

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KENDİ-KENDİNİ ONARAN KARBON ELYAF TAKVİYELİ POLİMER
MATRİSLİ KOMPOZİT GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Gökçenur İŞLEK

Polimer Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

OCAK 2022

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KENDİ-KENDİNİ ONARAN KARBON ELYAF TAKVİYELİ POLİMER
MATRİSLİ KOMPOZİT GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ
Gökçenur İŞLEK
(141081002)

Polimer Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ayşe ÇELİK BEDELOĞLU

OCAK 2022

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 141081002 numaralı Doktora Öğrencisi Gökçenur İŞLEK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KENDİ-KENDİNİ ONARAN KARBON ELYAF TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Ayşe ÇELİK BEDELOĞLU**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ayşe ÇELİK BEDELOĞLU**
Bursa Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ayşe KALEMTAŞ
Bursa Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Yunus GÜMÜŞ
Bursa Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. İlven MUTLU
İstanbul Üniversitesi/Cerrahpaşa

Doç. Dr. Volkan ESKİZEYBEK
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Teslim Tarihi :

Savunma Tarihi : **31.01.2022**



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Gökçenur İŞLEK

İmzası :

X X X X



Eşime ve aileme,

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım sırasında desteğini esirgemeyen, bilgi birikimini, tecrübesini ve değerli zamanını paylaşan kıymetli hocam, tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ayşe ÇELİK BEDELOĞLU'na en içten sevgi ve saygılarımı sunarım.

Çalışmalarım süresince ilgi, alaka ve yardımlarını esirgemeyen, yaşadığım tüm zorlu ve sıkıntılı dönemlerde her zaman yanımda olup bana güç veren Arş. Gör. Dr. Yasin ALTIN, Arş. Gör. Ayten Nur YÜKSEL YILMAZ ve Ömer Faruk ÜNSAL desteklerinden dolayı sonsuz teşekkür ederim.

Tez izleme komitesindeki, Doç. Dr. Ayşe KALEMTAŞ ve Dr. Öğr. Üyesi Ömer Yunus GÜMÜŞ'e pozitif yorum ve tavsiyeleri ile doktora çalışmamın şekillenmesinde büyük emeklerinden ötürü ayrıca teşekkür ederim. Diğer taraftan doktora tez savunma jüri üyeliğini kabul edip zaman ayırdıkları için beni onurlandıran Prof. Dr. İlven Mutlu ve Doc. Dr. Volkan Eskizeybek'e teşekkürlerimi iletirim.

Bugünlere gelmemde çok büyük katkısı olan, lisans eğitimim süresince danışmanlığımı yapan, akademik hayatı bana sevdiren ve ufkumu açan hocam Prof. Dr. Mehmet Kadir YURDAKOÇ ve Prof. Dr. Mürüvvet YURDAKOÇ sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte benimle birlikte bu stresli dönemi yaşayan, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sarsılmayan inancı ile beni sürekli motive eden ve en önemlisi bugünlere gelmemde en büyük payı olan canım annem Nilgün SAĞLAM ve desteklerini her zaman hissettiren babam Sedat SAĞLAM, kardeşim Onur SAĞLAM ve eşim Burak İŞLEK iyiki varsınız ve hayatımdasınız.

Tez çalışmalarım sırasında kullanmış olduğum malzeme temini, numunelerin üretimi ve testlerin yapılmasında sağladığı katkılardan dolayı ERMETAL ve PLASMOT firmasına ve sevgili iş arkadaşlarım Onur KAYA ve Orhan BULUT'a çok teşekkür ederim.

Ocak 2022

Gökçenur İŞLEK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı ve Sınıflandırılması.....	1
1.1.1 Matris fazı	2
1.1.1.1 Polimer matrisli kompozit malzemeler	2
1.1.1.2 Metal matrisli kompozit malzemeler	5
1.1.1.3 Seramik matrisli kompozit malzemeler	6
1.1.1.4 Karbon-karbon matrisli kompozit malzemeler	7
1.1.2 Takviye elemanı	7
1.1.2.1 Elyaf (fiber) takviyeli kompozitler.....	8
1.1.2.2 Partikül takviyeli kompozitler.....	10
1.1.2.3 Tabaka (sheet) takviyeli kompozitler.....	11
1.2 Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler	11
1.3 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	15
1.3.1 SMC/BMC kalıplama yöntemi	15
1.3.2 RTM (reçine transfer kalıplama) yöntemi	16
1.3.3 Otoklav prosesi (autoclave process)	17
1.3.4 El yatırması (hand lay up) yöntemi.....	18
1.3.5 Vakum infzyon yöntemi	20
1.3.6 Püskürtme (spray-up) yöntemi.....	21
1.3.7 Gelişmekte olan diğer yöntemler	22
1.4 Kendi Kendini Onarabilen Kompozit Malzemeler	25
1.4.1 Ekstrinsik kendi kendini onarma mekanizması	29
1.4.1.1 Kapsül tabanlı kendi kendini onarabilen malzemeler	29

1.4.1.2 Vasküler tabanlı kendi kendini onarabilen malzemeler	33
1.4.2 İçsel (intrinsic) kendi kendini onarabilen malzemeler	35
1.4.2.1 Isı etkisi ile kendi kendini onarma prosesi	36
1.4.2.2 Termoset/Termoplastik karışımli kendi kendini onarma prosesi	38
1.4.2.3 Işık etkisi ile kendi kendini onarma prosesi	39
1.4.3 Kompozit Malzemelerin Dikiş Prosesi İle Üretimi	40
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	46
3. MATERYAL VE METOT	51
3.1 Malzemeler	51
3.1.1 Akrlonitril bütadiyen stiren (ABS)	51
3.1.2 Etilen vinil asetat (EVA)	53
3.1.3 Poli (etilen-metakrilik) asit (EMAA)	554
3.1.4 Karbon-epoksi prepreg	565
3.1.5 Diğler kullanılan yardımcı malzemeler	56
3.2 Yöntem	57
3.2.1 Ekstrüzyon yöntemi ile filamentlerin üretilmesi	57
3.2.1.1 0,6, 0,8 ve 1,0mm çaplarındaki filamentlerin üretimi	59
3.2.2 Kalıpların hazırlanması	59
3.2.3 Kompozit malzemelerin üretilmesi	61
3.3 Kompozit Malzemelere Uygulanan Testler	63
3.3.1 Kompozit malzemelerin hacimsel oran(volume fraction) testi	63
3.3.2 Çekme testi	64
3.3.2.1 Filamentlere uygulanan çekme testi	64
3.3.2.2 Kompozit malzemelere uygulanan çekme testi	65
3.3.3 Üç nokta eğilme testleri	67
3.3.4 Mod-I tabaklar arası kırılma tokluğu testi ve kendi kendini onarma verimliliği	68
3.4 Yapısal Analizler	70
3.4.1 Fourier dönüşümlü infrared spektroskopi ölçümleri	69
3.5 Morfolojik Analizler	71
3.5.1 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntü analizleri	71
3.5.2 Optik mikroskop	71
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	73
4.1 Mekanik Test Sonuçları	73
4.1.1 Kompozit malzemelerin hacimsel oran(volume fraction) testi	731
4.1.2 Çekme testi sonuçları	74

4.1.2.1 Filamentlerin çekme mukavemeti test sonuçları.....	74
4.1.2.2 Kompozitlerin çekme mukavemeti test sonuçları.....	78
4.1.3 Eğilme testi sonuçları.....	85
4.1.4 Mod I tabakalar arası kırılma tokluğu test sonuçları.....	87
4.2 Yapısal Analiz Sonucu.....	92
4.2.1 Fourier dönüşümlü infrared spektroskopi analizi.....	92
4.3 Morfolojik Analiz Sonuçları.....	96
4.3.1 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntü analizleri.....	96
4.3.2 Optik mikroskop analizi.....	99
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	105
6. KAYNAKLAR.....	107
7. ÖZGEÇMİŞ.....	128



KISALTMALAR

ABS	: Akrilonitril bütadiyen stiren
AFP	: Automotive fiber placement
ATL	: Automotive Tape Laying
CFRP	: Karbon elyaf takviyeli polimer
CFIP	: Continuous fiber injection process
CMK	: Seramik matrisli kompozitler
ÇAK	: Çift ankastre kiriş
DCB	: Double cantilever beam
DGEBA	: Diglisidil eter bisfenol A
DSC	: Difransiyel taramalı kalorimetre
EMAA	: Poli (etilen-metakrilik) asit
EVA	: Etilen vinil asetat
FT-IR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi
IR	: Infrared bölgesi
MMK	: Metal matrisli kompozit
PA6	: Poliamit6
PA66	: Poliamit66
PC	: Polikarbonat
PCL	: Polikaprolakton
PE	: Polietilen
PEI	: Polieterimid
PEEK	: Polietereterketon
PEGMA	: Poli (etilen-glisidil-metakrilat)
PFS	: Polifenilensülfür
PMF	: Poli(melamin–formaldehit)
PMUF	: Poli(melamin– üre-formaldehit)
PP	: Polipropilen
PPC	: Polimer matrisli kompozitler
PS	: Polisülfon
PUF	: Poli(üre-formaldehit)

PVB	: Poli (vinil-butiral)
RTM	: Reçine transfer metodu
SEBS	: Stiren etilen bütadien kopolimeri
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
SMC	: Sheet moulding compound
TEFLON	: Politetrafloroetilen
VA	: Vinil asetat
VARTM	: Vakum altında reçine transfer metodu



SEMBOLLER

$^{\circ}\text{C}$: Santigrat derece
μm	: Mikrometre
σ	: Gerilme (N/mm^2)
F	: Kuvvet (N/mm^2)
A	: Kesit alanı (mm^2)
A	: Delaminasyon çatlağı uzunluğu (mm)
b	: Numune genişliği (mm)
h	: Numune kalınlığı (mm)
D_L	: Filament çapı (mm)
G	: Enerji yayılım hızı
ΔL	: Boyca uzama (mm)
L	: Uzunluk (mm)
P	: Yük (N)
T_m	: Erime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_g	: Camsı geçiş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
Δ	: Düzeltme faktörü
ϵ	: Birim şekil değiştirme
ρ_c	: Kompozit yoğunluğu
ρ_{alkol}	: Alkol yoğunluğu
W_{hava}	: Kompozitin havadaki ağırlığı
W_{alkol}	: Kompozitin alkoldeki ağırlığı
V_f	: Elyaf hacim oranı
$\rho_{\text{reçine}}$: Reçine yoğunluğu
ρ_{elyaf}	: Karbon elyafın yoğunluğu
γ	: Numunede kuvvet anında oluşan kopma mukavemeti (N/mm^2)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Metal matrisli kompozit malzemelerin temel özellikleri.....	6
Çizelge 1.2 : Seramik matrisli kompozit malzemelerin temel özellikleri.....	6
Çizelge 1.3 : Karbon-karbon matrisli kompozitlerin temel özellikleri [9,16].	7
Çizelge 1.4 : Kompozit malzemelerin özellikleri [8,17,25].	12
Çizelge 3.1 : ABS polimerinin özellikleri.	51
Çizelge 3.2 : EVA polimerinin özellikleri.	53
Çizelge 3.3 : EMAA polimerinin özellikleri.....	55
Çizelge 3.4 : Polimerlerin ekstruder içerisindeki çalışma sıcaklıkları.....	59
Çizelge 3.5 : EMAA, EVA ve ABS filamentlerinin proses parametreleri.	60
Çizelge 4.1 : Dikişli ve dikişsiz kompozit malzemelerin fiziksel özellikleri.	73
Çizelge 4.2 : EMAA, EVA ve ABS filamentlerinin gerilim ve uzama değerlerinin filament çapına göre değişimi.....	74
Çizelge 4.3 : EMAA, EVA ve ABS filamentleri ile hazırlanan kompozit malzemelerin eğilme mukavemeti (MPa) ve uzama oranlarının(%) filament çapına göre değişimi	85
Çizelge 4.4 : Kompozit malzemelerin onarmadan önce ve sonra, kırılma toklukları ve onarma verimliliği	89

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Kompozit malzemelerin sınıflandırılması [4].	1
Şekil 1.2 : Polimer matrisli kompozit malzemelerin sınıflandırılması [9].	3
Şekil 1.3 : Kompozit malzemelerin takviye elemanlarına göre sınıflandırılması [18].	8
Şekil 1.4 : Fiber takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi a) sürekli ve çekme doğrultusunda yönlendirilmiş, b) süreksiz ve çekme doğrultusunda yönlendirilmiş, c) süreksiz ve rastgele yönlendirilmiş [8,20].	9
Şekil 1.5 : Elyaf formları.	9
Şekil 1.6 : (A) Dokuma kumaş ve (B) Kumaş desen görünümü.	10
Şekil 1.7 : Açılı tabakaların ayrı gösterimi [22].	11
Şekil 1.8 : Yıllara göre kilo ton olarak küresel karbon elyaf talebi [27,28].	13
Şekil 1.9 : Kompozit malzemelerin kullanım alanları [34].	13
Şekil 1.10: (a) uygulama, (b) satış, (c) bölge ve (d) üretim sürecine göre 2018 yılındaki karbon talebi. 2020'deki karbon elyaf talebi (e) uygulamaya göre ve (f) bölgelere göre havacılık sektöründen 2050'de tahmini karbon atığı [26,27].	14
Şekil 1.11 : Termoset Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri [38].	15
Şekil 1.12 : BMC (a) ve SMC (b) üretim prosesi.	16
Şekil 1.13 :a) Reçine Transfer Yöntemi (RTM) b) Vakum Altında Reçine Transver Yöntemi (VARTM) [45].	17
Şekil 1.14 : Otoklav (vakum torbalı) kalıplama prosesi [49].	18
Şekil 1.15 : El yatırması proses basamakları [38].	19
Şekil 1.16 : Vakum infüzyon yönteminde kullanılan elemanlar [55].	20
Şekil 1.17 : Püskürtme (spray-up) Yöntemi [57].	21
Şekil 1.18 : 2020 Chevrolet Corvette aracının arka tamponu [62].	23
Şekil 1.19 : ATL (Automotive Tape Laying) (A) ve AFP (Automotive Fiber Placement) (B) [66].	23
Şekil 1.20 : Overmolding kompozit malzeme üretim prosesi [68].	24
Şekil 1.21 : 3D baskı ile üretilen parçaların sürekli karbon fiberlerle güçlendirilmesi.	25
Şekil 1.22 : Polimer kompozitlerde hasar modları: a) katmanlar arası ayrılma, b) yüzey çatlaması, c) elyafların tekrar yönlendirilmesi, d) elyaf kopması ve çekilme, e) Enine ve kayma çatlaması, f) delinme, g) yüzeyde derin kesim, h) Korozyon korumalı metal, i) ince çatlaklar, j) çizilme [75].	26
Şekil 1.23 : Küresel kendi kendini onaran kompozit pazarı [79].	27
Şekil 1.24 : Kendi kendini onarabilen yapıların sınıflandırılması [104].	28
Şekil 1.25 : (a) Poli-üreformaldehit içeren kırık bir mikrokapsülasyon görüntüsü, (b) Kendi kendini onaran epoksinin kırılma düzlemi ve orijinal kırılma düzlemini kaplayan polimerize onarıcı ajan [107].	30
Şekil 1.26 : A-Faz ayrımlı kapsül Sistemi, B-Kapsül Kataliz Sistemi, C-Tek kapsül sistemi, D-Kapsül-Kapsül Sistemi, E-Çift kapsül sistemi [123].	31
Şekil 1.27 : Yerinde/in situ polimerizasyon ile mikrokapsül oluşumu [127].	32

Şekil 1.28 : Vaküer tabanlı kendi kendini onarma mekanizması [141].	34
Şekil 1.29 : Vaküer ağ yapısı [75].	35
Şekil 1.30 : Kendi kendini onaran polimerlerde uygulanan dış etkenler [156].	36
Şekil 1.31 : Kendi kendini onaran polimerlerde kullanılan dinamik kovalent bağların ve kovalent olmayan etkileşimlerin bir özeti [164].	37
Şekil 1.32 : Dikişli kompozitlerin şematik diyagramı ve ilgili uygulama alanları. (a) Dikişli kompozit yapısı; (b) Airbus A380; (c) Hibrit Kanat Gövdesi: ABD X-48B uçağı; (d) güdümlü füze; (e) yapay uydu; (f) roketin perdesi; (g) buharlı gemi; (h) otonom sualtı planör [210–212].	41
Şekil 1.33 : a) kilit dikişi, (b) modifiye kilit dikişi, (c) zincir dikişi ve (d) çift kilit dikişi [221,222].	42
Şekil 1.34 : EMAA filamentleri ile dikilmiş karbon elyaf-epoksi kompozitin öncesi (A) ve sonrası (B) [228].	43
Şekil 1.35 : Dikişin neden olduğu bozulmaların şeması [213].	43
Şekil 1.36 : Onarıcı ajanların kimyasal yapısı, fonksiyonel grup ve polimer yapılarını göstermektedir. (a) Akrilonitril Bütadiyen Stiren (ABS), (b) Etilen Vinil Asetat (EVA), (c) Poli (etilen-metakrilik asit (EMAA) [185].	45
Şekil 2.1 : (a) EMAA dikişi, (b) onarmadan önce kırılma yüzeyleri, (c) ilk onarmadan sonra ve (d) ikinci onarmadan sonraki dikişli DCB örnekleri [245].	46
Şekil 2.2 : Çatlak köprüleme bölgesi [197].	47
Şekil 2.3 : (a) EMAA, (b) PEGMA, (c) EVA (d) ABS içeren kompozitlerde onarmadan sonra delaminasyon çatlakları [194].	49
Şekil 2.4 : Laminatın iç kısmındaki bir dikiş etrafında düzlem içi liflerin düzlem dışı sapması.	50
Şekil 3.1 : ABS oluşturan malzemelerin kimyasal yapısı [251].	52
Şekil 3.2 : EVA kimyasal yapısı [255].	54
Şekil 3.3 : EMAA ve DGEBA(epoksi) kimyasal yapısı	56
Şekil 3.4 : EMAA ve epoksi arasında geçen birleşme reaksiyonu.	56
Şekil 3.5 : Ekstrüzyon sistemi.	57
Şekil 3.6 : Çeşitli ekstrüzyon vidaları.	58
Şekil 3.7 : Merdane ve makara sarım sistemi.	58
Şekil 3.8 : Kalıpların genel görünümü.	61
Şekil 3.9 : Üç boyutlu kompozit malzeme üretim prosesi.	61
Şekil 3.10 : Kompozit malzemelerin üretim basamakları.	63
Şekil 3.11 : Şematik olarak çekme numunelerinin boyutları [268].	66
Şekil 3.12 : Şematik olarak eğilme numunelerinin boyutları [269].	67
Şekil 3.13 : Kırılma modları; (a) Mod I, çatlak açılması (b) Mod II, kayma (c) Mod III, yırtılma [271].	69
Şekil 3.14 : Mod I tabaklar arası kırılma tokluğu deneylerinde kullanılan ÇAK numunelerinin şematik olarak boyutları ve Mod I yüklemesine maruz bırakılmış bir tabakalı kompozit ÇAK numunesi gösterilmektedir.	70
Şekil 4.1 : EMAA filamentlerinin çap değişimine karşı (a) çekme mukavemeti (N/mm ²) ve (b) uzama (%) grafikleri	75
Şekil 4.2 : EVA filamentlerinin çap değişimine karşı (a) çekme mukavemeti (N/mm ²) ve (b) uzama (%) grafikleri	76
Şekil 4.3 : ABS filamentlerinin çap değişimine karşı çekme (a) ve uzama (b) grafikleri	77
Şekil 4.4 : (a) Pürüzlü ve (b) Pürüzsüz yapıdaki filamentlerin görünümü	78
Şekil 4.5 : EMAA, EVA ve ABS polimerlerinin farklı filament çapları ile üretilmiş kompozit malzemelerin çekme mukavemeti (MPa) ve uzama (%) grafikleri	82

Şekil 4.6 : Çekme testi için karbon elyaf sarımlı numune hazırlama çalışmaları	84
Şekil 4.7 : Çekme testi için çeltikli (a) ve metalli (b) numune hazırlama çalışmaları	84
Şekil 4.8 : Farklı çaplarda ABS(a), EMAA(b) ve EVA(c) filamentleri ile hazırlanmış kompozit malzemelerin üç nokta eğilme deneyi grafiği	86
Şekil 4.9 : Farklı çaplarda EMAA, ABS ve EVA filamentleri ile üretilmiş kompozitlerin, ÇAK numunelerine ait kırılma tokluğu ve çatlak uzunluğu grafiği	90
Şekil 4.10 : Test plakalarının ve kompozit malzeme yüzeyinin modifikasyonu	92
Şekil 4.11 : EMAA ve epoksi arasında geçen birleşme reaksiyonu [179,180,184]	93
Şekil 4.12 : EMAA ve epoksi arasında geçen reaksiyon basamakları [180,184]	93
Şekil 4.13 : EMAA(a), ABS(b) ve EVA(c) filamentleri ile hazırlanan kompozit malzemelerin FT-IR spektrumu	94
Şekil 4.14 Onarma prosesi başlangıcındaki katmanlar arası dikişin SEM görüntüleri	97
Şekil 4.15 : EVA filamentleri ile üretilmiş kompozit malzemelerin onarma prosesinden sonraki SEM görüntüleri.....	97
Şekil 4.16 : EMAA filamentleri ile üretilmiş kompozit malzemelerin onarma prosesinden sonraki SEM görüntüleri.....	99
Şekil 4.17 : ABS filamentleri ile üretilmiş kompozit malzemelerin onarma prosesinden sonraki SEM görüntüleri.....	100
Şekil 4.18 : Termoplastik dikişin neden olduğu düzlem içi elyaf dalgalanması ve reçine açısından zengin bölge	101
Şekil 4.19 : EMAA optik mikroskop görüntüsü (a) 0,6mm, (b)0,8 ve (c)1,0mm	102
Şekil 4.20 : EVA optik mikroskop görüntüsü (a) 0,6mm, (b)0,8 ve (c)1,0mm	103
Şekil 4.21 : ABS optik mikroskop görüntüsü (a) 0,6mm, (b)0,8 ve (c)1,0mm	104

KENDİ-KENDİNİ ONARAN KARBON ELYAF TAKVİYELİ POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu doktora tezinin temel amacı, EMAA (poli (etilen-metakrilik asit)), EVA (etilen vinil asetat) ve ABS (akrilonitril bütadiyen stiren) filamentleri ile dikiş prosesi uygulanarak üç boyutlu kendi kendini onarabilen karbon elyaf takviyeli kompozit malzeme geliştirilmesidir.

Bu amaçla, önce EMAA, EVA ve ABS termoplastik polimelerinden 0,6, 0,8mm ve 1 mm çaplarında, filamentler üretilmiştir. Daha sonra karbon elyaf prepreg, bu filamentlerle dikilmiş ve ardından, basınçlı kalıplama yöntemi ile kompozit üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri çekme, eğilme ve Mod-I katmanlar arası kırılma tokluğu testleri ile, yapısal analizi FT-IR analizi ile ve morfolojik analizleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu ile yapılmıştır. Ayrıca kompozitlerin kendi kendini onarma verimliliği hesaplanmıştır.

Bu tezde elyaf takviyeli kompozit malzemelerin yapısı, önemi, karbon elyaflı kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ve dikiş prosesinin kompozit malzemeler üzerindeki etkisinden bahsedilmiştir. Ayrıca kendi kendini onarabilen polimerlerin yapısı, proses parametreleri ve çeşitleri de detaylı olarak incelenmiştir.

Mod-I katmanlar arası test sonuçları incelendiğinde, dikiş prosesinde filamentlerin çapları arttıkça kırılma tokluklarının arttığı gözlenmiştir. Onarma verimliliği en fazla, EMAA06 (%189), EMAA08 (%141) ve EMAA1 (%124) numunelerinde elde edilmiştir. Ayrıca EVA06 (%133), EVA08 (%115) ve EVA1 (%110) numunelerinde de onarma verimliliği sağlanmıştır. Fakat ABS06(%-53), ABS08 (%-64) ve ABS1 (%-67) numunelerinde, elde edilen sonuçlar gözönüne alındığında, ABS filamentleri ile onarmanın gerçekleşmediği sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Kendi kendini onaran kompozitler, dikiş prosesi, polimer-matris kompozitler, mod-I katmanlar arası kırılma tokluğu testi, mekanik testler, delaminasyon, termoplastik filament

DEVELOPMENT OF SELF-HEALING CARBON FIBER REINFORCED POLYMER MATRIX COMPOSITE

SUMMARY

The main purpose of this doctoral thesis is to develop a three-dimensional self-healing carbon fiber reinforced composite material by applying the stitching process with EMAA (poly (ethylene-methacrylic acid)), EVA (ethylene vinyl acetate) and ABS (acrylonitrile butadiene styrene) filaments.

For this purpose, filaments with diameters of 0.6, 0.8 mm and 1 mm were produced from EMAA, EVA and ABS thermoplastic polymers. Then, carbon fiber prepreg was stitched with these filaments and then composite production was carried out by compression molding method. The mechanical properties of the produced composites were made by tensile, bending and Mod-I interlayer fracture toughness tests, structural analysis by FT-IR analysis and morphological analysis by optical microscope and scanning electron microscope. In addition, the self-healing efficiency of the composites was calculated.

In this thesis, the structure and importance of fiber reinforced composite materials, the production methods of carbon fiber composite materials and the effect of stitching process on composite materials are mentioned. In addition, the structure, process parameters and types of self-healing polymers were examined in detail.

When the Mode-I interlayer test results were examined, it was observed that the fracture toughness increased as the diameter of the filaments increased in the stitching process. The highest healing efficiency was obtained in EMAA06 (189%), EMAA08 (141%) and EMAA1 (124%) samples. In addition, the healing efficiency of EVA06 (133%), EVA08 (115%) and EVA1 (110%) samples was also achieved. However, considering the results obtained in ABS06 (-53%), ABS08 (-64%) and ABS1 (-67%) samples, it was concluded that the healing did not occur with ABS filaments.

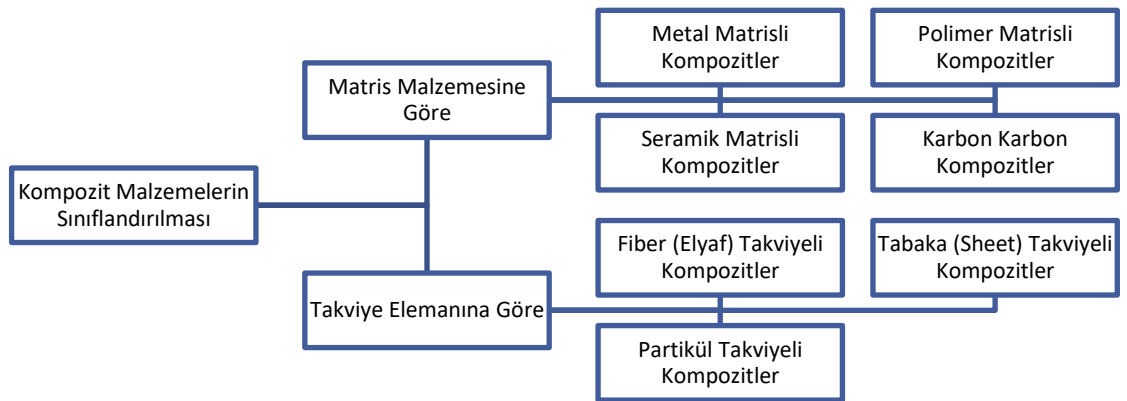
Keywords: Self-healing composites, stitching process, polymer-matrix composites, mechanical tests, delamination

1. GİRİŞ

20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren teknolojinin hızla gelişmesi, beraberinde sanayinin temel girdisi olan malzeme ve malzeme biliminde olan gelişmelerin hızlanmasını sağlamıştır. Çeşitli mühendislik ve teknolojik uygulamalarda, 50 binin üzerinde malzeme kullanılmaktadır. Bu malzemeler karakteristik özelliklerine (sertlik, yoğunluk, erime sıcaklığı vb.) göre metal, plastik, seramik ve kompozit olmak üzere 4 ana gruba ayrılmaktadır (Balasubramanian, 2013b). Bunlar arasında son zamanlarda yüksek performanslı kompozit malzemelerin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır (Balasubramanian, 2013a; Head, 1996).

1.1 Kompozit Malzemelerin Tanımı ve Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, birbiri içerisinde çözünmeyen ve birbirinden farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla bileşenin, belli olan bir özelliği elde edebilmek ya da daha da geliştirebilmek için, bu malzemelerin belirli şartlar altında ve belirli oranlarda fiziksel olarak birleştirilmesiyle elde edilirler. Kompozit malzemelerin sınıflandırılmasında, Şekil 1.1'de özetlendiği gibi genel olarak matris ve takviye fazlarına göre bir sınıflandırma yapılmaktadır.



Şekil 1.1 : Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Yamaguchi, 1995).

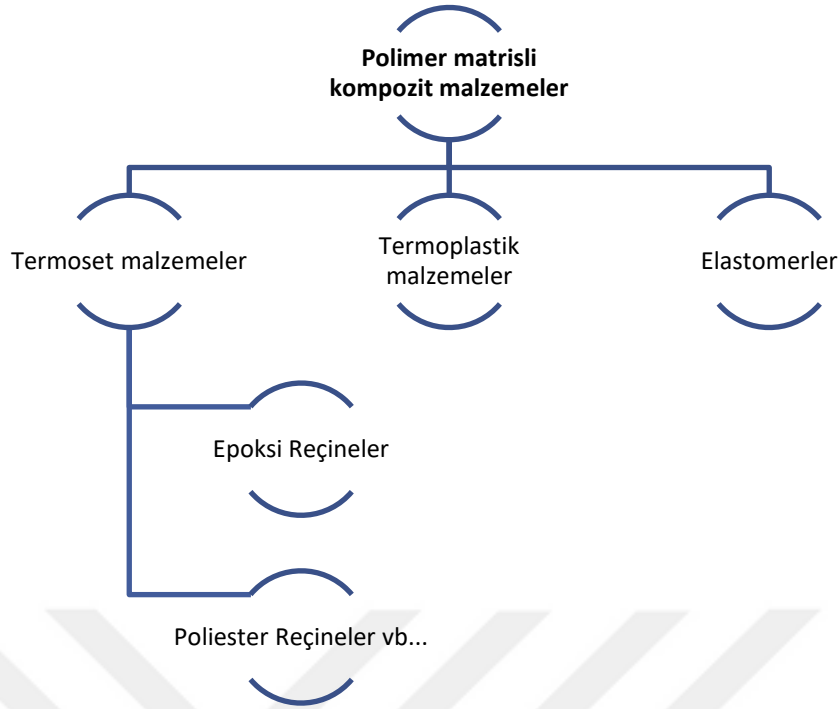
1.1.1 Matris fazı

Matris, homojen ve sünek bir yapıdadır, ayrıca kullanılan fiberlerden daha dk elastisite modülü değerine sahiptir (Asi, 2018.). Matris fazının temel görevi takviye malzemesine göre değişiklik göstermektedir. Partikül takviyeli kompozitlerde matris fazı, parçacıkları bir arada tutarak yapı bütünlüğünü sağlar. Elyaf takviyeli kompozitlerde, fiberleri bir arada tutup, malzeme üzerine gelen yükü fiberlere aktararak yapının dayanıklılığını arttırır, Őeklinin korunmasını sağlar, malzemede oluşan hasarların ilerlemesini yavaŐlatır ve yapının yüzey kalitesini arttırır. Ayrıca fiberlerin matristen ayrılmaması için, matris-fiber arasındaki ara yüzey bağ kuvvetinin, yüksek olması gerekir. Matris fazının ikinci görevi, takviye elemanlarını mekanik aşınma, çevresel etmenler ve kimyasal reaksiyonlardan korumaktır (Campbell, 2003; Yamaguchi, 1995; Mazumdar, 2001).

Matris fazı, polimer matrisli kompozitler, metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve karbon-karbon matrisli kompozitler olmak üzere 4 ana kısma ayrılmaktadır (Topuz, 2021).

1.1.1.1 Polimer matrisli kompozit malzemeler

Polimer matrisli kompozitlerde; matris malzemesi olarak polimer, takviye elemanı olarakta elyaf kullanılır. Kolay üretilebilmesi ve maliyetinin düşük olması sebebiyle en yaygın kullanım alanına sahip kompozitlerdir. Matriste kullanılan polimer malzemeler Şekil 1.2’de gösterildiği gibi termosetler, termoplastikler ve elastomerler olarak e ayrılırlar.



Şekil 1.2 : Polimer matrisli kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Sibel Topuz, 2021).

Termoset malzemeler

Termoset matrisler; küçük monomerlerin, ısı varlığında çapraz bağlarla birbirlerine bağlanmaları ile oluşurlar. Termoplastik malzemeler gibi ısıtılıp tekrar kullanılamazlar. Geri dönüşümleri yoktur. Fakat termoset malzemeler yüksek kuvvet ve mukavemete sahiptir. Proses sıcaklığı düşüktür, fiberleri ısıtma özellikleri yüksektir. Fakat raf ömründeki sınırlamalar, yüksek sıcaklıklarda sınırlı çalışma, kırılabilirlik ve uzun üretim prosesleri başlıca dezavantajlarıdır (Asi, 2018; Bayraktar, 2016; Bulut, 2014; Topuz, 2021).

Kompozit malzemelerde matris olarak çoğunlukla termosetler tercih edilmektedir. Termoset matrisler izotropiktirler. Termal stabilite, kimyasal direnç, düşük yoğunluk termosetlerin en önemli avantajlarıdır. Termoset plastikler sıvı halde bulunurlar, ısıtılarak ve kimyasal tepkimelerle sertleşirler. Termoset plastik malzemeler, epoksi, poliester, fenolik, vinil, siyanat, silikon, poliimid ve poliüretan reçinelerden oluşurlar. Bunların arasında en fazla epoksi ve poliester reçineler kullanılmaktadır. Bu malzemelerin her biri farklı özelliklere sahiptir ve üretilen kompozit malzemelere

farklı özellikler kazandırmaktadırlar (Asi, 2018; Bayraktar, 2016; Bulut, 2014; Deniz, 2005).

