



T.C

ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

ÜÇ BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLEN POLİAMİD (PA)
KATMANLAR İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ KARBON
FİBER/EPOKSİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK
PERFORMANSI

Yüksek Lisans Tezi

Volkan DUMAN

Danışman

Doç. Dr. Bertan BEYLERGİL

ALANYA

2024

T.C.

ALANYA ALAADDİN KEYKUBAT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLEN POLİAMİD (PA)
KATMANLAR İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ KARBON
FİBER/EPOKSİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK PERFORMANSI

Yüksek Lisans Tezi

Volkan DUMAN

Anabilim Dalı: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Program Adı: Nanobilim ve Nanomühendislik

Danışman

Doç. Dr. Bertan BEYLERGİL

Bu tez çalışması TÜBİTAK Komisyonunca kabul edilen 218M710' numaralı
proje kapsamında desteklenmiştir.

ALANYA

2024

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmamın Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programıyla tarandığını ve “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Volkan DUMAN

TEŞEKKÜR SAYFASI

Her konuda sabır ve sevgiyle yaklaşan, bildiklerini büyük bir zevkle aktaran ve hem maddi hem de manevi destek olan saygıdeğer hocam Doç. Dr. Bertan BEYLERGİL' e kariyerimde uzmanlaşmam için yaptığı tüm yardımlar için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Öğretim hayatım boyunca yardımlarını esirgemeyen ve bana hep inanan annem Elif DUMAN, babam Yahya DUMAN ve kardeşim ATAKAN DUMAN' a destekleri için teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarımnda her zaman yanımda olan ortağım Şeyma Nur DURUKAN' a teşekkürlerimi sunarım.

Tez tamamlama sürecinde bana evlerini açan Alper GEDİK ve Ailesine yardımları için teşekkür ederim.

Volkan DUMAN

ÖZET

ÜÇ BOYUTLU YAZICI İLE ÜRETİLEN POLİAMİD (PA) KATMANLAR İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ KARBON FİBER/EPOKSİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK PERFORMANSI

Volkan DUMAN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü,

Aralık,2023

Bu çalışmanın amacı, 3D baskılı poliamid (PA) ara katmanlar ekleyerek geleneksel karbon fiber/epoksi kompozitlerin delaminasyon direncini artırmaktır. Referans ve PA ara katmanlı karbon fiber/epoksi laminantlar vakum destekli reçine transfer kalıplama tekniği ile üretilmiştir. 3D baskılı PA ara katmanların karbon fiber/epoksi kompozitlerin hem Mod-I hem de Mod-II kırılma tokluğu üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Ayrıca, kompozitlerin kesme ve eğilme özellikleri kısa kiriş kesme ve üç nokta eğme testleri ile değerlendirilmiştir. PA ara katmanlarının kompozit laminantların arıza modları üzerindeki etkisini incelemek için akustik emisyon verileri toplanmıştır. Referans ve PA takviyeli kompozitlerin termomekanik tepkisini incelemek için dinamik mekanik analiz (DMA) kullanılmıştır. Çalışma, referans kompozitlere kıyasla hem Mod-I hem de Mod-II (GIc ve GIIC) için kritik enerji salınım oranlarında sırasıyla %43,5 ve %81,2 oranında önemli bir artış olduğunu ortaya koymuştur. İyileşmenin birincil mekanizması, interlaminar bölgedeki PA filamentlerinin çatlak köprülemesi ve plastik deformasyonuna bağlanmıştır. Ek olarak, interlaminar kesme mukavemetinde %17,4'lük bir artış olmuştur. DMA sonuçları tan-delta değerlerinde önemli bir artış olduğunu gösterirken, 3D baskılı PA ara katmanlarının dahil edilmesi camsı geçiş sıcaklığını etkilememiştir. Bununla birlikte, 3D baskılı PA ara katmanlar, artan kalınlık ve azalan elyaf hacim oranı nedeniyle kompozitlerin eğilme özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir. Hibrit kompozit sistemlerdeki hasarı tespit ve analiz etmek için AE tekniğinin kullanılması, araştırmacılara ve mühendislere performanslarını artırma ve dayanıklılıklarını uzatma konusunda yardımcı olabilir.

Anahtar Sözcükler: 3D baskı, PA filamentler; karbon fiber/epoksi, interlaminar özellikler

ABSTRACT

ENHANCING MODE-I AND MODE-II FRACTURE TOUGHNESS OF CARBON FIBER/EPOXY LAMINATED COMPOSITES USING 3D-PRINTED POLYAMIDE INTERLAYERS

Volkan DUMAN

Department of of Metallurgy and Material Engineering

Graduate School of Alanya Alaaddin Keykubat University,

December, 2023

The aim of this study is to improve the delamination resistance of traditional carbon fiber/epoxy composites by incorporating 3D-printed polyamide (PA) interlayers. Reference and PA-interleaved carbon fiber/epoxy laminates were manufactured by vacuum assisted resin transfer molding technique. The effect of the 3D-printed PA interlayers on both Mode-I and Mode-II fracture toughness of the carbon fiber/epoxy composites was evaluated. Additionally, the shear and flexural properties of the composites were assessed through short-beam shear and three-point bending tests. Acoustic emission data was gathered to study the influence of PA interlayers on the failure modes of composite laminates. Dynamic mechanical analysis (DMA) was utilized to study the thermomechanical response of the reference and PA-reinforced composites. The study revealed a substantial increase in critical energy release rates for both Mode-I and Mode-II (G_{Ic} and G_{IIc}) by 43.5% and 81.2%, respectively, as compared to the reference composites. The primary mechanism for the improvement was attributed to crack bridging and plastic deformation of the PA filaments in the interlaminar region. Additionally, there was a 17.4% increase in the interlaminar shear strength. The DMA results indicated a significant increase in tan-delta values, while the inclusion of 3D-printed PA interlayers did not affect the glass transition temperature. Nonetheless, the 3D-printed PA interlayers adversely affected the flexural properties of the composites, owing to increased thickness and reduced fiber volume fraction. The utilization of AE technique for detecting and analyzing damage in hybrid composite systems can assist researchers and engineers in enhancing their performance and prolonging their durability.

Keywords: 3D printing, PA filaments, carbon fiber/epoxy, interlaminar properties

İÇİNDEKİLER

İÇ KAPAK SAYFASI	
ONAY SAYFASI	i
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	ii
TEŞEKKÜR SAYFASI.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER SAYFASI	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ.....	viii
SİMGELER	ix
KISALTMALAR LİSTESİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Kompozit Malzemeler.....	1
1.2 Tabakalı Kompozitler.....	1
1.3 Amaç ve Kapsam	2
2. LİTERATÜR	3
3. MATERYAL ve YÖNTEM	6
3.1. Malzemeler	6
3.2. PA Ağ Yapılarının 3D Baskısı.....	6
3.3. Referans ve PA Takviyeli CF/EP Kompozitlerin Üretimi.....	7
3.4 Mekanik ve Termomekanik Testler	9
4. BULGULAR.....	14
4.1. 3D Baskılı PA Ağ Yapılarının Termal Karakterizasyonu	14
4.2. Mekanik Test Sonuçları	15
4.3. DMA Test Sonuçları.....	23
4.3. Akustik Emisyon Test Sonuçları	23
5. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER	26
6. KAYNAKLAR	27
7. ÖZGEÇMİŞ	31

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.2 PA ara katmanların 3D baskısı.....	8
Şekil 3.3 (a) 3D baskılı PA ara katmanların yerleştirilmesi ve (b) vakum infüzyon işlemi	9
Şekil 3.4.1 (a) Mod-I (b) Mod-II, (c) eğilme ve (d) kesme yüklemesi altında bir test numunesi.....	10
Şekil 3.4.2 Denklem (2)'deki "m" sabitinin belirlenmesi	12
Şekil 4.1 3D baskılı PA ara katmanların (a) TGA ve (b) DSC termogramları.....	16
Şekil 4.2.1 Mod-I yüklemesi altında (a) referans ve (b) PA takviyeli kompozitlerin kuvvet-yer değiştirme eğrileri.....	17
Şekil 4.2.2 (a) referans ve (b) PA takviyeli kompozitlerin çatlak büyüme direnci eğrileri (R-eğrileri)	17
Şekil 4.2.3 Mod-I test numunelerinin SEM görüntüleri (a-c) referans ve (d-f) PA takviyeli kompozitler	19
Şekil 4.2.4 Mod-II yüklemesi altında (a) referans ve (b) PA takviyeli kompozitlerin yük- deplasman eğrileri.....	20
Şekil 4.2.5 Mod-II test numunelerinin SEM görüntüleri (a-c) referans ve (d-f) PA takviyeli kompozitler	21
Şekil 4.2.6 Kısa kiriş kesme testi numunelerinin SEM görüntüleri (a-c) referans ve (d-f) PA takviyeli kompozitler	23
Şekil 4.2.7 Eğilme yüklemesi altındaki numunelerin gerilme-gerinim eğrileri (a) referans ve (b) PA takviyeli kompozitler.....	24
Şekil 4.4.1 (a) Davies Bouldin; (b) Gap; ve (c) Silhouettes endeksleri kullanılarak yapılan küme değerlendirme sonuçları	25
Şekil 4.4.2 Kısa kiriş kesme testi numunelerinin SEM görüntüleri (a-c) referans ve (d-f) PA takviyeli kompozitler	27

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 3.2 Bu çalışmada kullanılan 3D baskı işleme parametreleri.....	8
Tablo 3.3 Üretilen kompozit plakalar hakkında detaylı bilgi	9
Tablo 3.4 Üç nokta eğme test sırası	11
Tablo 4.2.1 DCB ve ENF test sonuçları.....	18
Tablo 4.2.2 Kısa kiriş kesme, eğme ve DMA test sonuçları	21



SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

Simgeler

<i>a</i>	Çatlak uzunluğu, mm
<i>a₀</i>	Tabakalar arası yapay çatlak uzunluğu, mm
<i>mm</i>	Milimetre
<i>°C</i>	Celcius
<i>s</i>	Saniye
<i>gsm</i>	g/cm ³
<i>KN</i>	Kilo Newton
<i>Gc</i>	Tabakalar arası kırılma tokluğu, kJ/mm
<i>GIc</i>	Mod I tabakalar arası kırılma tokluğu, kJ/mm ²
<i>GIIC</i>	Mod II tabakalar arası kırılma tokluğu, kJ/mm ²
<i>Pc</i>	Kritik kuvvet
<i>dk</i>	Dakika
<i>b</i>	Genişlik
<i>a</i>	Çatlak uzunluğu
<i>Ef</i>	Kompozitlerin Eğilme Modülü
<i>P</i>	Kuvvet
<i>Pmax</i>	Maksimum yük
<i>D</i>	Açıklık uzunluğu
<i>d</i>	Numune merkezindeki sapma ve numune kalınlığı
<i>kHz</i>	Kilohertz
<i>dB</i>	Desibel
<i>Mhz</i>	Megahertz
<i>Au/Pd</i>	Altın/Pladyum
<i>Tm</i>	Erime Sıcaklığı
<i>Tg</i>	Camsı geçiş sıcaklığı
<i>Xc</i>	Numunelerin kristallik derecesi
<i>aJ</i>	Attojoule , 10 ⁻¹⁸

Kısaltmalar

ALKÜ	Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi
CF/EP	Karbon fiber epoksi
PEEK	Polieter-eter-keton
PPS	Polifenilen-sülfid
PET	Poliyeten tereftalat
PA	Poliamid
E-Cam	Cam Elyaf
FDM	Eriyik Yığıma Modellemesi
PCL	Polikaprolakton
Rf	Referans
DMA	Dinamik Mekanik Analiz
MFI	Eriyik Akış İndeksi
ILSS	Tabakalar Arası Kesme Mukavemeti ASTM D 2344
ENF	Üç Nokta Eğme ASTM 7905
ASTM	Amerikan Test ve Malzemeler Derneği
DCB	Çift Konsol Kiriş Testi ASTM D 5528
MBT	Mod-I hesaplaması için modifiye kiriş teorisi
UD	Tek yönlü
NPC	Ön çatlaksız
SBS	Kısa Kiriş Kesme
TGA	Termogravimetrik Analiz
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
MC	Matris Çatlaması
IF	Analiz Hatası
FP	Fiber kopması / bağlaması

1. GİRİŞ

1.1 Kompozit Malzemeler

Günümüzde, malzeme bilimi ve mühendisliği alanlarındaki hızlı gelişmeler, endüstriyel uygulamalarda daha dayanıklı, daha uzun ömürlü, hafif, esnek, korozyona dayanıklı, düşük Co2 emisyonu ve yüksek performanslı malzemelere olan talebi artırmıştır. Bu bağlamda, kompozit malzemeler, en az iki farklı malzemenin özelliklerini birleştirerek daha iyi özelliklere sahip yeni malzemenin oluşturulmasını sağlayan önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir.

Kompozit malzemeler genellikle bir matris malzemesi ve takviye edici malzeme ile üretilir. Matris malzemeler polimer reçine, metal alaşımlar veya seramik seçilerek üretilen yeni malzemenin bileşenlerini bir arada tutan bağlayıcı işlevini görmektedir. Malzemeye dışarıdan gelecek olan tüm etkenleri (sıcaklık, korozyon, darbe vb.) ilk olarak matris malzeme karşılamaktadır. Kompozit üretiminde malzemenin dayanıklılığını, mukavemetini belirleyen ana unsur takviye edici malzemelerdir. Takviye edici malzemeler genellikle lifler (karbon fiber, cam elyaf vb.), polimer tabakalar, nano partiküller olarak matris malzemenin iç hatlarını oluşturmaktadır. Kompozit malzemeler bu iki temel bileşen sayesinde yüksek mukavemet/ağırlık oranına, korozyon direncine, radyasyon absorpsiyonuna, termal izolasyon veya iletkenliği ve benzeri gibi istenilen özelliklere göre tasarlanabilir. Bu özellikler havacılık, rüzgar türbini, savunma sanayi, inşaat, otomotiv ve spor malzemeleri gibi bir çok endüstride çeşitli uygulama alanları sağlamaktadır.

Bu yüksek lisans tezi, üç boyutlu yazıcıda üretilen poliamid (PA) takviyeli karbon fiber epoksi (CF-EP) kompozitinin, üretimi, mekanik ve termal karakterizasyonu ile ilgili bir dizi konuyu ele almaktadır. İncelenen başlıca konular arasında poliamid takviyeli karbon fiber kompozit malzemelerin Mod-I ve Mod-II kırılma tokluğu, Akustik Emisyon (AE) testleri, Taramalı elektron görüntüleme (SEM) ve Dinamik mekanik analiz (DMA), yöntemleri kullanılmıştır.

