit yapının yük taşıma performansının diğer numunelere göre daha fazla olduğu görülürken; CF-CF kompozit yapının KF-KF yapıdan sonra ikinci büyük değere ulaştığı görülmektedir (Şekil 4.3). Elium® yapıştırıcısının kompozit/kompozit numunelerde gösterdiği performans BF-Al yapılarda KF-Al yapılara göre düşüş gözlenmiştir. KF-KF bağlantılı numunelerin çift konsol kiriş testi sonucu yük taşıma kapasitesi 69 N olarak bulunurken, % 19.04 düşüş ile CF-CF yapıda 54,59 N olarak tespit edilmiştir. Çift konsol kiriş testi sonucu Elium® yapıştırıcısının en düşük yük taşıma kapasitesi 54 N ile BF-BF yapılarda görülmektedir. Bu değer KF- KF yapılarına göre % 21.73 düşüş, CF- CF yapılarına göre % 1.08 düşüş göstermektedir.



Şekil 4.2. Kompozit-kompozit numunelerin çift konsol kiriş deney sonucu kuvvet- yer değiştirme eğrileri

Karbon, bazalt ve cam fiber kompozit malzemelerin alüminyum plakalar ile Elium® yapıştırıcısı kullanılarak gerçekleştirdikleri Mod I çift konsol kiriş testleri sonuçları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Şekil 4.3'te verilen çift konsol kiriş testlerine ilişkin kuvvet- yer değiştirme grafikleri incelendiğinde KF-Al kompozit numunenin diğer numunelere göre yük taşıma performansının daha fazla olduğu görülmektedir. BF- Al kompozit yapıların; KF- Al yapılardan sonra yük taşıma performansı bakımından ikinci sırada yer aldığı görülmektedir (Şekil 4.3). Elium® yapıştırıcısının kompozit/alüminyum bağlantılarında gösterdiği performans BF-Al yapılarda KF-Al yapılara göre düşüş gözlenmiştir. KF-Al bağlantılı numunelerin çift konsol kiriş testi sonucu yük taşıma kapasitesi 63 N olarak bulunurken, % 19.04 düşüş ile BF-Al yapıda 51 N olarak tespit edilmiştir. Çift konsol kiriş testi sonucu Elium® yapıştırıcısının en düşük yük taşıma kapasitesi 45.16 N ile CF- Al yapılarda görülmektedir. Bu değer KF- Al yapılarına göre % 28.31 düşüş, BF- Al yapılarına göre % 11.45 düşüş göstermektedir.

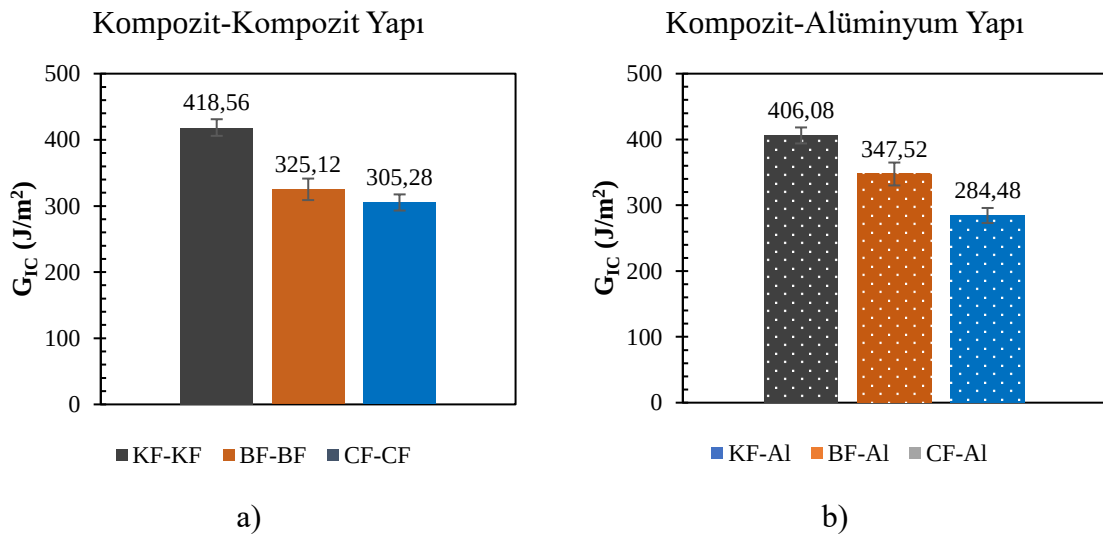


Şekil 4.3. Kompozit-metal numunelerin çift konsol kiriş deney sonucu kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Şekil 4.4, Mod I Çift Konsol Kiriş testi sonrasında kırılma tokluğu enerjilerinin (G_{Ic}) farklı kompozit-kompozit ve kompozit-alüminyum bağlantı yapılarına göre değişimini göstermektedir. Kompozit-kompozit yapının, KF-KF numuneleri 418.56 J/m^2 ile en yüksek kırılma tokluğu enerjisine sahiptir (Şekil 4.4a). Bu durum, karbon fiberlerin yüksek mekanik dayanımı ve matris ile güçlü bağ oluşturma kapasitesine atfedilebilir. BF-BF bağlantılar, 325.12 J/m^2 ile orta seviyede bir kırılma tokluğu göstermiştir. Bazalt fiberlerin mekanik özellikleri karbon fiberlerden daha zayıf olmasına rağmen, cam fiberlere göre daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir. Cam fiber takviyeli kompozit bağlantılar ise 305.28 J/m^2 ile en düşük kırılma tokluğu enerjisine sahiptir ve bu durum cam fiberlerin elastikiyet modülü ve mekanik dayanımının düşük olmasına bağlanmıştır. Elde edilen veriler, karbon fiberin en yüksek kırılma dayanıklılığı sağladığını, bazalt fiberin ise maliyet ve performans arasında dengeli bir seçenek sunduğunu, cam fiberin ise ekonomik olmasına rağmen mekanik dayanım açısından sınırlı bir performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, Elium® reçine matrisli kompozit yapılarda, kullanılacak fiber türünün, malzemenin nihai performansını belirlemede kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