Epoksi reçineler;

Epoksi reçineler çok yönlülükleri, sıvı, viskoz sıvı veya katı hallerde bulunabilmeleri, yüksek mekanik özellikleri ve yüksek korozyon dirençlerinden dolayı yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Başka malzemelerin uygun şekilde epoksilere ilave edilmesiyle kürleşme sıcaklıkları, kürleşme hızları, ısı dayanımları iyileştirilebilir. Özellikle kırılğan yapıdaki epoksilere termoplastiklerin ilavesiyle tokluk değerleri geliştirilmektedir. 5°C ile 150°C aralığında kolayca kürleşebilirler. Mükemmel elektrik yalıtım özellikleri olduğundan bu yönlerinden de endüstride faydalanılmaktadır. Epoksi reçinelerinin arasından en fazla kullanılan Diglisidil eter bisfenol-A (DGEBA)'dır (Asi, 2018; Topuz, 2021).

Poliester Reçineler;

Poliester reçineler korozyon dirençlerinin yüksek, maliyetlerinin düşük ve kimyasal işlemlerle çok farklı görevleri yerine getirebilmeleri nedeniyle en çok kullanılan reçine çeşitlerindedir. Poliester reçineler, cam elyafı iyi ıslatır ve dolgu maddesi olarak kullanılabilirler Ancak poliester reçinelerin çalışma sıcaklığı genellikle epoksi reçinelerin çalışma sıcaklıklarından düşüktür (Topuz, 2021).

Bunların dışında; Fenolik reçineler; ısı stabiliteyi, elektrik özellikleri, suya ve alkaliler dışındaki kimyasal maddelere dayanımları çok iyidir. Silikon reçineler; yapılarında karbon yerine inorganik esaslı silikonlar bulunan malzemelerdir. Mekanik dayanımları diğer reçinelere göre daha düşüktür ve maliyetleri de genelde daha yüksek olması nedeniyle çok az kullanılırlar.

Termoplastik malzemeler

Termoplastik malzemeler genellikle amorf, yarı-kristal ve kristal olarak 3 ana kısma ayrılır. Termoplastik malzemeler çoğunlukla yarı kristal ve amorf yapıdadırlar. Termoplastikler termoset malzemelerin aksine oda sıcaklığında katı, ısıtıldığında yumuşayan ve/veya eriyen ve soğutulduğunda ise katılaştıran malzemelerdir. Dolayısı ile geri dönüştürülebilir özellikte malzemelerdir. Dayanıklılığı ve delaminasyon direnci yüksektir. Çoğunlukla proses sıcaklıkları yüksektir ve yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini korurlar (Asi, 2018; Bayraktar, 2016; Bulut, 2014).

Termoplastikler düşük çekme mukavemeti ve sertliğe sahiptir, kuvvet altında oda sıcaklığında malzemede sünme ve şekil değişimleri meydana gelmektedir. Genellikle yalıtkan malzemelerdir, bu nedenle termoplastikler, polimer endüstrisinde üretimin %70'lik kısmı ile en çok kullanılan polimer çeşididir. En fazla kullanılan termoplastikler; poliamid6 (PA6), poliamid66 (PA66), polikarbonat (PC), polistiren (PS), polietilen (PE), polieterimid (PEI), polipropilen (PP), polifenilensülfür (PFS), polisülfon (PS) ve polietereterketon (PEEK)'dur (Akkerman ve diğ, 2015).

Elastomerler

Termoset polimerler gibi çapraz bağlı olan uzun zincir moleküllerinden oluşurlar. Bazı polimerler çekme kuvveti etkisi altında %500 gibi çok yüksek bir uzama gösteren kuvvet kaldırıldığında ise hemen eski haline dönen ağısı bir yapıdadır. Doğal kauçuk, sentetik kauçuk vb. polimerik malzemeler en sık kullanılan elastomerlere örnektir.

1.1.1.2 Metal matrisli kompozit malzemeler

Metal matrisli kompozit malzemeler, istenen ve gerekli özellikleri sağlamak üzere en az biri metal olan iki veya daha fazla farklı malzemenin sistematik bileşimiyle üretilen yeni malzemelerdir. Metal matrisli kompozitler, metalik bir matris ve dağınık bir fazdan oluşurlar. Bu malzemelerin üretilmesinde matris malzemesi olarak metal alaşımları tercih edilmektedir. Temel özellikleri Çizelge 1.1'de belirtildiği gibi çoğunlukla Al, Ti, Mg, Cu, Fe, Co, Mo ve Ni gibi yüksek mukavemet özelliğine sahip metaller ve alaşımları en çok kullanılan matris malzemeleridir. Takviye elemanı olarak ise elyaf, parçacık, plakalı, lifli yapıda olabilen seramik malzemeler kullanılmaktadır. Metaller arasında düşük yoğunluklu, ucuz, kolay bulunabilirliği ve mekanik özelliklerinden dolayı çoğunlukla alüminyum ve alaşımları kullanılmaktadır. Daha sonra Ti, Cu ve Mg alaşımlı metaller kullanılmaktadır (Deniz, 2005; Haghshenas, 2016; Topuz, 2021).

Bu özelliklere göre sanayide uygulamaları yaygındır. Özellikle alüminyum matrisli kompozitler, otomotiv ve havacılık endüstrilerinde, magnezyum matrisli kompozitler, düşük yoğunluğu sayesinde uzay endüstrisi için geliştirilmişlerdir. Titanyum alaşımları, yüksek sıcaklıklardaki iyi mukavemetleri ve mükemmel korozyon direnci nedeniyle uçak ve füze yapılarının imalatında kullanılmaktadır (Haghshenas, 2016).

Çizelge 1.1 : Metal matrisli kompozit malzemelerin temel özellikleri.

Metal matrisli kompozitlerin temel özellikleri	
1.	Düşük yoğunluk
2.	Yüksek mukavemet ve esneklik modülü
3.	Yüksek tokluk ve darbe mukavemeti
4.	Yüksek yüzey sertliği ve yüzey çatlaklarına karşı düşük hassasiyet
5.	Sıcaklık değişikliklerine veya ısıl şoka karşı düşük hassasiyet
6.	Yüksek elektriksel ve ısıl iletkenlik

1.1.1.3 Seramik matrisli kompozit malzemeler

Seramikler kayaların dış yapısında bulunan kil, kaolen gibi yapıların yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ile elde edilen malzemelerdir. Seramikler düşük yoğunluklu, mukavim ve sert olmalarına rağmen çok gevreklerdir diğer bir deyişle plastik olarak akamazlar. En fazla kullanılan seramikler silisyum karbür (SiC), silisyum nitrür (Si₃N₄), alüminyum oksit (Al₂O₃) ve seramik fiberlerdir (Deniz, 2005; Topuz, 2021).

Seramik matris kompozitler takviye malzemesine göre iki grupta toplanmaktadır:

- Süreksiz takviyeli seramik matrisli kompozitler
- Sürekli fiber takviyeli seramik matrisli kompozitler

Çizelge 1.2 : Seramik matrisli kompozit malzemelerin temel özellikleri.

Seramik matrisli kompozitlerin temel özellikleri	
1.	Düşük yoğunluk
2.	Ergime noktaları yüksek
3.	Termal ve kimyasal dayanımları yüksektir
4.	Sert, dayanıklı ve kaymaya dirençlidirler
5.	Kırılmandır

Çizelge 1.2'de seramik matrisli kompozit malzemelerin temel özellikleri gösterilmektedir. Bu özelliklere göre seramik matrisli kompozitler, havacılık sektörü

(gaz türbinleri, yapısal yeniden giriş termal koruması), otomotiv (fren rotorları) ve enerji sektöründe (ısı eşanjörleri, füzyon reaktörü duvarları) yaygın olarak kullanılmaktadır (Razzell ve diğ, 2016).

1.1.1.4 Karbon-karbon matrisli kompozit malzemeler

Karbon (veya grafit) fiber takviyeli karbon matris kompozitler çok önemli ve gelecek vadede mühendislik malzemeleridir. Kompozit malzemesinde hem takviye hem de matrisi karbon olan kompozitlerdir.

Çizelge 1.3 : Karbon-karbon matrisli kompozitlerin temel özellikleri (Razzell ve diğ, 2016; Sibel Topuz, 2021).

Karbon-karbon matrisli kompozitlerin temel özellikleri

1. Gerilme kuvveti ve gerilme modülü yüksektir
 2. Kayma ve yayılmaya karşı dirençlidir
 3. Kırılma mukavemeti yüksektir
 4. Termal genleşme katsayısı düşük ve termal iletkenliği yüksektir
 5. Oksitlenme özelliği bulunmaktadır
 6. Pahalıdır
-

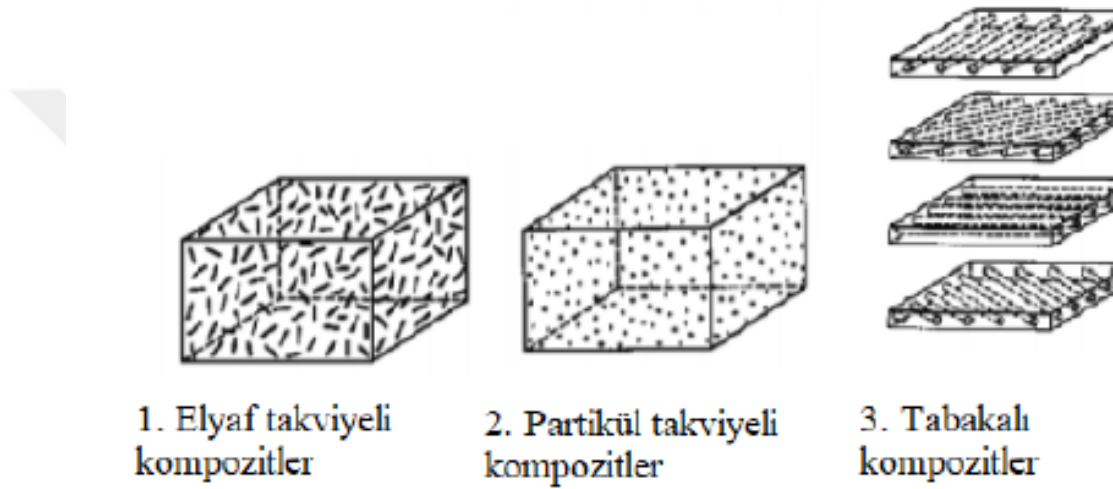
Karbon-karbon matrisli kompozitlerin temel özellikleri Çizelge 1.3'de gösterilmektedir. Bu özelliklere dayanarak roket motorlarında, uzay, uçak ve yüksek performans otomobillerde sürtünme malzemelerinde veya sıcak presleme kalıpları gibi çok çeşitli alanlarda uygulamaları bulunmaktadır (Razzell ve diğ, 2016; Topuz, 2021).

1.1.2 Takviye elemanı

Takviye elemanları, matris içerisinde yer almakta ve kompozit malzemeye istenilen özelliklerin kazandırılması amacıyla kullanılmaktadır. Kompozit içerisindeki temel görevi yapı mukavemetini arttırmaktır. Kompozit malzemelerde takviye malzemesi, yüksek mukavemet, sertlik, kimyasal, sıcaklık ve aşınmaya karşı dayanım gibi özellikler sunmaktadır. Ayrıca takviye elemanı ve matrisin ara yüzey bağ kuvvetinin iyi olması, elyaf yönlenmesinin ayarlanması, uygun takviye elemanının seçilmesi, takviye elemanının boyutları ve matrisin elyafı iyi bir şekilde ıslatması gibi kriterlere

bağlı olarak takviye elemanı malzemenin üzerine gelen yükü yaklaşık %90 oranında taşır (Rajak ve diğ, 2019).

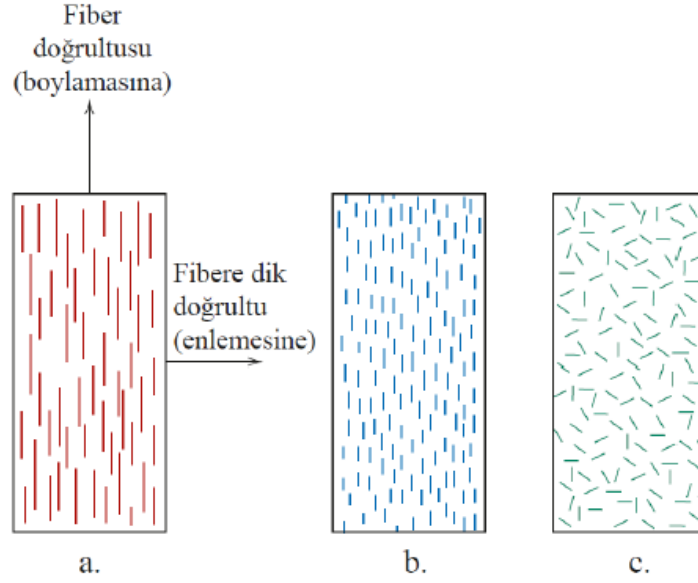
Kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanlarının büyük çoğunluğu lifli bir yapıya sahiptir. Lifli form, düşük ağırlığının yanı sıra yapı dayanımını büyük ölçüde arttırmaktadır (Balasubramanian, 2013b). Kompozitlerin takviye elemanı geometrisi ve yerleştirme biçimine göre Şekil 1.3'te gösterildiği gibi; elyaf takviyeli kompozitler, parçacık (partikül) takviyeli kompozitler ve tabakalı kompozitler olmak üzere 3 çeşide ayrılmaktadır (Koruvatan, 2008).



Şekil 1.3 : Kompozit malzemelerin takviye elemanlarına göre sınıflandırılması (Koruvatan, 2008).

1.1.2.1 Elyaf (fiber) takviyeli kompozitler

Elyaf takviyeli kompozitler, içerisine sert ve dayanıklı fiberlerin eklenmesiyle oluşturulur. Bu malzemelerde, takviye elemanı olarak genellikle cam, karbon ve aramid gibi elyaflar kullanılmaktadır (Sarasini ve diğ, 2013). Bunlar arasında en fazla hafiflik ve düşük maliyet avantajından dolayı cam ve yüksek mekanik özelliklerinden dolayı karbon elyaf kullanılmaktadır. Elyaflar anizotropik özelliklerinden dolayı boylamasına doğrultuda yüksek mekanik performansa sahip iken, enlemesine yönde zayıftırlar. Farklı yönlerde yük taşıma kabiliyetlerini artırmak için Şekil 1.4'te gösterildiği gibi farklı yönlenmeler ve üretim yöntemleri gerçekleştirilmektedir (E., 2017; Mazumdar, 2001).



Şekil 1.4 : Fiber takviyeli kompozitlerin şematik gösterimi a) sürekli ve çekme doğrultusunda yönlendirilmiş, b) sürekli ve çekme doğrultusunda yönlendirilmiş, c) sürekli ve rastgele yönlendirilmiş (E., 2017; Mazumdar, 2001).

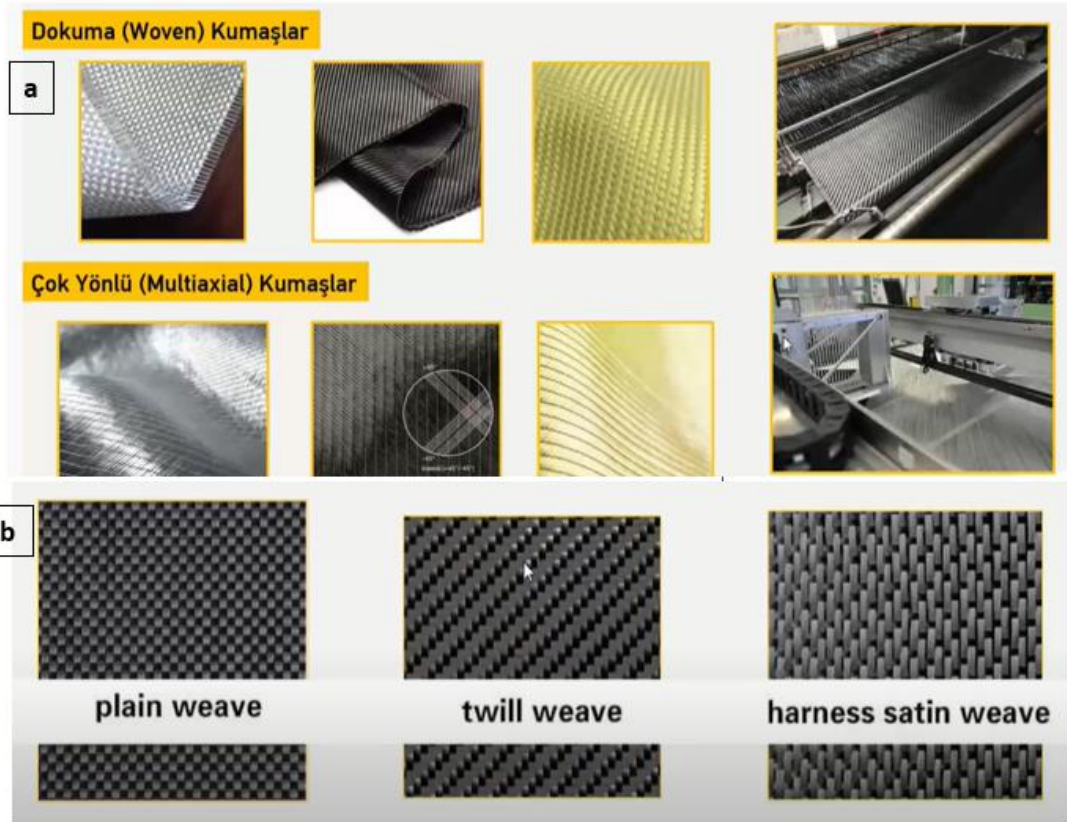
Elyaf üretim yöntemlerine göre değişkenlik göstermektedir. Örneğin Şekil 1.5'te gösterildiği gibi ilk üretim fitil (Rowing) formudur. Filament sarma, pultrüzyon gibi yöntemlerde bu elyaf kullanılır. İkinci olarak kırılmış (chopped) elyaflardır. Bu elyaf fitillerin özel bıçaklarla belirli uzunlukta kesilmesi ile elde edilirler ve daha çok plastik malzemelerin içerisinde karıştırılarak kullanılır. Diğer bir formu ise RTM yada el yatırması gibi yöntemlerde kullanılan keçe (mat) formudur.



Şekil 1.5 : Elyaf formları.

Daha yüksek performanslı ürünlerin üretilmesinde Şekil 1.6'da gösterildiği gibi dokuma kumaşlar ön plana çıkmaktadır. Cam, karbon ve aramid gibi elyafların özel

dokuma makinaları ile üretilmesi ile elde edilirler. Çoğunlukla tabakalı kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılırlar. Bunların dışında mekanik özellikleri daha da iyileştirilmiş ve özel malzemelerin üretilmesi için çok yönlü eksenli (multiaxial) kumaşlar kullanılmaktadır (Kompozit Hammadde Seçiminde Bilinmesi Gerekenler).



1.1.2.2 Partikül takviyeli kompozitler

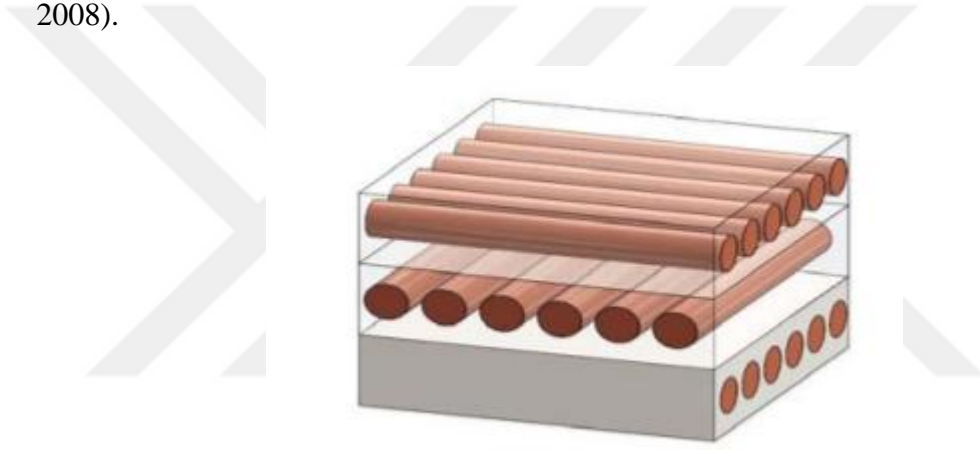
Matris içerisinde yayılmış olan mikro veya büyük boyutlu partiküllerin oluşturduğu kompozit malzemelerdir. Boyutları $1\ \mu\text{m}$ 'den daha büyük olanlar parçacık, $1\ \mu\text{m}$ 'den daha küçük boyutlular ise partikül olarak adlandırılmaktadır. Takviye elemanları partikülün boyutu, yüzey enerjileri (yapışma etkisi nedeniyle), hacimsel oranlar ve kompozit içerisindeki partiküllerin homojen dağılımına göre, kompozitin mukavemetini arttırmak, yapıya rijitlik, elektrik iletkenliği, aşınma direnci ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi özellikler kazandırmaktadır (Lubin, 1982).

Partikül takviyeli kompozitlerin elyaf takviyeli kompozitlerden ayırt eden karakteristik özellikleri, partiküllerin matris içinde tamamen rasgele dağılması ve bu nedenle malzemenin izotropik özellik göstermemesidir. Ayrıca parçacık takviyeli

kompozit malzemeler elyaf takviyeli olanlara göre daha kolay üretilir ve daha ekonomiktir (Asi, 2018; Bulut, 2014; Deniz, 2005).

1.1.2.3 Tabaka (sheet) takviyeli kompozitler

Tabakalı kompozitler tasarım amaçlarına bağlı olarak fiber yönelimlerine sahip iki boyutlu tabakaların; fiber takviyeli laminelerin üst üste istiflenmesi ve yapıştırılması ile üretilen çok katmanlı yapılarıdır. Tabakalı kompozitler yüksek mukavemet, yüksek ısı ve korozyon dayanımı, hafiflik gibi özelliklere sahiptirler. Tabakaların Şekil 1.7’de gösterildiği gibi farklı oryantasyon dizilimlerinde yerleştirilmesi ve katman sayılarının uyumu ile farklı doğrultularda kompozit malzemelerin çekme, basma, eğilme ve darbe mukavemeti gibi mekanik özellikleri iyileştirilmektedir (Hull ve diğ, 1996; Strong, 2008).



Şekil 1.7 : Açılı tabakaların ayrı gösterimi (Lubin, 1982).

1.2 Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler

Hafif malzemelere olan ihtiyacın artmasıyla birlikte elyaf takviyeli kompozit malzemelerin geliştirilmesi gün geçtikçe artmaktadır. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler arasında en sık kullanılanı karbon elyaftır. Çünkü karbon elyaftın diğer tüm malzemelere göre, çok avantajlı özellikleri bulunmaktadır, bunlardan en temel özellikleri Çizelge 1.4’de belirtilmiştir.

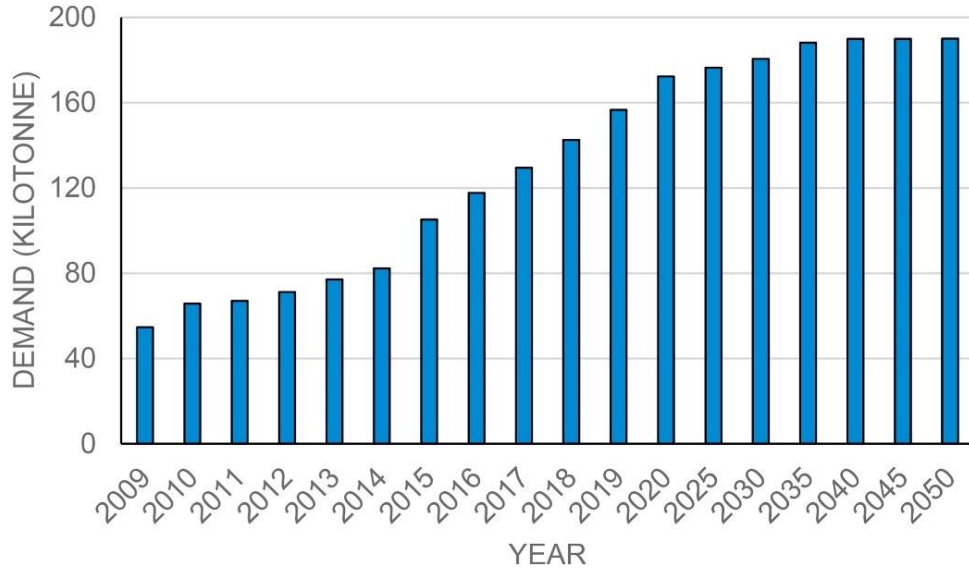
Çizelge 1.4 : Kompozit malzemelerin özellikleri (Andrew ve diğ, 2019; Mazumdar, 2001; Rajak ve diğ, 2019).

Kompozit Malzemelerin Temel Özellikleri

1. Aşınma, yorulma ve korozyon direnci yüksek
 2. Elektriğe ve sese karşı dirençli
 3. Kolay şekillenebilir
 4. Titreşim sönümlenme özelliği
 5. Kimyasal etkilere karşı dayanıklı
 6. Tasarım esnekliği sunması
 7. Yüksek sıcaklığa dayanıklı
 8. Eğilme, çekme, basınç, darbe gibi mekanik dayanıklılık
 9. Özgül ağırlığının düşük olmasından dolayı hafiflik avantajı
(çelikten 4 kat, alüminyumdan 1,5 kat)
-

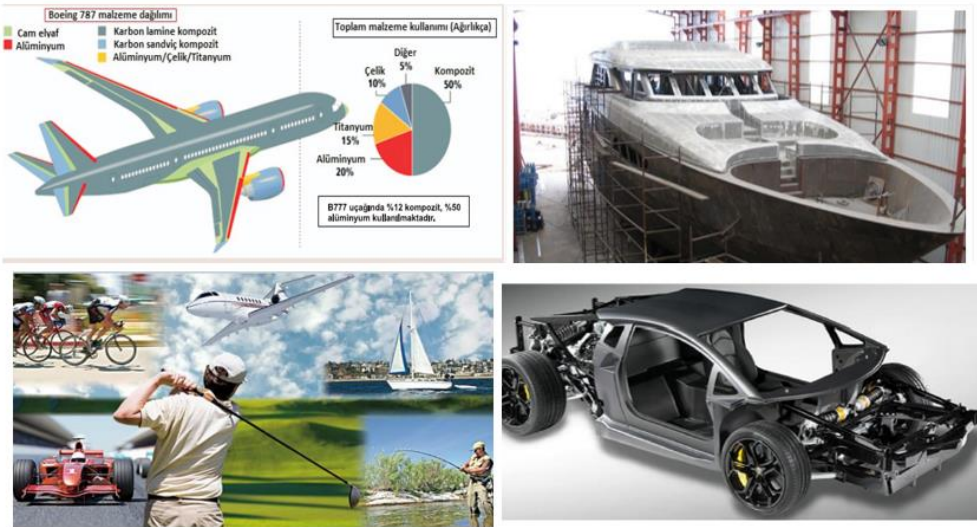
Bununla birlikte kompozit malzemelerin hammadde maliyetlerinin yüksek olması, farklı doğrultuda, farklı özellik gösterebilmesi, üretimin güç ve pahalı olması, raf ömürlerinin sınırlı olması, kompozit malzemelerde gerekli yüzey kalitesinin elde edilememesi, kırılma yapıları, mamul kalitesinin imalat yöntemine ve kalitesine bağlı oluşu, standart olmayışı, malzeme içerisinde elyaf kırılması yada katmanlar arası hasar oluşması, geri dönüşümünün olmayışı (termoset yapılı kompozit malzemeler), karmaşık anizotropik analiz gereksinimi gibi olumsuz yönleri de bulunmaktadır (Mazumdar, 2001).

Yapılan araştırmalara göre hafif malzemelere olan ihtiyacın artmasıyla, karbon fiber kullanımı da hızla artmaktadır. Bu konuda Şekil 1.8’te gösterildiği gibi karbon elyaf kullanımının 2050 yılında 190 kt geçmesi beklenmektedir (Das ve diğ, 2016; J. Zhang ve diğ, 2020)



Şekil 1.8 : Yıllara göre kilo ton olarak küresel karbon elyaf talebi (Melendi-Espina ve diğ., 2016; J. Zhang ve diğ., 2020).

Kompozit malzemelerin avantaj ve dezavantajları göz önünde bulundurulduğunda üstün özelliklerinin daha fazla olması dolayısıyla sanayide çok geniş bir yelpazede kullanım alanına sahiptir. Şekil 1.9'da belirtildiği gibi uzay ve havacılık Kuppusamy ve diğ. (2020) üzere, otomotiv Faruk ve diğ. (2017); Mallick, (2010); Van Acker ve diğ. (2009), rüzgâr enerjisi üretimi, otomasyon, askeri ve savunma sanayi, spor malzemeleri, denizcilik, robot teknolojisi, inşaat ve medikal teknoloji gibi birçok dalda geniş bir kullanım alanına sahiptir (Shah ve diğ., 2019).

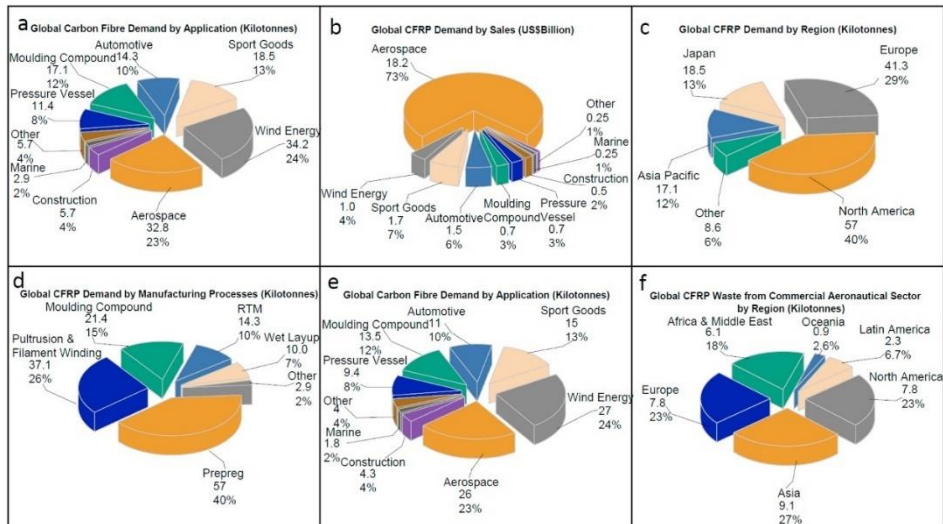


Şekil 1.9 : Kompozit malzemelerin kullanım alanları (Zor, 2008).

2018 yılında yapılan bir araştırmaya göre, havacılık, rüzgar türbini kanadı, otomotiv, spor ve eğlence uygulamalarındaki karbon elyaf kullanımını Şekil 1.10'da da gösterilmektedir. Rüzgar türbini kanat imalatında karbon elyafların uygulanması, havacılık (32.8 kt) uygulamalarına göre daha yüksektir (Zor, 2008.).

Maliyet açısından bakıldığında, karbon elyaf kullanımının %73'ünü havacılık sektörü oluşturmaktadır. Spor ve eğlence amaçlı ticari ürünler %6, otomotiv sektöründeki karbon elyaf kullanımı gelirin %7'sini oluşturmaktadır. Kuzey Amerika ve Avrupa, karbon elyaf kompozitlerinin tüketimini %40'ını ve %29'unu oluşturmaktadır. Kuzey Amerika ve Avrupa'daki Boeing, Airbus, savunma ve diğer otomotiv ve rüzgar enerjisi şirketleri bu iki bölgede karbon elyaf satışlarına öncülük etmektedir.

Japonya'da karbon elyaf kullanımı, ABD ve Avrupa'ya kıyasla daha düşüktür, ancak en kaliteli karbon elyaflar Japonya'da üretilmektedir. Üretim yöntemlerine göre el yatırması işlemi, havacılık ve spor (%40) uygulamalarında; pultrüzyon ve filaman sarımı, rüzgar türbini kanat imalatında yaygın olup, payın %26'sını oluşturmaktadır. SMC (Sheet Moulding Compound), RTM ve bunun varyasyonları, özellikle yüksek basınçlı RTM gibi otoklav dışı yöntemler otomotiv sektöründe kullanıldığı yapılan araştırmalara göre kanıtlanmıştır (Vita ve diğ, 2019; J. Zhang ve diğ, 2020).

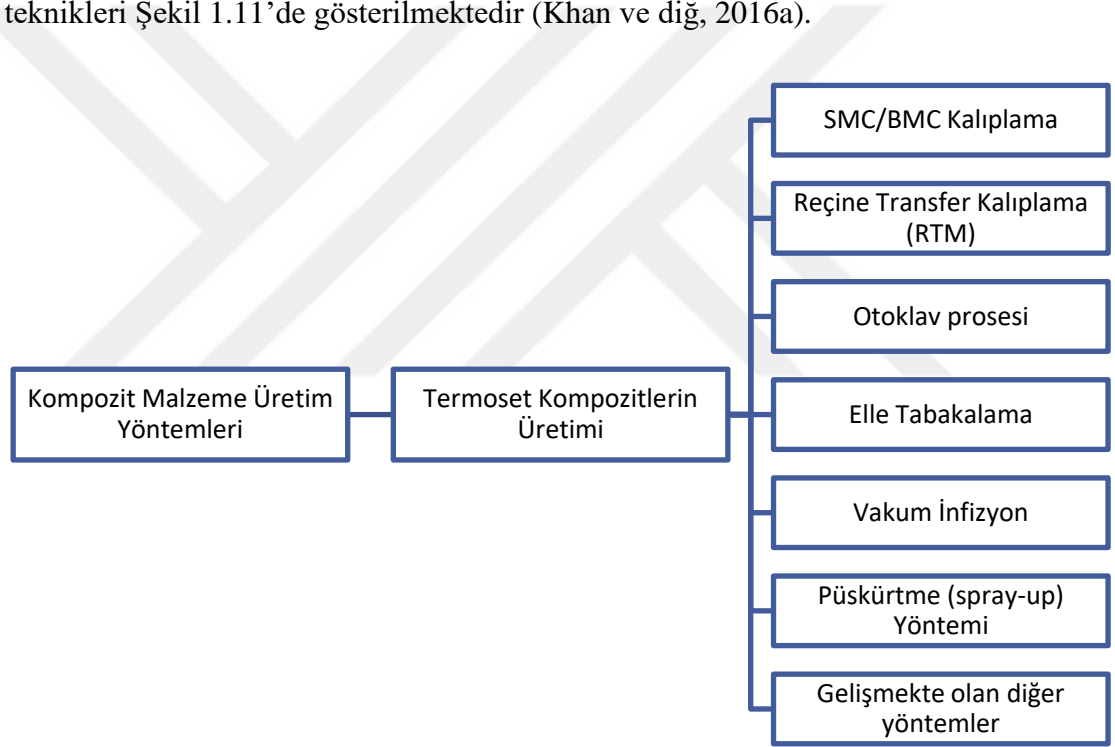


Şekil 1.10 : (a) uygulama, (b) satış, (c) bölge ve (d) üretim sürecine göre 2018 yılındaki karbon talebi. 2020'deki karbon elyaf talebi (e) uygulamaya göre ve (f) bölgelere göre havacılık sektöründen 2050'de tahmini karbon atıf (Das ve diğ, 2016; J. Zhang ve diğ, 2020).