1.2 Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozitler, modern mühendislik ve endüstriyel uygulamalarda önemli bir rol oynayan özel bir malzeme sınıfını temsil eder. Bu özel malzeme, farklı özelliklere sahip olan ve birleştirildiğinde sinerjik avantajlar sunan çeşitli malzemelerin katmanlar halinde birleştirilmesiyle oluşur. Bu karma malzeme, genellikle daha güçlü, daha hafif ve

daha dayanıklı özelliklere sahip olması nedeniyle bir dizi sektörde geniş bir uygulama alanına sahiptir.

Tabakalı kompozitlerin en dikkat çekici özelliklerinden biri, hafif olmalarına rağmen yüksek mukavemet sunmalarıdır. Bu özellik, özellikle havacılık, otomotiv ve uzay endüstrilerinde kullanılmalarını mümkün kılar. Uçak gövdeleri, kanatlar, otomobil parçaları ve roket yapıları gibi birçok uygulama, tabakalı kompozit malzemelerin avantajlarından yararlanarak daha hafif ve dayanıklı hale gelir. Bu katmanlı yapının avantajlarından bir diğeri ise her katmanın farklı yönlere yerleştirilebilmesi ve böylece malzemenin genel mekanik özelliklerinin optimize edilebilmesidir. Bu, malzemenin çekme, basma, burulma ve diğeri mühendislik özelliklerinde istenen performansı elde etmek için tasarlanabilmesine olanak tanır. Tabakalı kompozitler aynı zamanda çeşitli koruyucu özelliklere sahiptir. Kimyasal direnç, korozyon direnci ve yüksek sıcaklık dayanıklılığı gibi özellikler, bu malzemenin endüstriyel ortamlarda ve zorlu koşullarda kullanılmasını mümkün kılar. Bu özellikler, endüstriyel ekipmanlardan savunma sistemlerine kadar çeşitli uygulama alanlarına yönelik geniş bir yelpazede kullanım imkânı sunar.

Tabakalı kompozitlerin kullanım alanları, sadece yüksek mukavemet, düşük ağırlık korozyon, kimyasal direnç avantajlarıyla sınırlı değildir. Aynı zamanda özelleştirilebilir bir malzeme olmaları, farklı endüstrilerdeki özel gereksinimlere uyum sağlamalarını sağlar. Mühendisler, istenen özellikleri elde etmek için farklı matris ve takviye malzemelerini birleştirebilir, bu da malzemenin performansını artırabilir.

Sonuç olarak, tabakalı kompozitler, çok yönlü ve etkileyici özelliklere sahip olan önemli bir malzeme sınıfını temsil eder. Bu malzemenin geniş uygulama alanları, mühendislik çözümlerindeki çeşitliliği ve esnekliği artırırken, endüstriyel gelişmelerde ve teknolojik ilerlemelerde önemli bir rol oynamasını sağlar. Bu nedenle, tabakalı kompozitler, günümüzdeki mühendislik ve üretim süreçlerinde vazgeçilmez bir malzeme olarak öne çıkmaktadır.

1.3 Amaç ve Kapsam

Tezin amacı, üç boyutlu yazıcıda yazılmış poliamid takviyeli karbon fiber epoksi malzemesinin genel özellikleri ve avantajları hakkında kapsamlı bir anlayış sağlamak, mevcut literatürü araştırmak ve öğrencinin bu alandaki araştırma becerilerini geliştirmesine katkıda bulunmaktır.

2. LİTARETÜR

Delaminasyon, bir laminantın iki bitişik katmanı birbirinden ayrıldığında ortaya çıkan bir sorundur. Bu sorun üretim esnasında veya yapının hizmet ömrü boyunca ortaya çıkabilir. Hava kabarcıkları, yabancı unsurlar veya eksik kürlenme gibi çeşitli faktörler delaminasyona katkıda bulunabilir. Bu faktörler katmanların birbirinden ayrılmasına neden olabilir. Ayrıca, bir kompozit laminat, hizmet ömrü boyunca düzlem dışı yüklemeye, eksantrik veya döngüsel yükleme yollarına ve düşük hızlı darbelere maruz kalabilir. Bu dış faktörler delaminasyonun yayılmasını hızlandırabilir [1, 2].

Fiber takviyeli kompozit laminantlar, hafiflik, yüksek özgül sertlik/mukavemet, uyarlanabilir özellikler ve genel olarak geliştirilmiş performans gibi olağanüstü özellikleri nedeniyle denizcilik, otomotiv, hava taşıtları ve spor malzemeleri dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle karbon fiber/epoksi (CF/EP) kompozit laminantlar, ağırlığı önemli ölçüde azaltma, geleneksel metalik malzemelerden daha yüksek yorulma ve korozyon direnci sağlama yetenekleri nedeniyle havacılık ve otomobil endüstrilerinde giderek daha popüler hale gelmektedir. Bununla birlikte, bu tür kompozitlerdeki epoksi matrisin doğal kırılma dayanıklılığı, onları delaminasyona oldukça yatkın hale getirerek mukavemetin azalmasına, erken bozulmaya ve çevresel faktörlere karşı duyarlılığın artmasına neden olur. CF/EP kompozitlerin Mod-I kırılma tokluğunun tipik olarak 0,3-0,4 kJ/m² aralığında olduğu yaygın olarak kabul edilirken, geleneksel metal alaşımları 8,0 kJ/m²'ye kadar Mod-I kırılma tokluğuna sahip olabilmektedir. Sonuç olarak, bu malzemelerin uygulaması ağırlıklı olarak kanatçıklar, dümenler ve uçak kanatçıkları gibi küçük veya yük taşımayan ikincil yapılarla sınırlı kalmıştır [3-6].

Bir önceki paragrafta bahsedilen delaminasyon sorununu ele almak ve lamine kompozitlerin delaminasyon direncini artırmak için araştırmacılar tarafından yıllar içinde çok sayıda teknik geliştirilmiştir. Bu teknikler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir: (i) organik/inorganik partiküller kullanılarak matris modifikasyonları (silika [7], kauçuk [8], karbon nanotüpler [9], grafen [10], kalsit partikülleri [11] vb.), (ii) elyaf yüzey modifikasyonları; (iii) polieter-eter-keton (PEEK) [12], polifenilen-sülfid (PPS) [13], polietilen tereftalat (PET) [14], poliamid (PA) [15, 16] ve aramid [17] gibi termoplastik bileşenlerin (ara örgüler) interlaminar bölgede kullanımı ve (iv) z-pinning, 3D-dokuma ve dikiş gibi mekanik işlemler. Çalışmalar, bu tekniklerin uygulanmasının lamine

kompozitlerin delaminasyon direncini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, bazı tekniklerin düzlem içi mekanik özelliklerde önemli bir azalmaya neden olabileceği gösterilmiştir. Örneğin, z-pinning ve dikiş, boşluklar, elyaf yanlış hizalanması ve reçine cepleri gibi mikroyapısal kusurlar nedeniyle çekme mukavemetini önemli ölçüde (%40-%50) azaltabilir [18, 19]. Matrisi modifiye etmek için mikro/nanopartiküllerin kullanılmasının, kompozit yapıların düzlem içi mekanik özelliklerinden ödün vermeden delaminasyon direncini artırmanın etkili bir yolu olduğu gösterilmiştir. Ancak, bu partiküllerin eklenmesi matris viskozitesinde artışa neden olabilir ve bu da özellikle otoklav dışı üretim süreçlerinde sorun yaratabilir. Bu tekniklerin yerine, delaminasyon direncini arttırmak için tabakalar arası bölgeye interleaves eklemek uygulanabilir bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır ve devam eden bir araştırma konusudur. Saz-Orozco ve diğerleri [20] tarafından yapılan bir çalışmada, PA ara katmanlarının E-cam elyaf/epoksi kompozitlerin Mod-I kırılma tokluğu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yazarlar, PA mikro ara örgülerin kullanımının Mod-I kırılma tokluğunda yaklaşık %90'lık bir artışa neden olduğunu bildirmişlerdir. Bununla birlikte, elyaf hacim oranının azalması ve kalınlığın artması nedeniyle elastik modül ve eğilme mukavemetinde önemli bir düşüş gözlenmiştir. Daelemans ve arkadaşları [21] PA 66 ve PA 69 nanoliflerinin CF/EP prepreglerinin Mod-I kırılma tokluğu üzerindeki etkilerini incelemiş ve Mod-I kırılma tokluğunda %42'lik bir artış olduğunu ortaya koymuştur. Benzer şekilde, Beylergil ve diğerleri [22] tarafından yapılan bir çalışma, elektrospun PA66 nanolifleri ile serpiştirilmiş vakum infüzyonlu CF/EP kompozitlerinin, diğer düzlem içi mekanik özelliklerden ödün vermeden Mod-I kırılma tokluğunda önemli bir gelişme sergilediğini göstermiştir.

1980'lerde ortaya çıkan ve katmanların sırayla biriktirilmesiyle karmaşık geometriye sahip mühendislik yapılarının hızlı ve güvenilir bir şekilde üretilmesini sağlayan eklemeli imalat teknolojileri, herhangi bir kalıp ve alet kullanmadan istenen ve karmaşık mimariye sahip parçaların özelleştirilmesi için yeni bir strateji sunmaktadır [23]. En yaygın eklemeli üretim teknolojileri arasında VAT fotopolimerizasyon, malzeme püskürtme, bağlayıcı püskürtme, malzeme ekstrüzyonu, toz yatağı füzyonu, tabaka laminasyonu ve yönlendirilmiş enerji biriktirme yer almaktadır. Yaygın bir malzeme ekstrüzyon işlemi olan eriyik yığma modellemesi (FDM) aşağıdaki adımları içerir: ilk olarak, yapı üç boyutlu olarak modellenir. Daha sonra, STL formatlı modeli G kodu formatına dönüştürmek için bir dilimleyici program kullanılır. 3D yazıcı G-

kodunu alır ve ekstrüzyon kafası, G-kodu tarafından belirlenen takım yolu ile baskı yatağına gönderilen ince ve uzun termoplastik filament ile yüklenir. Filament kalınlığı yüksekliğinde bir katman oluşturulur ve diğer katmanlar da aynı şekilde üst üste inşa edilerek bitmiş ürün elde edilir. FDM süreci son derece hızlı ve ucuz bir ekstrüzyon teknolojisidir [24, 25].

FDM'nin geleneksel kompozit üretim yollarına entegre edilmesi, lamine kompozitlerin delaminasyon direncini artırmak için umut verici bir tekniktir. Bununla birlikte, literatürde lamine kompozitlerin arayüzey modifikasyonu için FDM teknolojisini kullanan çok az çalışma vardır. Szebényi ve diğerleri [26] tek yönlü karbon fiber/epoksi prepregler üzerinde farklı geometrilere sahip 3D baskılı polikaprolakton (PCL) ara katmanlar kullanmış ve PCL ara katmanların kompozitlerin sünekliğini önemli ölçüde artırdığını bulmuştur. Beylergil [27] ayrıca 3D baskılı PCL ara katmanlarının CF/EP kompozitlerinin Mod-I kırılma tokluğunu neredeyse yedi kat artırabildiğini göstermiştir. Literatürde 3D baskılı PA termoplastik ara katmanların geleneksel CF/EP kompozitlerin mekanik ve termomekanik davranışları üzerindeki etkilerini araştıran çalışma sayısı oldukça azdır.

Daha önce de belirtildiği gibi, termoplastik ara katmanlar kompozit laminantların Mod-I delaminasyon direncini artırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bunların dahil edilmesi, laminantın belirli bölgelerindeki hasar büyümesini istemeden kötüleştirebilir, böylece avantajlarını tehlikeye atabilir ve potansiyel olarak laminantın mukavemetini azaltabilir. Hibrit kompozit sistemlerdeki hasar mekanizmalarının anlaşılması, CF/EP kompozitlere termoplastik ara katmanların eklenmesinden kaynaklanan karmaşık mikro düzeydeki etkileşimler nedeniyle çok önemlidir. Akustik emisyon (AE), bu malzemelerin neden olduğu hasarı uygun maliyetli ve tekrarlanabilir bir şekilde tespit etmek için umut verici bir tekniktir ve termoplastik ara katmanların genel kompozit sistem üzerindeki etkilerini anlamak için değerli bir araçtır.

Bu araştırmanın amacı, 3D baskılı poliamid (PA) ara katmanlar ekleyerek geleneksel CF/EP kompozitlerin delaminasyon direncini artırmaktır. Referans ve PA ara katmanlı CF/EP kompozit laminantlar vakum destekli reçine transfer kalıplama tekniği kullanılarak üretilmiştir. 3D baskılı PA ara katmanların CF/EP kompozitlerin hem Mod-I hem de Mod-II kırılma tokluğu üzerindeki etkisi ortaya çıkarılmıştır. Ayrıca, kompozitlerin kesme ve eğilme özellikleri kısa kiriş kesme ve üç nokta eğme testleri ile

değerlendirilmiştir. Akustik emisyon verileri, 3D baskılı PA ara katmanlarının kompozit laminantların arıza modları üzerindeki etkisini incelemek için toplanmıştır. Referans ve PA takviyeli kompozitlerin termomekanik tepkisini araştırmak için dinamik mekanik analiz (DMA) kullanılmıştır.