Kompozit-Alüminyum bağlantılarının kırılma tokluğu enerjilerini (G_{Ic}) gösteren Şekil 4.4b de KF-Al yapı, 406.8 J/m^2 ile en yüksek kırılma tokluğuna sahiptir. Bu sonuç, karbon fiberlerin yüksek mekanik özellikleri ve alüminyum ile güçlü bir bağ oluşturma kapasitesine

sahip olmasına dayandırılmaktadır. Bazalt fiber takviyeli kompozit ve alüminyum bağlantılar 347.52 J/m^2 ile orta seviyede bir kırılma tokluğu göstermiştir. Cam fiber takviyeli kompozit ve alüminyum bağlantılar ise 284.48 J/m^2 ile en düşük kırılma tokluğu enerjisine sahiptir ve bu durum Elium® yapıştırıcının aynı zamanda alüminyum yüzeylerle olan ilişkisini de açıklamaktadır. Fiber takviyeli kompozit yüzeyler alüminyum plakalar ile birleştirildiğinde KF-Al ve CF-Al yüzeylerinin enerji toklularında düşüş gözlenirken, BF-Al yüzeylerin kırılma enerjisinde artış gözlenmiştir. Ayrıca, alüminyumun mekanik özellikleri ile Elium® reçinenin birleşimi, fiber türü fark etmeksizin kompozit-alüminyum bağlantıların genel kırılma tokluğuna etkisinin olduğu görülmektedir. Bu bağlamda, karbon fiber takviyeli kompozitlerin, yüksek mekanik dayanım gerektiren hibrit yapılar için daha uygun olduğu sonucuna varılabilir.

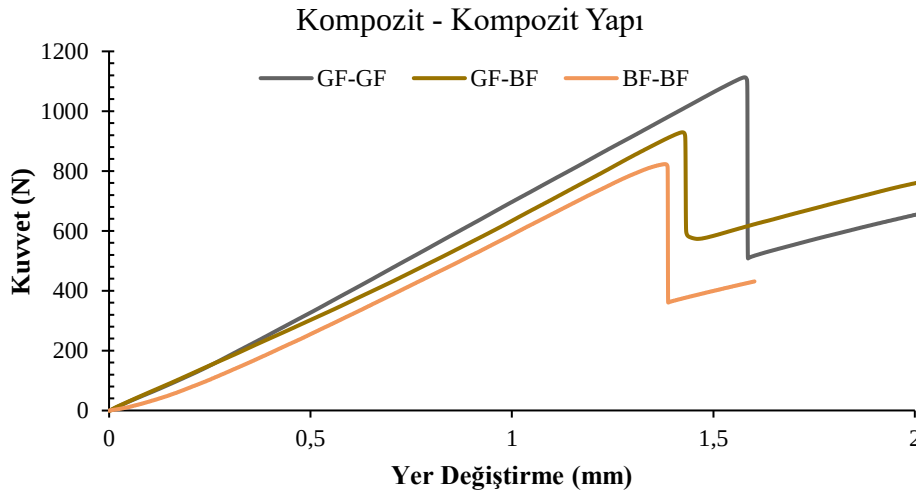


Şekil 4.4. Çift konsol kiriş testi tabakalar arası kırılma tokluğu enerjileri bar grafikleri a) Kompozit-Kompozit yapı b) Kompozit-Alüminyum yapı

4.3. Mod II- Uç Çentikli Eğilme Deneyi Sonuçları- ENF Testi

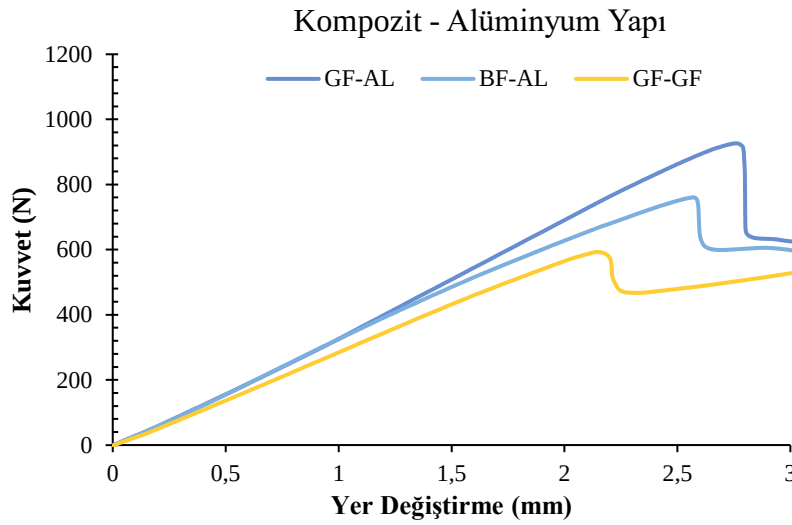
Karbon, bazalt ve cam fiber kompozit malzemelerin kompozit malzemeler ile Elium® yapıştırıcısı kullanılarak gerçekleştirdikleri Mod II uç çentikli testleri sonuçları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Numunelerin, kuvvet-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde KF-KF kompozit yapının yük taşıma performansının diğer numunelere göre daha fazla olduğu görülürken; BF-BF kompozit yapının KF-KF yapıdan sonra ikinci büyük değere ulaştığı görülmektedir (Şekil 4.3). Elium® yapıştırıcısının kompozit/kompozit numunelerde gösterdiği performans BF-BF yapılarda KF-KF yapılara göre düşüş

gözlenmiştir. KF-KF bağlantılı numunelerin uç çentikli eğilme testi sonucu yük taşıma kapasitesi 1113 N olarak bulunurken, % 16.53 düşüş ile BF-BF yapıda 929 N olarak tespit edilmiştir. Uç çentikli eğilme testi sonucu Elium® yapıştırmasının en düşük yük taşıma kapasitesi 823 N ile CF-CF yapılarda görülmektedir. Bu değer KF- KF yapılarına göre % 26.05 düşüş, BF- BF yapılarına göre % 12.87 düşüş göstermektedir.



Şekil 4.5. Kompozit-kompozit numunelerin uç çentikli eğilme deney sonucu kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Karbon, bazalt ve cam fiber kompozit malzemelerin alüminyum plakalar ile Elium® yapıştırıcısı kullanılarak gerçekleştirdikleri Mod II uç çentik eğilme testleri sonuçları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Şekil 4.5'te verilen test sonuçlarına ilişkin kuvvet- yer değiştirme grafikleri incelendiğinde KF-Al kompozit numunenin diğer numunelere göre yük taşıma performansının daha fazla olduğu görülmektedir. BF- Al kompozit yapıların; KF- Al yapılardan sonra yük taşıma performansı bakımından ikinci sırada yer aldığı görülmektedir (Şekil 4.5). Elium® yapıştırıcısının kompozit/alüminyum bağlantılarında gösterdiği performans BF-Al yapılarda KF-Al yapılara göre düşüş gözlenmiştir. KF-Al bağlantılı numunelerin çift konsol kiriş testi sonucu yük taşıma kapasitesi 926 N olarak bulunurken, % 17.92 düşüş ile BF-Al yapıda 760 N olarak tespit edilmiştir. Çift konsol kiriş testi sonucu Elium® yapıştırmasının en düşük yük taşıma kapasitesi 626 N ile CF-Al yapılarda görülmektedir. Bu değer KF- Al yapılarına göre % 17.63 düşüş, BF- Al yapılarına göre % 32.39 düşüş göstermektedir.