1.3 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Dayanım ve tokluk, düşük ağırlık, yüksek sıcaklıkta kullanılabilirlik, yorulma dayanımı, düşük bakım masrafı, korozyon dayanımı ve tamir kolaylıkları gibi etkenler birlikte düşünülerek; en düşük maliyetle, en kolay şekilde bir kompozit malzeme üretimi planlanmalıdır.

Üretim teknikleri matris malzemesine, katkı ve/veya elyafların özelliklerine (boyut, şekil, yapısı), reçinenin yapısına (termoplastik/termoset) ve son ürünün yapısal özelliklerine göre değişmektedir (Mallick, 2007; Mazumdar, 2001). Günümüzde otomotiv, savunma veya havacılık gibi sektörlerde ağırlıklı olarak termoset yapıdaki kompozit malzemeler ağırlıkta kullanılmaktadır. Termoset kompozitlerin üretim teknikleri Şekil 1.11'de gösterilmektedir (Khan ve diğ, 2016a).

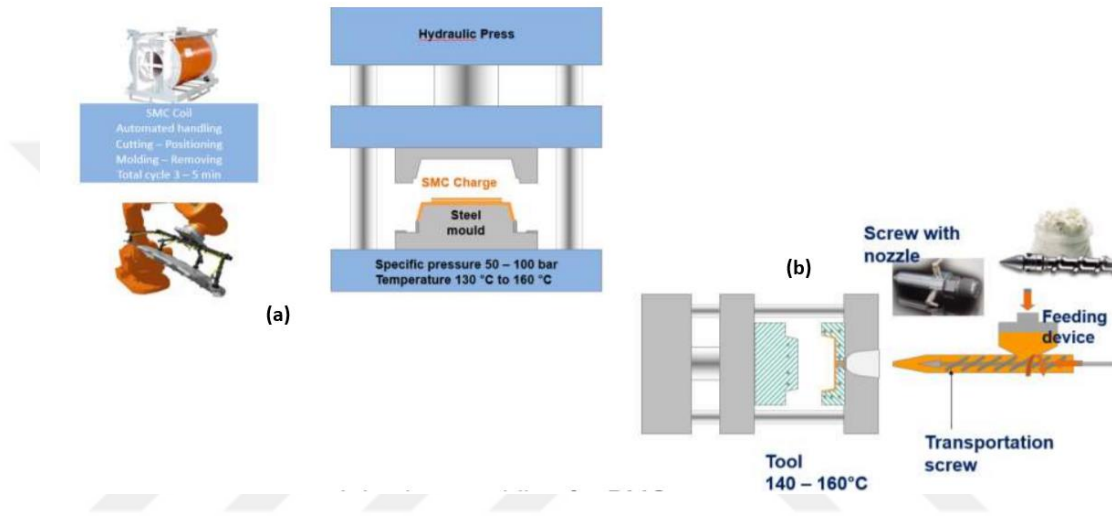


Şekil 1.11 : Termoset Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri (Mazumdar, 2001)

1.3.1 SMC/BMC kalıplama yöntemi

Dökme kalıplama kompozitleri (BMC-Bulk Moulding Composites) ve levha kalıplama kompozitleri (SMC-Sheet Moulding Composites) olarak bilinen termoset kompozit üretim yöntemlerinin kullanımları gün geçtikçe artmaktadır. BMC ve SMC malzemeleri genellikle kısa cam elyafı poliestere reçineler (hacimce %10-25), renklendiriciler, inhibitörler ve kalsiyum karbonat veya alev geciktirici alümina trihidrat gibi yüksek miktarda dolgu maddeleri içerir. SMC ve BMC'nin işlem adımları

Şekil 1.12’de gösterildiği gibi, elyafın emprenye edilmesi dışında benzerdir. Bu proseste elyaf katkılı kompozitlerin dahil edilmesi mekanik özelliklerini arttırırken, inorganik dolgu maddeleri ürünün nihai fiyatını düşürmektedir. Bu proses ile diğer kompozit malzeme üretim tekniklerinin olanak vermediği delik gibi karışık şekiller elde edilebilmektedir. Iskarta oranı düşüktür. Bu yöntemin dezavantajları, kalıpların metal olmasından dolayı diğer kalıplardan daha maliyetli olması ve büyük parçaların üretimi için büyük ve pahalı preslere ihtiyaç duyulmasıdır (Barczewski ve diğ, 2016; Lautenschläger ve diğ, 2018).



Şekil 1.12 : BMC (a) ve SMC (b) üretim prosesi.

1.3.2 RTM (reçine transfer kalıplama) yöntemi

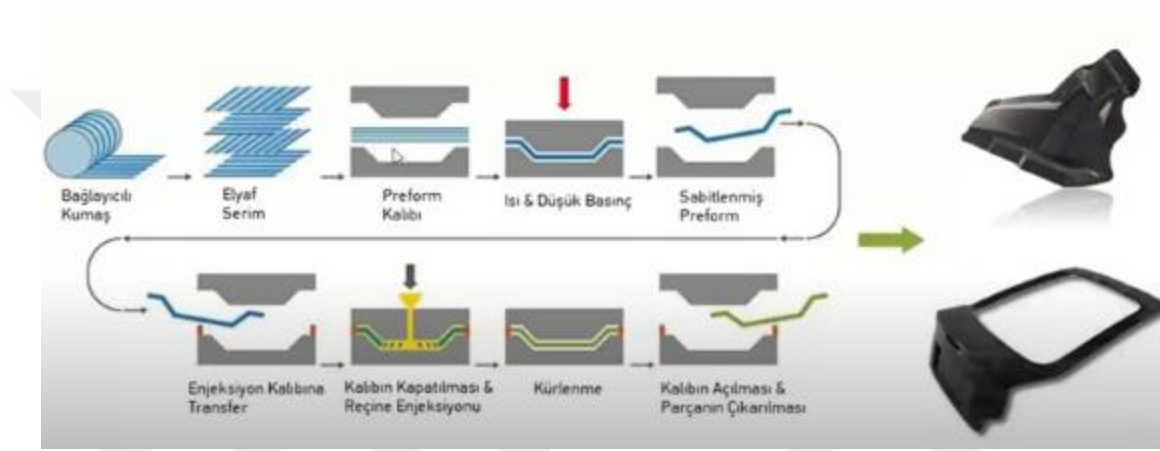
RTM, sürekli elyaf takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılan sıvı kompozit kalıplama yöntemidir. Proses genel olarak Şekil 1.13’te gösterildiği çeşitli basamaklardan oluşmaktadır;

1. Kalıpların temizlenmesi ve kalıp ayırıcı uygulanması
2. Elyaf takviyeli kumaşların iki kalıp arasına yerleştirilmesi
3. Reçine ve katalizör karışımından oluşan sıvının kalıp içerisine enjekte edilmesi
4. Isı varlığında malzemenin kurlenmesi

RTM yönteminin en önemli avantajı karmaşık şekilli parçaların üretiminde kullanılması, üretimde kullanılan parça maliyetlerinin daha ucuz ve basit olması, tasarım esnekliği sağlaması ve ek işleme yöntemine de gerek kalmadan ürünün her iki yüzeyinde de yüzey kalitesinin yüksek olmasıdır. Dezavantajı ise; reçinenin

vizkozitesi nedeniyle kısıtlı reçine seçimi, preform ve takviye elemanının kalıp içerisindeki diziliminin kritik öneme sahip olması, zaman zaman üretim sırasında malzeme içerisinde hava kabarcığı oluşması ve bu da malzemenin yapısının bozulmasına neden olmaktadır. Bu hava kabarcığı dezavantajının önüne geçebilmek için VARTM (Vakum destekli RTM) yöntemi geliştirilmektedir (Henning ve diğ., 2019; Mallick, 2021; Tempelman ve diğ., 2014).

RTM uygulaması çoğunlukla; taşıma ve kargo araç gövde panelleri, ekran panelleri, tıbbi cihazlar, depolama tankları, araç koltukları, küçük tekneler, rüzgar türbini kanatları veya uçak parçaları yapımında uygulanmaktadır.



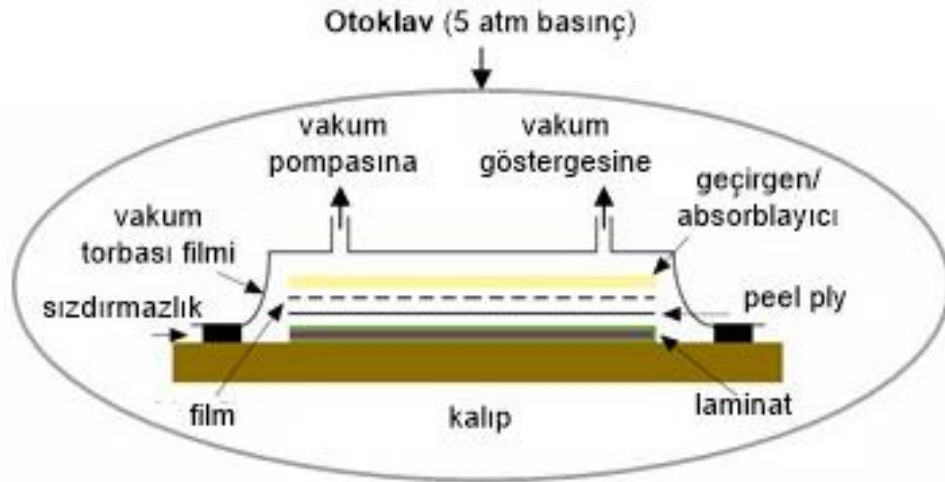
Şekil 1.13 : a) Reçine Transfer Yöntemi (RTM) b) Vakum Altında Reçine Transfer Yöntemi (VARTM) (Marques, 2011).

1.3.3 Otoklav prosesi (autoclave process)

Otoklav prosesi, vakum infüzyon yönteminine benzemektedir. Otoklavlama, yüksek lif hacmi fraksiyonu ve düşük boşluk içeriği ile sürekli olarak yüksek kalitede malzemeler üretebilen bir teknolojidir. Otoklav prosesi genel olarak düşük sayıdaki üretim ve yüksek kalitede kompozit parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Bu proseste yüksek sıcaklık, vakum, basınç, sıcaklık artış hızı ve kürlenme sıcaklığı kontrol altında olmaktadır (Centea ve diğ., 2015a; Dong ve diğ., 2019; F.C. Campbell, 2006). Proses genel olarak Şekil 1.14’te gösterilen sistemden oluşmaktadır;

1. Malzeme olarak genellikle reçine emdirilmiş kumaşlar (ör. prepreg), son ürün özelliğinde hazırlanır.
2. Hazırlanan malzeme çeşitli yapılar ile (boşaltıcı ve havalandırma deliği) kaplanır ve otoklav içerisine yerleştirilir.

3. Boşaltıcı, fazla reçineyi emerek optimal elyaf hacmi oranının elde edilmesini sağlar.
4. Havalandırma deliği, kürlenme sırasında kompozit malzeme içinde oluşabilecek hava boşluklarının çıkmasını sağlar (G. Li, 2014).
5. Son olarak otoklav içerisindeki yapıya basınç, vakum ve sıcaklık uygulanarak malzemenin kürlenmesi sağlanır ve son ürün elde edilir.



Şekil 1.14 : Otoklav (vakum torbalı) kalıplama prosesi (Beşergil, 2016).

Otoklav yöntemi ile üretilen parçaların başlıca avantajları, yüksek dayanım/ağırlık ve parça içerisinde hava kabarcıklarının minimum düzeyde oluşması ile parçaların daha mukavemetli üretilmesi sağlanır. Ayrıca kontrol edilebilir basınç ve sıcaklık ayarı ile aynı cihazda, aynı anda birçok parça üretilmektedir (Centea ve diğ, 2015b).

Bunların yanında ilk yatırım maliyeti yüksektir, çok yüksek ısı ve basınca ihtiyaç vardır. Otoklav boyutu üretilen parça boyutunu sınırlamaktadır ve proses süresi oldukça uzundur. Seri üretime uygun değildir, çoğunlukla savunma sanayi gibi yüksek kalitede ürünlerin üretiminde uygulanmaktadır (A., ve diğ, 2020).

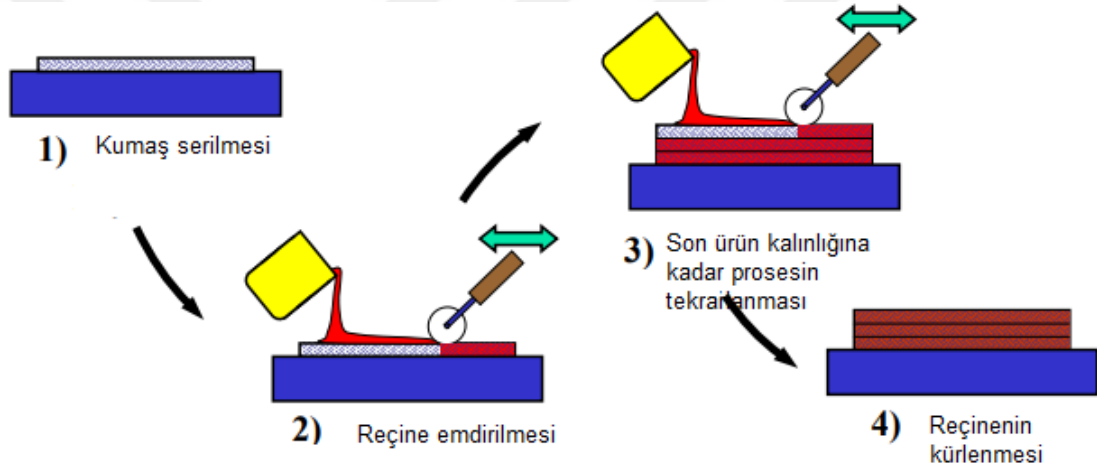
1.3.4 El yatırması (hand lay up) yöntemi

En eski açık kalıp kompozit işleme yöntemlerinden birisidir ve ilk olarak tekne gövdesi üretiminde kullanılmıştır. Bu yöntemde çoğunlukla oda sıcaklığında küreleşebilen epoxy, poliester, vinylester, phenolic gibi termoset reçine; takviye malzemesi olarak ise cam, karbon, aramid, kevlar gibi bilinen elyaflar kullanılmaktadır. Bu yöntem

düşük üretim adetlerinde yaygın kullanılan, sürekli gelişime açık olan ve üzerinde çalışılan üretim yöntemlerindedir

El yatırması Şekil 1.15'te gösterildiği gibi aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır havacılık (Kuppusamy ve diğ, 2020)

1. Kalıp yüzeyinin temizlenmesi
2. Kalıp ayırıcı ve eğer son ürün yüzeyinin düzgün olması gerekiyorsa jelkot uygulanması
3. Cam, karbon, aramid gibi takviye kumaşların kalıba yerleştirilmesi
4. Katmanlar arasına el ile sıvı reçine emdirilmesi
5. Son olarak reçine emdirilmiş kumaşların oda sıcaklığı ve atmosferik basınç altında veya farklı sıcaklık ve basınçlar altında bırakılarak prosesin tamamlanması.



Şekil 1.15 : El yatırması proses basamakları (Mazumdar., 2001)

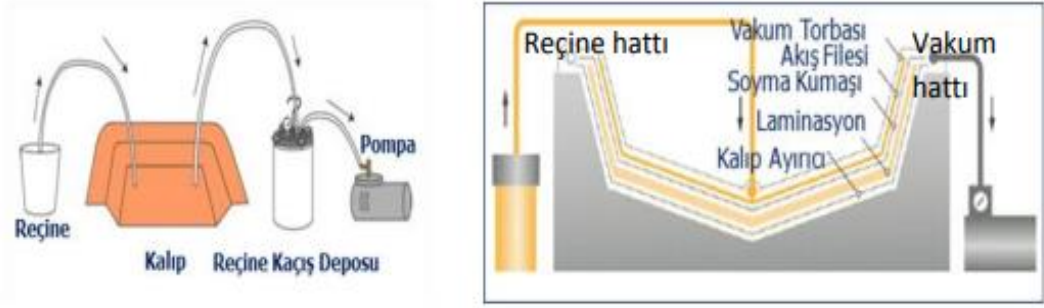
El yatırması basit ve kolay bir yöntemdir. Kalıp tasarımı, diğer üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında çok basittir. Düşük sayıdaki parça imalatı için çok uygundur. Maksimum tasarım esnekliği ve en önemlisi belirli bölgelerin daha mukavim yapılabilmek olanağı sunar.

En önemli dezavantajı, prosesin ve ürün kalitesinin yapan kişiye göre değişmesidir. Tek yüzü düzgün ürün elde edilir. Ayrıca reçine oranı düşük tutulmak istendiğinde yüksek oranda hava boşlukları ve ıslanmayan bölgeler meydana gelmektedir.

El yatırma yönteminin rüzgar türbin kanatları, plakalar, tekne, yat gövdeleri, küvet, sıvı tank üretimleri, mimari amaçlı kalıplama gibi çok fazla kullanım alanı vardır (Kuppusamy ve diğ, 2020).

1.3.5 Vakum infizyon yöntemi

Vakum infizyon yöntemi çoğunlukla karmaşık yapılara sahip kompozit parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Bu yöntem genel olarak Şekil 1.16’da belirtildiği gibi vakum pompası, peel ply (soyma kumaşı), akış filesi, vakum tankı (reçine toplama tankı), kalıp, reçine ve hava akışını sağlayacak spiral hortumlar ve reçine kovanından oluşmaktadır.



Şekil 1.16 : Vakum infizyon yönteminde kullanılan elemanlar (Hager ve diğ., 2010).

Proses işlemleri şu şekildedir (A., Cadambi, 2020);

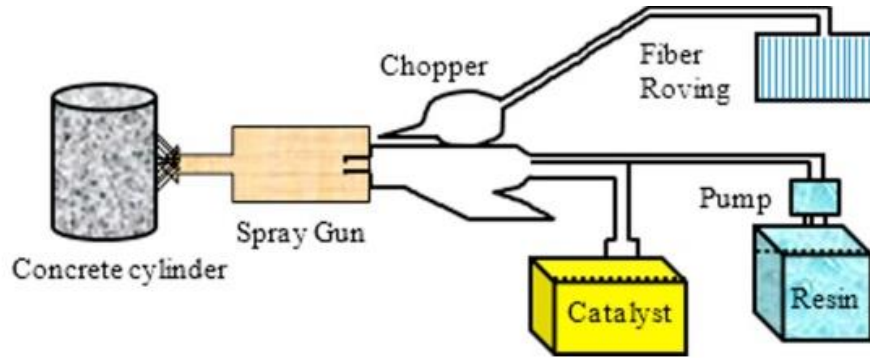
1. Kalıp yüzeyi temizlenmeli
2. Elyafın kalıp yüzeyine yapışmasının engellenmesi için kalıp yüzeyine kalıp ayırıcı uygulanmalı
3. Elyaf kalıp üzerine yerleştirilmeli
4. Elyafın üzerinde düzgün yüzey elde etmek amacıyla soyma kumaşı (peel – ply) ve reçine akışını hızlandırmak için akış filesi yerleştirilmeli
5. Reçine ve hava akışını sağlayacak spiral hortumların laminasyon üzerine yerleştirilmesi.
6. Kalıbın kenarlarının hava sızdırmaz bantları ile çevrelenmesi ve kalıbın üzeri vakum torbası ile hava geçirmez şekilde kapatılmalıdır.
7. Şekil 1.15’de görüldüğü gibi bir pompa ile kalıp içinde vakum yaratılması, bu şekilde vakum torbası ve kalıp arasında kalan havanın emilmesi.
8. Reçine emdirme işlemine başlamadan önce vakum altındaki sistemde kaçak olmadığı kontrol edilmelidir.
9. Daha sonra hazırlanan reçinenin vakum altındaki sisteme gönderilerek elyafı ıslatması sağlanmalıdır.

Bu yöntemin en önemli avantajı; büyük parçaların üretiminde kullanılabilmesidir. Tek taraflı bir kalıp yeterlidir ve ayrıca bu kalıbın yüksek mukavemetli olmasına gerek yoktur. Reçinenin elyaf yüzeyine dağılımı ve emilimi aynı miktarda olduğundan reçine birikmeleri veya elyaf katlanmaları meydana gelmemektedir. Ayrıca kalıp ve üretim maliyeti RTM prosesine göre daha düşüktür (Durgun, 2013).

Dezavantajı ise; diğer yöntemlere göre kullanılan ekipman sayısı fazla olduğundan maliyetlidir. İşlem basamakları karmaşıktır. Kısmen de olsa reçine ile ıslanmamış bölgeler kalabilir. Ham madde fiyatları yüksek olduğundan pahalı atık malzeme oluşumu sağlanır.

1.3.6 Püskürtme (spray-up) yöntemi

Spreyleme yönteminde; malzeme (reçine ve fiber), spreyleme cihazı, spreyleme prosesi (operatörün etkisi) ve kaplamanın kalınlığı gibi 4 ana faktör etkilidir (Parghi ve diğ, 2018). Temel olarak Şekil 1.17’de belirtildiği gibi sadece kırılmış elyaflar kullanılır ve bu elyaflar istenen kalınlık elde edilene kadar kalıp üzerine püskürtülür. Püskürtme uygulamalarında genellikle poliester reçineler, izofoalik poliesterler ve vinil esterler kullanılmaktadır. Püskürtme yöntemiyle üretilmiş parçalarda, genellikle oda sıcaklığında kürleştirmesi sağlanır, bazı durumlarda dışarıdan ısı uygulaması ile kürleme sürecini hızlandırılmaktadır.



Şekil 1.17 : Püskürtme (spray-up) yöntemi (Parghi ve diğ, 2018).

Kalsiyum karbonat, alüminyum trihidrat, keçe, fitil dokuma gibi malzemeler, püskürtme reçinesi içine üründen beklenen özellikleri geliştirmek için dolgu maddesi olarak kullanılır.

El yatırması gibi düşük maliyetli ve basit bir yöntemdir. Karmaşık yapıları parçaların imal edilmesine uygundur. Fakat püskürtme yönteminde elyaflar rastgele

yerleşmektedir ve lif içeriği %30 - %35 ile sınırlıdır, elle yatırma yönteminde ise elyaflar düzenli yerleşmekte ve lif içeriği %65 - %70 oranında olduğu için parça mukavemeti el yatırmasına göre daha düşüktür (Gurit Holding AG, 2000; Khan ve diğ., 2016b). Bunların dışında ürünün ön yüzü düzgün, arka yüzey, elyafların görüldüğü kısım olup, pürüzlüdür. Ürünün kalitesi el yatırması yöntemindeki gibi operatörün bilgisine bağlıdır.

Bu yöntemle üretilen tipik ürünler tekne gövdeleri, otomobil ve kamyon gövde panelleri, yüzme havuzları, korozyon dayanımlı ürünler, elektrikli ev aletleri ve havalandırma kanallarıdır.

1.3.7 Gelişmekte olan diğer yöntemler

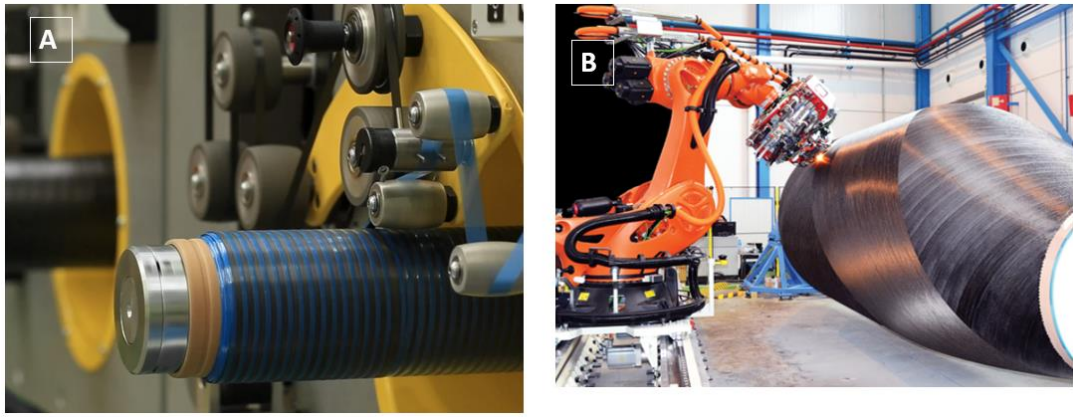
Bunların dışında Kavisli (Curved) Pultrüzyon, Robotik Sistemler (AFP/ATL), Prepreg Overmolding ve Sürekli Elyaf Takviyeli Enjeksiyon (CFIP) gibi yeni nesil üretim yöntemleri geliştirilmektedir.

Kavisli (Curved) Pultrüzyon yönteminde radyus formundaki sabit kalıp içerisine reçine ile ıslatılmış kuru elyaflar, kalıp içerisine yönlendirilmekte ve ısıtılmış kalıp varlığında kürlenerek radyuslu kavisli yapılar elde edilmektedir. Şuan Şekil 1.18'de gösterildiği gibi 2020 Chevrolet Corvette aracının arka tamponunda, tampon koruma demiri yerine bu tarz kompozit parçalar kullanılmaktadır (Curved Auto Part Made with Pultrusion, 2020; Curved Pultrusions Enter Production, 2021; S. Mazumdar, 2001)



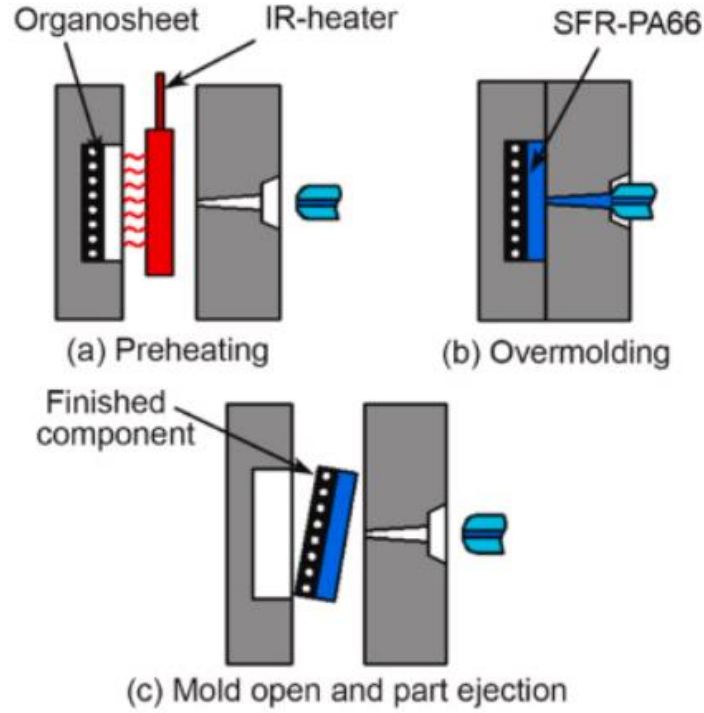
Şekil 1.18 : 2020 Chevrolet Corvette aracının arka tamponu (Curved Auto Part Made with Pultrusion, 2020).

Robotik sistemler AFP (Automotive Fiber Placement) ve ATL (Automotive Tape Laying). Elyaf demetleri ya da bant şeklindeki termoset veya termoplastik esaslı prepreglerin Şekil 1.19’da görüldüğü gibi robotik kol vasıtasıyla kalıp yüzeyine parçanın karmaşıklığına bağlı olarak değişen derecelerde kusursuz oryantasyonla serilmesi yöntemidir. Bu yöntem UD bantlarının manuel olarak yerleştirilmesini kopyalar. Ama bu proses ile işçilik maliyetini azaltma ve aynı zamanda ıskarta oranı azaldığı için ham madde maliyetlerinin %50 azalacağı öngörülmektedir. Günümüzde NASA’da uzay uçak üretim parçalarında kullanımı mevcuttur (Lukaszewicz ve diğ, 2012; Oromiehie ve diğ, 2019; Yassin ve diğ, 2017).



Şekil 1.19 : ATL (Automotive Tape Laying) (A) ve AFP (Automotive Fiber Placement) (B) (Making Prepreg Tape).

Prepreg Overmolding yöntemi, termoset veya termoplastik prepreglerden üretilmiş kompozit parça üzerine plastik enjeksiyonla insert, braket, feder gibi yapısal parçaların eklenmesi işlemidir (Akkerman ve diğ, 2020). Kompozit malzeme üretimi için proses temel olarak Şekil 1.20’de gösterildiği gibi gerçekleşmektedir.



Şekil 1.20 : Overmolding kompozit malzeme üretim prosesi (Fu ve diğ, 2022).

Sürekli Elyaf Takviyeli Enjeksiyon (Continuous Fiber Injection Process (CFIP) yöntemi, içi boş yapıda hazırlanmış kalıpların(boruların) içerisine, sıvı reçine ile aynı anda sürekli karbon elyafların enjekte edilmesi esasına dayanan yeni nesil özel bir üretim yöntemidir (CFIP - Technology of Carbon Fibre Injection in 3D Printing, 2020). Bu teknoloji, Eurecat tarafından geliştirilmiş ve patenti alınmıştır. CFIP teknolojisi, yüksek mekanik ve hafiflik performansının gerekli olduğu yeni uygulamalarda 3D baskının kullanılmasını sağlamayı amaçlamaktadır. Bu aynı zamanda farklı parçaların Şekil 1.21’de gösterildiği gibi aralarında fiber sürekliliği sağlayarak entegre bir şekilde birleştirilmesini ve bu sayede yüksek birleştirme performansı, verimli malzeme ve çok işlemlili yapıların üretilmesini sağlamaktadır (Continuous Fiber Injection Process Increases Strength of Plastic, Metals and Ceramics, 2020).



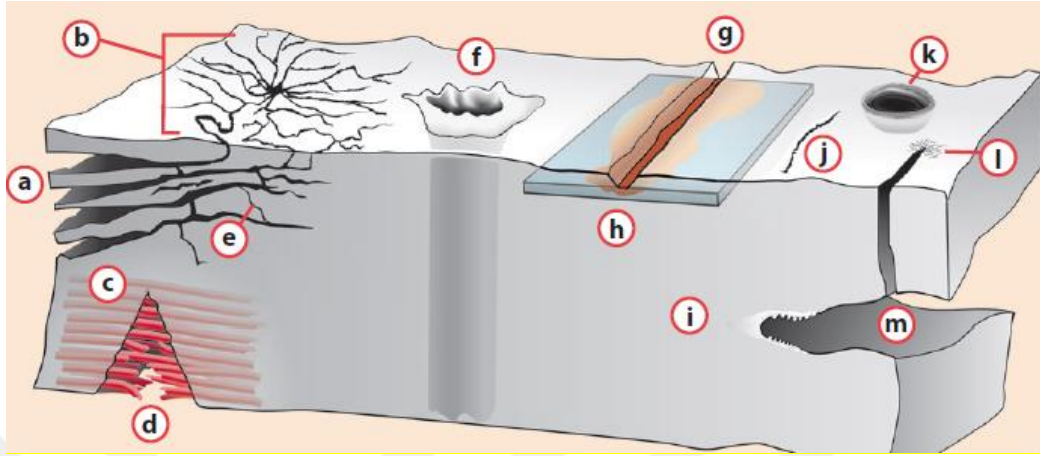
Şekil 1.21 : 3D baskı ile üretilen parçaların sürekli karbon fiberlerle güçlendirilmesi.

1.4 Kendi Kendini Onarabilen Kompozit Malzemeler

Son araştırmalara göre, fosil yakıtların, sera etkisine önemli bir katkıda bulunduğunu ve toplam karbondioksit emisyonlarının yaklaşık dörtte birini oluşturduğunu göstermektedir (Greenhouse Gas Emissions: Drivers and Impacts, 2021). Bu da iklim değişikliğinde olumsuz etkiler yaratmaktadır. Avrupa Birliği, Kyoto Protokolü kapsamında 1990 seviyesine göre 2008-2012 yılları arasında %20 bir sera gazı emisyon azaltma hedefi, ardından 2030 yılına kadar %40 ve 2050 yılına kadar %60'ın altına çekmek hedeflenmektedir (Avrupa Birliği'nin Düşük Karbon Emisyonlu Ulaştırma Sektörü Stratejileri ve Türk Otomotiv Sektörü, 2017; Sera Gazı Emisyonlarının Azaltımı, 2020). Bu hedefler kapsamında çok çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

Bunlar arasında yapılan en yaygın çalışma, fosil yakıt tüketiminin azaltılması için, hafifletme çalışmalarıdır. Özellikle bu konuda otomotiv sektöründe ciddi bir yasal zorunluluk bulunmaktadır. 2012 yılından bu yana 130g/km olan CO₂ emisyon salınım seviyesinin 2021 yılı itibariyle 95g/km seviyelerine düşecek olması günümüzde araç üreticilerinin en önemli problemi haline gelmiştir (Fuel Quality). Bu nedenle, son zamanlarda karbon fiberli kompozitler, seri üretilen araçlarda hafiflik sağlamak için kullanılan en önemli malzemeler olarak tanımlanmaktadır.

Karbon fiberli kompozitler ile üretilen parçalar, diğer malzemeler gibi kullanım ömürleri boyunca hem yapısal hemde işlevsel olduklarından Şekil 1.22’de belirtildiği gibi çeşitli hasar modlarına maruz kalmaktadır (Blaiszik ve diğ, 2010).