3.MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Malzemeler

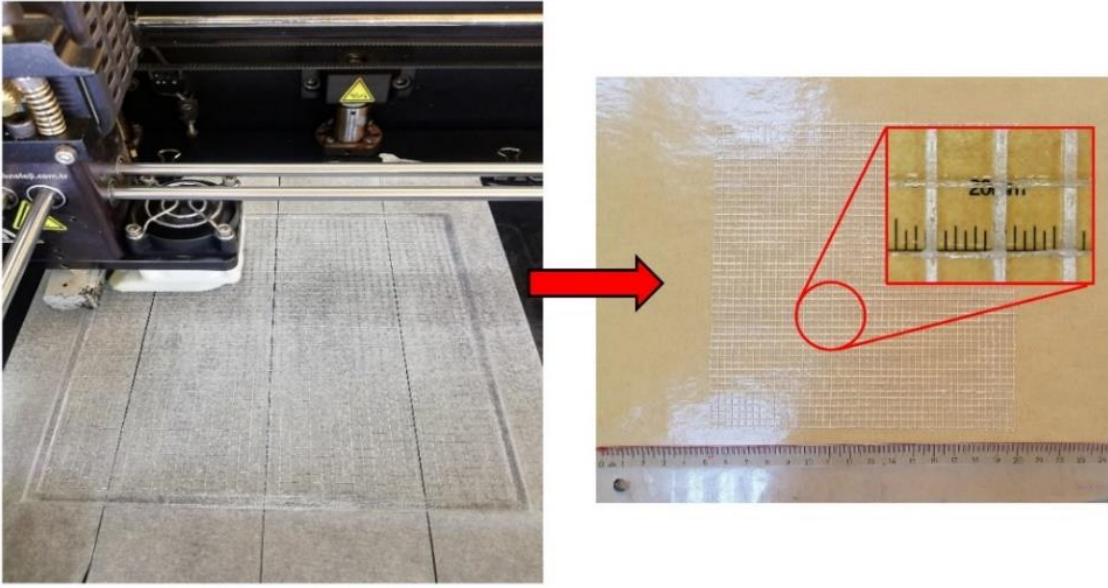
Düz dokuma karbon kumaşlar (ağırlık: 200 gsm) yerel bir tedarikçiden (Fibermak Composites, Türkiye) satın alınmıştır. Termoset reçine sistemi, Sika Biresin® CR131/ CH132-5, Tekno Kimya A.Ş.'den (Türkiye) temin edilmiştir. 50-100 bisfenol A diglisidil eter (DGEBA), %10-20 bisfenol F diglisidil eter (DGEBF) ve %5-10 1,4-bis (2,3-epoksipropoksi) bütandan oluşan reçine sistemi, özellikle infüzyon uygulamaları için yüksek performanslı fiber takviyeli kompozit parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Trieteneteramin (TETA) içeren bir CH132-5 sertleştirici ile eşleştirilmiştir. Naylon 6/66 kopolimer bazlı poliamid (PA) 3D baskı filamentleri eSUN® şirketinden temin edilmiştir. Bu filamentlerin yoğunluğu 1.12 g/cm³ ve eriyik akış indeksi (MFI) 12.30'dur (230⁰C/2.16 kg yükte ölçülmüştür).

3.2 PA Ağ Yapılarının 3D Baskısı

Desteksiz iki katmandan oluşan PA ara katmanlar ticari bir 3D yazıcı (MY X30, CCH Teknoloji A.Ş., Türkiye) kullanılarak üretilmiştir. PA filamentleri, firmanın önerisi dikkate alınarak 3D yazıcıya beslenmeden önce emilen nemin giderilmesi için eSUN® eBOX Lite 3D filament kurutucusunda 60 ⁰C 'de 12 saat bekletilmiştir. İlk olarak, 3D ara katman modelleri (filament oryantasyonu: 0/90) ANSYS Workbench 2021 Design Modeler kullanılarak hazırlandı ve ardından Ultimaker Cura yazılımı kullanılarak bir G koduna dönüştürüldü. Cihazın baskı kapasitesi 300x200x250 mm³ olup, x ve y eksenlerinde 15 mikron, z ekseninde ise 5 mikron konumsal hassasiyet elde edebilmektedir. İzin verilen en yüksek yatak sıcaklığı 100 ⁰C 'dir. XY düzlemi baskı düzlemi olarak seçilmiştir çünkü polimer ile yapı platformu arasında en önemli yüzey temasına izin verirken XZ düzleminde ortaya çıkabilecek yapışma sorunlarından kaçınır. PA ara katmanlarının imalatı için 3D baskı parametreleri Tablo 3.2'de sunulmuştur. Boyutlar şu şekildedir: uzunluk: 250 mm, genişlik: 250 mm ve kalınlık: 0,4 mm. Şekil 3.2, PA ağ yapılarının 3D baskısının bir fotoğrafını göstermektedir.

Tablo 3.2. Bu çalışmada kullanılan 3D baskı işleme parametreleri

Parametreler	Değer
Nozül çapı (mm)	0.2
Yazma sıcaklığı (°C)	240
Yatak sıcaklığı (°C)	60
Yazma Hızı (mm/s)	12
Katman yüksekliği (mm)	0.25
Gezme hızı (mm/s)	120
Soğutucu Fan	Aktif



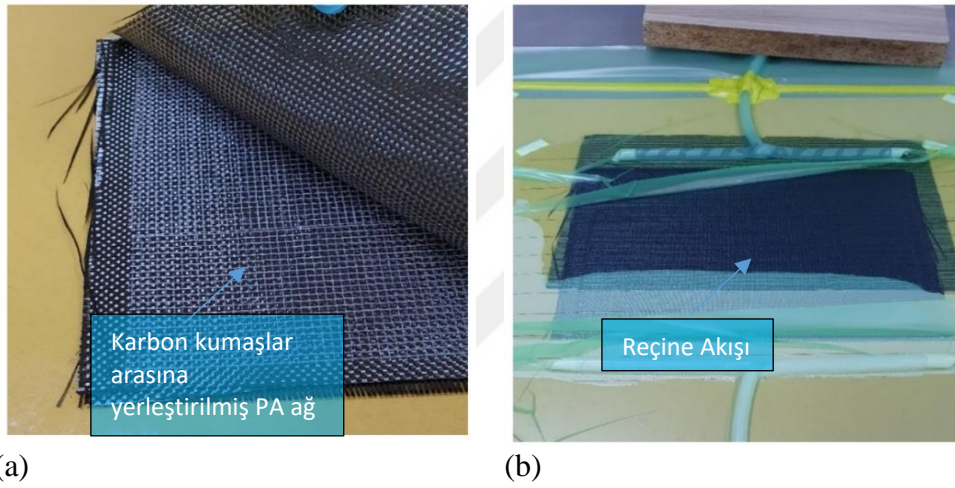
Şekil 3.2 . PA ara katmanların 3D baskısı

3.3 Referans ve PA Takviyeli CF/EP Kompozitlerin Üretimi

Referans ve PA takviyeli CF/EP kompozit plakalar vakum destekli reçine transfer kalıplama tekniği ile üretilmiştir. Üç nokta eğme (ENF), kısa kiriş kesme (ILSS) ve dinamik mekanik analiz (DMA) testleri için hem referans hem de PA takviyeli plakaları üretmek üzere bir kalıba altı karbon kat yerleştirilmiştir.

Reçine infüzyonundan önce, her bir karbon kumaş katmanı arasına 55 gsm ağırlık yoğunluğuna sahip 3D baskılı PA ara katmanlar yerleştirilmiştir. Mod-I ve Mod-II kırılma tokluğu testleri için numuneler üretmek amacıyla, istenen kalınlığa ulaşmak için bir kalıba on sekiz kat karbon kumaş yerleştirildi ve 0,02 mm kalınlığında bir Teflon film kullanılarak yığının orta düzleminde yapay bir çatlak oluşturuldu. PA takviyeli kompozitler üretilirken, laminatın kalınlığını arttırmaktan kaçınmak için 3D baskılı PA ara katmanları yalnızca yığının orta düzlemine yerleştirilmiştir (Şekil 3.3(a)'da

gösterildiği gibi). 3D baskılı PA ara katmanların ve karbon kumaşların kalıba yerleştirilmesinin ardından, reçine infüzyonunu tamamlamadan önce sıkışmış havayı çıkarmak için epoksi/sertleştirici karışımı vakum odasında 15 dakika boyunca gazdan arındırılmıştır. Yığın daha sonra üreticinin tavsiyelerine göre 8 saat boyunca 100°C'de kürlenmiş ve yavaşça oda sıcaklığına soğutulduktan sonra kalıptan çıkarılmıştır. Altı karbon katından oluşan ve 3D baskılı PA ara katmanlarla güçlendirilen kompozit plakaların kalınlığı $2,35\pm 0,08$ mm iken referans kompozit plakaların kalınlığı $1,35\pm 0,03$ mm'dir. On sekiz kat içeren referans ve PA takviyeli kompozit plakalar 3,85 ila 4,0 mm kalınlık aralığına sahipti. Kompozit plakalar aşındırıcı su jeti sistemi kullanılarak kesilmiştir. Tablo 3.3' de numune kodları, karbon katların ve PA ara katmanların sayısı ile referans ve PA takviyeli kompozitlerin nihai kalınlıkları listelenmektedir.



Şekil 3.3 (a) 3D baskılı PA ara katmanların yerleştirilmesi ve (b) vakum infüzyon işlemi.

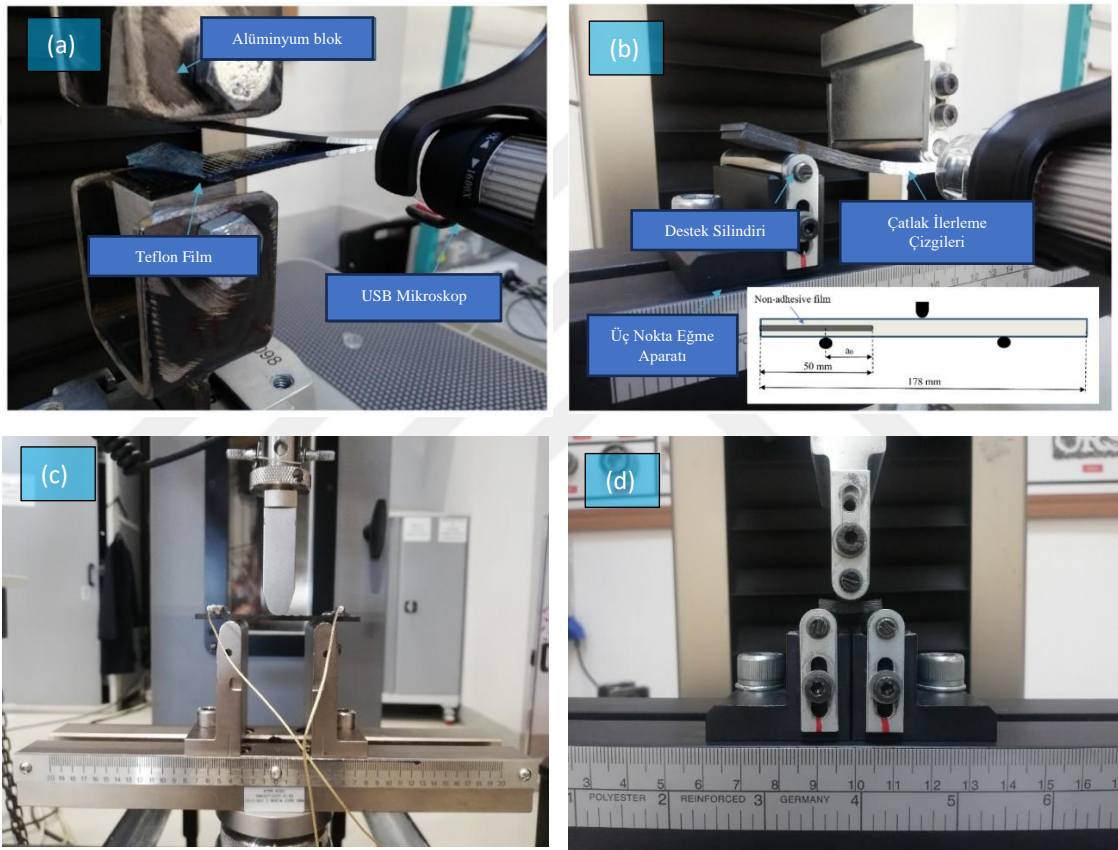
Tablo 3.3. Üretilen kompozit plakalar hakkında detaylı bilgi

Mekanik ve termomekanik testler	Numune kodları	Karbon kumaş sayısı	İnterlaminar bölgedeki PA ara katmanlarının sayısı	Laminant kalınlığı (mm)
Eğilme, DMA, kısa kırış testleri	Referans	6	-	1.35±0.03
	PA-Takviyeli	6	5	2.35±0.08
Mod-I ve Mod-II kırılma tokluğu testleri	Reference	18	-	3.85-4.0
	PA-Takviyeli	18	1	3.85-4.0

3.4 Mekanik ve Termomekanik Testler

Mekanik ve termomekanik testler geçerli ASTM standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Her kompozit grubu toplam beş numune ile incelenmiştir. Mekanik testler için 10 kN yük hücresi kapasitesine sahip bir universal test cihazı (Besmak Universal Tester, BMT-E, Türkiye) kullanılmıştır. Kompozitlerin Mod-I tabakalar arası

kırılma tokluğunu (G_{Ic}) belirlemek için hazırlanan kompozit numuneler üzerinde çift konsol kiriş testleri (DCB) gerçekleştirilmiştir. Kompozit plakalar 150 mm uzunluk, 25 mm genişlik (b) ve 3,85-4,0 mm kalınlık boyutlarında DCB numuneleri halinde kesilmiştir. Mod-I açma yükünü test numunesine aktarmak için alüminyum uç blokları kullanılmıştır. DCB numunelerinin bir kenarı ince bir beyaz boya tabakası ile kaplanmış ve çatlak uzunluğu ölçümleri için 1 mm aralıklarla işaretlenmiştir. DCB testleri sırasında, çatlak uzaması Şekil 3.4.1 (a)'da gösterildiği gibi dijital bir USB mikroskobu ile gözlemlenmiştir.



Şekil 3.4.1 (a) Mod-I (b) Mod-II, (c) eğilme ve (d) kesme yüklemesi altında bir test numunesi

Her bir çatlak atlaması için kuvvet, yer değiştirme ve karşılık gelen çatlak uzunluğu değerlerinin tepe değerleri not edilmiş, çatlak uzunluğu numunenin serbest kenarından ölçülen 100 mm'ye ulaştığında (ilk çatlaktan 50 mm uzakta) DCB testi durdurulmuştur. ASTM 5528 [28], Mod-I kırılma tokluğunun hesaplanması için modifiye kiriş teorisini (MBT) önermektedir. MBT kullanılarak, Mod-I kırılma tokluğu aşağıdaki gibi hesaplanabilir [28]:

$$G_{Ic} = \frac{F}{N} \frac{3P\delta}{2b(a+|\Delta|)} \quad (1)$$

Burada P çatlak ilerlemesi için gereken kritik yükür. δ kritik yükün karşılık gelen yer değiştirmesidir. b ve a sırasıyla genişlik ve çatlak uzunluğudur (numunenin serbest kenarından ölçülür). Δ , çatlak uzunluğuna karşı uyumun küp kökü ($C = \delta/P$) grafiğinin çizilmesiyle bulunan uyum ofsetidir. Denklem (1)'de, F ve N sırasıyla moment kolunun kısalmasını ve numunenin sertleşmesini hesaba katan düzeltme parametreleridir. Düzeltme parametrelerinin hesaplanmasıyla ilgili daha fazla ayrıntı ASTM standardında bulunabilir [28]. Kullanılan iki farklı Mod-I kırılma tokluğu vardır: Tek yönlü (UD) fiber takviyeli kompozitler için G_{Ic} , başlatma ve G_{Ic} , yayılma (kararlı hal). Öte yandan, dokuma kompozitlerdeki çatlak büyümesi, elyaf takviyesinin örgü yapısı ve antiklastik (bir yönden dışbükey diğer yönde içbükey) bükülme nedeniyle tekdüze değildir. Bu nedenle, bu çalışmada her bir G_{Ic} , başlangıç ve G_{Ic} , yayılma kırılma tokluğu değerlerini raporlamak yerine, Mod-I kırılma tokluğu (G_{Ic}), G_{Ic} , yayılma kırılma tokluğu değerlerinin ortalaması olarak sunulmuştur.