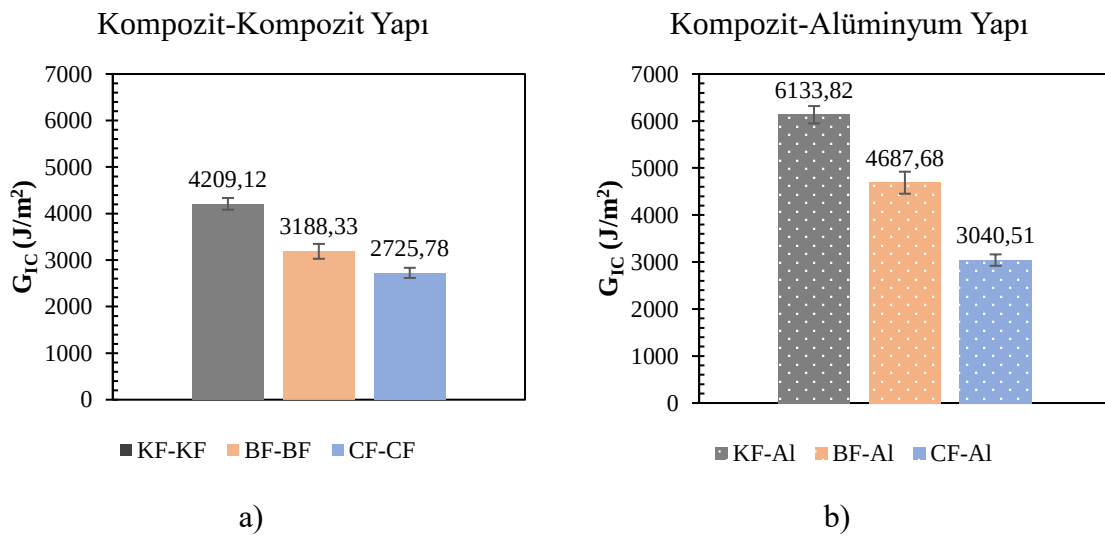


Şekil 4.6. Kompozit-alüminyum numunelerin uç çentikli eğilme deney sonucu kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Mod II Uç Çentikli Eğilme (ENF) test sonuçlarını içeren Şekil, kompozit-kompozit ve kompozit-alüminyum bağlantılarının kırılma tokluğu (G_{IC}) değerlerini göstermektedir. Kompozit-kompozit yapılarda (Şekil 4.7a), karbon fiber takviyeli (KF-KF) bağlantılar 4209.12 J/m^2 ile en yüksek kırılma tokluğunu sağlamıştır. Bu durum, karbon fiberlerin üstün mekanik özelliklerine ve Elium reçine ile güçlü bir bağ oluşturma kapasitesine atfedilmiştir. Bazalt fiber takviyeli (BF-BF) bağlantılar 3188.33 J/m^2 ile karbon fibere kıyasla daha düşük, ancak cam fiberden daha yüksek bir performans sergilemiştir. Cam fiber takviyeli (CF-CF) bağlantılar ise 2725.78 J/m^2 ile en düşük kırılma tokluğu değerini göstermiştir. Bu sonuç, cam fiberin düşük elastikiyet modülü ve Elium® reçine ile zayıf bağlanma kapasitesi ile açıklanabilir.

Kompozit-alüminyum bağlantılar (Şekil b) incelendiğinde, karbon fiber takviyeli kompozit ve alüminyum bağlantılar 6133.82 J/m^2 ile en yüksek kırılma tokluğu değerine sahiptir. Karbon fiberin Elium® reçine ile alüminyum arasında güçlü bir bağ oluşturma, bu yüksek dayanımı sağlamıştır. Bazalt fiber takviyeli (BF-Al) bağlantılar 4687.68 J/m^2 ile orta seviyede bir kırılma tokluğu göstermiştir ve bu sonuç, bazalt fiberin mekanik dayanımının cam fiberden daha üstün olduğunu kanıtlamaktadır. Cam fiber takviyeli (CF-Al) bağlantılar 3040.51 J/m^2 ile en düşük kırılma tokluğunu sergilemiştir. Cam fiberin mekanik dayanımı ve alüminyum ile bağ oluşturma kapasitesinin sınırlı olması, bu düşük performansı açıklamaktadır. Genel olarak, karbon fiber her iki yapı türünde de en yüksek kırılma tokluğu değerlerini sağlayarak, yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda en uygun malzeme olarak

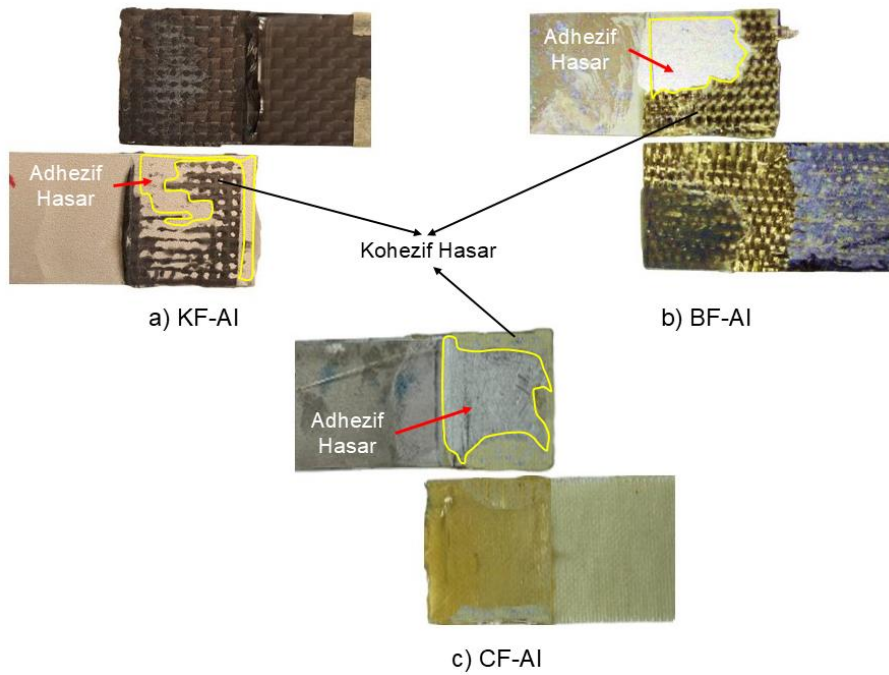
öne çıkmıştır. Bazalt fiber, maliyet ve performans dengesi açısından önemli bir alternatif sunarken, cam fiber ekonomik olmasına rağmen düşük kırılma tokluğu sebebiyle performans odaklı uygulamalarda sınırlı bir seçenektir. Ayrıca, kompozit-alüminyum bağlantılar, tüm fiber türleri için kompozit-kompozit bağlantılardan daha yüksek kırılma tokluğu sergilemiştir. Bu durum, alüminyumun Elium® reçine ile daha etkili bir bağ oluşturması ve yapının genel dayanımına katkıda bulunmasıyla ilişkilendirilmiştir. Bu bulgular, Elium reçine matrisli hibrit yapılarda kullanılacak fiber türünün, nihai performansı belirlemede kritik bir role sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.7. Uç Çentik Eğilme testi tabakalar arası kırılma tokluğu enerjileri bar grafikleri a) Kompozit-Kompozit yapı b) Kompozit-Alüminyum yapı