Şekil 1.22 : Polimer kompozitlerde hasar modları: a)katmanlar arası ayrılma, b)yüzey çatlama, c)elyafların tekrar yönlendirilmesi, d)elyaf kopması ve çekilme, e)Enine ve kayma çatlama, f)delinme, g)yüzeyde derin kesim, h)Korozyon korumalı metal, i)ince çatlaklar, j)çizilme (Blaiszik ve diğ, 2010).

Karbon fiber kompozitlerin potansiyel zayıf eksen dışı mukavemet özellikleri ve zayıf çatlak direnci gibi bazı dezavantajları mevcuttur ve bu durum, kullanım yerlerindeki performanslarını olumsuz şekilde etkilemektedir. Ayrıca kompozit malzemeler tabakalı yapıda bulunduğu için hasar sırasında öncelikle tabakalar arasındaki katmanların açılması olarak bilinen delaminasyon bölgeleri oluşmaktadır. Bu hasar türü kompozit malzemelerin servis ömürlerini kısıtlayan en önemli hasar türüdür (Pingkarawat, Wang ve diğ, 2013a). Geleneksel onarım yöntemlerinde, kompozit malzemelerin hasarını tespit etmek için manuel olarak incelenmektedir. Hasar tespiti ve değerlendirmesinde ultrasonik, kızılötesi tomografi ve X-ışını radyografisi gibi teknikler kullanılmaktadır. Kompozitteki hasar tespit edildikten sonra, hasarın ciddiyetine bağlı olarak bileşen onarılır veya değiştirilir (Whittingham ve diğ, 2009). Bu gibi durumlarda hasarlı bir parçanın onarılması (yama, kaynak, reçine kürleme ve yapıştırma) maliyeti, tüm bileşeni değiştirme maliyetinden önemli ölçüde daha düşüktür (X. Liu ve diğ, 2007). Bu nedenle, yüksek operasyonel verimlilik ve tamamen onarım sağlayarak mekanik performans sunan düşük maliyetli teknolojileri geliştirmek gerekmektedir.

Bu konu dünya genelinde büyük bir araştırma konusu olmuştur. Çünkü hasarların tamiri ciddi bir finansal sorun yaratmaktadır. Gelişmekte olan ülkeler bu konuda çeşitli çalışmalar yapmaktadır. Bu çalışmaların arasında kendi kendini onarabilen (self-healing) malzemeler çok büyük yer tutmaktadır. Bu konuda yapılan pazar analizleri Şekil 1.23'te gösterilmektedir. Kendi kendini onarabilen kompozit pazarı, 2021'den 2028'e kadar olan tahmin dönemi için bu büyümeyi %45,30 oranında arttıracak, 2028 yılına kadar 9.970,40 milyon ABD doları değerinde bir değere ulaşacağı öngörülmektedir (Kendi Kendini İyileştiren Kompozitler Pazarı, 2021).

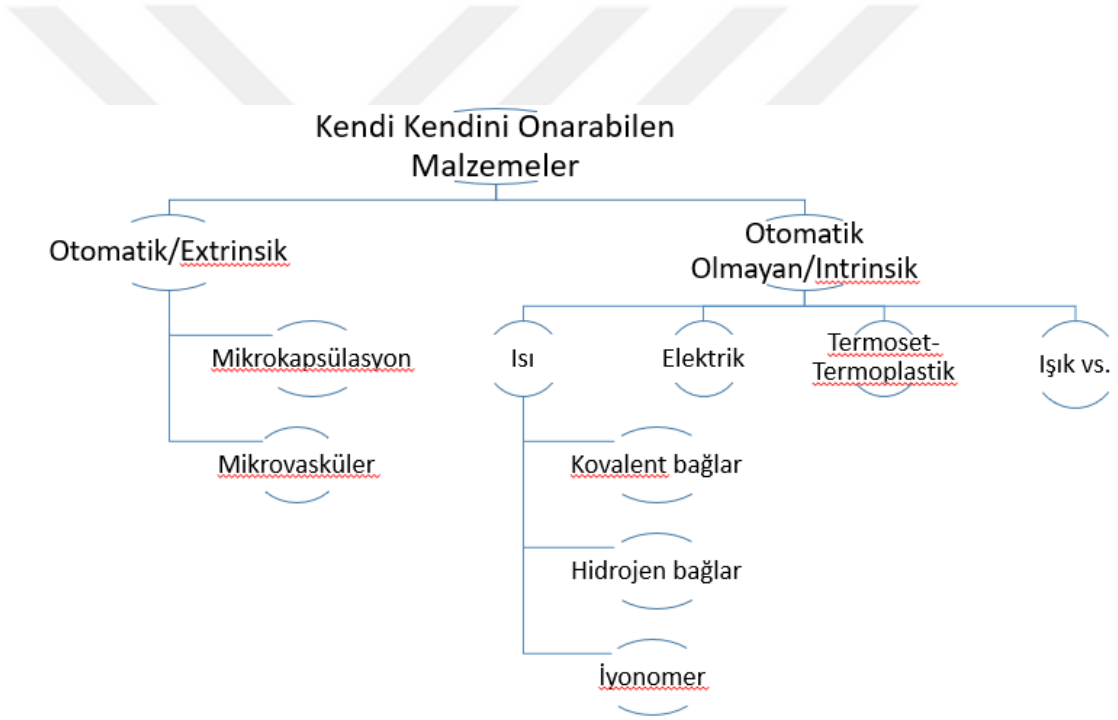


Şekil 1.23 : Küresel kendi kendini onaran kompozit pazarı (Kendi Kendini İyileştiren Kompozitler Pazarı, 2021).

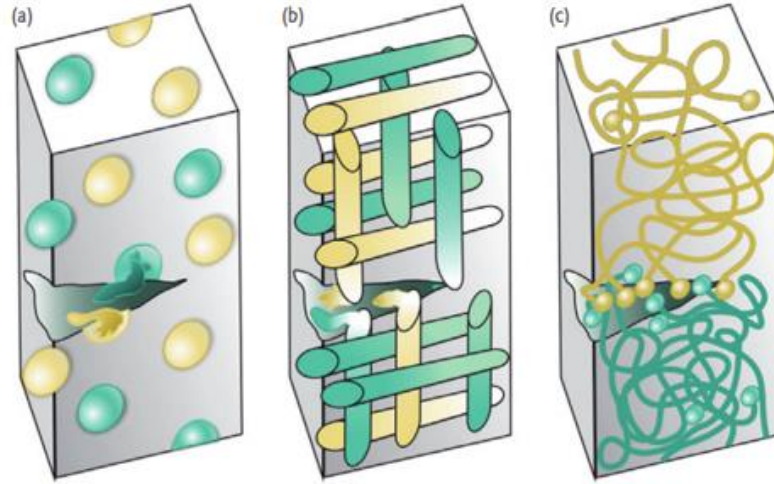
Polimer matrisli kompozitlerde delaminasyon matris bakımından zengin bölgelerde başlar ve bu hasarlar birçok durumda göz ile farkedilmezler. Benzer hasarların oluşumu polimerik malzemeler dışında boya/kaplama Behzadnasab ve diğ. (2017); Sun ve diğ. (2019); H. Wang ve diğ. (2018), metal/alaşım Cheng ve diğ. (2020); Y. Wu ve diğ. (2017); J. Zhu ve diğ. (2019), seramik/beton Ren ve diğ. (2020); Van Tittelboom ve diğ. (2016); X. F. Wang ve diğ. (2019) ve diğer farklı malzemelerde de Hao ve diğ. (2018); Lee ve diğ. (2017); Whiteley ve diğ. (2015); Zeng ve diğ. (2014) görülmektedir (G. Li, 2014). Bu hasarlar gerilmelere maruz kaldıkça mukavemet ve rijitlik gibi malzemelerin yapısal bütünlüğünü bozduğundan, incelenmesi gereken hasar türüdür. Tüm bu etkenleri göz önünde bulundurursak malzemelerin “kendi-

kendini onarabilme (self-healing)” özelliği kazanması önemini hızla arttırmaktadır (Billiet ve diğ, 2013; Hager ve diğ, 2010; G. Li, 2014.). Kendi kendini onarma formülasyonu, insan vücudundaki yaraların ve kemiklerin onarılmasının biyolojik konseptinden esinlenilmiştir (Kessler ve diğ, 2003; Scheiner ve diğ, 2016; Trask ve diğ, 2007; Urban, 2012; Wen ve diğ, 2021; D. Y. Wu ve diğ, 2008; Y. Yang ve diğ, 2018; Yuan ve diğ, 2008).

Kendi kendini onarabilen kompozit malzemeler mikrokapsülasyon, mikrovasküler ve intrinsik olmak üzere 3 ana gruba ayrılmaktadır (White ve diğ, 2011a). Bazı çalışmalara göre ise otomatik/ekstrinsik ve otomatik olmayan/intrinsik olmak üzere Şekil 1.24’te gösterildiği gibi 2 sınıfa ayrılmaktadır (Y. Wang ve diğ, 2015; P. Zhang ve diğ, 2016; D. Y. Zhu ve diğ, 2015a).



Şekil 1.24 : Kendi kendini onarabilen yapıların sınıflandırılması(D. Y. Zhu ve diğ, 2015a).



a)Mikrokapsülasyon, b)Mikrovasküler, c)İntrinsik

Şekil 1.24 (devamı): Kendi kendini onarabilen yapıların sınıflandırılması (D. Y. Zhu ve diğ, 2015a).

1.4.1 Ekstrinsik kendi kendini onarma mekanizması

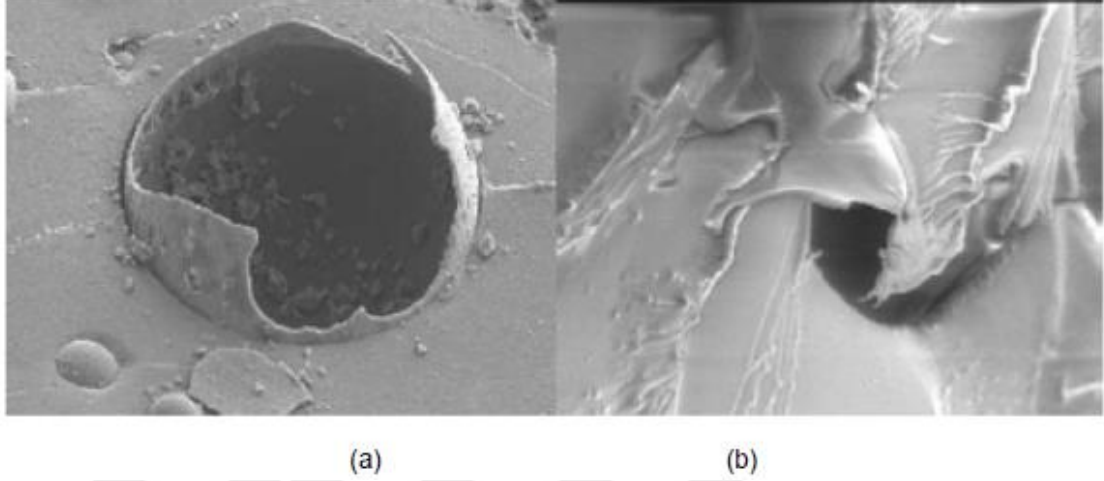
Kompozit malzemeler tek başına onarabilme özelliğine sahip değildir. Ekstrinsik kendi kendini onarabilme mekanizmasında, onarıcı ajanlar kapsül, kanal yapısı (boş lif yapısı) yada vasküler yapı içerisinde gömülü olarak matris malzemesine dahil edilirler. Çatlak algılanması ve onarma mekanizması dış müdahaleye gerek kalmadan gerçekleşmektedir. Bu avantajından dolayı endüstriyel sektörlerde yakın zamanda yaygın olarak kullanılacak prodestir.

Ekstrinsik onarma mekanizmaları arasından en çok kullanılan proses kapsül tabanlı yapılardır (Ahangaran ve diğ, 2019; Brown ve diğ, 2004; Z. He ve diğ, 2019; H. Li ve diğ, 2011; Loh ve diğ, 2021a; White ve diğ, 2001).

1.4.1.1 Kapsül tabanlı kendi kendini onarabilen malzemeler

Mikrokapsülasyon polimerler için kullanılan en eski kendi kendini onarabilme yöntemidir. Bu yöntemde mikrokapsülasyon, mikron büyüklüğünde katı partiküllerin, sıvı damlacıkların veya gazların, reaktif olmayan bir kabuğa alınmaları suretiyle korunma işlemidir (Ghosh, 2006b; Kuponu ve diğ, 2016). Bu yöntemin en büyük dezavantajı reaksiyonun tekrarlanabilir olmamasıdır. Çünkü onarıcı ajan kapsül içerisinden salındıktan sonra, Şekil 1.25'te gösterildiği gibi hasarlı bölgeye nüfus eder ve matris fazı boyunca dağılmış katı katalizör parçacıkları ile temas ettiğinde

reaksiyon gerçekleşerek onarıcı ajan tükendir (Kuponu ve diğ, 2016; Lv ve diğ, 2013a). Bunların dışında onarmanın tam olarak gerçekleşmesi için onarıcı ajanın yeteri kadar olması ve hasarlı yüzeye doğru akarak polimerizasyonun gerçekleşmesi gerekmektedir.



şekil 1.25 : (a) Poli-üreformaldehit içeren kırık bir mikrokapsülasyon görüntüsü, (b) Kendi kendini onaran epoksinin kırılma düzlemi ve orijinal kırılma düzlemini kaplayan polimerize onarıcı ajan (White ve diğ, 2001).

Mikrokapsülasyon prosesi konusunda çok fazla çalışma bulunmaktadır. Bu proste mikrokapsüllerin eklenmesi kompozitlerin işleme proseslerinden (sıcak presleme, enjeksiyon veya reçine transfer kalıplama, ekstrüzyon, laminasyon, toz kaplama vb.) etkilenmemesi gerekmektedir (Brown ve diğ, 2002; Lv ve diğ, 2013b). Bu proste kabuk, onarıcı ajan ve matris malzemelerinin (katalizör, kürlme ajanı, reaksiyon başlatıcı) yapısı çok önemlidir.

Onarıcı ajanlar (Ghosh, 2006a; Otsuka, 2016; White ve diğ, 2011a; D. Y. Zhu ve diğ, 2015a);

- Reaksiyon gerçekleşene kadar kapsül içerisinde stabil kalmalıdır.
- Hasarlı bölgeye nüfus edebilmesi için akışkan olmalı ve uçucu sıvılar içermemelidir.
- Hasarlı bölge ile kısa sürede reaksiyona girmeli ve yapışma özelliği göstermelidir.
- Onarma sonrasında mukavemet değeri ilk haline eşit veya bu değeri açan mekanik özellikler göstermelidir.

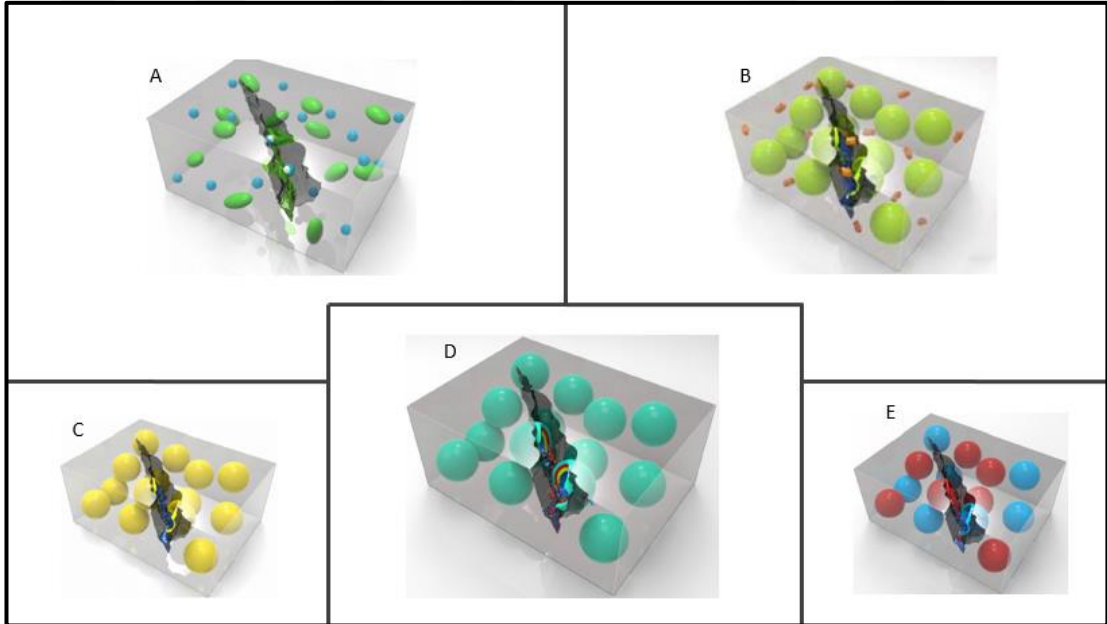
- Geniş sıcaklık aralığında uygulanması için düşük donma noktası ve yüksek kaynama noktasına sahip olmalıdır

Matris içerisindeki katalizör, küreme ajanı veya reaksiyon başlatıcısı (Ghosh, 2006a; Otsuka, 2016; White ve diğ, 2011b; D. Y. Zhu ve diğ, 2015a);

Kabuk yapısı;

- Hasar sonucunda onarıcı ajanın kabuk içerisinde salınabilmesi için kabuk çeper kalınlığı önemlidir. Çok kalın olması durumunda hasar oluşumunda kabukta çatlama gerçekleşmeyebilir, çok ince olduğunda ise üretim sırasında veya herhangi bir zamanda kapsül kolay yırtılır ve onarıcı ajan matris içerisinde zamansız salınır (Murphy ve diğ, 2010).
- Onarıcı ajan ile reaksiyona girmemelidir.
- Kapsüller uzun ömürlü, dayanıklı olmalıdır.

Tüm bu avantaj ve dezavantajları değerlendirdiğimizde Şekil 1.26'da gösterildiği gibi çok farklı mikrokapsülasyon teknikleri bulunmaktadır. Bunlar arasında tek kapsül sistemi, kapsül-katalizör sistemi, faz ayrımlı kapsül sistemi, çift kapsül sistemi ve kapsül-kapsül sistemi en yaygın kullanılan proseslerdir (Hia ve diğ, 2016).



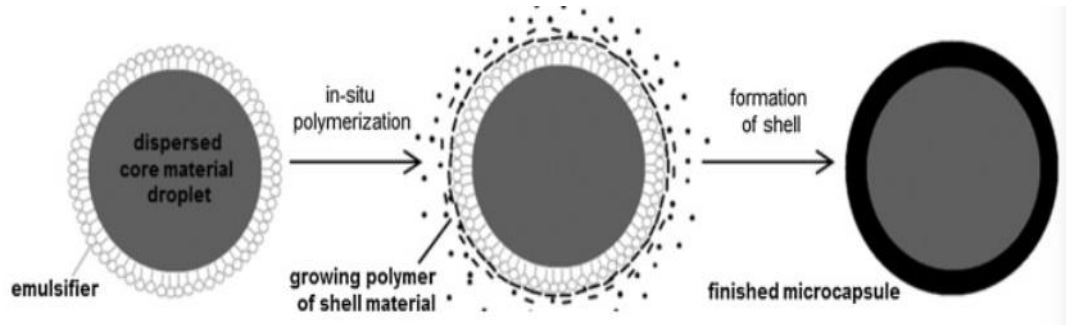
Şekil 1.26 : A-Faz ayrımlı kapsül Sistemi, B-Kapsül Kataliz Sistemi, C-Tek kapsül sistemi, D-Kapsül-Kapsül Sistemi, E-Çift kapsül sistemi (D. Y. Zhu ve diğ, 2015b).

Farklı alternatif mikrokapsülleme teknikleri kullanılmasına rağmen, her teknik kendi kendini onarabilme reaksiyonu için uygun değildir ve ayrıca farklı çekirdek yapılarının enkapsülasyonunda da tek metot yeterli olmayabilir. Bu nedenle doğal olarak/yerinde oluşum polimerizasyonu, yüzeysel polimerizasyon, Pickering emülsiyon tekniği, miniemülsiyon polimerizasyonu, çözücü buharlaşma polimerizasyonu, sol-jel reaksiyonu ve misel tekniği gibi çok çeşitli kapsülasyon yöntemleri bulunmaktadır (G. Li ve diğ, 2015a; Sijbesma ve diğ, 1997). Bunlar arasından en fazla doğal olarak/yerinde oluşum(in-situ) polimerizasyonu, yüzeysel polimerizasyon ve Pickering emülsiyon tekniği kullanılmaktadır.

Doğal olarak/yerinde oluşum(in-situ) polimerizasyonu

Doğal olarak/yerinde oluşum(in-situ) polimerizasyonu, kontrol edilebilir mikrokapsül boyutu ve prosedürün basitliği, sanayileşme kolaylığı, düşük maliyetler ve kabuk kalınlığı gibi birçok avantajlardan dolayı sanayide en fazla tercih edilen yöntemdir (D. Y. Wu ve diğ, 2008).

Mikrokapsül oluşumu Şekil 1.27’de gösterildiği gibi su içinde yağ emülsiyonları veya yağ içinde su emülsiyonları ile ilk önce iki fazlı bir sıvının şiddetli çalkalanması veya sonifikasyonu altında üretilir (Keller, 2013; Urdl ve diğ, 2017; D. Y. Zhu ve diğ, 2015c).



Şekil 1.27 : Yerinde/in situ polimerizasyon ile mikrokapsül oluşumu(Urdl ve diğ, 2017).

Bu konuda çok fazla çalışma yapılmaktadır. Onarıcı ajan olarak disiklopentadien (DCPD) monomeri, izosiyanat monomeri, keten toğumu, tung yağı ve neem yağları son zamanlarda en çok kullanılan onarıcı ajanlardır (S. An ve diğ, 2018; Chaudhari ve diğ, 2013; Marathe ve diğ, 2015). Kabuk yapısı olarak poli(üre-formaldehit) (PUF),

poli(melamin–formaldehit) (PMF), poli(melamin–üre-formaldehit) (PMUF), epoksi en çok kullanılan yapılarıdır (Keller, 2013; D. Y. Zhu ve diğ, 2015c).

Yüzeysel polimerizasyon

Ara yüzey polimerizasyonu, daha önce tartışılan yerinde polimerizasyona benzerdir; hidrofobik ön-polimer veya monomer, kapsülleyici ajan içinde çözülür. Daha sonra, dağılmış fazda çözünür olan başka bir monomer eklenir. Polimerizasyon hemen sulu-organik arayüzeyde veya yakınında meydana gelir, böylece çekirdek malzeme olarak damlacıklarla mikrokapsüller oluşturur. Bu teknik için en yaygın kullanılan mikrokapsüller poliüretan (PU) veya poliamidtir (PA) (Urđl ve diğ, 2017; D. Y. Zhu ve diğ, 2015c).

Pickering emülsiyon polimerizasyonu

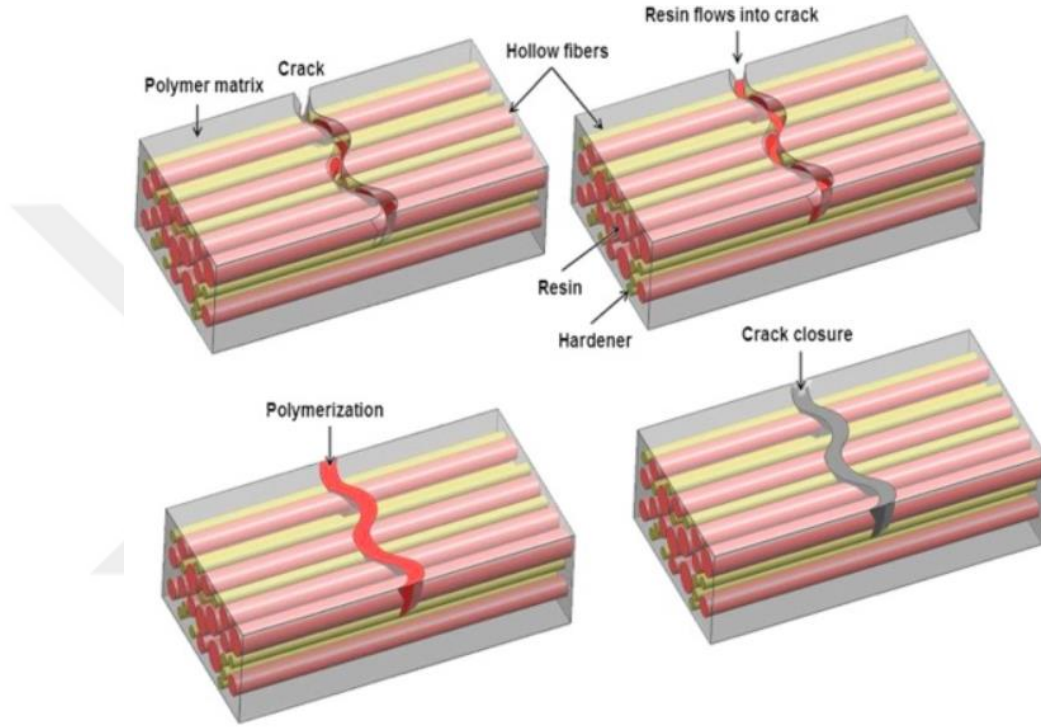
Pickering emülsiyonunda, kolloidal parçacıklar ilk önce mekanik hareketle arayüzde birleştirilir. Daha sonra, kolloidal parçacıklar, kararlı ve kompakt bir kabuk yapısı oluşturmak için fiziksel veya kimyasal çapraz bağlama ile oluşmaktadır. Pickering emülsiyonu, geleneksel emülsiyon sistemleri yoluyla kapsüllemesi zor olan kimyasalları (yani, epoksiyi sertleştirmek için kullanılan aminler) kapsüllemek için iyi bir alternatif yöntemdir (Aveyard ve diğ, 2003; D. Y. Zhu ve diğ, 2015c).

1.4.1.2 Vasküler tabanlı kendi kendini onarabilen malzemeler

Mikrokapsülasyon yöntemindeki en önemli sınırlama, onarıcı ajanın çatlakta uzun bir mesafe boyunca taşınması ve çatlağa büyük hacimlerde onarıcı ajan sağlanmasıdır. Bu problemler, sıvı onarıcı ajanı depolamak ve taşımak için uzun, ince içi boş lifler içeren kendi kendini onarma yöntemi kullanılarak çözülür (Van Der Zwaag, 2010). Vasküler kendi kendini onarabilen prosesin çalışma prensibi, Şekil 1.28'de gösterildiği gibi mikrokapsül yöntemine benzer ama üretim prosesi, onarıcı ajanlar ve matris entegrasyonu yönteminde farklılık gösterir (Coope ve diğ, 2014; Esser-Kahn ve diğ, 2011; Kanu ve diğ, 2019a; Loh ve diğ, 2021a; Norris, Bond, ve diğ, 2011; Norris, Meadway, ve diğ, 2011).

Vasküler onarıcı sistem yöntemi ilk olarak Dry (Dry., 1996) ve Li ve ark. (V. C. Li ve diğ, 1998) tarafından çalışılmıştır. Bu çalışmada onarıcı ajan olarak siyanoakrilat (Shah et. al., 2019); Vita et. al., 2019), etil siyanoakrilat (Zor., 2008) veya metil metakrilat (Mallick., 2007; Kahn et. al., 2019) gibi sıvı kimyasallar kullanılmıştır.

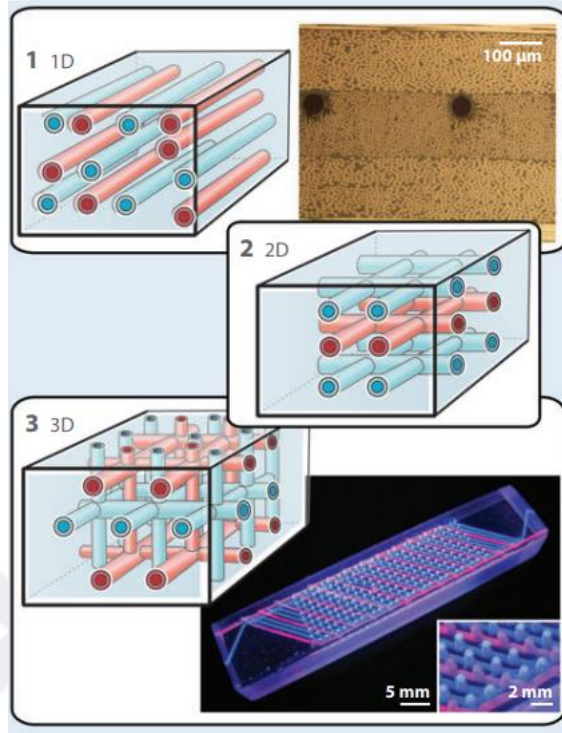
Vasküler sisteminin etkinliği, onarıcı ajanların yapısı, taşıyıcı yapıların (tüp, kanal ve ağ yapısı) mekanik özelliklerine, tetikleyici mekanizmaya ve onarma performansına bağlıdır. Taşıyıcı yapıların (tüp, kanal ve ağ yapısı), boyutu, çapı, şekli ve kanal yapısı, bu proseste önemli bir rol oynamaktadır. Onarıcı ajanların, yüzey ıslanabilirliği, kimyasal reaktivite ve viskozite özellikleri de ön plandadır. Yüksek viskozite ve/veya ıslatma özellikleri kanal yapısının doldurulmasını engellemektedir (White ve diğ, 2011b).



Şekil 1.28 : Vaküler tabanlı kendi kendini onarma mekanizması (Kanu ve diğ, 2019b).

Vasküler yapıda Şekil 1.29'da gösterildiği gibi tek boyutlu, iki (2B) ve üç (3B) boyutlu yapıda kanal/ağ sistemleri bulunmaktadır. Yapılan araştırmalara göre tek boyutlu sistemleri oluşturan kanal yapısında içi boş kanal/ağ ve tek parçalı onarıcı ajan (siyanoakrilat), iki(2B) boyutlu yapılarda içi boş kanal/ağ, reçine ve sertleştirici kullanılmaktadır (Bleay ve diğ, 2001; JE ve diğ, 2020; Kanu ve diğ, 2019b; Pang ve diğ, 2005). Üç boyutlu ağ sisteminin diğer yapılara göre en önemli avantajı onarma prosesinin tekrarlanabilir olmasıdır. Bu sistem insan vücudundan esinlenerek yapılmıştır. Çatlak sırasında yakınındaki ağ yapısı çatlak ve aradaki ara bağlantılarda

onarıcı ajan tükenmediği için proses tekrarlanmaktadır (Bleay ve diğ, 2001; Motuku ve diğ, 1999).



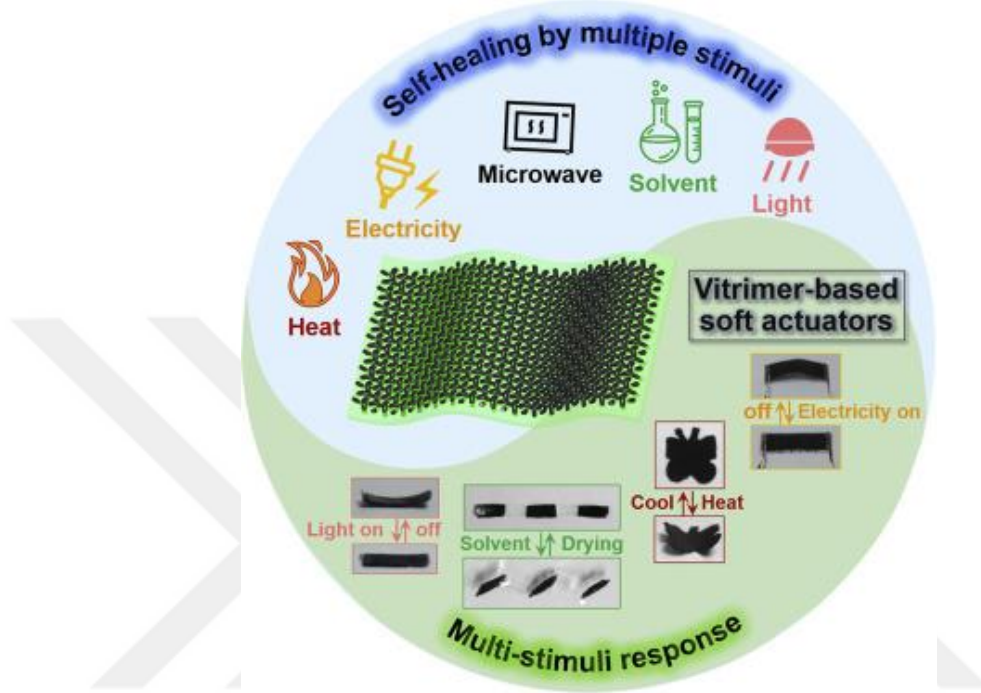
Şekil 1.29 : Vaküler ağ yapısı (Blaiszik ve diğ, 2010).

Vasküler sistemin en önemli avantajı; vasküler yapı içerisinde hasarı onarmak için daha yüksek hacimde onarıcı ajan içermesidir ayrıca farklı aktivasyon yöntemleri/ reçine türleri kullanılabilir. Bu avantajlarının yanında; onarıcı ajanı serbest bırakmak için liflerin kırılması gerekir, elyaf sızmasını kolaylaştırmak için düşük viskoziteli reçine kullanılmalıdır ve vasküler kanal/ağ yapılarının çok aşamalı üretim ile gerçekleşmesi en büyük dezavantajı oluşturmaktadır (Ghosh, 2009).

1.4.2 İçsel (intrinsic) kendi kendini onarabilen malzemeler

Intrinsic kendi kendini onarma mekanizmasında, onarma prosesi onarıcı ajan ve katalizöre gerek kalmadan malzemenin iç yapısında oluşmaktadır. Örneğin Şekil 1.30'da belirtildiği gibi malzemelerin, ısıtma ve soğutma sırasında, termal olarak tersinir reaksiyonları, termoplastik/termoset karışımı, supramoleküler kimya (hidrojen bağı, metal-ligand koordinasyonu, π - π etkileşimi (Sijbesma ve diğ, 1997), iyonomer Varley ve diğ. (2008), dağılık eritilebilir termoplastik faz veya moleküler difüzyon mekanizmaları ile kendi kendini onarma prosesi sağlanmaktadır. Bu proseste

monomer veya katalizör gerekmesede, Şekil 1.30’da gösterildiği gibi ısı Bode ve diğ. (2013); Haraguchi ve diğ. (2011), ışık Ling ve diğ. (2012a), pH L. He ve diğ. (2011); Krogsgaard ve diğ. (2013), tuz Reisch ve diğ. (2014), su X. Wang ve diğ. (2011), elektrik Chuo ve diğ. (2013), manyetik alan gibi faktörler ile kendi kendini onarmanın tetiklenmesi için farklı dış uyaranlar gereklidir (Hia ve diğ, 2016).