Referans ve PA takviyeli kompozit numuneler üzerinde ASTM D7905 [29] standardına uygun olarak üç nokta eğme testleri (ENF) gerçekleştirilmiştir. Mod-II kırılma tokluğunun hesaplanmasında her grup için altı numune kullanılmıştır. Bu çalışmada sadece NPC (ön çatlaksız) numunelerin kırılma testi sonuçları sunulmuştur. Şekil 3.4.1(b), ENF test numunesinin eğilme altındaki bir fotoğrafını göstermektedir. Yapışkan olmayan filmin uzunluğu 50 mm, numunelerin toplam uzunluğu ve genişliği (b) sırasıyla 178 mm ve 25 mm idi. Nominal çatlak uzunluğu (a_0), destek silindirisinin merkezinden yapışkan olmayan filmin uç noktasına kadar olan mesafedir.

Tablo 3.4. Üç nokta eğme test sırası

Sıra	Yük Seviyesi (P*)	a_0 (mm)	d^{**} (mm)	P^{**} (N)	C^{**} (x103, mm/N)
1	0.50xPc	10	1.62	420.5	3.85
2	0.75xPc	20	2.44	627.0	3.89
3	0.65xPc	35	2.90	543.2	5.34
4	0.35xPc	40	1.91	294.5	6.48
5	Pc	30	4.83	923.7	5.23

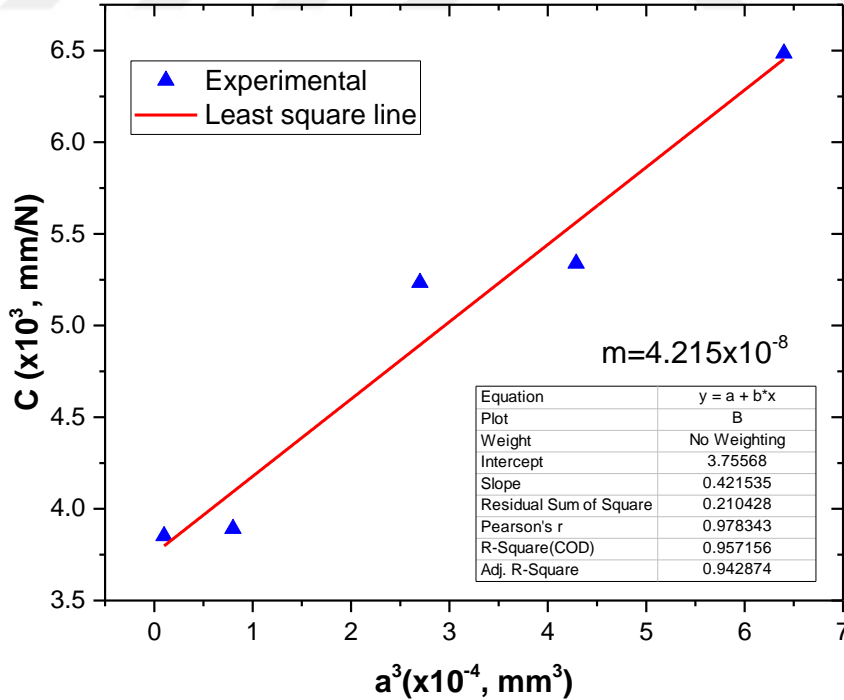
* Uygulanan yük bu değere ulaştığında test durdurulur

** Referans-2 numunesinin Mod-II test verileri.

Test numunesi, 30 mm'lik nominal çatlak uzunluğu (a0) elde edilecek şekilde konumlandırılmıştır. Daha sonra numune, kritik kuvvete (Pc) (karşılık gelen ilk yük düşüşü gözlenene kadar 1,0 mm/dak çaprazkafa hızıyla yüklenmiştir. Kalan beş numune farklı kuvvet seviyelerinde ve 10 mm ila 40 mm arasında değişen nominal çatlak uzunluklarında test edilmiştir. Sıralı olarak uygulanan yük seviyeleri ve nominal çatlak uzunlukları Tablo 3.4'te sunulmuştur. Her test için yük ve karşılık gelen yer değiştirme, komplikasyon kalibrasyonu için kaydedilmiştir. Mod-II kırılma tokluğu (GIIC) Denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır [29]:

$$G_{IIc} = 3m \frac{(P_c a)^2}{2b} \quad (2)$$

Uyumluluk (C, mm/N), kaydedilen yer değiştirmenin uygulanan kuvvete (yani δ/P) bölünmesiyle elde edilir. Çatlak uzunluğunun küpüne (a^3) karşı uyumluluk (C) grafikleri çizilmiş ve Denklem (2)'deki "m" değerini belirlemek için en küçük kare regresyon modeli kullanılmıştır. Referans-2 numunesi için "m" sabitinin belirlenmesi Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.4.2 Denklem (2)'deki "m" sabitinin belirlenmesi

Kompozit numunelerin eğilme özellikleri (eğilme modülü ve eğilme mukavemeti) ASTM D790 [30] uyarınca üç nokta eğme testlerinden elde edilmiştir

(Şekil 3.4.1 (c)). Testler 16:1 açıklık uzunluğu/kalınlık oranı ile gerçekleştirilmiştir. Test numuneleri 62 mm uzunluğa ve 12,7 mm genişliğe sahiptir. Kompozitlerin eğilme modülü (E_f) ve eğilme dayanımı değerleri (σ_f) aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır [30]:

$$E_f = \frac{(\sigma_{f,2} - \sigma_{f,1})}{(\varepsilon_{f,2} - \varepsilon_{f,1})} \quad (3)$$

$$\sigma_f = \frac{3P_{\max} L}{2bd^2} \quad (4)$$

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2} \quad (5)$$

Burada P_{\max} , L , D ve d sırasıyla kırılma anındaki maksimum yük, açıklık uzunluğu, numunenin merkezindeki sapma ve numunenin kalınlığıdır. ε_f , Denklem (5) kullanılarak hesaplanabilen eğilme gerinimidir.

Eğilme testleri sırasında, numuneler 200-750 kHz çalışma aralığına ve 550 kHz rezonans frekansına sahip iki adet PICO tipi AE sensörü ile donatılmıştır. Zaman alanı dalga formları, laminatların içinde hasar oluşumu ve/veya yayılımı sırasında meydana gelen enerji patlamalarını (akustik vuruşlar) tespit etmek için kullanılmıştır. Bu dalga formlarını yükseltmek için 20 dB kazançlı Mistras 0/2/4 ön yükselticiler kullanıldı. Mevcut verilerde gürültü görüntüsü olmadığından emin olmak için veri kayıt eşiği 45 dB olarak ayarlanmıştır. Akustik sinyallerin zamanlama parametreleri 150- μ s vuruş tanımlama süresi, 300- μ s vuruş kilitleme süresi ve 50- μ s tepe tanımlama süresi olarak ayarlanmıştır. AE örnekleme hızı 2 MHz olarak ayarlanmış ve her bir akustik vuruşla ilişkili gerinim değeri, bir çekme testi makinesinden alınan analog voltaj kullanılarak kaydedilmiştir. Mekanik testlerin ardından, toplanan AE verileri, gürültüyü gidermek için 8. dereceden bir Bessel bant geçiren filtre kullanılarak 20 ila 800 kHz arasında filtrelenmiştir. Zaman alanı ve frekans alanı parametreleri akustik vuruşların birincil özellikleri olarak tanımlanmıştır. Bu parametreler daha sonra testler sırasında kümeleme ve hasar tespiti için kullanılmıştır.

Referans ve PA takviyeli kompozitlerin (Şekil 3.4.1 (d)) laminantlar arası kesme mukavemetini (ILSS) belirlemek için ASTM D2344'e göre kısa kiriş kesme (SBS) testleri gerçekleştirilmiştir [31]. SBS testlerinde açıklık uzunluğu (L)-kalınlık oranı 8:1

ve aprazkafa hızı 1,0 mm/dak olarak takip edilmiştir. Kompozitlerin ILSS değerleri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır [31]:

$$ILSS = \frac{4P_{\max}}{3bd} \quad (6)$$

Burada Pmax, b ve d sırasıyla maksimum yük, genişlik ve numunenin kalınlığıdır. DMA testleri, hazırlanan test numuneleri üzerinde, 65 mm uzunluğunda ve 10 mm genişliğinde numune boyutlarına sahip çift konsol eğilme deformasyon modu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testler 25 0C ila 150 0C sıcaklık aralığında, 3 0C /dak ısıtma hızında ve 1 Hz yükleme frekansında gerçekleştirilmiştir. Test numunelerinin kırılmış yüzey morfolojileri Zeiss-Leo 1430 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. İncelemeden önce, kırılan yüzeyler 45 saniye boyunca altın/palladyum (Au/Pd) ile kaplanmış ve 20 kV'luk bir voltaj altında görüntülenmiştir.

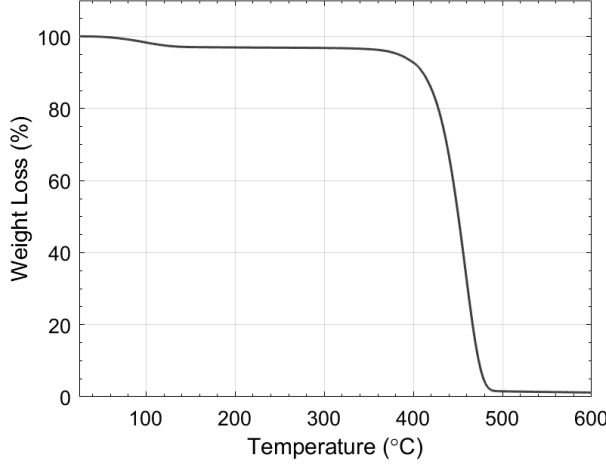
4.BULGULAR

4.1. 3D Baskılı PA Ağ Yapılarının Termal Karakterizasyonu

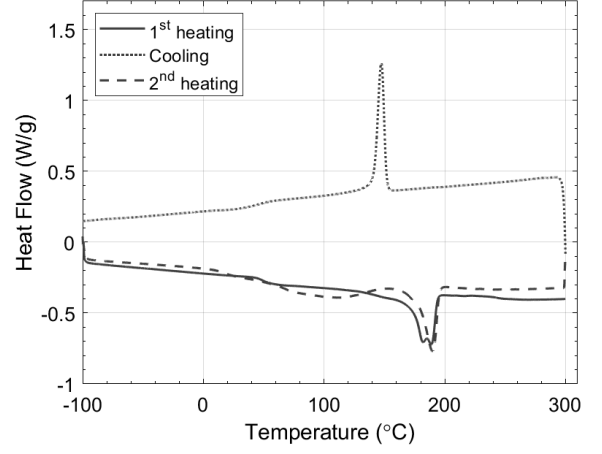
3D baskılı PA ara katmanların termal özelliklerini analiz etmek için termogravimetrik analiz (TGA) ve diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) azot atmosferi altında 10 °C /dak ısıtma hızıyla gerçekleştirilmiştir. Termal analiz sistemi olarak Mettler Toledo TGA DSC+3 (Columbus, OH) kullanılmıştır. DSC analizi numuneleri -100 °C 'den 200 °C 'ye kadar ısıtırken, TGA analizi oda sıcaklığından 700 °C 'ye kadar ısıtmıştır. Şekil 4.1'de 3D baskılı PA örneklerinin TGA ve DSC eğrileri gösterilmektedir. 100-150 °C sıcaklık aralığında gözlenen kütle kaybı, emilen suyun ve düşük moleküler ağırlıklı oligomerlerin uzaklaştırılmasından kaynaklanmış ve PA malzemesinin tek aşamalı bir termal bozunma eğrisi ile sonuçlanmıştır. 5'lik kütle kaybının meydana geldiği ilk bozunma sıcaklığı (T5%) 384 °C idi. Polimer ana zincirinin maksimum bozunma sıcaklığı 459 °C civarındaydı ve bunu aromatik yapıların bozunması izledi. Bozunma sonu sıcaklığı (%95 kütle kaybı, T95%) yaklaşık 479 °C olarak belirlenmiştir. PA katmanlarının erime ve kristalleşme davranışı Şekil 4.1 (b)'de gösterilen DSC termogramları kullanılarak incelenmiştir. Erime (T_m) ve camsı geçiş sıcaklığı (T_g) sırasıyla 176.9 °C ve 43.5 °C olarak bulunmuştur. Polimerlerin elastik modül, kırılma tokluğu, akma dayanımı ve ısı direnci gibi mekanik özelliklerinin kristalliklerinden etkilendiği iyi bilinmektedir. Numunelerin kristallik derecesi (X_c) aşağıdaki denklem kullanılarak belirlenmiştir [32]:

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^{100\%}} \cdot 100$$

Burada ΔH_m ve $\Delta H_m^{100\%}$ sırasıyla numunenin ölçülen erime entalpisi ve %100 kristal PA için erime entalpidir (206 J/g [33]). Kristallik derecesi (X_c) ve kristal sıcaklığı sırasıyla %17,44 ve 147,39 °C olarak belirlenmiştir.