4.4. Numune Hasar Görüntülerinin İncelenmesi

Tek bindirme bağlantılı kompozit numunelerin çekme testi sonrası kırılma yüzeyleri makroskobik olarak incelenmiştir (Şekil 4.8). Kırılma yüzeyleri üzerine test sonrası oluşan kalıntıların en net görüntüsü alüminyum bileşenler üzerinde belirgin şekilde gözlenmiştir. Alüminyum üzerinde meydana gelen bu kalıntılar adhezif ve kohezif hasarlar olarak sınıflandırılmıştır. Yüzeyler üzerindeki kohezif kalıntılar yapışma bağlantılarının sağlamlığı hakkında bilgi vermektedir. Adhezif hasar bölgeleri ise zayıf yüzey bağlantı bölgelerinin varlığını göstermektedir. Bu bakış açısıyla, KF-Al ve BF-Al kompozit yapıların kırılma yüzeylerinde kohezif kalıntıların yoğunlukla olduğu (Şekil 4.8a-b), nispeten CF-Al yüzeyde ise adhezif hasarın daha fazla meydana geldiği gözlenmiştir (Şekil 4.8c). Kompozit yapılardaki bu gözlemin mekanik test sonuçları ile tutarlı olduğu görülmektedir.



Şekil 4.8. Tek bindirme bağlantılı kompozit yapıların çekme testi sonrası hasar yüzeyleri görüntüsü

Test sonrası çift konsol kiriş numunelerinin alüminyum bileşenlerinde oluşan hasar görüntüleri Şekil 4.9’da sunulmuştur. Mod I kırılma testlerinde, delaminasyon hasarları genellikle yapıştırıcı görevi gören Elium® matrisi içinde veya fiber-matris arayüzünde çatlak ilerlemesi şeklinde gözlenmiştir. Fiber-matris arayüzünde gelişen hasar, adhezyon olarak; matris içindeki çatlak oluşumu ve ilerlemesi ise kohezyon olarak tanımlanmaktadır (Ulus, 2019). Bu bağlamda, KF, BF ve CF ile birleştirilmiş alüminyum yüzeylerinde hem adhezyon hem de kohezyon kaynaklı hasarlar tespit edilmiştir. Ancak mod I kırılma testi sonuçları, yük taşıma kapasitesi ve tokluk enerjisi açısından numuneler arasındaki performans farklılıklarının, kırılma yüzeylerine de yansıdığını göstermektedir. Örneğin, KF-Al numunelerde yoğun olarak görülen kohezyon hasarı dikkat çekicidir ve bu durum, KF-Al yapısının daha yüksek kırılma performansı sergilediğini açıklamaktadır (Şekil 4.9a). Benzer şekilde, BF-Al numunelerde de benzer bir hasar türünün oluştuğu görülmüştür (Şekil 4.9b). KF ve BF içeren numunelerdeki benzer yük taşıma performansları, hasar modlarının da birbirine yakın olmasına neden olmuştur. Diğer taraftan, en zayıf hasar modları CF-Al numunelerde gözlenmiştir (Şekil 4.9c). Bu yapılarda, CF ’nin alüminyum yüzeye zayıf bir şekilde yapıştığı, daha az yüzey alanında adhezyon ve kohezyon hasarlarının oluştuğu tespit edilmiştir. Bu durum, CF-Al numunelerin düşük yük taşıma performansı ve kırılma toklukları sergilemesinin bir sonucu olarak değerlendirilmektedir.

a) KF-AI



b) BF-AI



c) CF-AI



Şekil 4.9. Mod I- çift konsol kiriş testi sonrası alüminyum yüzeylerindeki hasar görüntüleri

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, metil metakrilat (MMA) esaslı termoplastik Elium® matrisli fiber takviyeli kompozitlerin kırılma davranışları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Araştırma bulguları, kullanılan fiber türünün ve yapı türlerinin mekanik performans üzerindeki belirgin etkisini ortaya koymuştur. Özellikle karbon fiber takviyeli kompozitler (KF), üstün mekanik özellikleri sayesinde hem kompozit-kompozit hem de kompozit-alüminyum bağlantılarda en yüksek performansı sağlamıştır. Bu sonuç, karbon fiberlerin yüksek elastikiyet modülü ve Elium® matris ile güçlü bağ oluşturma kapasitesi ile doğrudan ilişkilidir. Buna karşılık, bazalt fiber (BF) takviyeli kompozitler maliyet ve performans dengesi açısından dikkat çekici bir alternatif olarak öne çıkmış, cam fiber (CF) ise düşük elastikiyet modülü nedeniyle sınırlı uygulamalar için uygun bir seçenek olarak değerlendirilmiştir.