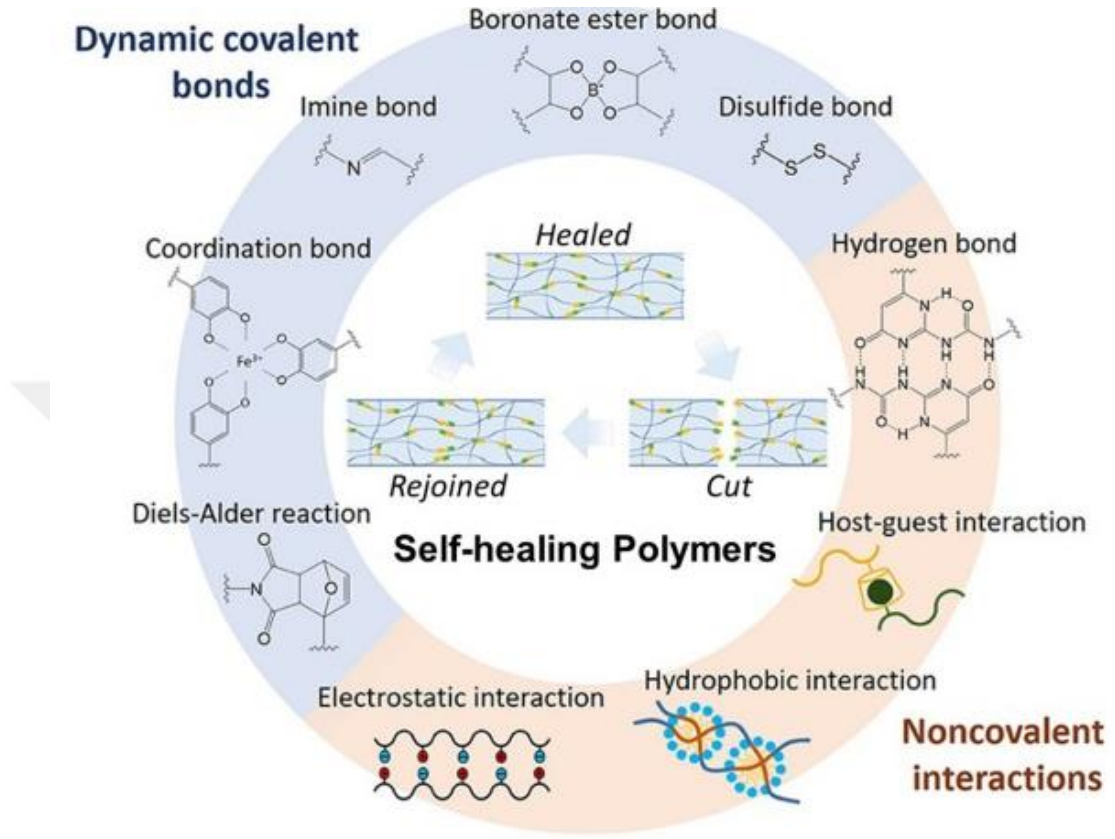


Şekil 1.30 : Kendi kendini onaran polimerlerde uygulanan dış etkenler (Y. Yang ve diğ, 2021).

1.4.2.1 Isı etkisi ile kendi kendini onarma prosesi

Bu yöntemin mikrokapsülasyon veya mikrovasküler prosesine göre en önemli avantajı, ekstra katalizör, onarıcı ajan yada aktive edecek dış kimyasallara gerek duyulmamasıdır. Aynı zamanda bu yöntem ile proses tekrarlanabilir özelliğindedir. Termal olarak aktive edilmiş kendi kendini onaran polimerler arasında Şekil 1.31’de gösterildiği gibi birden fazla teknik bulunmaktadır. Bunlardan en çok Diels-Alder/retro-Diels-Alder reaksiyonu (DA/rDA) kullanılmaktadır. Bu yöntem ilk olarak 1928 yılında Diels ve Alder tarafından geliştirilmiştir (Beiss ve diğ, 2010). Diels-Alder reaksiyonu, konjuge bir dien(sikloheksen) ile bir alken arasında gerçekleşen, geri dönüşümlü bir reaksiyondur. Bu reaksiyonda hasar sırasında sikloheksen halka sistemi içindeki kimyasal bağlar ayrışır ve yüksek sıcaklıkta (~120°C) kırılan bağlar, soğuduktan sonra yeniden şekillenerek retro-DA reaksiyonu ile sonuçlanır.

DA/rDA reaksiyonu, çoklu polimer sistemlerinde (örneğin poliamid, polietilen ve epoksiler) onarma mekanizması olarak kullanılır. Böylece hem matrisi hem de matris-dolgu ara yüzünde onarma gerçekleşir (Canary ve diğ, 1992; Y. L. Liu ve diğ, 2006; Magana ve diğ, 2010; Tian ve diğ, 2010; Y. Zhang ve diğ, 2009; Zhong ve diğ, 2015).



Şekil 1.31 : Kendi kendini onaran polimerlerde kullanılan dinamik kovalent bağların ve kovalent olmayan etkileşimlerin bir özeti (Liu ve diğ, 2018).

Bu yöntemde çok fazla polimerler ile çalışma yapılmıştır. Bunlar arasında furan-maleimit reaksiyonu (100-150°C iyileşme sıcaklığı aralığı) en iyi bilinendir (Murphy ve diğ, 2008; X ve diğ, 2002). Disülfid ile onarma, tiyollerle alifatik disülfid içeren zincirlerin kullanıldığı geleneksel epoksi bazlı termosetlerde kullanılmıştır (Canadell ve diğ, 2011; Garcia, 2014; Lafont ve diğ, 2012; Pepels ve diğ, 2013).

Bi ve ark. (Bi ve diğ, 2021) Diels-Alder reaksiyonunu etkinleştirmek için multi-furan monomeri (dien fonksiyonel grupları içeren) ve maleik anhidrit grupları (CNC-MAH) ile modifiye edilmiş PCL içeren bir polimeri araştırdı. Çalışmanın sonucunda %90 oranında onarma verimlilik elde edilmiştir.

İyonomerler, polimer omurgasına bağlı iyonik metal tuzları şeklinde nötrale edilmiş asit grupları içeren ve elektrostatik etkileşimler oluşturan polimer sistemleridir. Bu gruplar sıcaklık veya UV ışınması gibi dış uyaranlar ile aktive edilip tekrarlanabilir onarma prosesi gerçekleşmektedir. Bu yapılar eskiden beri balistik uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle EMAA polimeri bu proseste kullanılan en yaygın onarıcı ajandır. Yapılan araştırmalara göre balistik uygulamalarda merminin çapından dolayı 1-2mm çapında delikler oluşmaktadır ve bu deliklerde hızlı bir şekilde onarma gerçekleşmektedir. Bu çalışmalar incelendiğinde onarmanın sadece iyonik bağlardan değil aynı zamanda merminin deldiği anda sürtünmeden kaynaklı ısı açığa çıkmakta ve ısı varlığında onarmanın gerçekleştiği kanıtlanmıştır (S. J. Jr. Kalista, 2003; Stephen J Kalista ve diğ, 2006; R. Varley, 2007).

1.4.2.2 Termoset/Termoplastik karışımli kendi kendini onarma prosesi

Mikrokapsülasyon, mikrovasküler ve ısı etkisi ile kendi kendini onarma prosesinin en verimli şekilde kullanılabilmesi için kompozit malzemenin proses sırasında hasar görmeden üretilmesi gerekmektedir. Bu da çoğu zaman çok mümkün olmamaktadır. Bu dezavantajın önüne geçebilmek için onarıcı ajan olarak kullanılabilir katı fazlı termoplastikler geliştirilmiştir. Bu yöntemle termoset matris malzemesine karışılabilir veya karışılmayan özellikte termoplastik onarıcı ajan eklenerek kendi kendini onarma mekanizması sağlanmaktadır. Karışmayan termoplastikler için, onarıcı ajan ısıtılarak eritilir ve daha sonra çatlağa akar. Karışabilir termoplastik için, çatlama ve ardından ısıtma sonrasında, termoplastik, çatlak düzlemini köprüleyen ve onarmayı kolaylaştıran polimer zincirleri ile matris boyunca yayılır (Murphyve diğ, 2010; D. Y. Wu ve diğ, 2008).

Termoplastik takviyesi ile onarma yönteminin diğer kendi-kendini onarma yöntemlerine göre en önemli avantajı, onarma işleminin karmaşık olmaması, ekstra maliyet gerektirmemesi ve birden fazla onarma işleminin gerçekleştirilebilmesidir. Termoplastikler sıcaklığa karşı duyarlı bir plastik grubudur. Termoplastikler ısıtıldıkları zaman yumuşar, soğutuldukları zaman ise sertleşirler. Polimerleşme sırasında kovalent veya van der Waals bağları kurabilirler. Termoplastiklerin birden fazla ısıl işlem görebilme özelliği kendi-kendini onarma yöntemi için de önemli bir özelliktir (D. Y. Wu ve diğ, 2008).

Burada 3 kritik konu bulunmaktadır; bunlardan bir tanesi onarıcı ajanın düşük erime noktası ve vizkoziteli olması, termoset matrisin yüksek sıcaklıklarda katı halde bulunmasıdır. İkinci konu onarıcı ajan, matris ile reaksiyona girmelidir. Üçüncü konu ise onarıcı ajanın onarma sonrasında matris ile kuvvetli bir bağ kurması gerekmektedir. Burada yapılan çalışmalar incelendiğinde onarıcı ajan olarak poli(bisfenol-A-ko-epiklorohidrin Hayes, Jones, ve diğ. (2007); Hayes, Zhang, ve diğ. (2007), poli(ϵ -kaprolakton) (PCL) Rodriguez ve diğ. (2011), poli (etilen-ko-metakrilik) asit (EMAA) (Azevedo do Nascimento ve diğ, 2020a; Hayes, Zhang, ve diğ, 2007; Khomkrit Pingkarawat, 2013; Loh ve diğ, 2021b; Meure ve diğ, 2009, 2012b; Meure, Wu, ve diğ, 2010; Pingkarawat, Wang, ve diğ, 2013a, 2013b; Pingkarawat ve diğ, 2015; Ravandi ve diğ, 2016; R. J. Varley ve diğ, 2013; R. J. Varley ve diğ, 2012b; C. H. Wang ve diğ, 2012; T. Yang ve diğ, 2012a, 2013). Poli (etilen-ko-glisidil metakrilat) (PEGMA), etilen vinil asetat (EVA), akrilonitril bütadiyen stiren (ABS), stiren-etilen-bütadiyen kopolimeri (SEBS) ve Poli (vinil-butiral) (PVB) en çok tercih edilen polimerlerdir (Pingkarawat, Bhat, ve diğ, 2013c; Pingkarawat ve diğ, 2014b; R. J. Varley ve diğ, 2013). Bu proste hasara uğramış bölgelerdeki onarma işlemi, termoplastik onarıcı ajanın ısı varlığında eriyerek termoset matris ile reaksiyona girmesi ile gerçekleşmektedir.

Bu polimerler arasında en fazla epoksi ve karbon-epoksi kompozitlerde çözünmez formda bulunan EMMA polimerleri ile çalışmalar yapılmıştır. EMMA polimeri partikül Meure ve diğ. (2009, 2012b); Meure, Furman, ve diğ. (2010a); R. J. Varley ve diğ. (2013), mikrokapsüllenmiş partikül R. J. Varley ve diğ. (2012b), filament Meure, Furman, ve diğ. (2010a), kumaş R. J. Varley ve diğ. (2012) veya dikiş (Khomkrit ve diğ. (2013); Pingkarawat, Wang, ve diğ. (2013b, 2013c) formlarında kullanılmaktadır.

1.4.2.3 Işık etkisi ile kendi kendini onarma prosesi

Bu proste uygun dalga boyuna sahip ışık varlığında tersinir çapraz bağlı reaksiyon ile kendi kendini onarma prosesi gerçekleşmektedir. Bu tür reaksiyonlar için en büyük sınırlama, ilgili çapraz bağlama birimlerinin mesafesidir. Çapraz bağlanmaların gerçekleşmesi için, en azından ilgili orbitallerin örtüşmesi gerekir. Ayrıca reaksiyonun tersinir olarak gerçekleşmesi için polimerlerin camı geçiş (T_g) sıcaklığının üzerinde olması gerekmektedir.

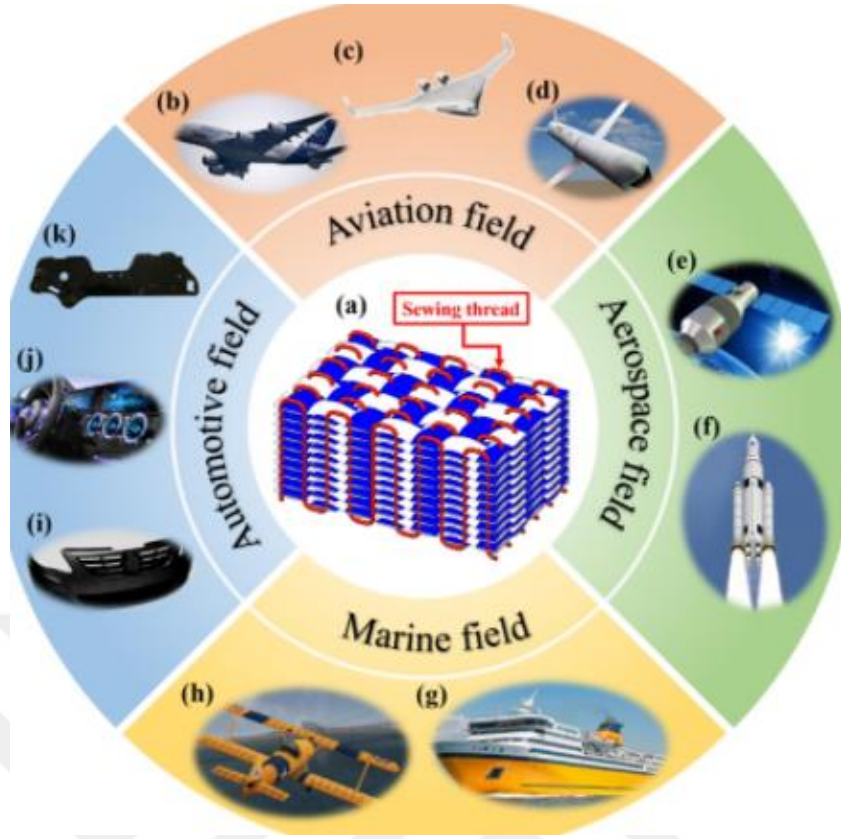
Bu proseste [2+2], [2+4] [4+4] siklo katkılar ve monomer olarak sinnamat veya kumarin en fazla bilinen ışık varlığında kendi kendini onaran polimerlerdir. Yapılan çalışmalara bakıldığında çoğunlukla [2+2] siklo katkısı kumarin türevleri ile, [4+4] siklo katkısı antresen türevleri ile çalışmalar yapılmıştır (Aguirresarobe ve diğ, 2016, 2021; Fang ve diğ, 2017; Ling ve diğ, 2011, 2012b).

Yang ve ark (S. Yang ve diğ, 2020) çalışmasında ışık etkisinin, çapraz bağlayıcılar ve foto-termal dolgu maddeleri olarak işlev gören furanla modifiye edilmiş polidopamin parçacıkları (f-PDAP'ler) ile maleimitle modifiye edilmiş poliüretan faz değişim malzemelerine olan etkisini araştırmıştır. Çalışma sonucunda %93,1 onarma verimliliği ve %87,9 foto-termal dönüşüm verimliliği elde edilmiştir.

İçsel olarak kendi kendini onarabilen mekanizmalar arasında, termoset matris içerisine ısı varlığında eriyebilir termoplastik katkılar eklenmesi, matris çatlamalarının onarılması ve delaminasyon oluşumunun önlenmesi açısından kullanılan yaygın yöntemlerdendir (Pingkarawat ve diğ, 2014c). Delaminasyonlu yapılarda kendi kendini onarma prosesinde, onarıcı ajanlar polimer matris içerisine tanecik veya katı partiküller, fiberler yada dikişli filamentler olarak eklenmektedir (S. J. Kalista ve diğ, 2007; S. J. Kalista ve diğ, 2007; Meure ve diğ, 2012a; Meure, Furman, ve diğ, 2010a; Pingkarawat ve diğ, 2012a; R. J. Varley ve diğ, 2012; T. Yang ve diğ, 2012a, 2013).

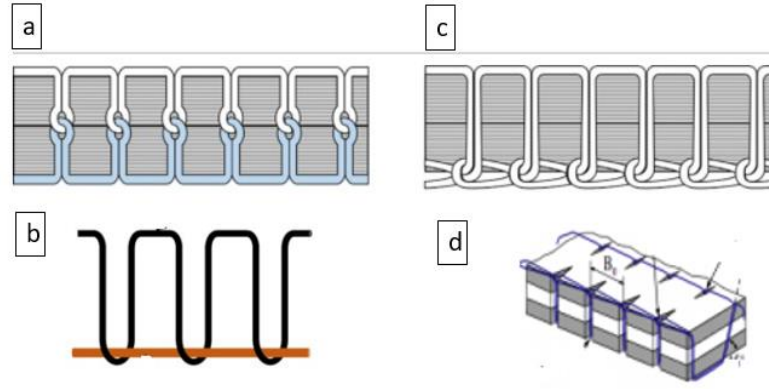
1.4.3 Kompozit Malzemelerin Dikiş Prosesi İle Üretimi

Yaygın olarak kullanılan iki boyutlu (2B) kompozit yapılar, yüksek düzlem içi sertlikleri ve mukavemetleri nedeniyle Şekil 1.32'de gösterildiği havacılık, elektronik ve otomotiv endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.



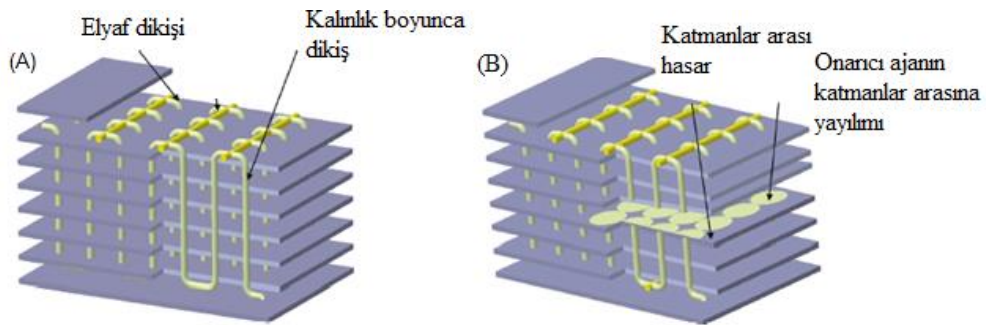
Şekil 1.32 : Dikişli kompozitlerin şematik diyagramı ve ilgili uygulama alanları. (a) Dikişli kompozit yapı; (b) Airbus A380; (c) Hibrit Kanat Gövdesi: ABD X-48B uçağı; (d) güdümlü füze; (e) yapay uydu; (f) roketin perdesi; (g) buharlı gemi; (h) otonom sualtı planör (K.-M. Li ve diğ, 2015; C. Song ve diğ, 2021; Wittig, 2001).

Fakat bununla birlikte, 2B kompozitlerin tabakalar arası mukavemetlerinin zayıf olması en önemli dezavantajı oluşturmaktadır. Bu nedenle 3B örme, 3B dokuma ve 3B dikiş gibi üç boyutlu (3B) tekstil üretim teknolojileri geliştirilmektedir (C. Song ve diğ, 2021). Polimer matrisli kompozit malzemelerde katmanlar arası ve kırılma özelliklerinin onarılması, max %1 oranında ağırlık artışı sağlayan tanecik veya filamentlerin eklenmesiyle elde edilebilirler (Beier ve diğ, 2007; Domun ve diğ, 2017; Drake ve diğ, 2021; Mouritz ve diğ, 1997; Mouritz ve diğ, 2000b). 3B kompozit malzemelerin üretilmesinde filamentler kalınlık boyunca kumaş üzerinde kullanılmaktadırlar (Ahn ve diğ, 2017; Dau ve diğ, 2016). Bu konuda Şekil 1.33'te gösterildiği gibi çeşitli dikiş prosesleri bulunmaktadır. Kompozit malzemelerde kullanılan en yaygın proses modifiyeli kilit dikişidir (Mouritz ve diğ, 2000a).



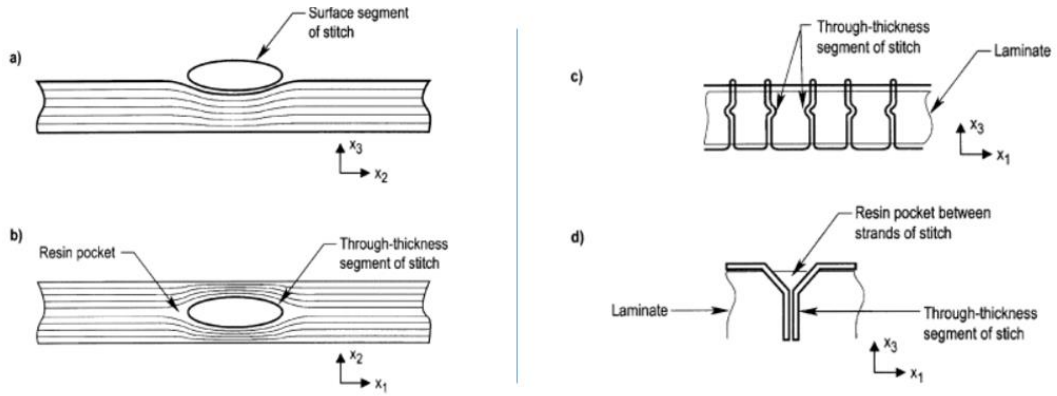
Şekil 1.33 : a) kilit dikişi, (b) modifiye kilit dikişi, (c) zincir dikişi ve (d) çift kilit dikişi (W. J. An ve diğ, 2019; W. Song ve diğ, 2021).

Dokuma, örgü veya ipliklerin dikiş yöntemi kullanılarak kompozit laminalar arasında yerleştirilip 3 boyutlu(3B) kompozit malzeme elde edilmesi, kendi kendini onarabilen kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılan en etkili yöntemdir. Kompozit malzemelerin dikimi, hem kuru kumaşın hem de kürlenmemiş prepreg tabakalarının dikilmesine izin verdiği için diğer tekstil işlemlerine göre avantajlıdır (Jain ve diğ, 1998). Katmanlı kompozitlerin şekik 1.34'te gösterildiği gibi kalınlık boyunca dikilmesi, yapışkan ve mekanik bağları ortadan kaldırarak yapısal sürekliliği korurken tabakalar arası çekme ve kesme mukavemetlerini artırmak için gerekli kalınlık boyunca takviye sağlar. Bu yöntem ile kompozit malzemelerin düzlem içi mukavemeti, katmanlararası kırılma tokluğu Mouritz ve diğ. (1999); Sridhar ve diğ. (2002), darbe hasar toleransı Tada ve diğ. (1989) ve gerilme mukavemeti artmaktadır. Ayrıca düşük ve yüksek enerji, dinamik yükleme ve balistik etkiler altında delaminasyon çatlakına karşı yüksek dirence sahiptir (Jain ve diğ, 1998; Mouritz, 1995).



Şekil 1.34 : EMAA filamentleri ile dikilmiş karbon elyaf-epoksi kompozitinin öncesi (A) ve sonrası (B) (Yudhanto ve diğ, 2014).

Dikişli kompozit malzemelerin avantajları olduğu kadar dezavantajları da bulunmaktadır (Dransfield ve diğ., 1993, 1994a; Jain ve diğ., 1998; Mouritz, 1995). Özellikle dikiş yoğunluğu (dikiş/alan), doğrusal iplik yoğunluğu (kütle/uzunluk), dikiş dağılımı, dikiş stili, dikiş ön gerilimi Dransfield ve diğ. (1994b), dikiş iğnesi çapı ve iğne çapına bağlı olarak prepreg veya kumaştan geçtiğinde Şekil 1.35'te gösterildiği gibi yapıda bir boşluk oluşması ve liflerin birbirinden ayrılması başlıca dezavantaj oluşturmaktadır (Benson Dexter ve diğ., 1986; D. Liu, 1987). Ayrıca iğne prepreg veya kumaştan kolayca geçemediğinde, reçine açısından zengin bölgeler, gözeneklilik, düzlem içi ve düzlem dışı liflerin kayması, liflerin kırılması ve reçine arasında çatlak oluşumu meydana gelebilir (Aymerich ve diğ., 2003; Farley ve diğ., 2016a; Farley ve diğ., 2016; W. Song ve diğ., 2021).



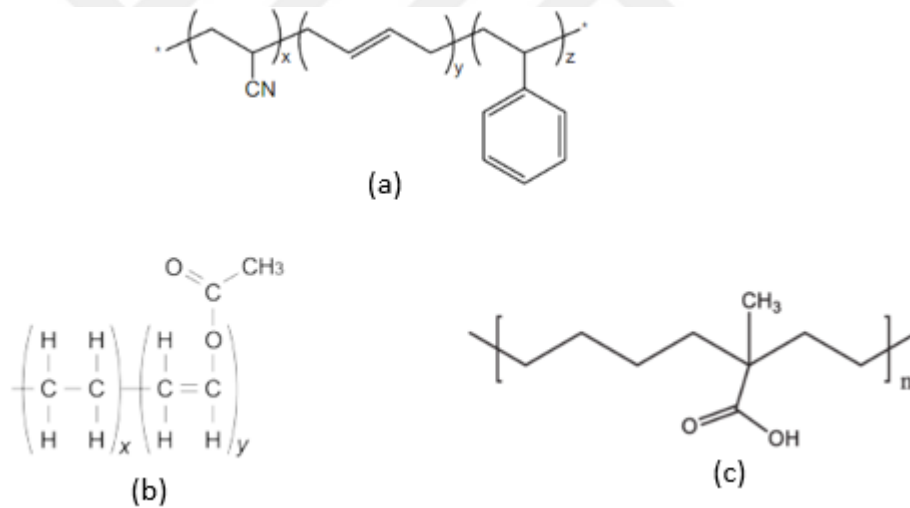
Şekil 1.35 : Dikişin neden olduğu bozulmaların şeması (Mouritz ve diğ., 2000b).

Bu nedenle genel olarak elde edilen 3 boyutlu kompozit malzemelerin yapısı, dikiş yoğunluğuna, filament yapısı ve çapına, dikiş iğnesi yapısı ve çapına, dikiş sıralarının James ve diğ. (2014) yönüne ve işleme tekniğine Williams ve diğ. (2007) bağlı olarak kontrol edilebilir.

Kompozitlerin dikim prosesi çoğunlukla karbon ve cam elyaflar üzerinde yoğunlaşılsa da Kevlar® fiber ve Spectra® konusunda da çalışmalar bulunmaktadır. Morales, Mouritz (Mouritz ve diğ., 2000b) ve Dransfield ve ark. (Dransfield ve diğ., 1994b), Zhan (H. Zhang ve diğ., 2021) endüstriyel bir dikiş makinesi kullanarak, genellikle karbon, cam veya Kevlar'dan yapılmış yüksek gerilimli bir ipliğin laminat yapı boyunca dikilmesi üzerinde çalışmaları bulunmaktadır.

Kompozit malzemelerde kendi kendini onaran malzemelerde, dikiş yöntemi ile sadece poli (etilen-ko-metakrilik) asit (EMAA) polimeri ile çalışılmıştır (Azevedo do Nascimento ve diğ, 2020b; Gao ve diğ, 2019; Pingkarawat ve diğ, 2016; Pingkarawat ve diğ, 2015). Bunların dışında Poli (etilen-ko-glisidil metakrilat) (PEGMA) Pingkarawat, Bhat, ve diğ. (2013c); Pingkarawat ve diğ. (2014b); R. J. Varley ve diğ, (2013), Etilen vinil asetat (EVA) Pingkarawat, Bhat, ve diğ. (2013a, 2014b); R. J. Varley ve diğ. (2013), Akrilonitril bütadiyen stiren (ABS) Pingkarawat, Bhat, ve diğ. (2013a), Stiren-etilen-bütadiyen kopolimeri (SEBS) R. J. Varley ve diğ. (2013) ve Poli (vinil-butiral) (PVB); R. J. Varley ve diğ. (2013) polimerleri tanecik olarak epoksi matris içerisinde kullanılmıştır.

Dikiş prosesi ile dikey yöndeki filamentlerin paralel sıradaki komşu filamentlerle etkileşmesi sonucunda, termoplastik polimerlerin hasarlı bölgeye daha aktif ve hızlı yayılacağı düşünülerek, kimyasal yapısı Şekil 1.36’da gösterildiği gibi EMAA, ABS ve EVA’nın onarma verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir.



Şekil 1.36 : Onarıcı ajanların kimyasal yapısı, fonksiyonel grup ve polimer yapılarını göstermektedir. (a) Akrilonitril Bütadiyen Stiren (ABS), (b) Etilen Vinil Asetat (EVA), (c) Poli (etilen-metakrilik asit) (EMAA) (R. J. Varley ve diğ, 2013).

Gittikçe önemi artan kendi kendini onarabilen “self-healing” kompozitlerin uygulama noktaları incelendiğinde öncelikle havacılıkta yada uçakların farklı bölgelerinde uygulamaları bulunmaktadır. Mikrokapsülasyon yöntemi uygulamalarında, kanatlar yada farklı yerlerde termoset içerisinde mikrokapsülasyon enjekte edilecektir. Bu bölgeler gereğinden fazla yüke maruz kaldığında yada hasar gördüğünde kendi kendini

onarabilen özelliikte mikrokapsülasyon ile karşılaşılarak onarıma gerçekleşmektedir (Havacılığın Geleceği Kompozit Malzemede Nedir, 2020).

Ayrıca bir diğer uygulama yönteminde kanat yada diğer bölmelerde fiber sistemler bulunmaktadır. Bu fiberler hasarlı parçaları bildirmektedir. Gelecekte kompozit malzemeler içerisinde nanofiberler belli bir düzende yerleştirilecektir. Bu fiberlerin açıları değiştiğinde yapı hasar gördüğü anlamına gelecek ve sinyal gönderme işlemi ile hasarlı yapı tespit edilecektir. Böylece bu projede önerdiğimiz dikişli yapıdaki kompozit malzemelere dışarıdan ısı uygulanarak onarılması sağlanacaktır (Havacılığın Geleceği Kompozit Malzeme Nedir, 2020).

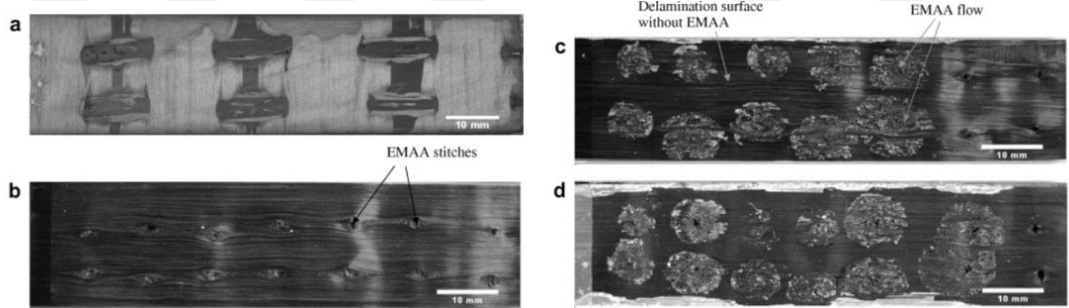
Literatürde dikiş prosesi ile kendi kendini onarma çalışmalarında sadece EMAA termoplastik polimeri kullanılmıştır. ABS ve EVA polimerleri ile çalışmalar tanecik boyutunda yapılmış ve onarma verimliliği oldukça düşük olduğu saptanmıştır. Bu çalışmada

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

EMAA'nın EMAA'nın onarıcı ajan olarak kompozitlerde kullanımı, ilk defa Meure ve arkadaşları tarafından ortaya konulmuştur. EMAA, tanecik ve lif şeklinde kullanılarak onarma özelliği kırılmadan önce ve sonra mod I tabakalar arası kırılma tokluğu testleri yapılarak gerçekleştirilmiştir. Onarma prosesinde, polimer zincirlerindeki asit grupları ile epoksi reçinesindeki amin gruplarının 30dk boyunca ısı varlığındaki (150°C) reaksiyonu sonucunda %100'den fazla geri kazanıldığı tespit edilmiştir (Meure, Furman ve diğ, 2010a).

Filament formu kullanılarak dikiş prosesi ile hazırlanmış üç boyutlu kompozit malzemelerin kendi kendini onarma çalışmaları aşağıda özetlenmiştir.

Yang ve ark. EMAA termoplastik filamentleri kullanılarak dikiş prosesi ile oluşturulmuş üç boyutlu kompozit malzemelerin, delaminasyon tokluğu ve kendi kendini onarabilme verimliliğini araştırmışlardır. Dikişler, delaminasyon büyümesi sırasında çatlak köprüsü oluşturarak Şekil 2.1 de gösterildiği gibi birden fazla kez onarma mekanizması gerçekleştirdiğini ve Mod-I tabakalar arası kırılma tokluğunu %150'den fazla arttırdığı kanıtlamıştır (T. Yang ve diğ, 2012b).