(a)

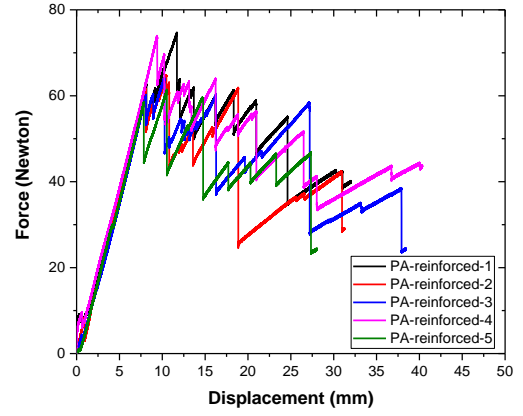
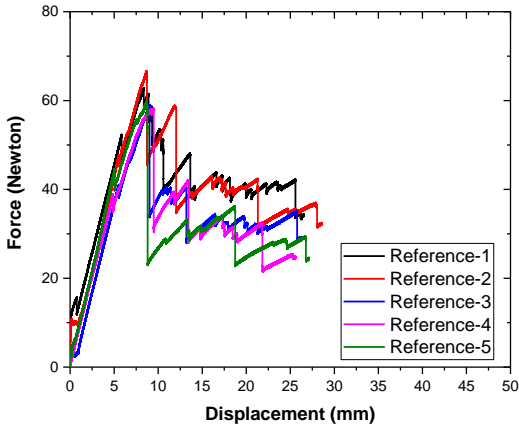


(b)

Şekil 4.1. 3D baskılı PA ara katmanların (a) TGA ve (b) DSC termogramları

4.2. Mekanik Test Sonuçları

Referans ve PA takviyeli CF/EP numunelerinin Mod-I yüklemesi altındaki kuvvet-yer değiştirme tepkisi şekil 4.2.1'de gösterilmiştir. Referans CF/EP numuneleri, tamamen iç içe geçmiş (düz örgü) dokuma kompozitlerin karakteristik bir özelliği olan testere dişi benzeri bir eğri sergilemiştir. İlk yükleme aşamasında, yük bir tepe noktasına ulaşana kadar uygulanan yer değiştirme ile doğrusal olarak artmış, ardından önemli bir yük düşüşü gözlenmiştir. Bu davranış genellikle çatlak durması ve hızlı çatlak sıçramaları dönemleriyle işaretlenen çubuk-kayma çatlak büyüme davranışı olarak adlandırılır. Yük daha sonra başka bir çatlak sıçraması meydana gelene kadar durma süresi boyunca doğrusal olarak artmıştır. Şekil 4.2.1 (b) PA takviyeli CF/EP numunelerinin kuvvet-yer değiştirme eğrilerini göstermektedir. Referans numunelere benzer bir kuvvet-deplasman tepkisine sahip olmasına rağmen, kuvvet düşüşlerinin sayısı önemli ölçüde artmıştır. PA ile güçlendirilmiş numunelerin maksimum kuvvet ve karşılık gelen yer değiştirme değerleri referans numunelerinkinden daha yüksekti, bu da 3D baskılı PA ara katmanlarının sertleştirme etkisine işaret ediyordu.

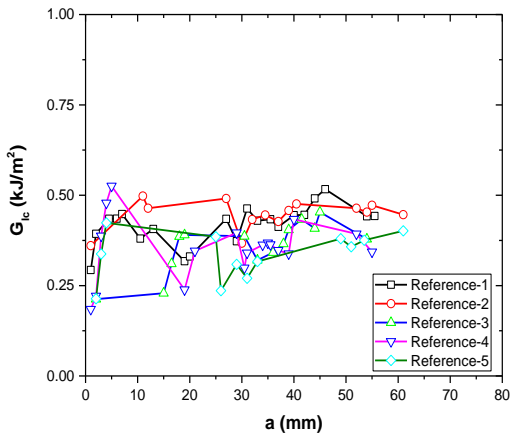


(a)

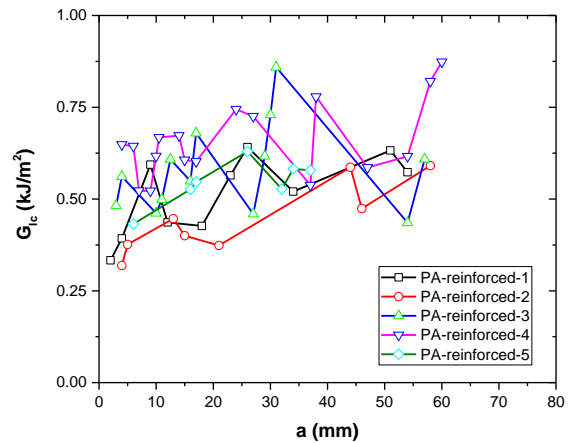
(b)

Şekil 4.2.1 Mod-I yüklemesi altında (a) referans ve (b) PA takviyeli kompozitlerin kuvvet-yer değiştirme eğrileri

Referans ve PA takviyeli CF/EP kompozitlerin çatlak büyüme direnci eğrileri (R-eğrileri) Şekil 4.2.2'de sunulmuştur. Şekil 4.2.2 (a)'da gösterilen referans numunelerin R-eğrileri düzdür, bu da kırılgan kırılma davranışını ve tipik olarak tek yönlü (UD) kompozitlerde gözlenen aşırı karbon fiber köprülemesinin eksikliğini gösterir. Buna karşılık, PA takviyeli numuneler, Şekil 4.2.2 (b)'de görüldüğü gibi, daha sünek davranış ve önemli PA-filament köprülemesinin yanı sıra diğer sertleştirme mekanizmalarını gösteren yükselen bir R eğrisi sergilemiştir. Deneyler, numunelerin ara yüzeyindeki PA filamentlerinin ayrılmış CF/EP yüzeylerini etkili bir şekilde köprülediğini ortaya koymuştur. PA takviyeli numunelerde sertleşmeden sorumlu mekanizmalar aşağıdaki paragraflarda tartışılacaktır.



(a)



(b)

Şekil 4.2.2 (a) referans ve (b) PA takviyeli kompozitlerin çatlak büyüme direnci eğrileri (R-eğrileri)

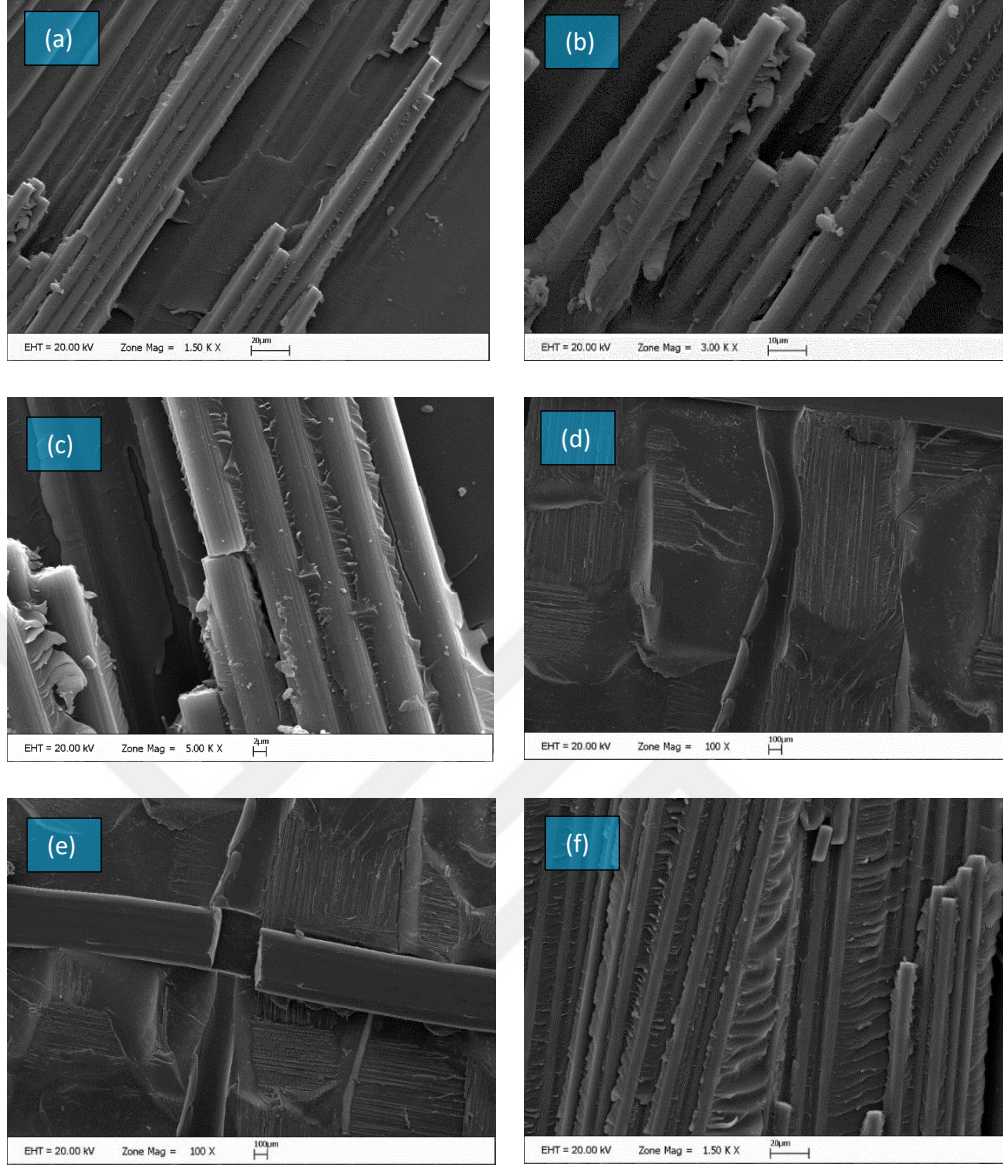
DCB testlerinin sonuçları Tablo 4.2.1'de sunulmakta olup, referans kompozitler için maksimum kuvvet ve karşılık gelen yer değiştirme değerlerinin sırasıyla $61,35 \pm 3,43$ N ve $8,84 \pm 0,42$ mm olduğunu ortaya koymaktadır. PA ara katmanlarının eklenmesi, kuvvet ve yer değiştirme değerlerinde hafif bir artışa yol açmış, maksimum yük ve karşılık gelen yer değiştirme sırasıyla %10,6 ve %17,9 oranında artmıştır. Ortalama GIc değerleri referans ve PA takviyeli kompozitler için sırasıyla 0,382 kJ/m² ve 0,548 kJ/m² olmuştur. PA takviyeli kompozitlerin Mod-I kırılma tokluğu değerleri referans kompozitlere kıyasla %43,4 oranında artmıştır.

Tablo 4.2.1 DCB ve ENF test sonuçları*

Test grubu	Maksimum yük (N)	Maksimum yer değiştirme (mm)	Ortalama GIc (kJ/m ²)	% artış	Ortalama GIc (kJ/m ²)	% artış
Referans kompozitler	61.35 (3.43)	8.84 (0.42)	0.382 (0.047)	-	1.959 (0.212)	-
PA takviyeli kompozitler	67.80 (6.08)	10.42 (0.84)	0.548 (0.079)	43.4	3.549 (0.135)	81.2

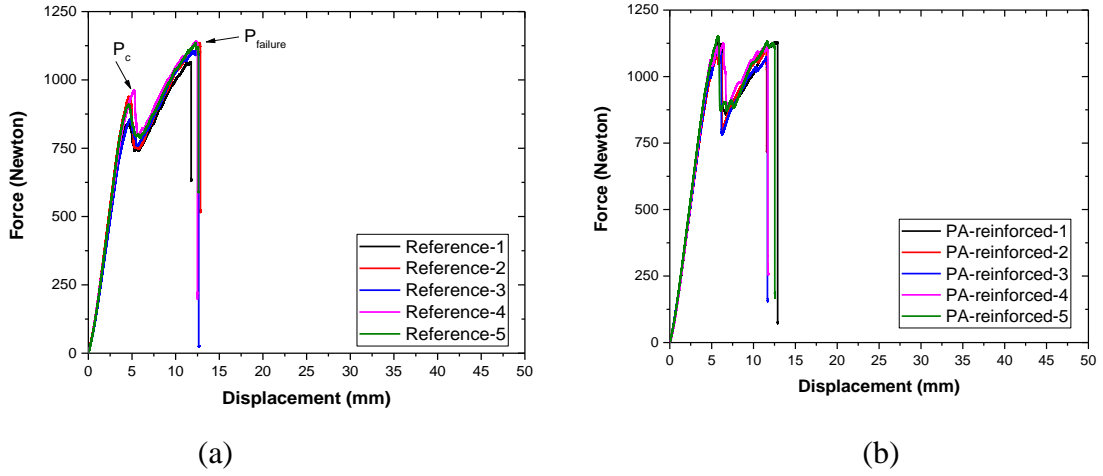
* Test verilerinin standart sapması parantez içindeki değerlerle gösterilmiştir.

Mode-I test numunelerinin kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 4.2.3'de verilmiştir. Referans CF/EP kompozitler, Şekil 4.2.3 (a)'da görüldüğü gibi gevrek kırılmayı temsil eden pürüzsüz, özelliiksiz bir yüzeye sahiptir. Şekil 4.2.3 (b) kırılmış karbon fiberleri göstermektedir. Şekil 4.2.3 (b) ve Şekil 4.2.3 (c)'de elyaf/matris ara yüzünün ayrılması ve çekilen elyaflar görülebilir. Yüklemeden sonra bir miktar epoksi matrisin karbon fiberlere bağlı kaldığı görülmektedir. Tüm bu gözlemler matris ve karbon fiberler arasında iyi bir arayüzey yapışması olduğunu göstermektedir. CF/EP kompozitlerde, birincil sertleştirme mekanizmaları elyaf çekilmesi ve elyaf kırılmasıdır. Şekil 4.2.3 (d-f), PA takviyeli kompozitlerin Mod-I yüklemesi altındaki kırılma yüzeylerini göstermektedir. Şekil 4.2.3 (d) deforme olmuş ve yüzeyden ayrılmış PA filamentlerinin izlerini göstermektedir. Bazı kırılmış ve plastik olarak deforme olmuş PA filamentleri Şekil 4.2.3 (e)'de görülebilir. Referans kompozitlerin aksine, PA ile güçlendirilmiş kompozitler için Şekil 4.2.3 (f)'de daha pürüzlü bir yüzey görülebilir.