Tek bindirme bağlantılı çekme testlerinde, karbon fiber takviyeli alüminyum (KF-Al) yapılar 3879 N ile en yüksek yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Bazalt fiber (BF-Al) yapılar, KF-Al yapılarından yalnızca %2,7 oranında daha düşük bir performans sergileyerek ikinci sırada yer almıştır. Buna karşılık, cam fiber (CF-Al) yapılar %34 oranında daha düşük yük taşıma kapasitesiyle en zayıf sonuçları vermiştir. Bu durum, cam fiberlerin matrisle zayıf bağlanma kapasitesini yansıtmaktadır. Testler sonucunda tespit edilen kayma gerilmeleri de benzer bir eğilim göstermiştir; karbon fiberli yapılar en yüksek değerleri sergilerken, cam fiberler en düşük performansı göstermiştir. Bu sonuçlar, fiber türünün yük taşıma kapasitesi ve kayma dayanımı üzerindeki doğrudan etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Mod I (Çift Konsol Kiriş) ve Mod II (Uç Çentikli Eğilme) testlerinde karbon fiber takviyeli yapılar, enerji soğurma kapasiteleri ve kırılma tokluğu değerleri bakımından diğer tüm numunelere kıyasla üstünlük sağlamıştır. KF-KF bağlantılarda kırılma tokluğu, Mod II testlerinde 4209.12 J/m²'ye kadar çıkarken, bazalt fiberli bağlantılar (BF-BF) 3188.33 J/m², cam fiberli bağlantılar (CF-CF) ise yalnızca 2725.78 J/m² kırılma tokluğu sergilemiştir. Cam fiberin düşük elastikiyet modülü ve Elium® reçine ile zayıf bağ oluşturma kapasitesi, bu sonuçların temel nedeni olarak değerlendirilmektedir. Kompozit-alüminyum bağlantılarda ise karbon fiberler, 6133.82 J/m² ile en yüksek kırılma tokluğu değerini sağlamış, bunu 4687.68 J/m² ile bazalt fiberler ve 3040.51 J/m² ile cam fiberler takip etmiştir. Bu durum,

alüminyumun mekanik özellikleri ve Elium® reçine ile etkili bağ oluşturma kapasitesinin, yapıların genel performansına olan katkısını gözler önüne sermektedir.

Adhezif ve kohezif hasar analizleri, testlerin sonuçlarını desteklemiştir. Alüminyum bileşenler üzerinde gözlemlenen kohezif kalıntılar, karbon ve bazalt fiber bağlantılarında bağlanma sağlamlığını işaret ederken, cam fiber bağlantılarında daha fazla adhezif hasarın meydana geldiği belirlenmiştir. Bu gözlemler, cam fiberli yapıların mekanik performansındaki sınırlılıkları açıklamaktadır. Ayrıca, kırılma yüzeylerinde gözlenen kalıntılar, bağlanma kuvvetinin fiber türüne bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini doğrulamaktadır.

Çift konsol kiriş (DCB) testleri ve ardından yapılan hasar incelemeleri, farklı fiber tipleriyle (KF, BF ve CF) birleştirilen alüminyum yapılar arasında önemli performans farklılıklarının olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle KF-Al numunelerin kohezyon ağırlıklı hasar modları sergileyerek, en yüksek kırılma performansı ve tokluk değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde BF-Al yapılar, KF-Al ile benzer kırılma davranışları göstermiştir. Buna karşın, CF-Al numunelerde düşük adhezyon ve sınırlı kohezyon alanları nedeniyle en zayıf yük taşıma kapasitesi ve kırılma tokluğu değerleri elde edilmiştir. Bu bulgular, fiber türünün, fiber-matris arayüzündeki adhezyon ve matris içi kohezyon özellikleriyle kırılma davranışı üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir.

Sonuçlar, Elium® reçine bazlı kompozitlerin mekanik dayanımının yanı sıra çevresel sürdürülebilirlik açısından da avantajlar sunduğunu göstermiştir. Elium® reçinenin termoplastik doğası, bu malzemelerin geri dönüştürülebilirliğini mümkün kılmakta ve atık yönetimi açısından önemli bir fırsat sunmaktadır. Bu durum, çevresel etkileri azaltma hedefi taşıyan sanayi uygulamalarında bu malzemelerin cazibesini artırmaktadır.

Bu bağlamda, ileriye dönük öneriler şunlardır:

- Karbon fiber takviyeli Elium® reçine matrisli yapılar, yüksek mekanik dayanım gerektiren havacılık, otomotiv ve savunma sanayi uygulamaları için en uygun seçenek olarak önerilmektedir. Orta düzey dayanım ve maliyet dengesi gerektiren uygulamalar için bazalt fiber tercih edilebilir. Cam fiber ise düşük performans beklentisi olan ekonomik çözümlerde kullanılabilir.

- Alüminyum ve kompozit yüzeyler arasındaki bağlanma performansını artırmak için yüzey işlem tekniklerinin (örneğin, plazma yüzey işleme veya kimyasal kaplama) uygulanması önerilmektedir. Bu tür işlemler, bağlanma sağlamlığını artırabilir ve mekanik performansı daha da iyileştirebilir.
- Elium® reçine bazlı kompozitlerin geri dönüştürülebilirliği, çevre dostu uygulamalar için büyük bir avantajdır. Geri dönüşüm süreçlerinin optimize edilmesi ve sanayi ölçeğinde uygulanabilirliğinin artırılması önemlidir.
- Bu çalışmada elde edilen bulguların sanayi ortamında ölçeklenerek doğrulanması gerekmektedir. Ayrıca, farklı çevresel koşullarda (örneğin, nem ve sıcaklık değişimleri) performans testlerinin yapılması, malzemelerin gerçek yaşam koşullarındaki davranışlarını anlamak açısından faydalı olacaktır.

Bu çalışma, Elium® reçine bazlı hibrit yapıların hem mekanik performansını hem de sürdürülebilirlik potansiyelini ortaya koymuş ve bu malzemelerin geniş bir uygulama yelpazesinde kullanımı için temel bir referans sağlamıştır. İleri araştırmalar, bu malzemelerin performansını daha da artırarak endüstriyel kullanımlarını genişletebilir.