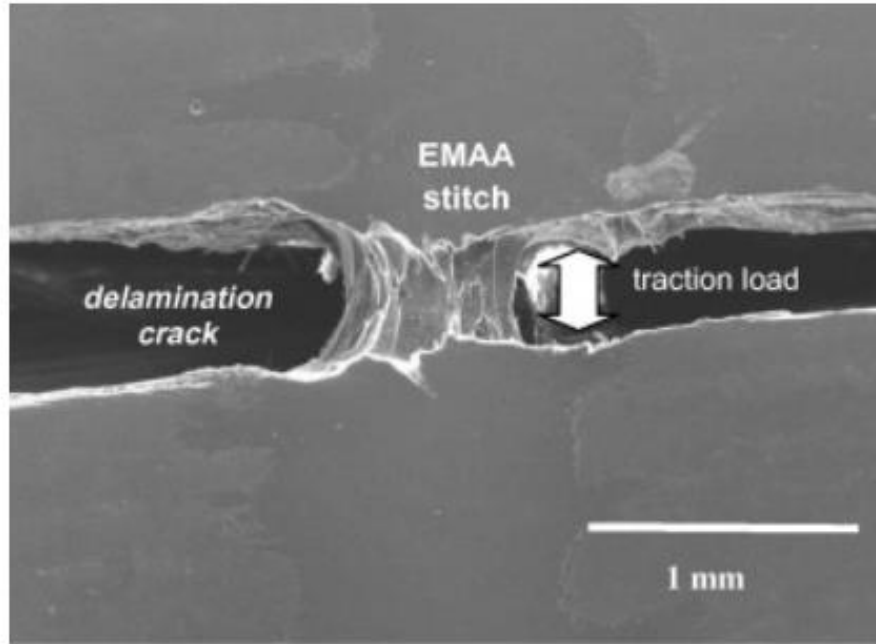
Şekil 2.1 : (a) EMAA dikişi, (b) onarmadan önce kırılma yüzeyleri, (c) ilk onarmadan sonra ve (d) ikinci onarmadan sonraki dikişli DCB örnekleri (T. Yang ve diğ, 2012b).

Katmanlar arası kırılma ve matris çatlakları en çok T-bağlantı ve eklem noktalarında gerçekleşmektedir. Yang ve ark., tarafından karbon-epoksi T-bağlantı noktalarının EMAA filamentleri ile dikilerek, kompozit T-bağlantılarının katmanlar arası tokluk ve kendi kendini onarma özellikleri incelenmiştir (T. Yang ve diğ, 2012a).

Pingkarawat ve arkadaşlarının bir diğer çalışmasında termoplastik filamentler ile dikilmiş 3 boyutlu kompozit malzemelerin kırılma tokluğu, mekanik özellikleri ve Mod-I ve Mod-II testleri ile onarma verimlilikleri incelenmiştir. Çalışma sonucunda

tabakalar arası kırılma tokluğuna (%35-650) ve onarma verimliliğine (%50-250) yönelik yüzde iyileştirmeler, termoplastik dikişin neden olduğu mekanik özelliklerdeki azalmalardan (%50'den az) çok daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca Mod I ve Mod II katmanlar arası kırılma tokluğunun, termoplastik dikişlerin boyutu ve alan yoğunluğu ile hızla arttığı saptanmıştır (Pingkarawat ve diğ, 2015).

Aynı şekilde Pingkarawat ve arkadaşları tarafından dikiş yoğunluğunun, katmanlar arası kırılma tokluğu ve kompozit yapının onarılması üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Dikiş yoğunluğu arttıkça yapının tokluğu ve Şekil 2.2 de gösterildiği gibi çatlak köprü bölgesi uzunluğunu artmıştır. Bu dikişler tarafından oluşturulan köprü traksiyon yükü, orijinal dikişlerin yüküne benzediği için onarılma sonrasında yüksek kırılma tokluğunu korunmuştur (Pingkarawat, Wang, ve diğ, 2013c).



Şekil 2.2 : Çatlak köprüleme bölgesi (Pingkarawat, Wang, ve diğ, 2013c).

EMAAs, EVA ve ABS termoplastik polimerlerinin tanecik ve diğ er formlarda kullanılarak elde edilen kompozit malzemelerin kendi kendini onarma çalışmaları aşağıda özetlenmiştir;

Nascimento ve ekibi (Azevedo do Nascimento ve diğ, 2020c) tarafından tanecik boyutunda EMAAs termoplastik polimerin, %5, %10 ve %15 konsantrasyonlarında kullanılarak karbon-epoksi kompozit malzemelerin kendi kendini onarma üzerindeki etkisi incelenmiştir. %5 konsantrasyonda EMAAs polimerinin kompozit malzemelerin

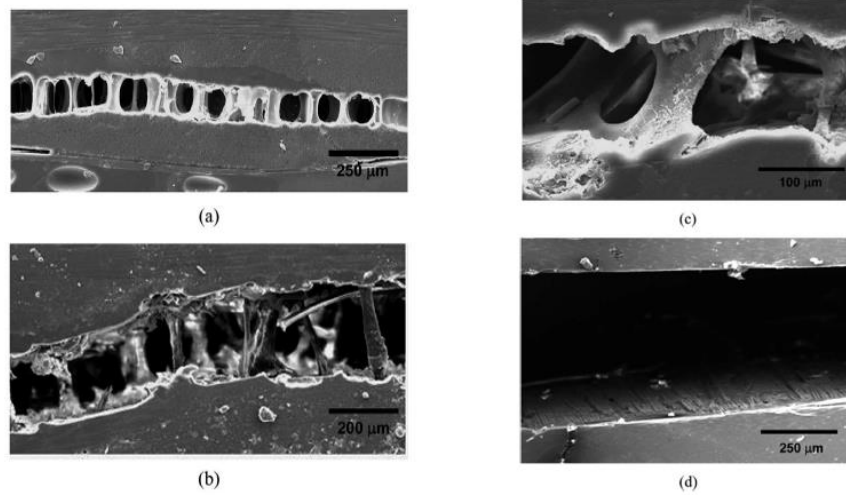
mekanik özelliklerinde %22 minimum azaltma ve onarma performansını %109 oranında maksimum arttığı tespit edilmiştir.

Loh ve ark. çalışmalarında 1mm çapında kullanılan EMAA filamentlerinin, karbon fiber liflerden örülmüş kumaş üzerine entegre edilerek üç tekrarlı proses ile kendi kendini onarma performansı çalışılmıştır. Test sonuçlarına göre %100 üzerinde onarma verimliliği elde edildiği ve EMAA-4 ve EMAA-16 kompozit malzemelerin kırılma tokluğunu sırasıyla %395 ve %240 arttığı belirtilmiştir (Loh ve diğ, 2021c).

Pingkarawat ve ekibi tarafından, EMAA'in filament olarak dikişli yapı oluşturması dışında kumaş ve partikül olarak kullanılarak kendi kendini onarma verimliliği çalışılmıştır (G. Li ve diğ, 2015b).

Meure ve ark. tanecik ve lif formunda kullanılan EMAA polimerinin, dokuma karbon kumaş üzerindeki onarmadan önce ve sonraki katmanlar arası kırılma tokluğu değerleri incelenmiştir. Onarma prosesi 10 tekrar olarak gerçekleştirilmiştir. Tanecik veya lif şeklinde kullanımının verimliliği değiştirmedeği ve onarma verimliliğinin %100'den fazla gerçekleştiği bulunmuştur (Meure, Furman ve diğ, 2010b).

Pingkarawat ve ark. tarafından kendi kendine onarma mekanizmasında EMAA, PEGMA, EVA ve ABS gibi alternatif termoplastik onarıcı ajanların epoksi içerisinde tanecik olarak kullanımı üzerinde çalışılmıştır. Şekil 2.3'te gösterildiği gibi yapılan testlere göre katmanlar arası kırılma tokluğu PEGMA(%25) ve EMAA(%63)'in karbon-epoksi matris içerisinde onarma verimlilikleri farklı olsada, benzer reaksiyon gerçekleştirmiş, EVA (%260) ise yüksek yapışma mukavemeti ve vizkozitesinin çok düşük olmasından kaynaklı onarma verimliliği yüksek gerçekleşmiştir. ABS ile epoksi arasında reaksiyon gerçekleşmemiş ve bu yüzden onarma gerçekleşmediği kanıtlanmıştır (Pingkarawat, Bhat ve diğ, 2013c).



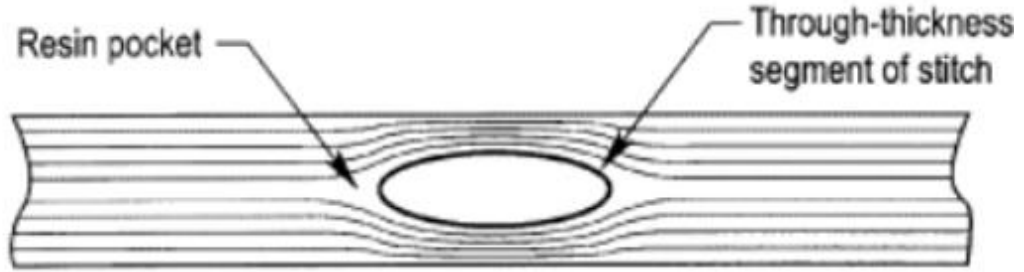
Şekil 2.3 : (a) EMAA, (b) PEGMA, (c) EVA (d) ABS içeren kompozitlerde onarmadan sonra delaminasyon çatlakları (Pingkarawat, Bhat, ve diğ, 2013c).

Pingkarawat tarafından (Pingkarawat ve diğ, 2014b) tanecik boyutunda EMAA, PEGMA ve EVA termoplastik polimerlerin, farklı konsantrasyonlarda kullanılarak karbon-epoksi kompozitlerdeki onarıma üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmaya bakıldığında kompozit malzemelerdeki karbon içeriği ve kalınlık artışı, polimerlerin yapısına bağlı olmadığı, onarma verimliliğinin ise polimerlerin viskozitesine bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Aynı şekilde Varley ve ekibinin çalışmasında EMAA, EVA, PEGMA, ABS, SEBS ve PVB gibi farklı onarıcı ajanların, onarma mekanizmaları incelenmiştir. Bu çalışmada onarma prosesi üzerindeki en önemli etkinin polimerlerin yapısı ve özellikle de viskozitesi olduğu tespit edilmiştir. EMAA ve PEGMA'in yapılarında asit grupları içermesi epoksi ile reaksiyona girmesinden dolayı onarma verimlilikleri yüksek olmuştur. ABS ve SEBS yapılarında fonksiyonel gruplar içermemesi ve yüksek viskozitesinden kaynaklı onarma verimlilikleri çok düşüktür. EVA'in ise çok düşük viskozitesi bulunmakta ve çok iyi yapışma özelliği gösterdiği için onarma verimlilikleri EMAA'dan sonra en iyisi olduğu saptanmıştır. Genel anlamda çalışmaya baktığımızda tüm termoplastik polimerlerin farklı verimliliklerde de olsa onarıcı ajan olarak kullanılabileceği kanıtlanmıştır (R. J. Varley ve diğ. 2013).

Bunların dışında Mouritz ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada onarıma özelliği göstermeyen karbon, aramid, Spectra veya cam filamentleri ile dikilmiş kompozitlerin, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi elyaf yönlendirmesinin bozulmasından kaynaklı, elastik

modülü, kırılma gerilimi veya servis ömrü gibi mekanik özelliklerine etkisi çalışılmıştır. Dikişin katmanlar arası kırılma mukavemetini yaklaşık %15–20'den fazla arttırmadığı veya azaltmadığı tespit edilmiştir (Mouritz ve diğ 2000a, 2010a).



Şekil 2.4 : Laminatın iç kısmındaki bir dikiş etrafında düzlem içi liflerin düzlem dışı sapması.

Varley ve Parn, EMAA'yı, dokuma bir karbon kumaş epoksi kompozitin içine gömülmüş dokuma olmayan bir ağ şeklinde araştırmıştır. Mod I tabakalar arası kırılma tokluğu testine göre onarma verimliliği, EMAA konsantrasyonuna göre artarak %200'ün üzerinde verimlilik elde edilmiştir (R. J. Varley ve diğ, 2012).

Bu tezin amacı kendi kendini onaran karbon elyaf takviyeli kompozit üretilmesidir. Bu amaçla, bu tezde öncelikle 0.6, 0.8 ve 1.0mm olmak üzere 3 farklı çapta EMAA, ABS ve EVA termoplastik filamentleri üretilmiştir. Ardından karbon prepregler bu filamentler ile dikilerek kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen filamentlerin ve kompozitlerin mekanik, morfolojik, yapısal özellikleri ölçülmüştür. Ayrıca elde edilen kompozit malzemelerin kendi kendini onarma performansı test edilerek değerlendirilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, 0,6, 0,8 ve 1,0mm çaplarında EMAA, ABS ve EVA termoplastik filamentlerinin hazırlanması, bu filamentlerin karbon-epoksi prepreg malzemesi ile dikilerek 3 boyutlu kompozit malzeme elde edilmesi ve elde edilen bu malzemelerin kürlenerek mekanik ve kendi kendini onarabilme özelliklerinin araştırılması açıklanmıştır.

3.1 Malzemeler

Bu çalışmada enjeksiyon prosesine uygun EMAA, ABS ve EVA polimerleri tercih edilmiştir.

3.1.1 Akrilonitril bütadiyen stiren (ABS)

ABS polimeri ticari adı ABS HI100 olan RESINEX firmalarından temin edilmiştir. Polimerin bazı özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : ABS polimerinin özellikleri.

Kimyasal özellikleri	Standart	Birim	Değer
MFI	ASTM D1238	g/20dk	12
Yoğunluk	ASTM D792	g/cm ³	1,02
Çekme Modülü	ASTM D638	kg/cm ²	16.400
Eğilme Modülü	ASTM D790	kg/cm ²	18,500
Darbe Testi (23C)	ASTM D256	kg/cm ²	43

ABS, opak, amorf bir polimerdir. Şekil 3.1 de gösterildiği gibi stiren, akrilonitril ve bütadiyen elementlerinin polimerizasyonundan oluşan önemli mühendislik

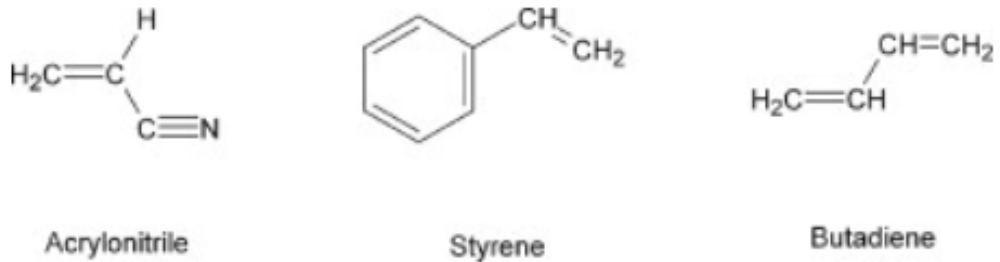
plastiklerinden birisidir. İçerdiği polimer hammadde oranları 15%-35% arası akrilonitril, 5%-30% arası butadien ve 40%-60% arası stiren olarak değişkenlik göstermektedir. ABS geniş bir kullanım alanına sahiptir. Çünkü yapısındaki her bir bileşenin farklı özellikleri bulunmaktadır (McKeen, 2010);

Akrilonitril, ısı ve kimyasal direnç, uzun süreli termal stabilite ve tokluğu; **Bütadiyen**, darbe mukavemeti ve düşük sıcaklıkta mekanik özelliklerini korumayı; **Stiren**, sertliği, yüzey parlaklığı ve kolay işlenebilirliği sağlamaktadır (McKeen, 2010).

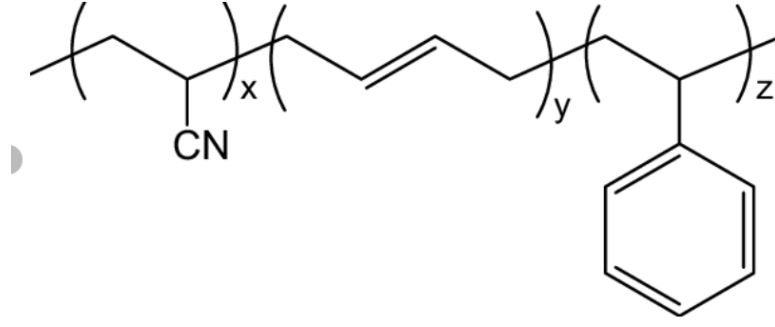
ABS polimerinin elektriksel yalıtıma yüksektir, kimyasal direnci fazladır, üretimi kolaydır, darbelere dayanıklıdır, su ve rutubetten etkilenmez, UV dayanımı yüksektir, iyi bir yüzey kalitesine sahiptir, esnek tasarım kolaylığı ve boyutsal kararlılığının yüksek olması gibi çok çeşitli özellikleri bulunmaktadır. Fakat buharlarının kanserojen olması en büyük dezavantajı oluşturmaktadır (Nabi ve diğ, 2021; Qiu ve diğ, 2019).

ABS iyi mekanik ve işleme özelliklerinden dolayı günlük hayatta elektronik ev aletleri gövdelerinde, telefonlar ve oyuncaklarda kullanılmaktadır. Diğer önemli kullanım alanları ise inşaat, makine, elektronik ve otomotiv gibi endüstriyel sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Nabi ve diğ, 2021; Qiu ve diğ, 2019).

ABS, epoksi gruplarıyla reaksiyona giren doymamış hidrokarbon (C=OH) ve nitril gruplarını (C=N) içerir. Ancak yüksek erime sıcaklığı (~210°C), yüksek viskozitesi ($3,4 \cdot 10^{-4}$ Pa.s), düşük camsı geçiş sıcaklığı (~110°C) ve zayıf yapışma özelliği bulunmaktadır (Pingkarawat ve diğ, 2014a).



Şekil 3.1 : ABS oluşturan malzemelerin kimyasal yapısı (McKeen, 2010).



Şekil 3.1 (devam): ABS oluşturan malzemelerin kimyasal yapısı (McKeen, 2010).

3.1.2 Etilen vinil asetat (EVA)

EVA polimeri ticari adı Greenfleks ML olan RESINEX firmalarından temin edilmiştir.

Polimerin bazı özellikleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 : EVA polimerinin özellikleri.

Kimyasal özellikleri	Standart	Birim	Değer
MFI	ISO 1133	g/10dk	2,5
Yoğunluk	ISO 1133	g/cm ³	0,941
Çekme mukavemeti	ISO 527	MPa	
Eğilme Modülü	ISO 178	MPa	40
Vinil asetat içeriği		%	19

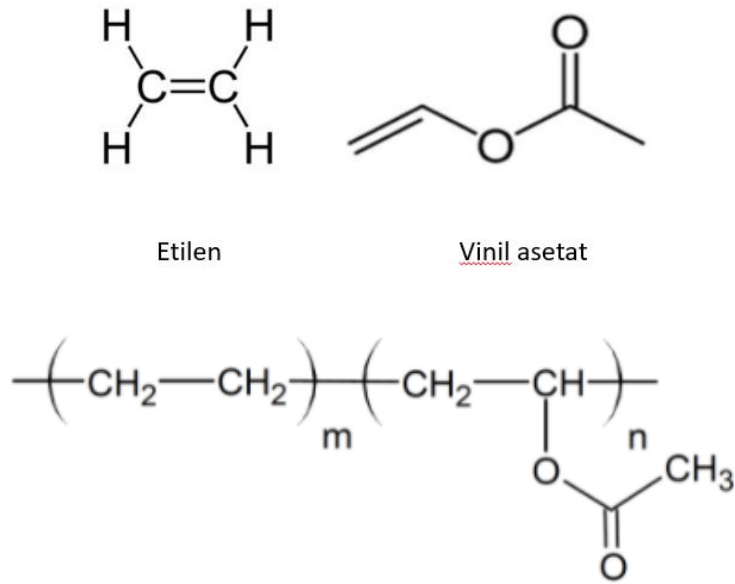
EVA şeffaf, yüksek mekanik mukavemete sahip, esnek, kauçumsu özellik gösteren bir termoplastik kopolimerdir. Şekil 3.2’de gösterildiği gibi değişen miktarlarda vinil asetat (VA) ve etilen ile üretilir. EVA düşük sıcaklıkta sertlik, basınç, çarpmalara ve UV ışınlarına karşı dirençlidir.

Son özellik, vinil asetat (VA) içeriğine bağlıdır. Kristallliği, erime noktası ve sertliği yapısında bulunan VA içeriği belirler. Genellikle VA oranı %1-40 arasında

değişmektedir. EVA'da, VA içeriği arttıkça kristallliği azalır, dolayısıyla erime sıcaklığı (T_m) düşer. Daha yumuşak ve daha elastikiyet yapıda olur. Darbe mukavemeti ve yırtılma direnci artar. EVA'da camsı geçiş sıcaklığı (T_g), VA oranından etkilenmez ve (-35) ve (-25) arasındadır (Almeida ve diğ, 2011; Arsac ve diğ, 2000; Schneider ve diğ, 2017). EVA saf halde veya diğer termoplastik polimerlerle karışımlarında çok çeşitli sanayi uygulamalarında kullanım alanına sahiptir. Bunlardan bazıları;

- Endüstriyel tarım ve gıda şişirme film uygulamaları
- Esnek profil ve borular
- Güneş pili kapsülleme
- Kablo uygulamaları da dahil olmak üzere çok çeşitli bileşikler
- Ayakkabı , bina ve koruma köpükleri
- Hot-Melt yapıştırıcılar

EVA'daki VA oranındaki artış, C=O gruplarının ortaya çıkmasına ve RCOO^- gruplarının oluşmasına neden olur. EVA, epoksi ile tam olarak reaksiyona girmez ancak yapısında RCOO^- grupları oluştuğunda reaksiyon gerçekleşir (Izdebska, 2016). Yüksek yapışkanlık özelliği de bulunmaktadır. Diğer termoplastiklerle karşılaştırıldığında, ısı varlığında çok daha düşük viskoziteye sahiptir ve sıvı benzeri bir davranış sergiler, böylece delaminasyonlu bölgelerde, ısı etkisi ile çatlaklara kolayca nüfuz eder (Hia ve diğ 2016; R. J. Varley ve diğ, 2013).



Şekil 3.2 : EVA kimyasal yapısı (Arsac ve diğ, 2000).

3.1.3 Poli (etilen-metakrilik) asit (EMAA)

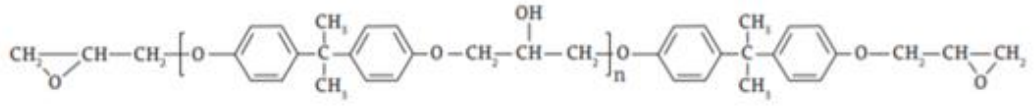
EMAA polimeri ticari adı Nucrel® 2940 olan DuPont firmasından temin edilmiştir. Polimerin bazı özellikleri Çizelge 3.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3 : EMAA polimerinin özellikleri.

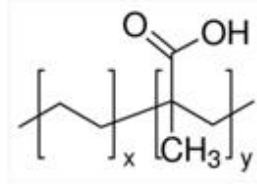
Kimyasal özellikleri	Standart	Birim	Değer
MFI	ASTM D1238	g/10dk	395
Yoğunluk	ASTM D792	g/cm ³	0,944
Çekme Mukavemeti	ASTM D638	MPa	10,5
Eğilme Modülü	ASTM D790	GPa	0,0462
Darbe Testi (23C)	ASTM D256	kg/cm ²	43

EMAA, ucuz, sert, hafif, kolay işlenebilir, plastikleştiriciye ihtiyaç duyulmadan doğal esneklik özellikte ve yapışma özelliği bulunan termoplastik polimerdir. Düşük erime noktası, tokluğu ve yüksek erime akış indeksi nedeniyle en etkili termoplastik onarıcı ajan olarak kullanılır (Pingkarawat ve diğ, 2012b). EMAA, epoksi ve kompozit malzemeler içinde dağılmış parçacıklar, filmler, lifler veya filamentler şeklinde kullanılır. Genel olarak onarım mekanizmasında reaksiyon, EMAA ve epoksinin kimyasal yapısı Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, reaksiyon epoksi içerisindeki hidroksil grubu ile EMAA yapısındaki asit grupları arasında, ısı (yaklaşık 150°C) varlığında gerçekleşir. Reaksiyon sonucunda Şekil 3.4 de görüldüğü gibi su açığa çıkar ve oluşan su, ısı varlığında basınçlı su buharı haline gelir. Kompozit yapı içerisinde eriyik halde bulunan EMAA, su buharının etkisiyle hasarlı bölgeye yayılır ve hasarlı yapı ile reaksiyona girerek onarma gerçekleşir (Izdebska, 2016).

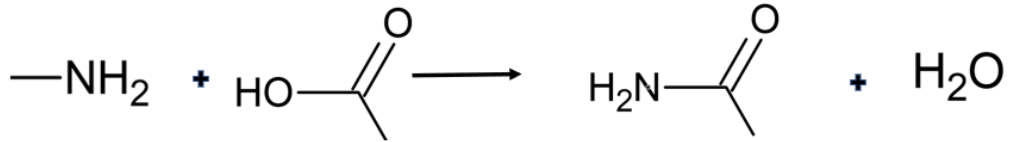
Bisfenol-A diglisidil eter (DGEBA) (epoksi)



Etil metil metakrilik asit (EMAA)



Şekil 3.3 : EMAA ve DGEBA(epoksi) kimyasal yapısı (R. J. Varley ve diğ, 2013).



Şekil 3.4 : EMAA ve epoksi arasında geçen birleşme reaksiyonu.

3.1.4 Karbon-epoksi prepreg

Karbon-epoksi prepreg malzemesi ticari adı VTP H 312 olan sıcak kalıplama prosesine uygun, SPM kompozit firmasından satın alınmıştır. VTP H 312 alana bağlı yoğunluğu 660gsm dimi (twill) dokuma ve kullanılan proses doğrultusunda kürlenme süresi 120 °C’de 2 saat olarak belirtilmiştir.

3.1.5 Diğer kullanılan yardımcı malzemeler

Mod I tabaklar arası kırılma tokluğu ölçümü için çift ankastre giriş testinde kullanılmak üzere 13µm yapışmaz politetrafloroetilen (teflon) film Pınar Metal/Plastik firmasından tedarik edilmiştir.

Kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılacak kalıplarda, karbon-epoksinin kalıp yüzeyine yapışmasının engellenmesi için öncelikle kalıplar kalıp astarı ve kalıp ayırıcı sürülerek prosese hazır hale getirilmiştir. Burada kullanılan ticari adı Chemlease 75

EZ olan kalıp ayırıcı ve ticari adı Chemlease 15 Sealer EZ olan kalıp astarı Tila Kompozitten satın alınmıştır.

3.2 Yöntem

3.2.1 Ekstrüzyon yöntemi ile filamentlerin üretilmesi

Ekstrüzyon çalışma prensibi yeterli sıcaklık ve basınç varlığında eriyik hale getirilmiş termoplastik polimerlerin işlenmesi anlamına gelmektedir. Ekstrüzyon kontrol paneli, besleme hunisi, kovan, ısıtıcı rezitanslar, vida, soğutma havuzu, merdane ve makara sarım sistemi olmak Şekil 3.5 de gösterildiği gibi temel sistemden oluşmaktadır (Lafleur ve diğ, 2014).



Şekil 3.5 : Ekstrüzyon sistemi.

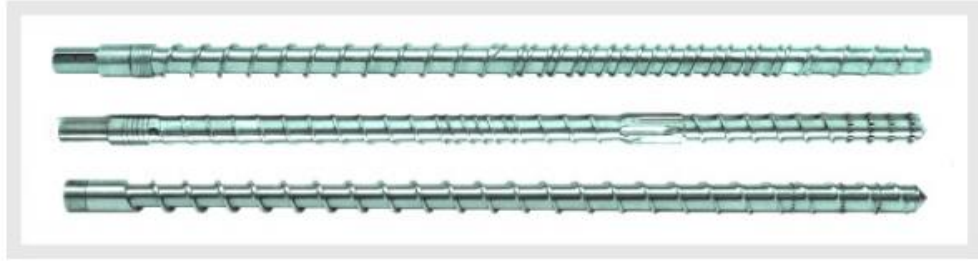
Kontrol paneli, dişli kutunun, motorun, sıcaklığın, vidanın dönme hızının ve besleme oranının ayarlandığı; bunlara ek olarak filamentlerin makaralara çekim hızının ve gerginliğinin ayarlandığı kısımdır.

Besleme hunisi, Ekstrüzyonda katı granül olarak işlenecek malzemenin düzenli olarak beslenmesini sağlayan kısımdır (Lafleur ve diğ,2014)

Kovan, içerisinde vida mekanizmasını barındırır. Boş bir silindir geometrisine sahiptir. Ergime olayı kovanın içerisinde meydana gelir. Aynı zamanda kovan dış yüzeyinde besleme hunisi, ısıtıcılar, soğutma kanalları gibi elemanları da barındıran kısımdır (Padmanabhan, 2008).

Isıtıcı rezitanlar, kovan içindeki plastik malzemelerin erimesi ve homojen bir karışımın elde edilmesini sağlayan kısımdır .

Vida, Şekil 3.6'da görüldüğü gibi plastik malzemelerin beslenmesi, taşınması, ergitilmesi ve homojenleştirilmesi gibi birçok işlevi yerine getiren ekstruderin en önemli parçasıdır. Plastiklerde en çok besleme, sıkıştırma, işlem ve dozajlama gibi üç bölgeyi vida sistemi kullanılmaktadır (Padmanabhan, 2008). Ekstrüzyonda, vida çap ve uzunluğu genellikle (L/D) olarak ifade edilir. Termoplastiklerde bu oran 15/1 - 20/1'dir. Tezde kullanılan makinanın L/D oranı 16/1'dir.



Şekil 3.6 : Çeşitli ekstrüzyon vidaları.

Soğutma havuzu, Soğutma işlemi sıvı (su) tarafından yapılan, kalıp ucundan çıkan filamentlerin soğutma işlemine tabi tutulan kısmıdır.

Merdane ve makara sarım sistemi, Merdane sistemi, havuzda soğutulan filamentlerin döndürülerek filament sarım kısmına yönlendirilmesini sağlamaktadır. Dijital ekranı sayesinde filament çaplarının kontrolü anlık olarak sağlanmaktadır.



Şekil 3.7 : Merdane ve makara sarım sistemi.

Bu projede ekstruzyonda yer alan tüm yapılar uygun proses şartlarında seçilerek EMAA, ABS ve EVA polimerlerinden 0,6, 0,8 ve 1,0mm olmak üzere 3 farklı çapta filamentler elde edilmiştir.

3.2.1.1 0,6, 0,8 ve 1,0mm çaplarındaki filamentlerin üretimi

Bu bölümde EMAA, EVA ve ABS termoplastik polimerlerden 0,6, 0,8 ve 1,0mm çaplarında filamentlerin üretim prosesi açıklanmıştır.

Öncelikle tüm polimerler Difransiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) testi ve malzeme bilgi formlarındaki ekstruzyon çalışma sıcaklığı değerlerinden faydalanarak Çizelge 3.4'te gösterildiği gibi polimerlerin ekstruder içerisindeki çalışma sıcaklıkları belirlenmiştir.

Çizelge 3.4 : Polimerlerin ekstruder içerisindeki çalışma sıcaklıkları.

POLİMER ÇEŞİTLERİ	SICAKLIK PARAMETRELERİ (°C)		
	1. Bölge	2. Bölge	3. Bölge
EMAA	125	130	135
EVA	150	170	190
ABS	200	210	220

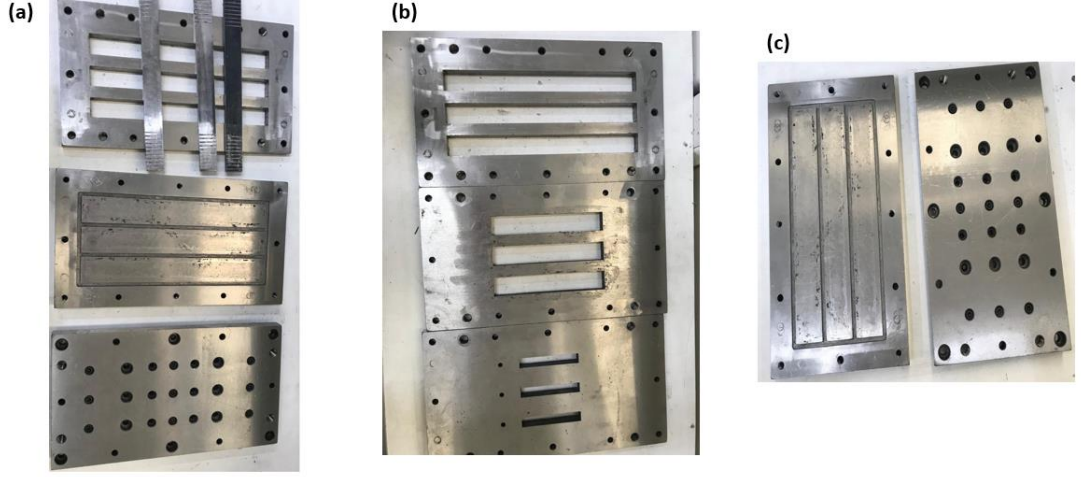
Daha sonra, yukarıda da bahsedilen Şekil 3.5'te gösterildiği gibi ekstruzyon çekim hattı cihazında, Çizelge 3.5'te gösterildiği gibi polimerlerin sıcaklık parametreleri ve ekstruderden çıkan filamentlerin soğutma havuz sıcaklığı, ekstruderden çıkan filamentlerin soğutma havuz sıcaklığı, ekstruder hızı ve filament çekme (traction) hızı proses değerleri ayarlanarak uygun çaplarda filamentler elde edilmiştir.

Çizelge 3.5 : EMAA, EVA ve ABS filamentlerinin proses parametreleri.