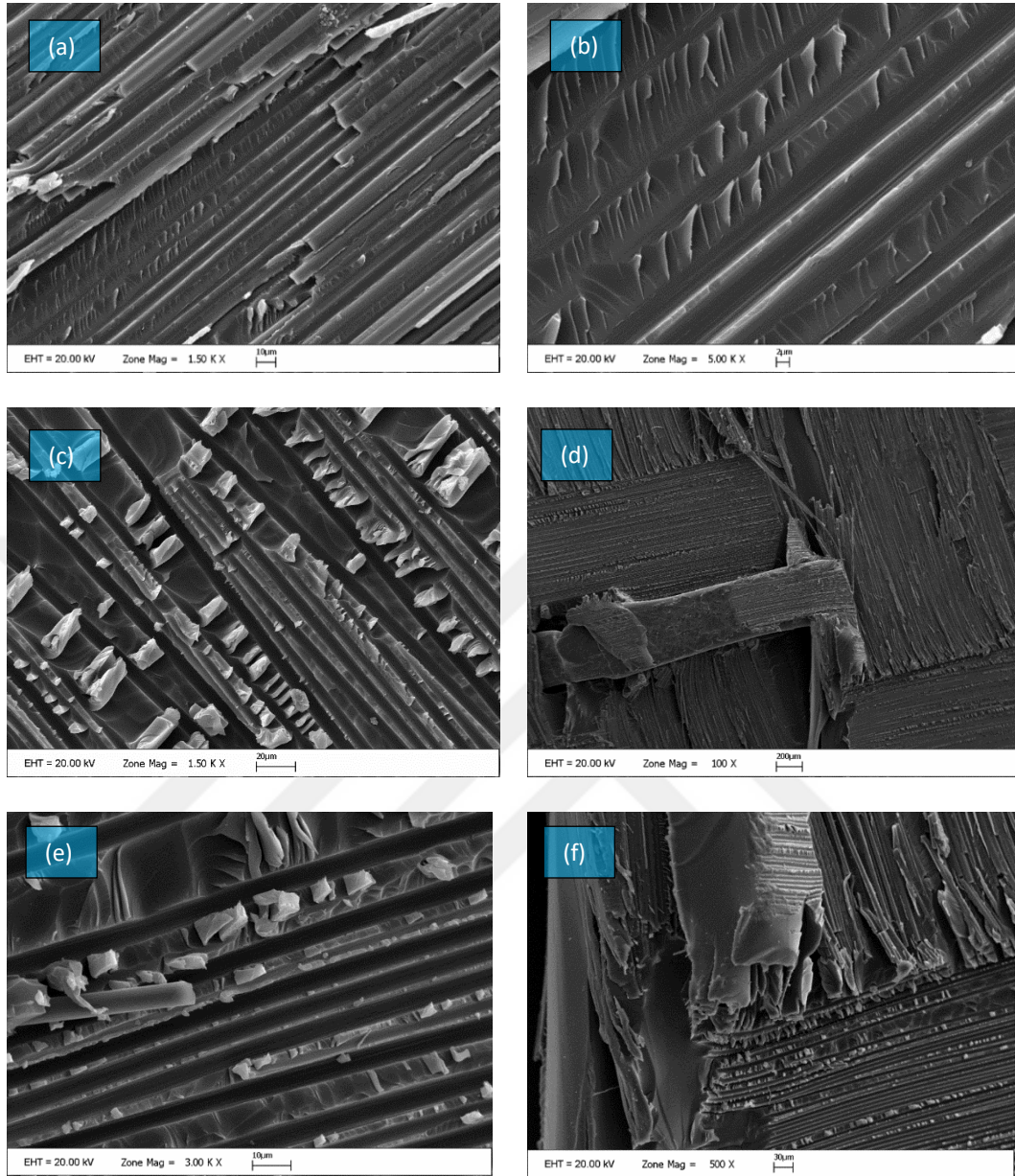
Şekil 4.2.3 Mod-I test numunelerinin SEM görüntüleri (a-c) referans ve (d-f) PA takviyeli kompozitler

Şekil 4.2.4, Mod-II yüklemesi altında referans ve PA takviyeli kompozitlerin yük-deplasman eğrilerini göstermektedir. Görülebileceği gibi yük, Denklem (2)'deki "Pc" değerine karşılık gelen kritik değere ulaşana kadar yer değiştirme ile doğrusal olarak artmaktadır. Bu yük seviyesinde çatlak ilerlemeye başlar ve yük değerleri buna bağlı olarak azalır. Çatlak, numune boyunca ilerlemeye devam eder ve silindir destek hattına ulaşır. Bir miktar yer değiştirmeden sonra, numune aşırı eğilme nedeniyle Pfailure'da başarısız olur. Referans ve PA takviyeli kompozitler için kritik yük sırasıyla 896.4 ± 51.1 N ve 1114.8 ± 25.7 N olarak bulunmuştur. Bu da %24,4'lük bir artışa karşılık gelmektedir. Kritik yükteki yer değiştirme değeri referans kompozitlerden önemli ölçüde farklı değildir. İnterlaminar bölgedeki PA filamentleri önemli miktarda enerji emerek çatlakın daha yüksek kuvvet değerlerinde ilerlemeye başlamasını sağlar.



Şekil 4.2.4. Mod-II yüklemesi altında (a) referans ve (b) PA takviyeli kompozitlerin yük-deplasman eğrileri

Şekil 4.2.5, Mod-II test numunelerinin SEM görüntülerini göstermektedir. Hasarlı karbon fiberler ve epoksi matris Şekil 4.2.5 (a)'da görülebilir. Sürtünme ve hackle oluşumları, Mod-II yüklemesi altında geleneksel dokuma kompozitlerde gözlemlenen iki temel sertleştirme mekanizmasıdır. Mod-I numunelerindeki elyaf/matris arayüzündeki sürekli çatlak ilerlemesinin aksine, Mod-II numunelerinin kırılma yüzeylerindeki süreksiz çatlak ilerlemesi ve mikro çatlakların kombinasyonu nedeniyle hackle oluşumları meydana gelir. Şekil 4.2.5 (b) ve 4.2.5 (c)'deki kırılmış yüzeylerin büyütülmüş görüntüleri hackle oluşumlarının varlığını ortaya koymaktadır. Şekil 4.2.5 (d)'de, kesme yüklemesi nedeniyle hasar görmüş PA filamentlerinin parçaları gösterilirken, Şekil 4.2.5 (e)'de bazı karbon fiberlerin çekildiği ve hasarlı epoksi matrisinin izleri görülmektedir. Şekil 4.2.5 (f) plastik olarak deforme olmuş PA filament parçalarının yakından görünümünü sunmaktadır. Bu gözlemler, PA filamentlerinin kapsamlı plastik deformasyon yoluyla önemli miktarda enerji emebildiğini ve bunun da Mod-II kırılma tokluğunda önemli bir iyileşmeye yol açtığını göstermektedir. Mod-II kırılma tokluğu testleri öncelikle kayma gerilmelerini içerdiğinden, PA filamentleri Mod-I yüklemesine kıyasla Mod-II delaminasyonuna karşı daha iyi direnç sağlar. Tablo 4.2.1, ENF testlerinden elde edilen Mod-II kırılma tokluğu değerlerini göstermektedir. Referans ve PA takviyeli kompozitler için ortalama Mod-II kırılma tokluğu değerleri sırasıyla $1,959 \pm 0,212$ kJ/m² ve $3,549 \pm 0,135$ kJ/m² olarak belirlenmiştir. 3D baskılı PA katmanlarının interlaminar bölgeye dahil edilmesi, Mod-II kırılma tokluğu değerlerinde %82'lik bir artışa yol açmıştır.

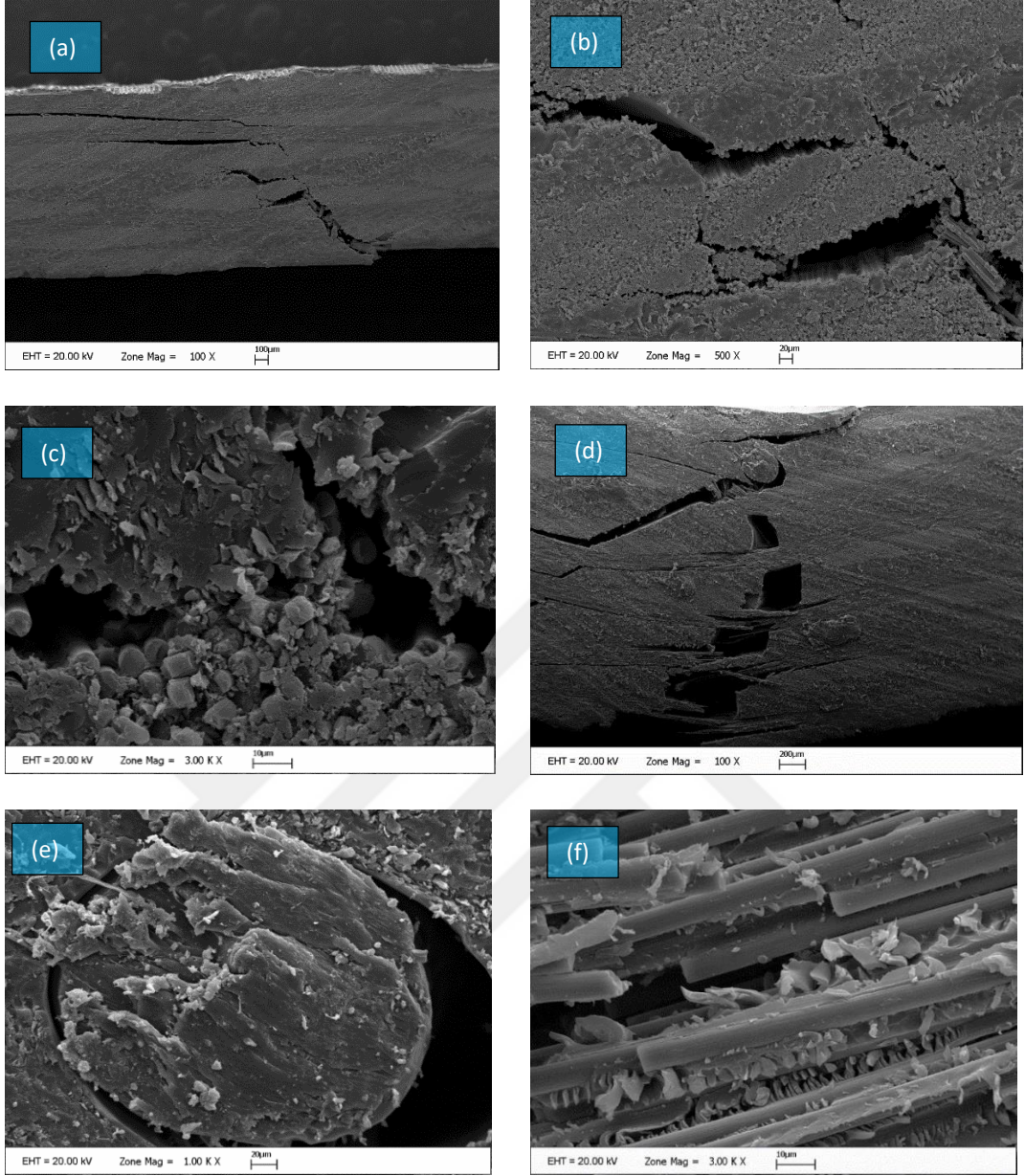


Şekil 4.2.5. Mod-II test numunelerinin SEM görüntüleri (a-c) referans ve (d-f) PA takviyeli kompozitler

Table 4.2.2 Kısa kiriş kesme, eğme ve DMA test sonuçları

Test grubu	ILSS (MPa)	Eğilme modülü (GPa)	Eğilme mukavemeti (MPa)	Dinamik modül (MPa)	Kayıp modülü (MPa)	tan δ	tan δ max	T _g (°C)
Referans kompozitler	53.32±1.1	44.58±1.4	966.8	19446.7	51.6	0.003	0.321	117.3
PA-takviyeli kompozitler	62.58±5.6	32.13±2.9	480.4	7866.0	86.5	0.011	0.576	119.6

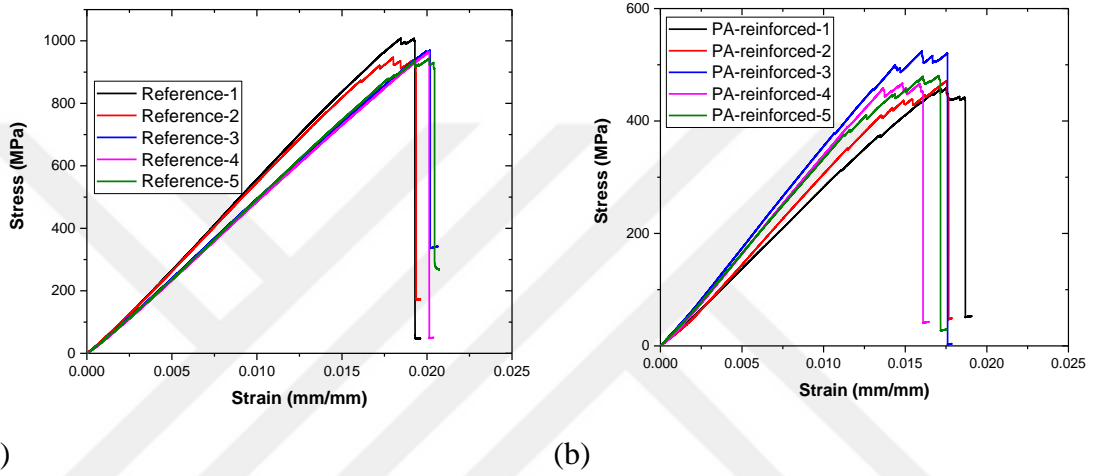
Şekil 4.2.6, kısa kirişli kesme testi numunelerinin SEM görüntülerini göstermektedir. Kesme kuvvetleri, Şekil 4.2.6 (a)'da gösterildiği gibi, referans numunelerin orta düzlemi boyunca gözlemlenen karbon katmanlarında ciddi delaminasyonlara neden olmuştur. Şekil 4.2.6 (b), Şekil 4.2.6 (a)'da gözlemlenen delaminasyonların daha yakından bir görünümünü sunmaktadır. Şekil 4.2.6 (b)'de enine çekme çatlakları ve interlaminar kesme kırılma yerleri görülebilir. Şekil 4.2.6 (c)'deki kırılma yüzeyleri özelliksiz görünmektedir ve matris, herhangi bir plastik deformasyon olmaksızın çok sayıda parçaya ayrılma göstermiştir, bu da düşük bir arayüzey kesme mukavemetine işaret etmektedir. Şekil 4.2.6 (d)'de PA filamentleri etrafındaki hasarın yayılımı, eğilme ve laminarlar arası kesme arızalarının varlığı ile birlikte gözlemlenebilir. Öte yandan, Şekil 4.2.6 (e)'deki PA takviyeli kompozitlerin kırılma yüzeyleri daha pürüzlü özellikler sergilemiş ve epoksi matris daha yüksek plastik deformasyon göstererek referans numunelere kıyasla daha yüksek bir arayüzey kesme mukavemetine işaret etmiştir. Referans kompozitlerle karşılaştırıldığında, PA takviyeli kompozitler daha fazla sayıda matris parçalanması sergilemiştir. Ayrıca, elyaf yüzeyindeki reçinenin varlığı, güçlü bir arayüzey yapışmasına dair daha fazla kanıt sağlamaktadır. Kırılma yüzeyi, paralel kırılma kusurlarının yanı sıra, daha düzgün bir yük dağılımı ve bitişik katmanlar arasında verimli yük aktarımını gösteren ve delaminasyon için daha fazla enerji gereksinimi ile sonuçlanan belirgin ve tekrarlayan tepe noktaları (Şekil 4.2.6 (f)) sergilemiştir. Kısa kiriş kesme testi sonuçları Tablo 4.2.2'de sunulmuştur. Referans ve PA takviyeli kompozitlerin ortalama ILSS değerleri sırasıyla $53,32 \pm 1,10$ MPa ve $62,58 \pm 5,65$ MPa olarak belirlenmiştir. PA filamentlerinin eklenmesi, kompozit laminatların kalınlığında önemli bir artışa rağmen ILSS değerlerinde %17,4'lük bir iyileşme ile sonuçlanmıştır.