KAYNAKLAR

- Açıkbaş, G. (2016). *Seramik Sağlık Gereçlerine Alternatif Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu*, Yayımlanmamış Doktora Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Kütahya.
- Adin H. (2007). *Yapıştırıcı ile Birleştirilmiş Ters Z Tipi Kompozit Malzeme Bağlantılarının Mekanik Analizi*, Yayımlanmamış Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Agarwal, B.D. and Broutman, L.J. (1980). *Analysis and performance of fiber composites*. John Wiley & Sons, A.B.D.
- Akangah, P., Lingaiah, S. and Shivakumar, K. (2010). Effect of Nylon-66 nano-fiber interleaving on impact damage resistance of epoxy/carbon fiber composite laminates. *Composite Structures*, 92(6): 1432–1439.
- Akbulut, H. (1994). *Alümina Fiber Takviyeli Al-Si Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi ve Mikroyapı- Özellik İlişkilerinin İncelenmesi*, Yayımlanmamış Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Akbulut, H., Karadayı, S., Azimpour Shishevan, F. and Acar, V. (2015). Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe Davranışlarının Nümerik Analizi, *Mühendislikte Yeni Teknolojiler*, Bayburt.
- Aleksendric, D. and Carlone, P. (2015) *Soft Computing in Design and Manufacturing of Composite Material*.
- Argüelles, A., Vina, J., Canteli, A. F. and Castrillo, M. A., Bonhomme, J. (2008). Interlaminar Crack Initiation and Growth Rate in a CarbonFibre Epoxy Composite under Mode-I Fatigue Loading, *Composites Science and Technology*, 68, 2325-2331.
- Baley, C., Lan, M., Bourmaud, A. and Le Duigou, A. (2018). Compressive and tensile behaviour of unidirectional composites reinforced by natural fibres: Influence of fibres (flax and jute), matrix and fibre volume fraction, *Materials Today Communications*, 16: 300–306.
- Barbero, E.J., 2017. *Introduction to composite materials design*. CRC Press.
- Barbosa, L. C. M., Bortoluzzi, D. B. and Ancelotti, A. C. (2019). Analysis of fracture toughness in mode II and fractographic study of composites based on Elium® 150 thermoplastic matrix, *Composites Part B: Engineering*, 107082.
- Barut, C. (2015). *Aramid Esaslı Kompozit Malzemelerin Balistik Performanslarının ve Mekanik Davranışlarının İncelenmesi*, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Bhudolia, S. K., Perrotey, P. and Joshi, S. C. (2017). Optimizing polymer infusion process for thin ply textile composites with novel matrix system, *Materials*, 10(3): 293.

- Bhudolia, S., Perrotey, P. and Joshi, S. (2017). Optimizing Polymer Infusion Process for Thin Ply Textile Composites with Novel Matrix System, *Materials*, 10(3): 293.
- Bhudolia, S. K. and Joshi, S. C. (2018). Low-velocity impact response of carbon fibre composites with novel liquid Methylmethacrylate thermoplastic matrix, *Composite Structures*, 203: 696–708.
- Bhudolia, S. K., Perrotey, P. and Joshi, S. C. (2018). Mode I fracture toughness and fractographic investigation of carbon fibre composites with liquid Methylmethacrylate thermoplastic matrix, *Composites Part B: Engineering*, 134, 246–253.
- Bhudolia, S. K., Joshi, S. C., Bert, A., Di Boon, Y., Raama, M. and Gohel, G. (2019). Flexural characteristics of novel carbon methylmethacrylate composites, *Composites Communications*.
- Bhudolia, S. K., Joshi, S. C. and Boon, Y. D. (2019). Experimental and Microscopic Investigation on Mechanical Performance of Textile Spread-tow Thin Ply Composites, *Fibers and Polymers*, 20(5), 1036–1045.
- Bhudolia, S. K., Gohel, G., Kah Fai, L. and Barsotti, R. J. (2020). Fatigue response of ultrasonically welded carbon/Elium® thermoplastic composites, *Materials Letters*, 264, 127362.
- Bhudolia, S. K., Gohel, G., Kantipudi, J., Leong, K. F. and Gerard, P. (2021). Manufacturing and investigating the load, energy and failure attributes of thin ply carbon/Elium® thermoplastic hollow composites under low-velocity impact, *Materials & Design*, 206, 109814.
- Bhudolia, S. K., Gohel, G., Kantipudi, J., Leong, K. F. and Gerard, P. (2021). Mechanical performance and damage mechanisms of thin rectangular carbon/ Elium® tubular thermoplastic composites under flexure and low-velocity impact, *Thin-Walled Structures*, 165, 107971.
- Bigg, D. M. (1994). The Impact Behavior of Thermoplastic Sheet Composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 13(4): 339–354.
- Botelho, E., Figiel, L., Rezende, M. C. and Lauke, B. (2003). Mechanical behavior of carbon fiber reinforced polyamide composites, *Composites Science and Technology*, 63(13): 1843–1855.
- Cadieu, L., Kopp, J. B., Jumel, J., Bega, J. and Froustey, C. (2019). Temperature effect on the mechanical properties and damage mechanisms of a glass/thermoplastic laminate, *Journal of Composite Materials*, 002199831989438.
- Cadieu, L., Kopp, J. B., Jumel, J., Bega, J. and Froustey, C. (2019). Strain rate effect on the mechanical properties of a glass fibre reinforced acrylic matrix laminate. An experimental approach, *Composite Structures*, 110952.
- Callister, W. D. and Rethwisch, D., (2015). *Materials Science And Engineering*. Eight Edition. Nobel Yayıncılık.
- Campbell, F.C. (2010). *Structural composite materials* (1. Baskı). Ohio: ASM International.

- Chawla, K.K. (2012). *Composite Materials*. (2. Baskı). London: CRC Press.
- Cheng, X., Zhang, Q., Zhang, J., Guo, X. and Niu, Z. (2019). Parameters prediction of cohesive zone model for simulating composite/adhesive delamination in hygrothermal environments, *Composites Part B: Engineering*, 166: 710–721.
- Chilali, A., Zouari, W., Assarar, M., Kebir, H. and Ayad, R. (2016). Analysis of the mechanical behaviour of flax and glass fabrics-reinforced thermoplastic and thermoset resins, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 35(16): 1217–1232.
- Cousins, D. S., Suzuki, Y., Murray, R. E., Samaniuk, J. R. and Stebner, A. P. (2018). Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades, *Journal of Cleaner Production*.
- Darıçık, F. ve Çelebi, K. (2017). Karbon Lifi/Epoksi Tabakalı Kompozit Malzemelerin Farklı Ortam şartlarındaki Mod I Kırılma Davranışı, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(1), 223-234.
- Davies, P. and Arhant, M. (2018). Fatigue Behaviour of Acrylic Matrix Composites: Influence of Seawater, *Applied Composite Materials*.
- de Moura, M.F.S.F., Gonçalves, J.P.M., Marques, A.T. and de Castro, P.M.S.T. (2000). Prediction of compressive strength of carbon–epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model, *Composite Structures*, 50(2): 151-157.
- de Moura, M.F.S.F. and Marques, A.T. (2002). Prediction of low velocity impact damage in carbon–epoxy laminates, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(3): 361-368.
- de Moura, M.F.S.F., Campilho, R.D.S.G. and Domingues, J.J.M.S. (2008). Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs, *International Journal of Solids and Structures*, 45(5):1497-1512.
- de Moura, M.F.S.F., Fernandes, R., Silva, F.G.A. and Dourado, N. (2015). Mode II fracture characterization of a hybrid cork/carbon-epoxy laminate, *Composites Part B: Engineering*, 76(2015): 44-51.
- Deniz, M. E. (2005). *Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri ve Isıl İşleme Presleme Tekniğini Kullanarak Kompozit Malzeme Üretecek Bir Düzeneğin Tasarım ve İmalatı*, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, 32-47.
- Ertekin, M. (2017). Aramid fibers. *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*, 153–167.
- Esendemir, Ü. and Caner, A. Y. (2018). Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışının Deneyisel Olarak İncelenmesi, *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences*, 22(1): 207- 215.