Polimer Malzeme Tipi	Filament Çap(mm) (mm)	Ort. Ekstruder Hızı (r/dk)	Ort. Traction Hızı (r/dk)	Soğutma Havuz Sıcaklığı(°C)
EMAA	0,6	3.5	6.0	40
	0.8	5.0	6.5	
	1.0	7.5	6.0	
EVA	0.6	3.5	10.0	40
	0.8	5.0	7.0	
	1.0	5	5.1	
ABS	0,6	2.5	8.0	40
	0.8	4.0	7.5	
	1.0	4.5	4.6	

3.2.2 Kalıpların hazırlanması

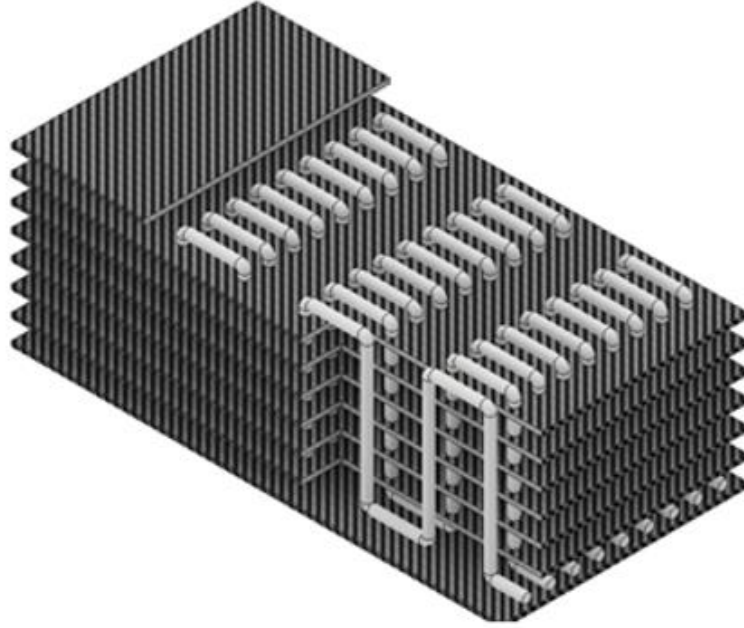
Bu bölümde, kompozit malzemelerin, ısı varlığında basınçlı kalıplama prosesi ile üretilebilmesi için, hazırlanan kalıplar anlatılmıştır. Kalıplar 2379 kalıp çeliği malzemesi kullanılarak Şekil 3.8’de gösterildiği gibi 3 farklı kalıp aparatı olarak üretilmiştir. Kalıp aparatlarından Şekil 3.8 “c” resminde gösterildiği gibi alt ve üst plakalar sabit her test kalıbına uyacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 3.8 “b” resminde gösterildiği gibi ortadaki kalıplar ise standartlara uygun olarak yapılacak mekanik testlere (çekme, eğilme ve Mod-I) göre ayrı ayrı hazırlanmıştır.



Şekil 3.8 : Kalıpların genel görünümü.

3.2.3 Kompozit malzemelerin üretilmesi

Bu kısımda, ABS, EMAA ve EVA polimerlerinden üretilmiş 0,6, 0,8 ve 1,0mm çaplarındaki filamentlerin karbon-epoksi prepreglere manuel olarak dikilerek Şekil 3.9'da gösterildiği gibi 3 boyutlu kompozit malzemelerin elde edilme prosesinden bahsedilmiştir.



Şekil 3.9 : Üç boyutlu kompozit malzeme üretim prosesi.

0,6, 0,8 ve 1,0mm çaplarındaki EMAA, EVA ve ABS filamentleri manuel olarak 1 dikiş/cm olacak şekilde dikilerek 3 boyutlu kompozit malzemeler hazırlanmıştır.

Basınçlı kalıplama prosesi ile 10 farklı kompozit numunesi elde edilmiştir. İlk tür numuneler kontrol numuneleri olup dikiş prosesi uygulanmamıştır. Bu numuneler katkısız olarak adlandırılmıştır. Daha sonra prepregler sırasıyla 0,6, 0,8 ve 1,0mm ABS filamentleri ile dikilmiştir ve ABS06-ABS08 ve ABS1 olarak adlandırılmıştır. Devamında prepregler sırasıyla 0,6, 0,8 ve 1,0mm EMAA filamentleri ile dikilmiştir ve EMAA06-EMAA08 ve EMAA1 olarak adlandırılmıştır. Son olarak da prepregler sırasıyla 0,6-0,8-1,0mm EVA filamentleri ile dikilmiş ve EVA06-EVA08 ve EVA1 olarak adlandırılmıştır.

Çekme ve eğilme deneylerinde kullanılacak numuneler ile Mod-I testinde kullanılacak numuneler ayrı ayrı hazırlanmıştır. Mod I testinde kullanılacak numuneler üretilirken 4. ve 5. prepreg tabakaları arasına 13µm kalınlığında TEFLON (politetrafloroetilen) film serilerek başlangıç çatlakları bu şekilde oluşturulmuştur.

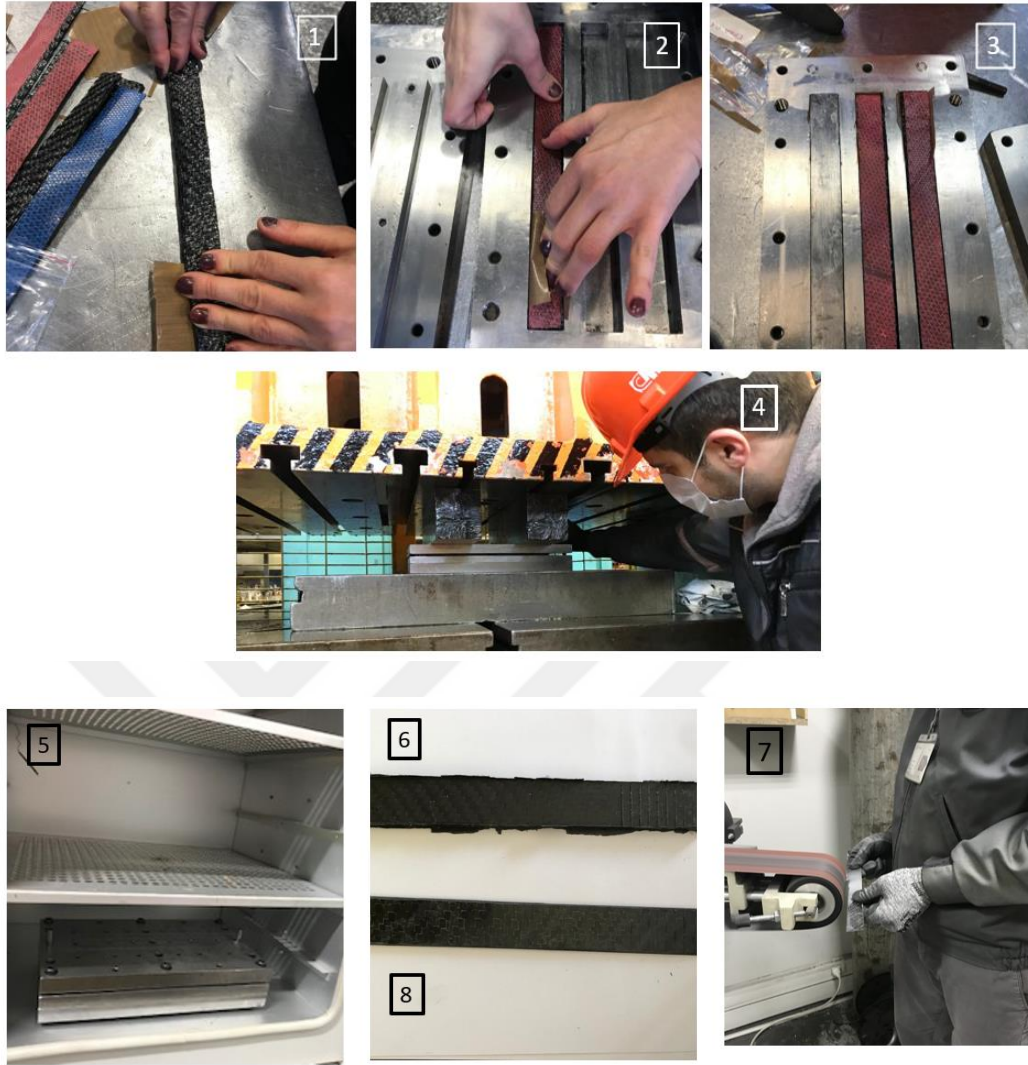
Hazırlanan dikişli/dikişsiz kompozit malzemeler üretilmeden önce kalıp yüzeyinde çeşitli işlemlerin yapılması gerekmektedir. Bunların başında üretime başlamadan önce kalıpların yüzeyi iyice silinmiştir. Ardından kalıbın ömrünü uzatmak ve malzemenin kalıptan kolayca ayrılmasını sağlamak amacı ile kalıbın yüzeyi astarlanmıştır. Bu projede kalıp astarı 10dk ara ile 2 kat ve ardından 10 dk ara ile 5 kat kalıp ayırıcı sürülerek kalıbın prosese uygun hale getirilmesi sağlanmıştır.

Hazırlanmış kompozit malzemeler kalıplara yerleştirilerek Şekil 3.10'da ki üretim basamaklarında da gösterildiği gibi üretimleri gerçekleştirilmiştir.

Bu basamakları incelediğimizde;

1. 2 ve 3. adımlarda malzemeler yapılacak testlerin standartlarına göre hazırlanıp kalıplara yerleştirilmiştir.
4. adımda kompozit malzemeler pres altında 200 bar basınçta civatalar ile sıkıştırılarak basınç sabitlenmiştir.
5. adımda basınç altında sıkıştırılmış kalıp, fırında 150°C'de 2 saat bekletilerek kürlenmesi sağlanmıştır.
6. adımda kalıptan çıkarılan kompozit malzemelerde reçinelerden kaynaklı çapak oluştuğu gözlemlenmiştir
7. adımda oluşan bu çapaklar zımparalanarak temizlenmiştir.

8. adımda ise kompozit malzemelerin testlere hazır olarak elde edilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.10 : Kompozit malzemelerin üretim basamakları.

3.3 Kompozit Malzemelere Uygulanan Testler

3.3.1 Kompozit malzemelerin hacimsel oran(volume fraction) testi

Elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri, kompozit içerisindeki karbon elyaf, reçine ve katkıların oranı ve cinsine göre değişmektedir. Bu çalışmada fiber içeriğinin tespiti ASTM D2548-68 standartına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir (ASTM D2584-18). Genel olarak test yöntemi aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır;

1. Öncelikle boş kroze ve numune içeren kroze ağırlıkları hassas terazide tartılır.
2. Daha sonra krozeler fırına yerleştirilir ve 565°C en az iki saat veya tüm matris kaybolana kadar fırında bekletilir.

3. Ardından krozelerin oda sıcaklığına kadar soğuması için beklenir.
4. Soğuduktan sonra krozeler hassas terazide tekrar tartılarak ağırlık farkı hesaplanır.

Bu araştırmada hacimsel oranı (V_f) belirlemek için, 4 adet kompozit numune hazırlanmıştır. Her numune hava ve alkol ortamında tartılmış ve kompozitin yoğunluğu, Denklem 3.1’de gösterilen Arşimet Prensibi ile hesaplanmıştır. Daha sonra elde edilen yoğunluk değerleri kullanılarak Denklem 3.2’de gösterildiği gibi elyaf hacim oranı belirlenmiştir (Amiri ve diğ, 2013; ASTM D2584-18).

$$\rho_c = (W_{\text{hava}} * \rho_{\text{alkol}}) / (W_{\text{hava}} - W_{\text{alkol}}) \quad (3.1)$$

ρ_c : Kompozit yoğunluğu

ρ_{alkol} : Alkol yoğunluğu

W_{hava} : Kompozitin havadaki ağırlığı

W_{alkol} : Kompozitin alkoldeki ağırlığı

$$V_f = (\rho_c - \rho_{\text{reçine}}) / (\rho_{\text{elyaf}} - \rho_{\text{reçine}}) \quad (3.2)$$

V_f : Elyaf hacim oranı

ρ_c : Kompozit yoğunluğu(Denklem 3.1’de hesaplanan)

$\rho_{\text{reçine}}$: Reçine yoğunluğu

ρ_{elyaf} : Karbon elyafın yoğunluğu

3.3.2 Çekme testi

3.3.2.1 Filamentlere uygulanan çekme testi

Filamentlerin mekanik çekme testleri, ASTM D3822/D3822M–14 standardı modifiye edilerek yapılmıştır (ASTM International, 2014a).

Standarda uygun olarak hazırlanan filamentlerinin boyutları 100mm, cihazda çeneler arası mesafe 150mm ve 2 mm/dk çekme hızında olacak şekilde en az 5 numune ile çekme deneyleri yapılmıştır.

Çekme mukavemeti: Bir malzemenin kopuncaya veya kırılıncaya kadar dayanabileceği en yüksek çekme gerilmesi olarak tanımlanır. Bu gerilme aşağıdaki Denklem 3.3 ile hesaplanmıştır;

$$\gamma = F/D_L \quad (3.3)$$

Denklem 3.3'te;

γ : Numunede kuvvet altında oluşan kopma mukavemeti (mN/tex [gf/den])

F : Numunede oluşan kopma mukavemeti (N),

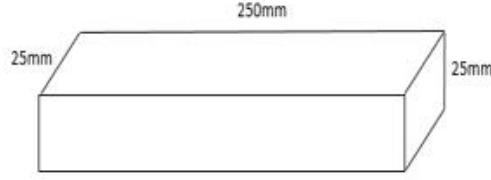
D_L : Filament çapını (mm) temsil etmektedir (ASTM International, 2014a).

3.3.2.2 Kompozit malzemelere uygulanan çekme testi

Çekme testi, malzemelerin statik yük altındaki mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla uygulanan bir mekanik deneydir. Kompozit malzemelerin çekme davranışlarını etkileyen en önemli faktörler, kompozit malzemelerin özellikleri ve içerisine eklenen katkı cinsi, kompozit üretim prosesi, tabakaların yönlenmesi, numune hazırlama koşulları, deneyin yapıldığı ortam şartları, kompozit malzemenin optimum proses koşulları ve elyaf, matris veya takviyenin hacimsel oranıdır.

Bu çalışmada üretilen kompozit malzemelerin tek eksenli çekme etkisi altındaki mukavemeti ASTM D 3039/D 3039M-00 standardına uygun olarak yapılmıştır (ASTM D3039).

Standarda uygun olarak hazırlanmış numunelerin boyutları Şekil 3.11'de de belirtildiği gibi genişlikleri 25mm, boyları 250mm ve kalınlıkları en az 25mm olarak üretilmiştir. Ayrıca çekme hızı ile ilgili standarda uygun olarak 2 mm/dk olacak şekilde en az 5 numune ile çekme deneyleri yapılmıştır (ASTM, 2017).



Şekil 3.11 : Şematik olarak çekme numunelerinin boyutları (ASTM, 2017).

Çekme testi sonucunda mukavemet değerlerinin doğru tespiti için numunelerin alt ve üst kısmı beyaz bir kalem ile işaretlenmiştir ve her bir numuneye uygulanan yük ve yer değiştirme değerleri kamera ile anlık olarak kayıt edilmiştir.

Çekme mukavemeti: bir malzemenin kopuncaya veya kırılıncaya kadar dayanabileceği en yüksek çekme gerilmesi olarak tanımlanır. Bu gerilme Denklem 3.4'te belirtildiği şekilde hesaplanmıştır (ASTM, 2017).

$$\sigma = F/A \quad (3.4)$$

Denklem 3.4'te;

σ : Gerilme (N/mm²)

F : Uygulama kuvveti (N)

A : Kesit alanı (mm²) göstermektedir.

Kopma uzaması: Çekme numunesinde boyunda meydana gelen en yüksek yüzde plastik uzama olarak tanımlanır.

$$\epsilon = \Delta L / (L_0) \times 100 \quad (3.5)$$

Denklem 3.5'te;

ϵ : Yer değiştirme noktasında oluşan şekil değiştirme miktarını (%)

ΔL : Boyca uzama miktarı (mm)

L_0 : İlk boy (mm) temsil etmektedir (ASTM, 2017).

Yukarıdaki denklemler kullanılarak elde edilen veriler sayısal hale getirildi ve grafiklere dönüştürülerek birbirleri ile kıyaslanmıştır.

3.3.3 Üç nokta eğilme testleri

Tabakalı kompozit malzemelerin eğilme özellikleri, numunenin hangi yüzeyinin basma gerilmesi etkisi altında olduğuna göre değişir. Kompozitlerin simetrik olduğu belirtilse de, küçük değişiklikler eksen kaymasına neden olabilir ve kompozitin asitmerik davranış sergilemesi gerçekleşir.

Eğilme testi, malzemenin eğilmeye karşı mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla yapılır. Eğilme deneyi ile malzemenin elastisite modülü, eğilme mukavemeti ve maksimum sehim miktarı tespit edilir. Bu çalışmada üretilen kompozitlerin eğilme testi ASTM D 7264/D 7264M-07 standardına uygun olarak yapılmıştır (ASTM D7264M - 07).

Standarta uygun olarak hazırlanmış numunelerin boyutları Şekil 3.12’de belirtildiği gibi genişlikleri 13mm olup kalınlık/mesnetler arası açıklık oranı 1/32 olarak alınmıştır. Ayrıca numunelerin boyu mesnetler arası açıklığın %20’si kadar daha uzundur. Her numune türü için en az 5 numune eğilmeye maruz bırakılmıştır.



Şekil 3.12 : Şematik olarak eğilme numunelerinin boyutları (ASTM D7264M - 07).

Her bir numuneye uygulanan eğilme mukavemeti aşağıdaki Denklem 3.6 ile hesaplanmıştır;

$$\sigma=3P_{\max}L/(2bh^2) \quad (3.6)$$

Denklem 3.6.'da;

Σ : Numunenin orta noktasında dış yüzeyde oluşan gerilme (MPa)

P : Uygulanan yükü (N)

L : Mesnetler arası açıklık (mm)

b : Numune genişliği (mm)

h : Numune kalınlığını (mm) göstermektedir

Numunenin orta noktasında dış yüzeyinin şekil değişimi ise aşağıdaki Denklem 3.7 ile hesaplanmaktadır;

$$\epsilon=6\delta h/L^2 \quad (3.7)$$

Denklem 3.7'de

ϵ : Dış yüzeyde oluşan en büyük şekil değiştirme miktarı (mm/mm)

δ : Orta noktadaki sehim (mm)

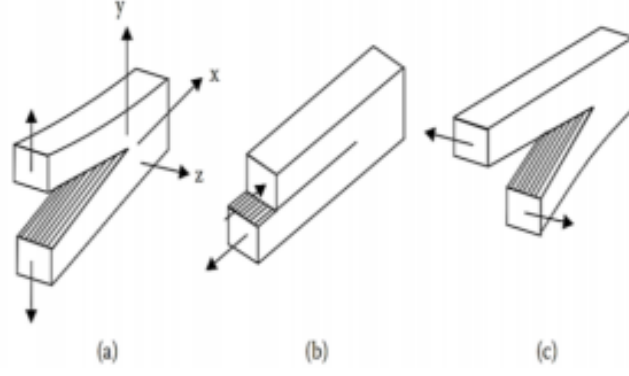
L : Mesnetler arası açıklık (mm)

h : Numune kalınlığını (mm) temsil etmektedir (ASTM D7264M - 07.)

3.3.4 Mod-I tabaklar arası kırılma tokluğu testi ve kendi kendini onarma verimliliği

Karbon-epoksi kompozitlerdeki EMAA, EVA ve ABS filamentlerinin onarma verimliliği çift ankastre kiriş (ÇAK) (double cantilever beam (DCB) testi kullanılarak incelenmiştir.

Kompozit malzemelerin tabakalar arası kırılma tokluğunda, malzemeye uygulanan yükleme durumuna göre Şekil 3.13'te gösterildiği gibi üç farklı çatlak ilerlemesi gözlenmektedir. Bunlar, çatlak düzlemine dik olarak uygulanan Mod I (açılma), çatlak yüzeylerine paralel olarak uygulanan Mod II (kayma) ve çatlağın her iki uç kenarına ya da çatlak önüne paralel uygulanan Mod III (yırtılma) (Gonzalez ve diğ, 2018).



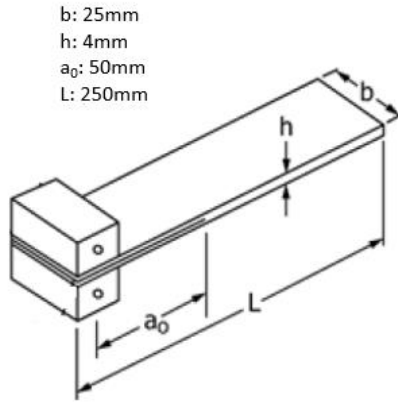
Şekil 3.13 : Kırılma modları; (a) Mod I, çatlak açılması (b) Mod II, kayma (c) Mod III, yırtılma (Argüelles ve diğ, 2008).

Mod I'de veya açılma modunda, çatlak yüzeylerinin yer değiştirme doğrultusu çatlak düzlemine diktir ve çatlak açılmaya çalışılır. Mod I kompozit malzemelerin kırılma tokluğu, matrisin ve matris ile fiber arasındaki bölgenin deformasyonu ve kırılma davranışı hakkında fikir sahibi olunmasını sağlar.

Bu çalışmada üretilen kompozit malzemelerin tabakalar arası kırılma tokluğu değerlerinin belirlenmesi için ASTM D 5528-1 standardı referans alınmıştır. ÇAK numuneleri kullanılarak, Mod I durumu için şekil değiştirme enerjisi boşalma hızı (G_I) değerleri hesaplanmıştır (ASTM D5528 – 13).

ÇAK hazırlanırken, üretime geçmeden önce 5mm uzunlukta ve uygun genişlikte kesilen 13µm kalınlığındaki yapışmaz TEFLON film, kompozit malzemelerde başlangıç çatlaklarını oluşturmak üzere orta tabakaya serilmiştir. Böylece orta tabakaların belirli bir uzunluk boyunca birbirine yapışması engellenmiştir. Mod I testinde kullanılan numunelerin boyutları 250x25x4mm olup boyutları şematik olarak Şekil 3.14'de gösterilmiştir. Testler 4mm/dk olacak şekilde sabit yer değiştirme hızında yapılmıştır. Her bir numune türü için en az 5 numune aynı şartlarda test edilmiştir (ASTM D5528 - 13).

Test sonucunda kompozit malzemelerin kendi kendini onarma verimliliğinin analiz edilebilmesi için, kompozit malzemelerin ilk test sonucunda oluşan çatlak kısmından basınç ve 120°C sıcaklıkta 2 saat bekletilerek, termoplastik polimerlerinin eriyerek kompozit malzemelerin arasına yayılması sağlanmıştır. Daha sonra aynı numuneler tekrar aynı koşullarda Mod I testine tabi tutularak onarma verimliliği analiz edilmiştir.



Şekil 3.14 : Mod I tabaklar arası kırılma tokluğu deneylerinde kullanılan ÇAK numunelerinin şematik olarak boyutları ve Mod I yüklemesine maruz bırakılmış bir tabakalı kompozit ÇAK numunesi gösterilmektedir.

Kırılma tokluğunda ÇAK numunelerine uygulanması ile elde edilen kırılma tokluğu aşağıdaki Denklem 3.8 ile hesaplanmaktadır;

$$G = 3P\delta/2b(a + I\Delta I) \quad (3.8)$$

Denklem 3.8'de;

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

P : Uygulanan yük (N)

δ : Yük uygulama noktaları arası açıklık (mm)

b : Numune genişliği (mm)

a : Delaminasyon çatlak uzunluğu (mm)

Δ : Düzeltme faktörü'nü göstermektedir (ASTM International, 2014b).

3.4 Yapısal Analizler

3.4.1 Fourier dönüşümlü infrared spektroskopisi ölçümleri

Elektromanyetik spektrumun dalga boyu 0.75 µm ile 1000 µm arasında kalan bölgeye infrared bölgesi (IR) adı verilir. IR spektroskopisine titreşim spektroskopisinde denilir. Çünkü IR spektrumu, maddeyi oluşturan atomlar arasındaki bağların titreşimiyle

oluşan frekanslarına karşılık gelen absorpsiyon pikleri ile örneğin, parmak izini göstermektedir. Her maddenin kendine has bir sprektrumu bulunmaktadır.

FTIR spektroskopisinde katı, sıvı, gaz ve çözelti halindeki örneklerin yapılarındaki fonksiyonel gruplar, iki bileşiğin aynı olup olmadığı, yapıdaki bağların durumu, bağlanma yerleri ve yapının aromatik yada alifatik olup olmadığını belirleyebilmek için kullanılabilen hızlı, güvenilir, hassas ve ucuz bir tekniktir (Hashim ve diğ, 2010).

Bu çalışmada kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan EMAA, ABS ve EVA polimerlerinin epoksi ile reaksiyonu, Smart Orbit-Diamond model ATR aparatı ile Thermo scientific Nicolet i550 model FT-IR spektrofotometre cihazı ile 4 cm^{-1} spektral çözünürlükte $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ frekans aralığında karakterize edilmiştir. ATR yüzeyi numune ölçümü alınmadan önce etil alkol ile dikkatlice temizlenmiştir ve ölçümler temizleme işleminin ardından gerçekleştirilmiştir.

3.5 Morfolojik Analizler

3.5.1 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntü analizleri

Taramalı Elektron Mikroskobunda (SEM), odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak görüntü elde eden bir elektron mikroskobu türüdür. Elektronlar numunedeki atomlarla etkileşerek numune üzerine gönderilir ve farklı sinyaller üretir. Bu sinyaller ilgili dedektörlerce toplanarak bilgisayar ekranına aktarılır ve görüntü elde edilir. Gerek ayırım gücü, gerek odak derinliği (depth of focus) gerekse görüntü ve analizi birleştirebilme özelliği, taramalı elektron mikroskobunun kullanım alanını genişletmektedir. SEM ile topografi, morfoloji, şekil, boyut ve bileşim yapıları analiz edilmektedir (Elektron Mikroskobu). Örneğin 1000X büyütmede optik mikroskobun odak derinliği yalnızca $0.1\mu\text{m}$ iken taramalı elektron mikroskobunun odak derinliği $30\mu\text{m}$ 'dir. ünümüzde modern taramalı elektron mikroskoplarının ayırım gücü 0.05 nm 'ye kadar inmiştir. Büyütme miktarı ise 5X-300000X arasında değişmektedir.

3.5.2 Optik mikroskop

Üretilen kompozit malzemelerin çekme, eğilme ve MOD-I gibi mekanik testler sonucunda kırılmış veya hasarlı yüzeylerin incelenmesi optik mikroskop görüntüleri ile gerçekleştirilmiştir. Optik mikroskop ile; takviye ve matris sistemi ara yüzeyi, matris içindeki partikül dağılımı, partikül tane büyüklüğü ve sınırları, matrisin takviye

sistemini ıslatabilirliği gibi birçok mikroyapı hakkında bilgi mikroskopik yöntemler kullanılarak elde edilmiştir (Korkmaz ve diğ, 2016).

Optik mikroskop ile; malzemenin mikroyapısal detaylarını tespit etmek, numunenin grntsnn büyüterek göze ya da ekrana (mikroskop, TV veya bilgisayar ekranına) aktarmak veya fotoğraflarını çekmek, numune içerisindeki uzunlukları, açıları ve bölgeleri ölçmek, analitik bir araç olarak incelemek mümkündür (Korkmaz ve diğ, 2016).



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Mekanik Test Sonuçları

4.1.1 Kompozit malzemelerin hacimsel oran(volume fraction) testi

Bu çalışmada kompozit malzemelerin fiber içeriğinin deneysel ölçümleri ASTM D2548-68 standartına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Üretilmiş kompozit malzemelerin son ürün kalınlıkları ve karbon elyaf oranları Çizelge 4.1’de gösterilmiştir (A., ve diğ, 2020.).

Çizelge 4.1 : Dikişli ve dikişsiz kompozit malzemelerin fiziksel özellikleri.

Kompozit	Kalınlık (mm)	Karbon elyaf hacimsel oranı (%)	Std sapma %
Dikişsiz kompozit	3,28 ± 0,01	0,59	0,02
ABS06	3,56 ± 0,01	0,44	0,03
ABS08	3,84 ± 0,01	0,41	1,08
ABS1	4,31 ± 0,01	0,37	0,37
EMAA06	3,53 ± 0,01	0,46	0,03
EMAA08	3,68 ± 0,01	0,44	0,04
EMAA1	4,17 ± 0,01	0,42	0,02
EVA06	3,43 ± 0,01	0,48	1,24
EVA08	3,57 ± 0,01	0,46	0,04
EVA1	4,14 ± 0,01	0,40	0,03

Çizelgeye göre termoplastik filamentlerin çaplarının artması, EMAA, ABS ve EVA polimerlerinin kapladığı alanı arttırdığı için kompozit malzemenin kalınlığı artmıştır. Ayrıca kompozit malzemelerin kalınlığının artması, karbon fiber oranının azalmasına neden olmuştur. Bununla birlikte kompozit malzemelerin kalınlığının artması, termoplastik polimerlerin çeşitleri ile bağlantılı olmadığı da Çizelge 4.1’de gözlemlenmiştir.

Dikiş prosesi kompozitlerde düzlem içi fiber dalgalanması, düzlem dışı fiber kıvrılması, fiber kırılması, boşluklar ve reçine açısından zengin bölgeler dahil olmak üzere çeşitli mikroyapısal hasarlar oluşturmaktadır. Kompozit malzemelerde oluşan bu hasarlar ve aynı zamanda yapı içerisindeki karbon fiber içeriğinin azalması, kompozitin mekanik özelliklerini düşürmesi beklentisi yaratmaktadır (Mouritz ve diğ., 2000a, 2010a).

4.1.2 Çekme testi sonuçları

4.1.2.1 Filamentlerin çekme mukavemeti test sonuçları

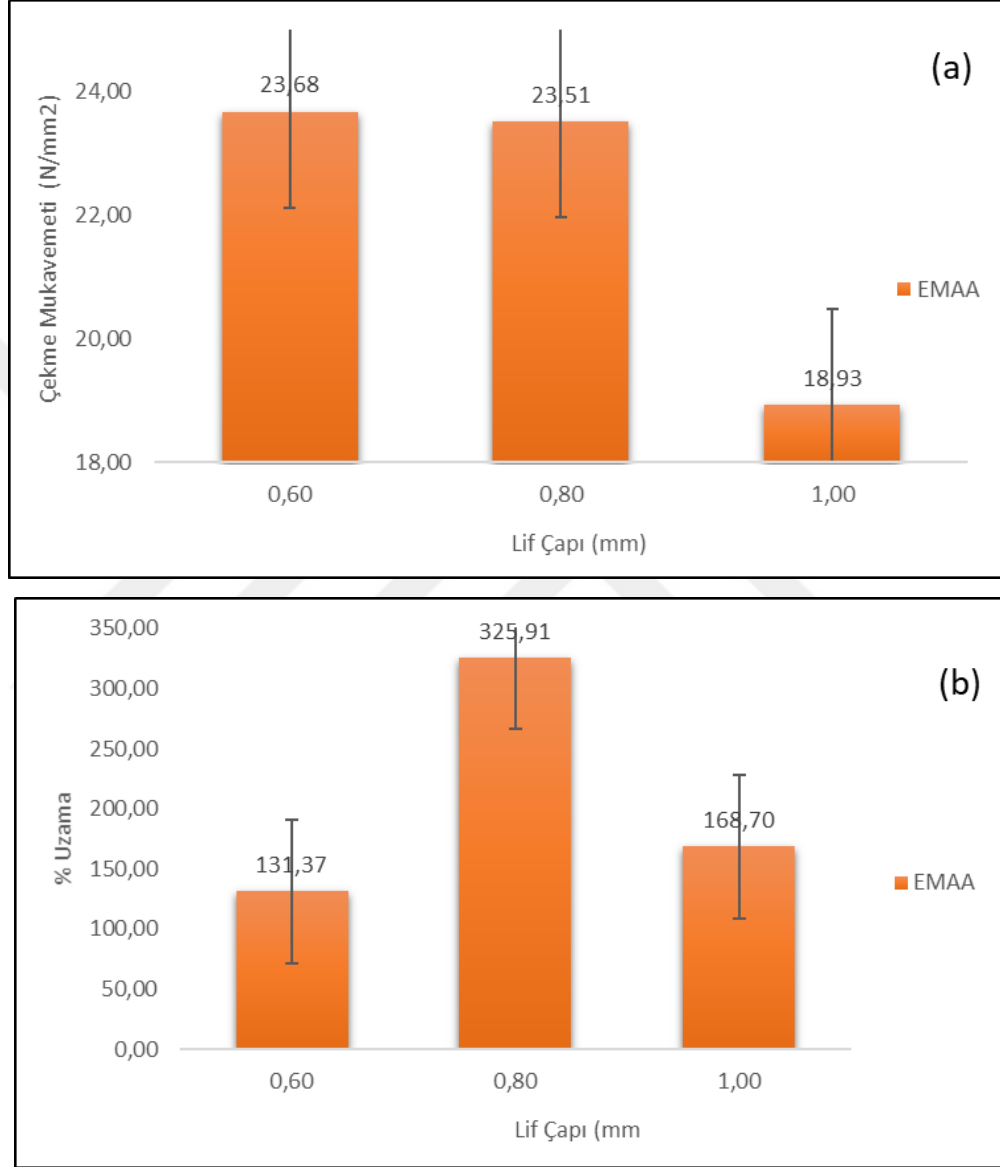
Ekstrüzyonda üretilmiş 0,6, 0,8 ve 1mm çapındaki filamentlerin ASTM D3822/D3822M-14 standartına göre yapılmış durumdaki çekme mukavemeti test sonuçları Çizelge 4.2’de ve Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.2’de ve Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3’te verilen test sonuçlarına göre filamentlerin çapı arttıkça mukavemetin değiştiği tespit edilmiştir (Ladani ve diğ., 2018).

Çizelge 4.2 : EMAA, EVA ve ABS filamentlerinin gerilim ve uzama değerlerinin filament çapına göre değişimi.