Şekil 4.2.6. Kısa kırış kesme testi numunelerinin SEM görüntüleri (a-c) referans ve (d-f) PA takviyeli kompozitler

Şekil 4.2.7, eğilme yüklemesi altında referans ve PA takviyeli kompozit numunelerin gerilme-gerinim eğrilerini göstermektedir. Şekil 4.2.7 (a)'da gösterildiği gibi, referans kompozitlerin gerilme-şekil değiştirme davranışı, önemli bir plastik deformasyon olmaksızın kırılma yüküne ulaşılan kadar neredeyse doğrusaldı ve bu da katastrofik (kırılgan) bir başarısızlığa işaret ediyordu. Şekil 4.2.7 (b)'de gösterildiği gibi PA takviyeli kompozitlerde de benzer bir gerilme-gerinim davranışı gözlenmiştir. Bununla birlikte, bu numuneler, çok sayıda küçük gerilme düşüşü ile kanıtlandığı gibi kademeli başarısızlık göstermiştir. Bu kademeli başarısızlık, PA filamentlerinin varlığı nedeniyle karbon/epoksi tabakaları arasında daha verimli yük aktarımına bağlanabilir. Tablo 4.2.2, hem referans hem de PA takviyeli kompozitlerin eğilme modülü ve

mukavemet değerlerini sunmaktadır. Beklendiği gibi, PA ara katmanlarının eklenmesi kompozitlerin eğilme özelliklerinde bir düşüşe neden olmuştur. Eğilme performansındaki bu düşüş, interlaminar bölgede daha az rijit PA'nın varlığı, kalınlıktaki artış, elyaf hacim fraksiyonundaki azalma ve kürleme işlemi sırasında boşluk oluşumu gibi çeşitli faktörlere bağlanabilir. Referans kompozitlerle karşılaştırıldığında, PA takviyeli kompozitler eğilme modülünde ve mukavemetinde sırasıyla %28 ve %52'lik bir düşüş göstermiştir.



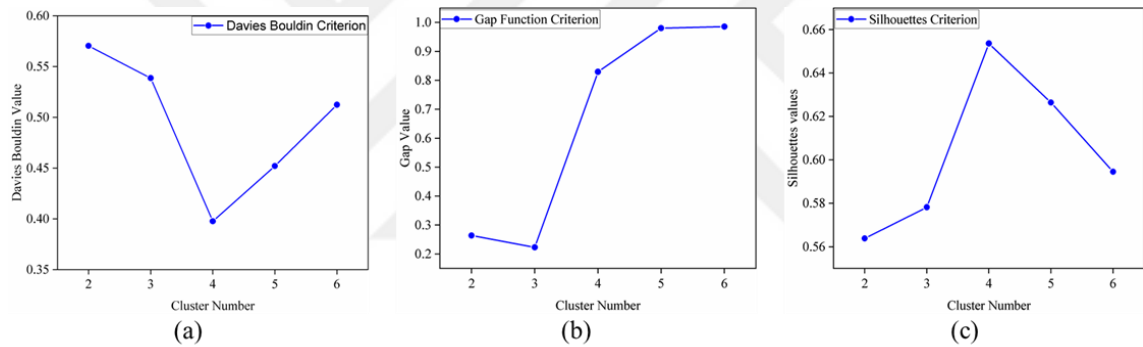
Şekil 4.2.7 Eğilme yüklemesi altındaki numunelerin gerilme-gerinim eğrileri (a) referans ve (b) PA takviyeli kompozitler

4.3. DMA Test Sonuçları

DMA test sonuçları Tablo 4.2.2'de sunulmuştur. Elastik davranışını ve sertliğini yansıtan depolama modülü, bir kompozit malzemenin yük taşıma kapasitesini değerlendirmek için kullanılabilir. Kayıp modülü, enerjinin döngü başına ısı olarak dağılmasını ölçer ve sönümlenme olarak da adlandırılır. Viskoelastik bir malzemenin viskoz tepkisinin elastik tepkisine oranı $\tan\delta$ olarak gösterilir [34]. PA ara katmanlarının dahil edilmesi, referans kompozitlere kıyasla dinamik modülde bir azalmaya ve kayıp modülünde bir artışa yol açmıştır. Bunun nedeni, PA takviyeli kompozitin daha az sert/sert olması, daha fazla kuvvetin ısı olarak dağılmasına neden olması ve böylece kayıp modülünü artırmasıdır. Sonuçlar, üç nokta eğme testi sırasında yapılan gözlemlerle tutarlıdır. 117⁰C ile 119⁰C arasında değişen camsı geçiş sıcaklığı ölçümlerinin önemli bir değişiklik göstermemesine rağmen, $\tan\delta$ değerlerindeki önemli artış, PA takviyeli kompozitlerin enerjiyi dağıtmada referans kompozitlerden daha etkili olduğunu göstermektedir.

4.4. AE Test Sonuçları

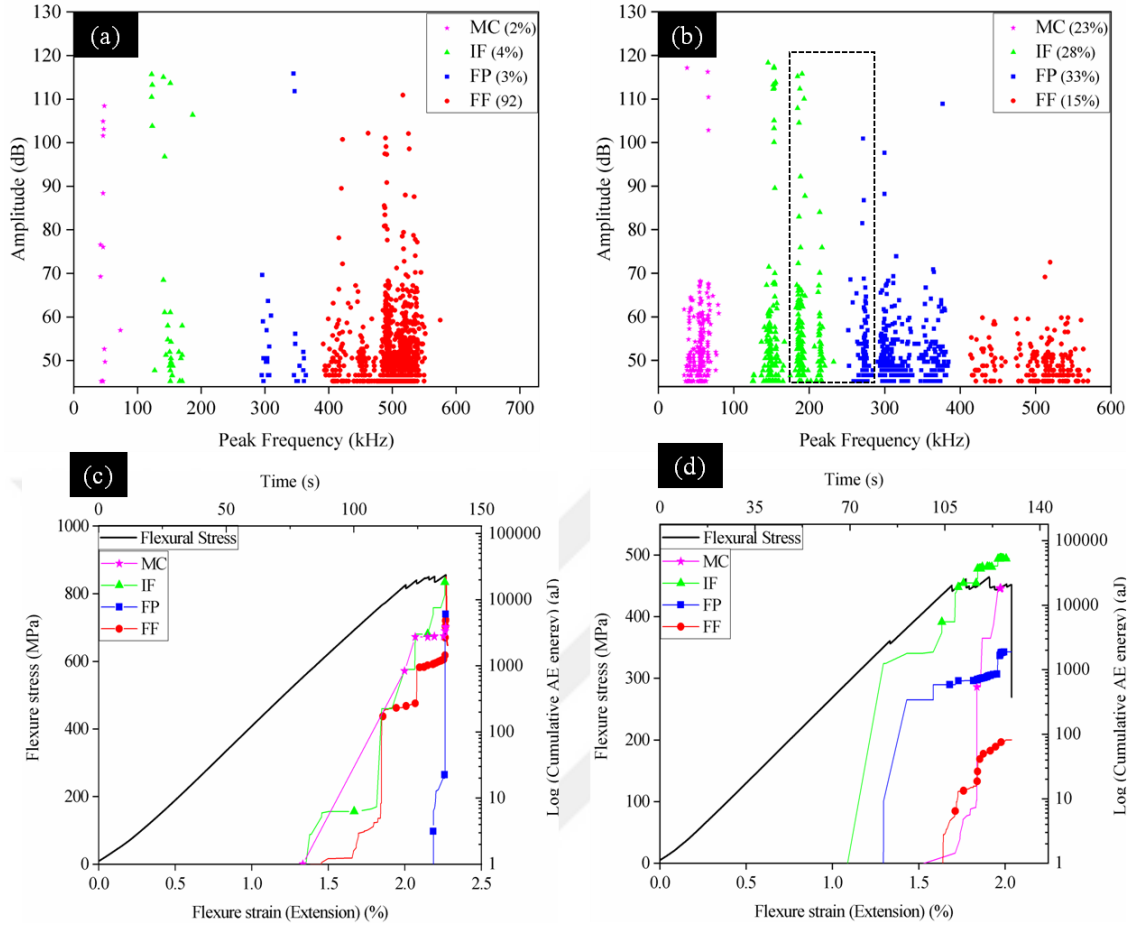
Şekil 4.4.1'de görüldüğü gibi, eğilme testleri sırasında elde edilen AE verileri için optimum küme sayısını belirlemek için bir karşılıklı oylama şeması kullanılmıştır. Davies-Bouldin, Gap ve Silhouettes [35-37] olmak üzere üç farklı endeks kullanılmıştır. Bölümlenme algoritması olarak şehir bloğu mesafe fonksiyonuna sahip k-ortalamlar kümeleme yöntemi kullanılmış ve AE verileri için 2 ila 6 arasında değişen kümeler değerlendirilmiştir. Gap fonksiyonu ve Silhouettes kriteri için maksimum değer bir veri kümesi için en uygun küme sayısını gösterirken, Davies-Bouldin indeksi için minimum değer aynı AE özellikleri uzayında ideal küme sayısını sağlar. Şekil 4.4.1'de gösterildiği gibi, mevcut çalışmada AE isabetleri için en uygun küme sayısı 4, 6 ve 4'tür. Hem Silhouettes hem de Davies-Bouldin endeksleri 4'ü en uygun küme sayısı olarak belirlediğinden, AE isabetleri 4 farklı sınıfa ayrılmıştır.



Şekil 4.4.1 (a) Davies Bouldin; (b) Gap; ve (c) Silhouettes endeksleri kullanılarak yapılan küme değerlendirme sonuçları

Şekil 4.4.2 (a)'da, genlik-tepe frekans özellikleri uzayında referans numune için AE verilerinin kümeleme sonuçları gösterilmektedir. Dört farklı küme ayrılmış ve malzeme içindeki farklı arıza modlarıyla ilişkilendirilmiş, her bir kümenin isabet oranı yüzde olarak sunulmuştur. Dört küme 0-100 kHz, 100-200 kHz, 250-350 kHz ve 400-550 kHz tepe frekans aralıklarında gözlemlenmiştir. Yazarlar tarafından yapılan önceki çalışmalar [38] en küçük frekans aralığının matris çatlaması (MC) ile ilişkili olduğunu göstermiştir, bu nedenle 0-100 kHz frekans aralığı mevcut eğilme testlerinde polimerik matris arızası ile ilişkilendirilmiştir. Önceki araştırmalara göre, en yüksek frekans aralığına sahip AE vuruşları fiber kırılması / fiber arızası ile ilgilidir [39, 40]. Bu nedenle, 4.4.2 (a)'da 400-550 kHz arasında tepe frekansına sahip AE dalga formları fiber arızasına (FF) atfedilmiştir. Kalan iki küme, tepe frekans aralığındaki artış sırasına göre arayüz arızası (IF) ve fiber kopması/bağlanması (FP) ile ilişkilendirilmiştir [37]. PA

takviyeli numune için kümeleme sonuçları, benzer bir frekans aralığının gözlemlendiği ve çeşitli hata modlarına atfedildiği Şekil 4.4.2 (b)'de sunulmuştur. Şekil 4.4.2 (a) ve 14 (b), PA takviyeli numunenin Şekil 4.4.2 (b)'de kesikli dikdörtgenle gösterilen 200 kHz ve 270 kHz civarındaki frekanslarda bulunan üç alt kümeye sahip olduğunu ve bunların sırasıyla 2. ve 3. kümelere ait olduğunu göstermiştir. PA ara katmanlarının varlığı, Şekil 4.4.2 (a) ve Şekil 4.4.2 (b)'de test edilen numuneler arasındaki en önemli farktı ve bu alt kümelerin 200 kHz aralığında PA ara katmanları ve karbon fiberler arasındaki arayüz arızası ve 300 kHz aralığında karbon fiberler ve PA bileşenleri arasındaki ayrışma ile ilişkili olduğunu gösteriyordu. PA ara katmanlarının eklenmesi, kompozit malzemeye hasar birikim oranını ve kompozitin mekanik tepkisini önemli ölçüde etkileyebilecek yeni hata modları getirmiştir. Şekil 4.4.2 (c) ve 4.4.2 (d), eğilme yükleme koşulları sırasında test numunelerindeki kümülatif AE enerji salınımını gerilme-gerinim eğrisi üzerine bindirilmiş olarak göstermektedir. PA takviyeli numunenin başarısızlık stresinin 464 MPa olduğu ve referans numuneden %45 daha az olduğu gözlemlenmiştir. Mekanik tepkideki bu azalma, eğilme yükleme koşulları altında PA ara katmanlarının eklenmesi nedeniyle karbon fiberin takviye kabiliyetini kaybettiğini göstermiştir. Şekil 4.4.2 (c) ve Şekil 4.4.2 (d), PA takviyeli numunenin arayüz arızası yoluyla 70000aJ enerji açığa çıkardığını, referans numunenin ise sadece 20000aJ enerji açığa çıkardığını göstermektedir. Kırılma noktasına kadar geçen test süreleri her iki numunede de benzer olduğundan, PA ara katmanlarının varlığının referans laminantın sertliğini azalttığı ve kompozit malzemedeki hasar büyüme oranını artırdığı sonucuna varılabilir. Ek olarak, PA takviyeli numunede elyaf kırılması için AE enerji salınım oranı, çoğu elyaf kırılma olayının yüklemenin son aşamalarında meydana geldiğini ve bu olayların enerjisinin referans numuneye göre önemli ölçüde daha düşük olduğunu göstermiştir. Ayrıca, PA takviyeli numunede lif kopması ile ilişkili AE vuruşları 70dB'nin altında genliklere sahipken, referans numunedekiler 115dB'ye kadar daha yüksek değerlere sahipti. PA takviyeli numunede lif kopması olaylarının nispeten düşük genliği, laminantın içinde yüklemenin son aşamasında yüksek genlikli lif kopmaları yoluyla salınan enerjiyi sönmüleyen PA ara katmanlarının varlığına bağlanabilir. Bu sonuçlar, referans malzemeye kıyasla PA takviyeli numune için $\tan\delta$ değerinde bir artış gözlenen DMA testlerinin sonuçları ile tutarlıdır. Genel olarak, PA ara katmanlarının eklenmesi, fiberin takviye edici etkisini zayıflatarak arayüz arızası, ayrışma ve fiber çekme olaylarına duyarlılığı artırarak mukavemetini ve elastik modülünü azaltmıştır. Sonuç olarak, eğilme yükleme koşulları altında mikro hasarın büyüme oranı daha yüksek olmuştur.