- Fernandes, R., de Moura, M.F.S.F., Silva, F.G.A. and Dourado, N. (2014). Mode I fracture characterization of a hybrid cork and carbon–epoxy laminate, *Composite Structures*, 112(2014): 248-253.
- Fidan, S. (2011). *Polimer Matrisli Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi ve Oluşan Hasarların Mikro Tomografi Yöntemiyle İncelenmesi*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Gohel, G., Bhudolia, S. K., Elisetty, S. B. S., Leong, K. F. and Gerard, P. (2021). Development and impact characterization of acrylic thermoplastic composite bicycle helmet shell with improved safety and performance, *Composites Part B: Engineering*, 221, 109008.
- Haggui, M., El Mahi, A., Jendli, Z., Akrou, A. and Haddar, M. (2017). Damage Analysis of Flax Fibre/Elium Composite Under Static and Fatigue Testing, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 681–691.
- Haggui, M., El Mahi, A., Jendli, Z., Akrou, A. and Haddar, M. (2018). Static and fatigue characterization of flax fiber reinforced thermoplastic composites by acoustic emission, *Applied Acoustics*.
- Han, N., Yuksel, O., Zanjani, J.S.M. An, L. L., Akkerman, R. and Baran, İ. (2022). Experimental Investigation of the Interlaminar Failure of Glass/Elium® Thermoplastic Composites Manufactured With Different Processing Temperatures, *Applied Composite Materials*, 29: 1061-1082.
- Harper, P. W. and Hallett, S. R. (2008). Cohesive zone length in numerical simulations of composite delamination, *Engineering Fracture Mechanics*, 75(16): 4774–4792.
- Harris, B. (1999). *Engineering Composite Materials*. London, UK.: The Institute of Materials.
- İnal, O., Akbolat, M. Ç., Soutis, C. and Katnam, K. B. (2021). Toughening mechanisms in cost-effective carbon-epoxy laminates with thermoplastic veils: Mode-I and in-situ SEM fracture characterisation, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 4(1): 50-61.
- İnançer, G. (2015). *Farklı Takviye Malzemeli Plastik Kompozitlerin Darbe Davranışına Çevrenin Etkisi*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Jefferson Andrew, J., Srinivasan, S. M., Arockiarajan, A. and Dhakal, H. N. (2019). Parameters influencing the impact response of fiber-reinforced polymer matrix composite materials: A critical review, *Composite Structures*, 224: 111007.
- Kalemtaş, A. (2014). *Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış*. Putech & Composites.
- Kaw, A. K. (2006). *Mechanics of composite materials* (2. Baskı). Boca Raton: CRC press.

- Kaya, Z., Balcıoğlu, H. E. and Gün, H. (2022). Fiber Takviyeli Kompozitlerin Farklı Deformasyon Hızındaki Mod I ve Mod I/II Kırılma Davranışların İncelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 25(2): 843-853.
- Kazemi, M.E., Shanmugama, L., Lub, D., Wangc, X., Wangc, B. and Yanga, J. (2019). Mechanical properties and failure modes of hybrid fiber reinforced polymer composites with a novel liquid thermoplastic resin, Elium®, *Composites Part A*, 125(2019): 105523.
- Kösedag, E. and Ekici, R. (2019). Partikül Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Darbe Davranışları Üzerine Bir Derleme, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1): 384-393.
- Lai, S. W. and Chung, D. D. L. (1994). Fabrication of particulate aluminium-matrix composites by liquid metal infiltration, *Journal of Materials Science*, Chapman & Hall, 3128.
- Leblebiciler, B. (2022). *Pultrüzyon Yöntemi ile Üretimi Yapılan Kompozit Malzemelerin Çevre Koşulları Altındaki Performanslarının İncelenmesi*, Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Uşak.
- Li, X., Bai, R. and McKechnie, J. (2016). Environmental and financial performance of mechanical recycling of carbon fibre reinforced polymers and comparison with conventional disposal routes, *Journal of Cleaner Production*, 127: 451-460.
- López, F.A., Martín, M.I., Alguacil, F.J., Rincón, J. Ma., Centeno, T.A. and Romero, M. (2012). Thermolysis of fibreglass polyester composite and reutilisation of the glass fibre residue to obtain a glass-ceramic material, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, (93), 104-112.
- Luo Y. X. and Kou C. H. (1994). Effect of the Interfacial Interleaf to the Interlaminar Fracture and Intralaminar Fracture of a New BMI Matrix Composites System, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 13(6): 509-540.
- Mamalis, D., Obande, W., Koutsos, V., Blackford, J. R., Ó Brádaigh, C. M. and Ray, D. (2018). Novel thermoplastic fibre-metal laminates manufactured by vacuum resin infusion: The effect of surface treatments on interfacial bonding, *Materials & Design*.
- Masters, J. E. (1991). Improved Impact and Delamination Resistance through Interleafing, *Key Engineering Materials*, 37: 317-0.
- Matadi Boumbimba, R., Coulibaly, M., Khabouchi, A., Kinvi-Dossou, G., Bonfoh, N. and Gerard, P. (2017). Glass fibres reinforced acrylic thermoplastic resin-based tri-block copolymers composites: Low velocity impact response at various temperatures, *Composite Structures*, 160: 939-951. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.10.
- Mazumdar, S. (2002). *Composites manufacturing materials, product and process engineering*, London, New York, Washington D.C.: Crc Press.
- Miracle, D. B. and Donaldson S.L. (2001) *ASM Handbook Vol 21 Composites*.

- Murray, R. E., Swan, D., Snowberg, D., Berry, D., Beach, R. and Rooney, S. (2017). Manufacturing a 9-Meter Thermoplastic Composite Wind Turbine Blade, Thirty-Second Technical Conference.
- Murray, R. E., Roadman, J. and Beach, R. (2019). Fusion Joining of Thermoplastic Composite Wind Turbine Blades: Lap-Shear Bond Characterization, *Renewable Energy*.
- Murray, R. E., Beach, R., Barnes, D., Snowberg, D., Berry, D., Rooney, S. and Hughes, S. (2020). Structural validation of a thermoplastic composite wind turbine blade with comparison to a thermoset composite blade, *Renewable Energy*.
- Nash, N. H., Portela, A., Bachour, C., Manolakis, I. and Comer, A. J. (2019). Effect of environmental conditioning on the properties of thermosetting- and thermoplastic-matrix composite materials by resin infusion for marine applications, *Composites Part B: Engineering*, 107271.
- Nourani, A., Akbari, S. and Spelt, J. K. (2016). Fracture load prediction of BGA solder joints: Cohesive zone modeling and experimental verification, *International Journal of Solids and Structures*, 90, 30–44.
- Obande, W., Mamalis, D., Ray, D., Yang, L. and Brádaigh, C. M. Ó. (2019). Mechanical and thermomechanical characterisation of vacuum-infused thermoplastic- and thermoset-based composites, *Materials & Design*, 107828.
- Obande, W., Ó Brádaigh, C. M. and Ray, D. (2021). Continuous fibre-reinforced thermoplastic acrylic-matrix composites prepared by liquid resin infusion – A review, *Composites Part B: Engineering*, 215, 108771.
- O'Brien, T. K. (1998). Interlaminar Fracture Toughness: The Long and Winding Road to Standardization, *Composites Part B*, 29(1), 57-62.
- Owens, J.F.P. and Leesullivan, P. (2000). Stiffness behaviour due to fracture in adhesively bonded composite-to-aluminum joints. I. Theoretical model, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 20(1): 39-45.
- Özer, H. (2015). *Sürekli Cam Elyaf Takviyeli Termoplastik Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel Olarak Belirlenmesi*, Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bursa.
- Petrie E., (2006). *Theories of Adhesion*. Handbook of Adhesives and Sealants, McGraw-Hill, New York.
- Pimenta, S. and Pinho, S. T. (2011). Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market Outlook, *Waste Management*, 31(2): 378-392.
- Pini, T., Caimmi, F., Briatico-Vangosa, F., Frassine, R. and Rink, M. (2017). Fracture initiation and propagation in unidirectional CF composites based on thermoplastic acrylic resins, *Engineering Fracture Mechanics*, 184: 51–58.

- Reis, P. J., de Moura, M. and Samborski, S. (2020). Thermoplastic Composites and Their Promising Applications in Joining and Repair Composites Structures: A Review, *Materials*, 13(24), 5832.
- Rhodes, P. (2009). Thermoset composite receives highest UL temperature rating, *Reinforced Plastics*, 53(5), 44-45.
- Rybicka, J., Tiwari, A. and Leeke, G. A. (2016). Technology readiness level assessment of composites recycling Technologies, *Journal of Cleaner Production*, 112(1): 1001-1012.
- Qin, Q. and Ye, J. (2015). *Toughening mechanisms in composite materials*. Elsevier.
- Sapanci, E. (2019). *Performance of the nanosilica filled neat epoxy and carbon fiber filament wound composites*, Doctoral dissertation, Middle East Technical University.
- Shanmugam, L., Kazemi, M. E., Rao, Z., Lu, D., Wang, X., Wang, B. and Yang, J. (2019). Enhanced mode I fracture toughness of UHMWPE fabric/thermoplastic laminates with combined surface treatments of polydopamine and functionalized carbon nanotubes, *Composites Part B: Engineering*, 107450.
- Seong, M.-S., Kim, T.-H., Nguyen, K.-H., Kweon, J.-H. and Choi, J.-H. (2008). A Parametric Study on The Failure of Bonded Single-Lap Joints of Carbon Composite and Aluminum, *Composite Structures*, 86(1-3): 135-145.
- Sevkat, E., Liaw, B. and Delale, F. (2013). Drop-weight impact response of hybrid composites impacted by impactor of various geometries, *Materials & Design*, 52: 67-77.
- Shivakumar, K.N., Elber, W. and Illg, W. (1985). Prediction of low velocity impact damage in thin circular laminates, *AZAA J*, 23(3): 442-449.
- Shivakumar, K., Lingaiah, S., Chen, H., Akangah, P., Swaminathan, G. and Russell, L. (2009). Polymer Nanofabric Interleaved Composite Laminates, *AIAA Journal*, 47(7): 1723-1729.
- Sonnenfeld, C., Mendil-Jakani, H., Agogu  , R., Nunez, P. and Beauch  ne, P. (2017). Thermoplastic/thermoset multilayer composites: A way to improve the impact damage tolerance of thermosetting resin matrix composites, *Composite Structures*, 171: 298-305.
- Sjoblom, P.O., Hartness, J.T. and Cordell, T.M. (1998). "On low-velocity impact testing of composite materials, *Journal of Composite Materials*, 22: 30-52.
- Standard A. (2007). D5528-01, Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Sur, G. (2008). *Karma Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin   retimi, Mekanik   zellikler ve   şlene Bilirliklerinin   ncelenmesi*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Tirtom, I., Guden, M. and Yıldız, H. (2008). Simulation of the strain rate sensitive flow behavior of SiC particulate reinforced aluminum metal matrix composites, *Computational Materials Science*, 42: 570-578.
- Ulus, H. (2019). *Tuzlu Su Yaşlandırmasının Halloysit Nanotüp-Epoksi/Bazalt Fiber Nanokompozitlerin Mekanik ve Kırılma Performansına Etkisi*, Yayımlanmamış Doktora Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Ulus, H., Kaybal, H. B., Cacık, F., Eskizeybek, V. ve Avcı, A. (2022). Effect of long-term stress aging on aluminum-BFRP hybrid adhesive joint's mechanical performance: Static and dynamic loading scenarios, *Polymer Composites*, 43(8): 5301-5318.
- Van Rijswijk, K. and Bersee, H. E. N. (2007). Reactive processing of textile fiber-reinforced thermoplastic composites – An overview, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(3): 666–681.
- Wang, R. M., Zheng, S. R. and Zheng, Y. G. (2011). *Polymer matrix composites and technology*. Elsevier.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Serkan EMEKTAR
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti

Eğitim Derecesi

Okul/Program

Mezuniyet Yılı

Lisans	Selçuk Üniversitesi/Makine Müh.	2015
Yüksek Lisans	Amasya Üniversitesi/Makine Müh.	-

İş Deneyim/Yıl

Çalıştığı Yer

Görevi

2018	Emektar Mühendislik	Makine Mühendisi
------	---------------------	------------------