Şekil 4.4.2. Kümeleme sonuçları (a) referans numune (b) PA takviyeli kompozit numune; hasar birikim eğrileri ve gerilme-gerinim eğrileri (c) referans numune (d) PA takviyeli kompozit numune

5.TARTIŞMA SONUÇ ve ÖNERİLER

5.1. Sonuç

Bu çalışmada, geleneksel karbon fiber/epoksi kompozitlerin Mod-I ve Mod-II kırılma tokluğunu artırmak için 3D baskılı poliamid (PA) ara katmanlar kullanılmıştır. 3D baskılı PA ara katmanların geleneksel CF/EP kompozitlerin mekanik ve termomekanik özellikleri üzerindeki etkisi ilgili ASTM standartlarına göre değerlendirilmiştir. Sonuçlar, interlaminar bölgede 3D baskılı PA ara katmanların kullanılmasının Mod-I (%43,5), Mod-II (%81,2) kritik enerji salınım oranlarında ve ILSS'de (%17,4) önemli bir iyileşmeye yol açtığını ortaya koymuştur. Sertleştirme mekanizmaları, interlaminar bölgedeki 3D baskılı PA filamentlerinin çatlak köprüleme, ayrışma ve plastik deformasyonuydu. Kompozitlerin camsı geçiş sıcaklığı (T_g), 3D baskılı PA ara katmanların varlığından çoğunlukla etkilenmemiştir. Bununla birlikte, kompozitlerin eğilme özellikleri, elyaf hacim oranının azalması ve kalınlığın artması nedeniyle bu ara katmanlardan olumsuz etkilenmiştir. AE test sonuçlarının karşılaştırmalı analizi, 3D baskılı ara katmanların entegrasyonunun malzemede yeni bir kırılma moduna yol açtığını ve kompozit laminantların hasar davranışı için fiber baskın moddan matris baskın moda geçişe neden olduğunu göstermiştir. Davranıştaki bu değişiklik, mikroskobik gözlemler ve kırılma testleriyle de desteklenen PA takviyeli kompozitler için daha yüksek kırılma enerjisine işaret etmiştir. Hibrit kompozit sistemlerdeki hasarı tespit ve analiz etmek için AE tekniğinin kullanılması, araştırmacılara ve mühendislere performanslarını artırma ve dayanıklılıklarını uzatma konusunda yardımcı olabilir.

6.KAYNAKLAR

- [1] C. K. Hirwani, S. K. Panda, T. R. Mahapatra, S. K. Mandal, S. S. Mahapatra, A. K. De, Delamination Effect on Flexural Responses of Layered Curved Shallow Shell Panel-Experimental and Numerical Analysis [J]. *Int. J. Comput. Methods.* 15, 04, 1850027 (2018) “<https://doi.org/10.1142/S0219876218500275>”.
- [2] C. K. Hirwani, S. K. Panda, S. S. Mahapatra, S. K. Mandal, L. Srivastava, M. K. Buragohain, Flexural strength of delaminated composite plate – An experimental validation [J]. *Int. J. Damage Mech.* 27, 2, 296-329 (2018) “<https://doi.org/10.1177/1056789516676515>”.
- [3] C. K. Hirwani, S. K. Panda, T. R. Mahapatra, S. S. Mahapatra, Numerical Study and Experimental Validation of Dynamic Characteristics of Delaminated Composite Flat and Curved Shallow Shell Structure [J]. *J. Aerosp. Eng.* 30, 5, 04017045 (2017) “[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0000756](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000756)”.
- [4] V. Kumar, H. C. Dewangan, N.Sharma, S. K. Panda, Numerical prediction of static and vibration responses of damaged (crack and delamination) laminated shell structure: An experimental verification [J]. *Mech. Syst. Signal Process.* 170, 108883 (2022) “<https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2022.108883>”.
- [5] V. Kumar, S. K. Panda, S.R. Mahmoud, M. Balubaid, Numerical investigation of transient thermo-mechanical loading effect on combined damaged (crack and delamination) curved shell structure: An experimental verification [J]. *Ocean Eng.* 266, 113009 (2022) “<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113009>”.
- [6] S. S. Sahoo, V.K. Singh, S. K. Panda, Nonlinear Flexural Analysis of Shallow Carbon/Epoxy Laminated Composite Curved Panels: Experimental and Numerical Investigation [J]. *J. Eng. Mech.* 142, 41, 04016008 (2016) “[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001040](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001040)”.
- [7] H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, R. Eslami-Farsani, S. Mirzamohammadi, S. A. Chirani, The Simultaneous Effect of Microcapsules and Silica Nanoparticles on the Mechanical-healing Properties of Glass Fibers-Epoxy Smart Composites [J]. *Fibers Polym.* 23, 2907–2915 (2022) “<https://doi.org/10.1007/s12221-022-4365-z>”.
- [8] L. Tran, J. Kim, A Comparative Study of the Thermoplastic Polyurethane/Carbon Nanotube and Natural Rubber/Carbon Nanotube Composites According to Their Mechanical and Electrical Properties [J]. *Fibers Polym.* 1948–1955 (2018) “<https://doi.org/10.1007/s12221-018-8182-3>”.
- [9] J. A. Rodríguez-González, C. Rubio-González, J. A. Soto-Cajiga, Piezoresistive Response of Spray-coated Multiwalled Carbon Nanotube/Glass Fiber/Epoxy Composites under Flexural Loading [J]. *Fibers Polym.* 20, 1673–1683 (2019) “<https://doi.org/10.1007/s12221-019-8711-8>”.
- [10] F.S. Awan, M. A. Fakhar, L.A. Khan, T. Subhani, Study of Interfacial Properties of Carbon Fiber Epoxy Matrix Composites Containing Graphene Nanoplatelets [J]. *Fibers Polym.* 20, 633–641 (2019) “<https://doi.org/10.1007/s12221-019-8596-6>”.

- [11] S. N. Durukan, B. Beylergil, C. Dulgerbaki, Effects of silane-modified nano-CaCO₃ particles on the mechanical properties of carbon fiber/epoxy (CF/EP) composites [J]. *Polym. Compos.* 44, 3, 1805-1821 (2023) "<https://doi.org/10.1002/pc.27206>"
- [12] D. Quan, G. Wang, G. Zhao, R. Alderliesten, On the interlayer toughening of carbon fibre/epoxy composites using surface-activated ultra-thin PEEK films [J]. *Compos. Struct.* 303, 16309 (2023) "<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116309>".
- [13] D. Quan, R. Alderliesten, C. Dransfeld, I. Tsakoniatis, R. Benedictus, Co-cure joining of epoxy composites with rapidly UV-irradiated PEEK and PPS composites to achieve high structural integrity [J]. *Compos. Struct.* 251, 112595 (2020) "<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112595>".
- [14] D. Quan, C. Mischo, X. Li, G. Scarselli, A. Ivanković, N. Murphy, Improving the electrical conductivity and fracture toughness of carbon fibre/epoxy composites by interleaving MWCNT-doped thermoplastic veils [J]. *Compos. Sci. Technol.* 182, 107775 (2019) "<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107775>".
- [15] B. Beylergil, M. Tanoğlu, E. Aktaş, Effect of polyamide-6,6 (PA 66) nonwoven veils on the mechanical performance of carbon fiber/epoxy composites [J]. *Compos. Struct.* 194, 21-35 (2018) "<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.03.097>".
- [16] B. Beylergil, E. Aktas, M. Tanoglu, Experimental and statistical analysis of carbon fiber/epoxy composites interleaved with nylon 6,6 nonwoven fabric interlayers [J]. *J. Compos. Mater.* 54(27), 4173 (2020) "<https://doi.org/10.1177/0021998320927740>".
- [17] B. Beylergil, E. Aktas, M. Tanoglu, Mode-I fracture toughness of carbon fiber/epoxy composites interleaved by aramid nonwoven veils [J]. *Steel Compos. Struct.* 31(2), 113 (2019) "<https://doi.org/10.12989/scs.2019.31.2.113>".
- [18] A. P. Mouritz, Review of z-pinned composite laminates [J]. *Compos. Part A Appl. Sci.* 38(12), 2383 (2007) "<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.08.016>".
- [19] A. P. Mouritz, K.H. Leong, I. Herszberg, A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites *Compos. Part A Appl. Sci.* 28 (12), 979 (1997) "[https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(97\)00057-2](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(97)00057-2)".
- [20] B. D. Saz-Orozco, D. Ray, W.F. Stanley, Effect of thermoplastic veils on interlaminar fracture toughness of a glass fiber/vinyl ester composite [J]. *Polym. Compos.* 38(11), 2501 (2017) "<https://doi.org/10.1002/pc.23840>".
- [21] L. Daelemans, S. Van der Heijden, I. De Baere, H. Rahier, W. Van Paeppegem, K. De Clerck, Nanofibre bridging as a toughening mechanism in carbon/epoxy composite laminates interleaved with electrospun polyamide nanofibrous veils [J]. *Compos. Sci. Technol.* 117, 244 (2015) "<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.06.021>".
- [22] B. Beylergil, E. Aktas, M. Tanoglu, Enhancement of interlaminar fracture toughness of carbon fiber-epoxy composites using polyamide-6,6 electrospun nanofibers [J]. *J. Appl. Polym. Sci.* 134(35), 45244 (2017) "<https://doi.org/10.1002/app.45244>".

- [23] X. Song, C. Xie, W. Guan, H. Qin, Y. Ye, Z. Ma, X. Han, Properties of Poly(Lactic Acid)/Wild Jujube Pit/Hydroxyapatite Based on 3D Printing [J]. *Fibers Polym.* 24, 1195–1209 (2023) “<https://doi.org/10.1007/s12221-023-00042-w>”
- [24] I. S. Ramírez, F. P. G. Márquez, M. Papaalias, Review on additive manufacturing and non-destructive testing [J]. *J. Manuf. Syst.* 66, 260-286 (2023) “<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.12.005>”.
- [25] B. Beylergil, A. Al-Nadhari, M. Yildiz, Optimization of Charpy-impact strength of 3D-printed carbon fiber/polyamide composites by Taguchi method [J]. *Polym. Compos.* (2023) “<https://doi.org/10.1002/pc.27285>”.
- [26] G. Szebényi, T. Czigány, B. Magyar, J. Karger-Kocsis, 3D printing-assisted interphase engineering of polymer composites: Concept and feasibility [J]. *EXPRESS Polym. Lett.* 11, 525 (2017) “<https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2017.50>”.
- [27] B. Beylergil, Interlaminar fracture and crack-healing capability of carbon fiber/epoxy composites toughened with 3D-printed poly- ϵ -caprolactone grid structures [J]. *J. Appl. Polym. Sci.* 139(17), 52038 (2022) “<https://doi.org/10.1002/app.52038>”.
- [28] ASTM D5528. In *Annual Book of ASTM Standards*. pp. 1-26. 2013.
- [29] ASTM D7905M-14. In *Annual Book of ASTM Standards*. p. 1-18. 2014.
- [30] ASTM D790-10. In *Annual Book of ASTM Standards*. p. 146. 1990.
- [31] ASTM D2344. In *Annual Book of ASTM Standards*. p. 1–16. 2013.
- [32] M. Dhanalakshmi, J. P. Jog, Preparation and characterization of electrospun fibers of Nylon 11 [J]. *EXPRESS Polym. Lett.* 2(8), 540 (2008) “<https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2008.65>”.
- [33] J. O. Fernandez, G. M. Swallowe, S. F. Lee, Crystallization of Nylon 11 under compressive high strain rates [J]. *J. Appl. Polym. Sci.* 80, 2031 (2000) “<https://doi.org/10.1002/app.1301>”.
- [34] B. Beylergil, E. Aktas, M. Tanoglu, Modification of Carbon Fibre/Epoxy Composites by Polyvinyl Alcohol (PVA) Based Electrospun Nanofibres [J]. *Adv. Compos. Lett.* 25(3), 69 (2016) “<https://doi.org/10.1177/096369351602500303>”.
- [35] M.G.R. Sause, A.Gribov, A.R. Unwin, S. Horn, Pattern recognition approach to identify natural clusters of acoustic emission signals [J]. *Pattern Recognit. Lett.* 33(1), 17 (2012) “<https://doi.org/10.1016/j.patrec.2011.09.018>”.
- [36] H. Q. Ali, I. E. Tabrizi, R. M. A. Khan, A. Tufani, M. Yildiz, Microscopic analysis of failure in woven carbon fabric laminates coupled with digital image correlation and acoustic emission [J]. *Compos. Struct.* 230, 111515 (2019) “<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111515>”.
- [37] I. E. Tabrizi, A. Kefal, J. S. M. Zanjani, C. Akalin, M. Yildiz, Experimental and numerical investigation on fracture behavior of glass/carbon fiber hybrid composites using acoustic emission method and refined zigzag theory [J]. *Compos. Struct.* 223, 110971 (2019) “<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110971>”.

- [38] B. Beylergil, I. E. Tabrizi, J. S. M. Zanjani, S. Saeidiharzand, L.H. Poudeh, M.Yildiz, Experimental failure analysis and mechanical performance evaluation of fiber-metal sandwich laminates interleaved with polyamide-6,6 interlayers through the combined usage of acoustic emission, thermography and microscopy techniques [J]. *J. Sandw. Struct. Mater.* 23(7), 3044 (2021) “<https://doi.org/10.1177/1099636220924654>”.
- [39] B. AlKhateab, I. E. Tabrizi, J. S. M. Zanjani, M. N.Rahimi, L. H. Poudeh, A. Kefal, M. Yildiz, Damage mechanisms in CFRP/HNT laminates under flexural and in-plane shear loadings using experimental and numerical methods [J]. *Compos. Part A Appl. Sci.* 136, 105962 (2020). “<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105962>”.
- [40] R. M. A. Khan, S. Saeidiharzand, I. E. Tabrizi, H. Q. Ali, M. Yildiz, A novel hybrid damage monitoring approach to understand the correlation between size effect and failure behavior of twill CFRP laminates [J]. *Compos. Struct.* 270, 114064 (2021) “<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114064>”.



7. ÖZ GEÇMİŞ

Adı Soyadı: Volkan DUMAN

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- 2020- Akdeniz Üniversitesi Alanya Mühendislik Fakültesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği
- 2023- Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Nanobilim ve Nanomühendislik (Tezli) Yüksek Lisans Programı

Yayınları ve Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- Duman, V. (2023). Enhancing Mode-I and Mode-II fracture toughness of carbon fiber/epoxy laminated composites using 3D-printed polyamide interlayers. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications.