Polimer Çeşidi	Filament Çapı	Çekme mukavemeti (MPa)	Standart Sapma (%)	Uzama oranı (%)	Standart Sapma (%)
EMAA	0,6	23,68	0,84	131,37	3,96
	0,8	23,51	0,39	325,91	14,16
	1	18,93	0,18	168,70	4,55
EVA	0,6	30,27	1,44	146,42	27,32
	0,8	21,58	1,28	149,65	17,29
	1	23,73	0,43	415,70	33,08
ABS	0,6	23,08	4,38	18,71	2,50
	0,8	33,59	0,46	47,35	23,12
	1	33,21	0,33	13,29	2,05

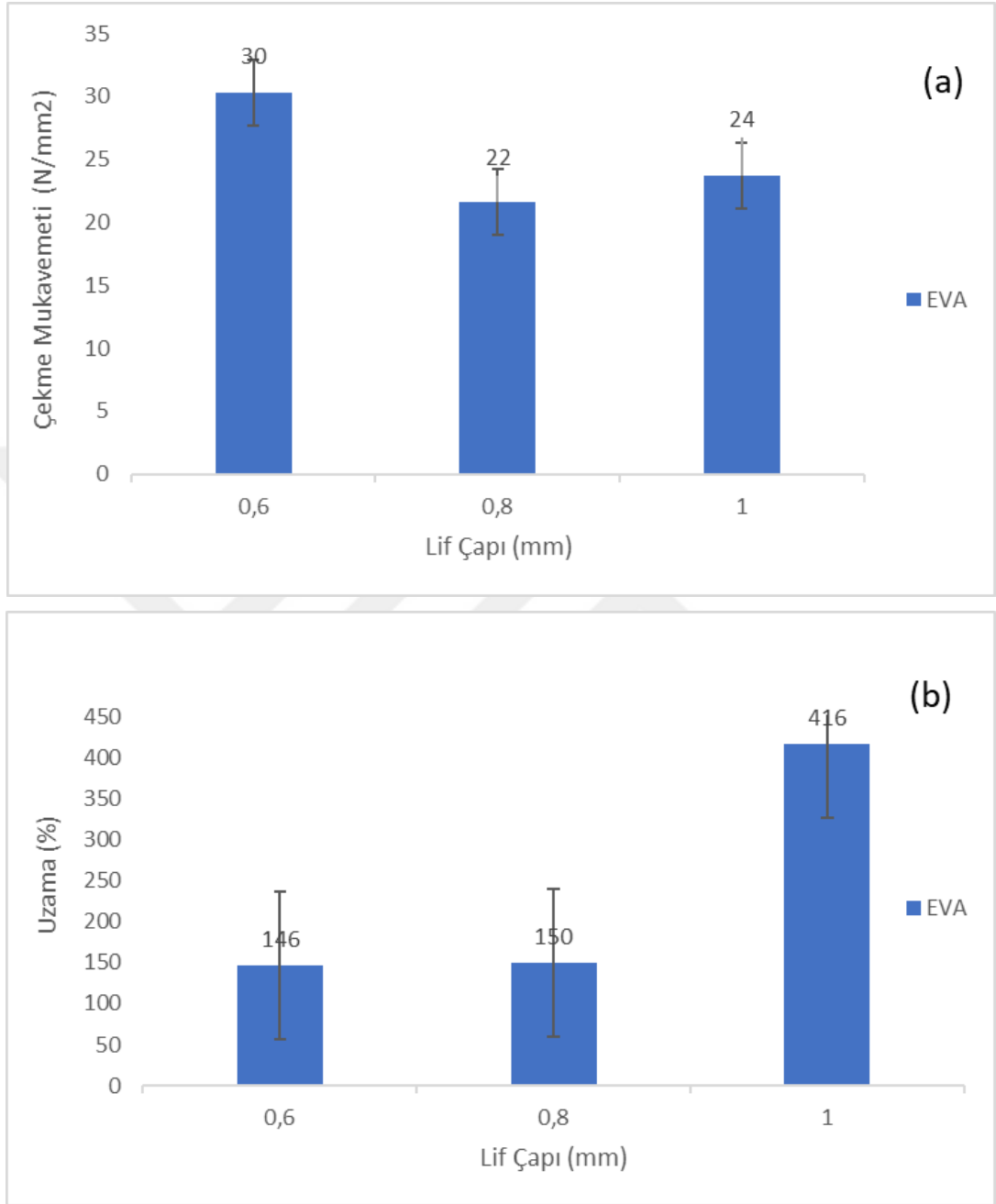
Çizelge 4.2’de ve Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3’te görüldüğü gibi, EMAA filamentinin çekme mukavemeti, 0,6 mm çapında 23,68 MPa olarak elde edilmiştir. 0,6 ve 0,8 mm çaplı filamentlerin mukavemetinde belirgin bir değişiklik gerçekleşmemiştir. 1mm çaplı filamentlerin mukavemeti ise 0,6 ve 0,8mm çaplı filamentlere göre %20 azalmıştır (Shah ve diğ, 2019).



Şekil 4.1 : EMAA filamentlerinin çap değişimine karşı (a) çekme mukavemeti (N/mm²) ve (b) uzama (%) grafikleri

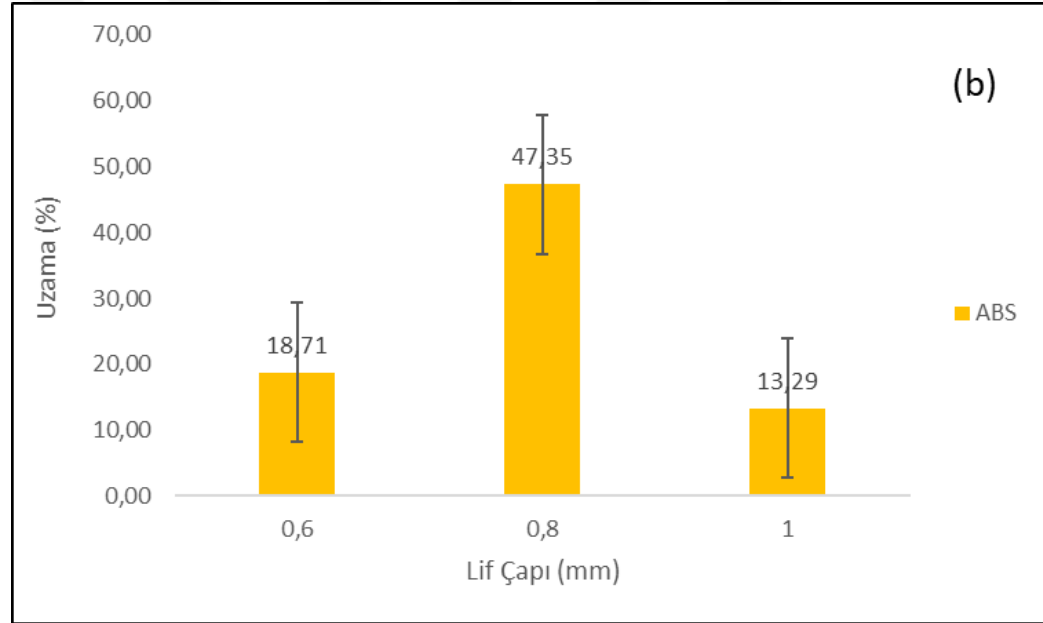
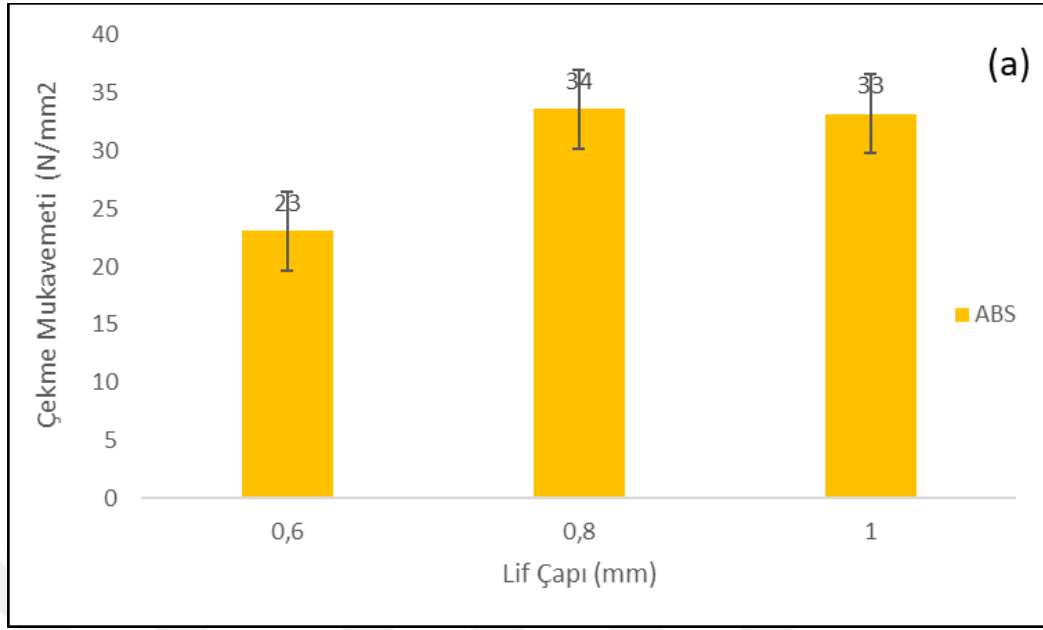
Çizelge 4.2’de ve Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3’te 0,6 mm çaplı EVA filamentinin çekme mukavemeti 30,27 MPa’dır. Sonuçlara göre, 0,8 ve 1mm çapındaki EVA

filamentlerinin mukavemeti, 0,6mm çaplı filamentin mukavemetine göre %30'dan fazla düştüğü gözlemlenmiştir.



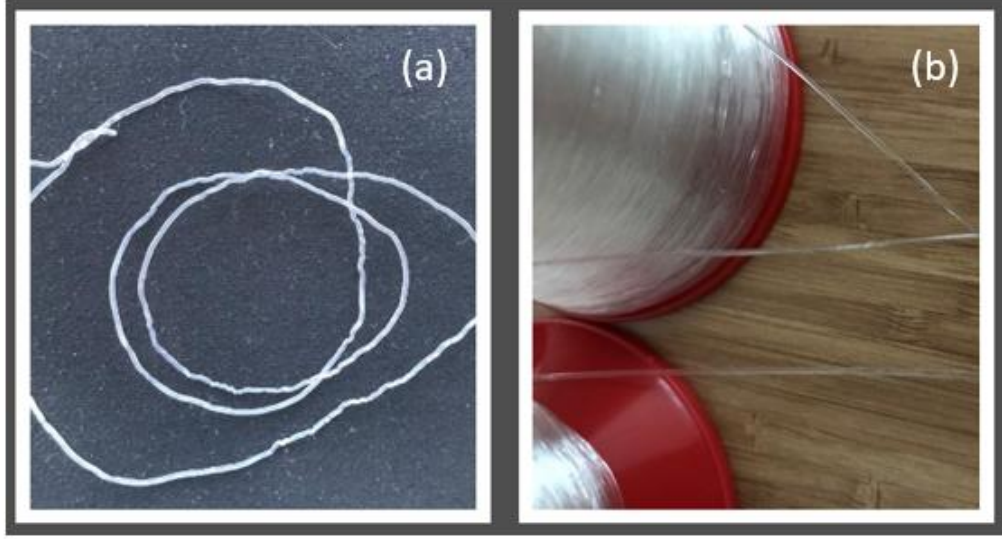
Şekil 4.2 : EVA filamentlerinin çap değişimine karşı (a) çekme mukavemeti (N/mm²) ve (b) uzama (%) grafikleri

Çizelge 4.2’de ve Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3’te 0,6 mm çapındaki ABS filamentinin çekme mukavemeti 23,08 MPa’dır. 0.8mm ve 1.0mm çapındaki filamentlerin mukavemeti ise 0,6mm çaplı filamentte göre yaklaşık %40’ın üzerinde artış gerçekleşmiştir.



Şekil 4.3 : ABS filamentlerinin çap değişimine karşı çekme (a) ve uzama (b) grafikleri

Tüm termoplastik polimerler ile yapılan ön denemelerde optimum parametrelere ulaşıncaya kadar tüm çaplardaki filamentler Şekil 4.4'de (a)gösterildiği gibi stabil olmayan bir yapı elde edilmiştir. Daha sonra optimizasyon çalışmaları yapılarak Şekil 4.4 (b) de gösterildiği gibi düzgün, stabil ve istenen çaplarda filamentlerin üretimi gerçekleşmiştir.



Şekil 4.4 : (a) Pürüzlü ve (b) Pürüzsüz yapıdaki filamentlerin görünümü

Filamentler çekilirken çeşitli sorunlarla karşılaşmıştır;

EMAA; termoplastik filamentlerin üretimi diğer polimerlere göre daha kolay ve daha stabil olarak gerçekleşmiştir

ABS; termoplastik filamentlerin üretiminde 1.0mm çapındaki filamentlerin üretimi oldukça zor gerçekleşmiştir. Malzeme çok rijit yapıda olduğu için makara sarımları sırasında sürekli kopma, liflerin ayrılması ve makaradan atma meydana gelmiştir.

EVA; termoplastik filamentlerin üretimi oldukça uzun ve zor bir şekilde gerçekleşmiştir. Filamentler üretilirken, başlangıçta ekstrüzyon çeperi, kovan ve vida bölgelerine EVA polimeri sürekli yapışmıştır. Ayrıca stabil olmayan ve sürekli değişen çaplarda filamentler elde edilmiştir. Bu nedenle proses sürekli tekrarlanarak ve optimize edilerek optimum parametrelere ulaşılmıştır.

4.1.2.2 Kompozitlerin çekme mukavemeti test sonuçları

Bu çalışmada üretilen kompozit malzemelerin tek eksenli çekme etkisi altındaki mukavemeti ASTM D 3039/D 3039M-00 standardına uygun olarak yapılmıştır (ASTM D3039).

Genel olarak kompozit malzemelerin içerisindeki filament yoğunluğu arttıkça malzeme içerisindeki karbon oranı azalmaktadır. Diğer yandan, lif kırılması, kat dalgalanması, lif kırılması, matris çatlaması ve reçine açısından zengin bölgeleri içeren dikiş işleminin neden olduğu mikro yapısal hasar nedeniyle de mekanik özellikleri

azalmaktadır. Bu durum da çoğunlukla mukavemetin düşmesine neden olmaktadır (Karpaz ve diğ., 2014; Mouritz ve diğ., 2010b). Fakat termoplastik filamentlerle dikilerek hazırlanan kompozit malzemelerin, kompozitlerin düzlem içi mekanik özellikleri üzerindeki etkisi tam olarak açıklanamamıştır. Yüksek mukavemetli dikişler veya çubuklarla (onarım özelliği göstermeyen) takviye edilmiş kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine yapılan araştırmalara dayanarak, termoplastik dikişin sertlik ve mukavemet için zararlı olabileceği beklenmektedir. Fakat Mouritz ve diğerleri tarafından yapılan çalışmalara bakıldığında, dikişin kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirebileceğini veya değiştirmeden bırakabileceğini göstermiştir. Dikişlerin, katları sıkıştırarak ve böylece kompozitin lif içeriğini artırarak mekanik özelliklerini arttırdığı test sonuçları ile kanıtlanmıştır (Mouritz, 2020; Mouritz ve diğ., 1997; Mouritz ve diğ., 2000a, 2010a).

Bu çalışmada her termoplastik polimerden 0,6, 0,8, 1mm çaplarında ve katkısız olmak üzere 4 farklı kompozit malzeme üretilip test edilmiştir. Üretilmiş kompozit malzemelerin ASTM D 3039/D 3039M-00 standardına göre yapılmış çekme mukavemeti test sonuçları Şekil 4.5'te verilmiştir.

Yapılan çalışmanın sonuçları incelendiğinde termoplastik filamentlerin epoksi matris içerisine katıldığında kompozit malzemenin karakteristik çekme mukavemetine etkisi değerlendirilmiştir. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi, kontrol numunesinin kopma mukavemeti 368 MPa olarak elde edilmiştir. Filamentlerle dikiş işlemi gerçekleştiğinde;

- Şekil 4.5 (a) grafiğinde 0,6mm ve 0,8mm çapında EMAA filamentleri ile üretilmiş kompozit malzemelerin çekme mukavemeti, kontrol numunesine göre sırasıyla %17 ve %8 artış gerçekleştirmişken, 1mm çapında filament ile üretilen kompozit malzemenin kopma mukavemetinde ise %6 oranında düşme gerçekleşmiştir. (Calderón-Villajos ve diğ., 2019). Filament çaplarının kompozit malzemenin uzama oranları üzerinde de önemli etkiler yarattığı Şekil 4.5'ten açıkça görülmektedir. 0,6mm ve 0,8mm çapında filament ile üretilmiş kompozit malzemelerin uzama oranı kontrol numunesine göre sırasıyla %82 ve %54 oranında artmıştır. Böylece malzeme daha sünek bir hale gelmiştir.

EMAA polimerinin kimyasal yapısını incelediğimizde; EMAA'in yapısındaki asit grubu ile epoksi reçinesinin yapısındaki hidroksil grubu arasında sıcaklık(150°C) varlığında birleşme reaksiyonu gerçekleşmektedir. Reaksiyon sonucunda su açığa çıkmakta ve oluşan su katmanlar arasında basınçlı su buharı oluşturmaktadır. Oluşan bu su basıncı ile birlikte EMAA'in katmanlar arasına kolaylıkla yayılması gerçekleşmektedir. Kompozitin yapısı soğudunda, EMAA ile epoksi arasında kuvvetli bir bağ oluşmaktadır (Gao ve diğ, 2019; Pingkarawat, Wang, ve diğ, 2013b; Pingkarawat ve diğ, 2015; Ravandi ve diğ, 2016; R. J. Varley ve diğ, 2013). Bu nedenle test sonuçlarına göre kompozit malzeme içerisindeki karbon oranı azalsa bile, termoplastik matrisin katmanlar arasına kolayca yayılımı ve ardından epoksi matris ile kimyasal reaksiyonu kompozitin mukavemetinde ciddi bir değişikliğe yol açmamıştır. Daha önce de bahsedildiği gibi kompozit malzemelerde dikiş sırasında çeşitli mikroyapısal bozukluklar oluşmaktadır ve mekanik özelliklerinin düşmesine neden olmaktadır. Fakat bu çalışmada kullanılan filamentler ile hazırlanan kompozit malzemenin mukavemetindeki değişim kullanılan filamentin kompozit yapısında köprü görevi görmesi ile liflerin ayrılma ve kırılmasını ertelemesi olarak da değerlendirilmiştir (Yudhanto ve diğ 2014). Ayrıca kompozit malzemede oluşan mukavemet değerlerinin, filamentlerin Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi çekme mukavemeti testi sonucunda elde edilen mukavemet değerleri ile de orantılı olduğu görülmüştür.

- Şekil 4.2 (b) grafiğinde 0,6mm ve 0,8mm çapında kullanılan EVA filamentleri ile üretilmiş kompozit malzemenin çekme mukavemeti, kontrol numunesine göre yaklaşık %14 oranında düşmüştür. 1mm çapında kullanılan EVA filamentleri ile üretilmiş kompozit malzemenin mukavemetinde ise %17 oranında artış gerçekleşmiştir (Go ve diğ 2018; Kumar ve diğ 2018). Fakat filament çaplarının uzama değerleri üzerinde çok önemli etkiler yaptığı Şekil 4.5'te açıkça gözlemlenmiştir. 0,8mm ve 1mm çapında kullanılan filament ile üretilen kompozit malzemenin uzama oranı kontrol numunesine göre %250'den, 0,6mm çaplı filament ile %180'den fazla artış gerçekleştirerek malzeme yapısı çok sünek bir hal almıştır.

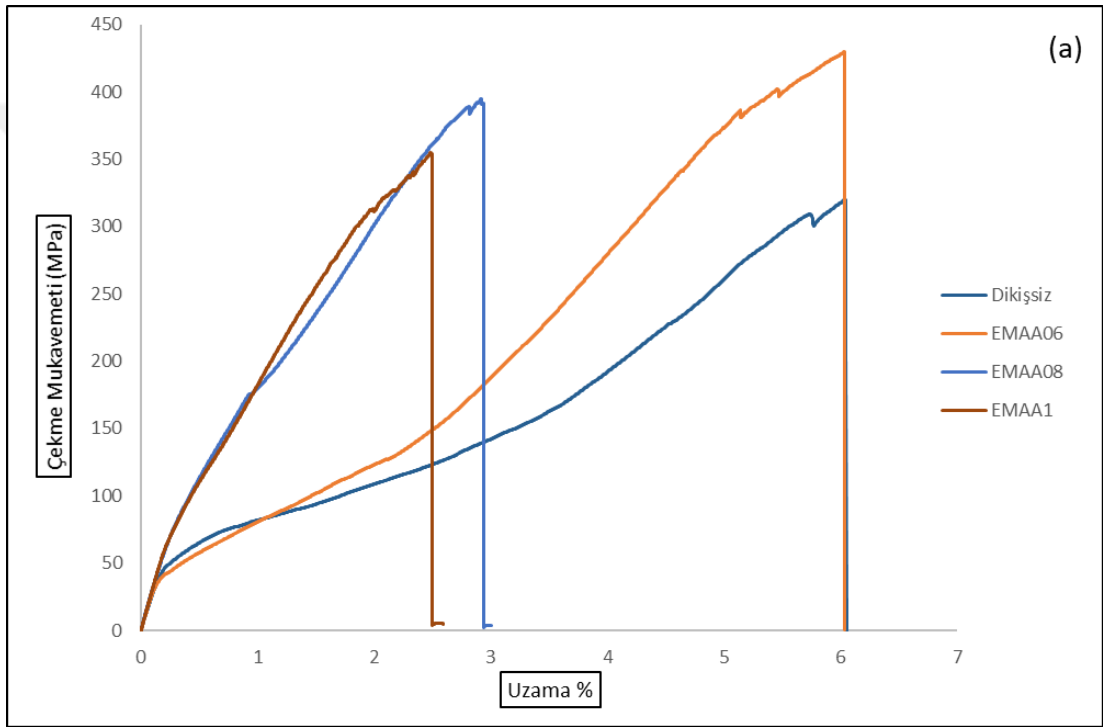
EVA'in kimyasal yapısı incelendiğinde epoksi matris ile arasında reaksiyon gerçekleşmemektedir. EVA moleküler yapısından kaynaklı EVA oranındaki artış C=O gruplarından RCOO⁻ gruplarının oluşmasına neden olmaktadır ve ancak bu şekilde

reaksiyonun gerçekleşmesi beklenmektedir (Almeida ve diğ, 2011; Arşac ve diğ, 2000; Schneider ve diğ, 2017). EVA erime sıcaklığı (~83°C) düşüktür ve ayrıca EVA vizkozitesi ($3,1 \cdot 10^{-3}$ Pa.s) EMAA ve ABS termoplastik polimerlerine göre düşüktür. Bu çalışmada kompozit malzemenin üretim proses sıcaklığı (~150°C), EVA erime sıcaklığının üzerinde (~83°C) gerçekleşmiştir ve vizkozitesinin çok düşük olmasından dolayı da EVA'in katmanlar arasına yayılımı kolaylıkla sağlanmıştır. Ayrıca EVA'in kimyasal yapısı gereği yapıştırıcı özelliği de bulunmaktadır (R. J. Varley ve diğ, 2013). Kompozit malzemelerin içerisindeki, karbon fiber oranının azalması sonucunda, mukavemetinin düşmesi beklenmektedir. Fakat 1mm çapında kullanılan filamentin kompozit yapı içerisinde köprü görevi görmesi, katmanlar arasına yayılması ile yapıştırıcı özelliğinin olması, mukavemetinin artmasına neden olmuştur (Yudhanto ve diğ, 2014). Tüm bu özellikler göz önüne alınırsa EVA ile epoksi matris arasında reaksiyon gerçekleşmeye de çekme mukavemetinde yüksek oranda bir azalma gerçekleşmemiştir. Ayrıca kompozit malzemenin mukavemet değerlerinin, Çizelge 4.2 de görüldüğü gibi filamentlerin çekme testi sonucunda elde edilen mukavemet değerleri ile, sonuçlarının orantılı olduğu da tespit edilmiştir.

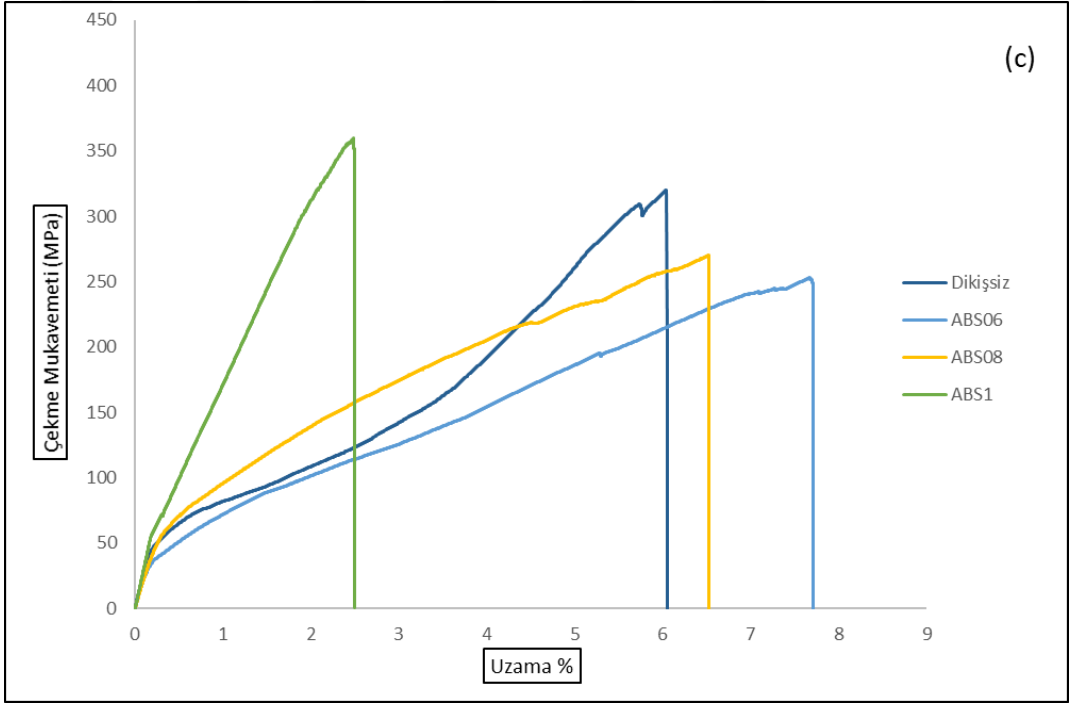
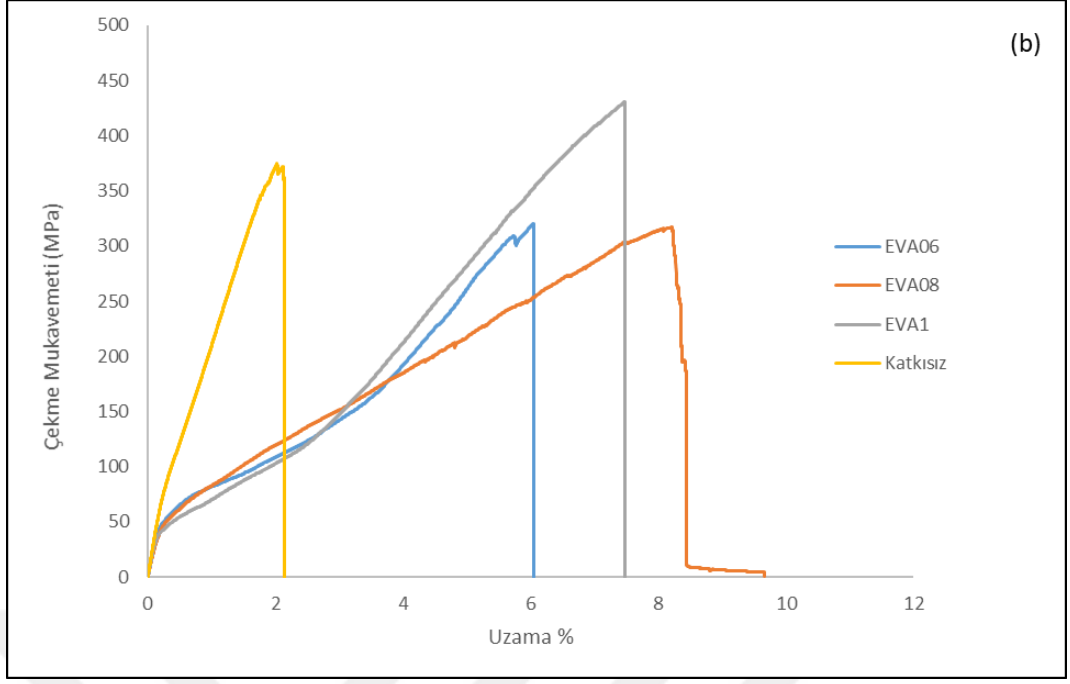
- Şekil 4.2 (c) grafiğinde 0,6mm ve 0,8mm çapında kullanılan ABS filamentleri ile üretilen kompozit malzemenin çekme mukavemeti, kontrol numunesine göre yaklaşık %30 oranında düşmüştür. 1mm çapında filament ile üretilen kompozitin çekme mukavemetinde ise belirgin bir değişiklik gerçekleşmemiştir. Fakat filament çaplarının uzama değerleri üzerine önemli etkiler yaptığı Şekil 4.2'de açıkça gözlemlenmiştir. 0,6mm ve 0,8mm çapındaki filamentler ile üretilen kompozitlerde %200 üzerinde bir artış gerçekleşerek malzeme daha sünek bir hal almıştır. Aynı şekilde 1mm çaplı filament ile üretilen kompozitin uzama değerlerinde belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir.

ABS'in kimyasal yapısı incelendiğinde, epoksi gruplarıyla reaksiyona giren doymamış hidrokarbon (C=OH) ve nitril (C=N) gruplarını içerir (R. J. Varley ve diğ, 2013). ABS erime noktası (~210°C) yüksektir, bu çalışmada proses sıcaklığı 150°C civarında gerçekleştiği için ABS kompozit malzeme içerisine tam olarak eriyememiştir ve ayrıca viskozitesinin ($3,4 \cdot 10^{-4}$ Pa.s) çok yüksek olmasından dolayı katmanlar arasına yayılamamıştır. Bu nedenle ABS epoksi matris ile reaksiyona girecek fonksiyonel

grupları olsa da, yeterli yüzey ile temas edemediği için çekme mukavemetine olumlu etkisi bulunamamıştır (McKeen, 2010; Nabi ve diğ, 2021; Qiu ve diğ, 2019). Daha önce de bahsedildiği gibi kompozit malzeme içerisinde oluşan hasarlar ve karbon fiber oranının düşmesi, mukavemetinin düşmesine sebep olsa da 1mm çapındaki filament ile üretilen kompozit malzemenin karbon liflerini birbirinden ayrılmadan köprü görevinde tutmasını ve mukavemetinin değişmemesine neden olduğu tespit edilmiştir (Yudhanto ve diğ, 2014). Ayrıca kompozit malzemede oluşan çekme mukavemeti değerlerinin, Çizelge 4.2’de görüldüğü gibi filamentlerin çekme testi sonucunda elde edilen mukavemet değerleri ile orantılı olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.5 : EMAA, EVA ve ABS polimerlerinin farklı filament çapları ile üretilmiş kompozit malzemelerin çekme mukavemeti (MPa) ve uzama (%) grafikleri



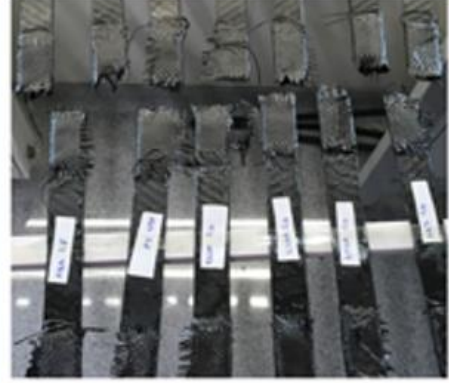
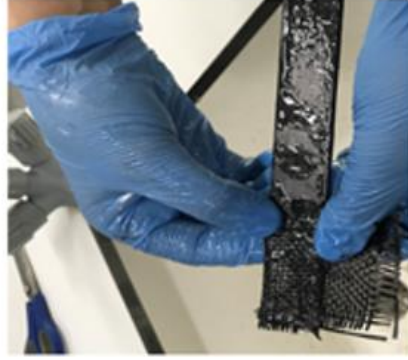
Şekil 4.5 (devam) : EMAA, EVA ve ABS polimerlerinin farklı filament çapları ile üretilmiş kompozit malzemelerin çekme mukavemeti (MPa) ve uzama (%) grafikleri

Çekme testi sırasında çeşitli sorunlarla (çenelerden kayma gibi) karşılaşılmıştır ve bu nedenle çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları;

1. Hazırlanan kompozit malzemeler başlangıçta çift taraflı zımpara kâğıdı ile zımparalanmıştır. Bunun sebebi tutucular ile numuneler arasındaki temas alanı

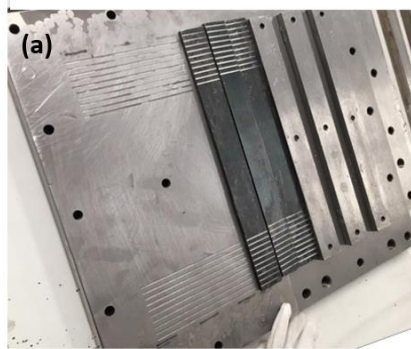
arttırılarak numunelerin kayma olasılığı azaltılmaktadır. Fakat malzeme yüzeyi çok pürüzsüz olduğu için yine de kayma gerçekleşmiştir.

2. Daha sonra, Şekil 4.6'da belirtildiği gibi numunelerin her iki ucuna karbon fiber sarılarak yüzey alanının daha fazla arttırılması sağlanmıştır. Fakat bu işlemde de kompozit malzemelerin çenelerden kayması gerçekleşmiştir.



Şekil 4.6 : Çekme testi için karbon elyaf sarımlı numune hazırlama çalışmaları

3. Ardından Şekil 4.7 “a” şeklinde gösterildiği gibi kalıpta 50mm uzunluğunda malzeme uçlarına gelecek şekilde 1mm derinliğinde çentik açılmıştır. Bu sefer de çekme sırasında kırılma çentik bölgesinde gerçekleşmiştir. Şekil 4.7 “b” şeklinde de görüldüğü gibi numunelerin her 2 ucuna en:25mm boy:50mm olarak hazırlanan 1mm kalınlığında metal plakalar yapıştırılmıştır ve çekme testi tekrarlanmıştır. Bu yöntemle testler başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği için bu şekilde devam edilmiştir.



Şekil 4.7 : Çekme testi için çentikli (a) ve metalli (b) numune hazırlama çalışmaları

4.1.3 Eğilme testi sonuçları

Eğilme testinin amacı, üretilen kompozit malzemelerin eğme anındaki mukavemetlerini bulmaktır. Bu tezde üretilen kompozit malzemelerin ilgili ASTM D 7264/D 7264M-07 standardına göre yapılmış durumdaki eğilme testi sonuçları Çizelge 4.3'te ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 0,6, 0,8 ve 1mm çapında termoplastik filamentler ile dikilerek hazırlanmış kompozit malzemelerin eğilme mukavemeti sonuçları, dikişsiz kompozit malzeme sonuçlarına göre önemli ölçüde değişmiştir.

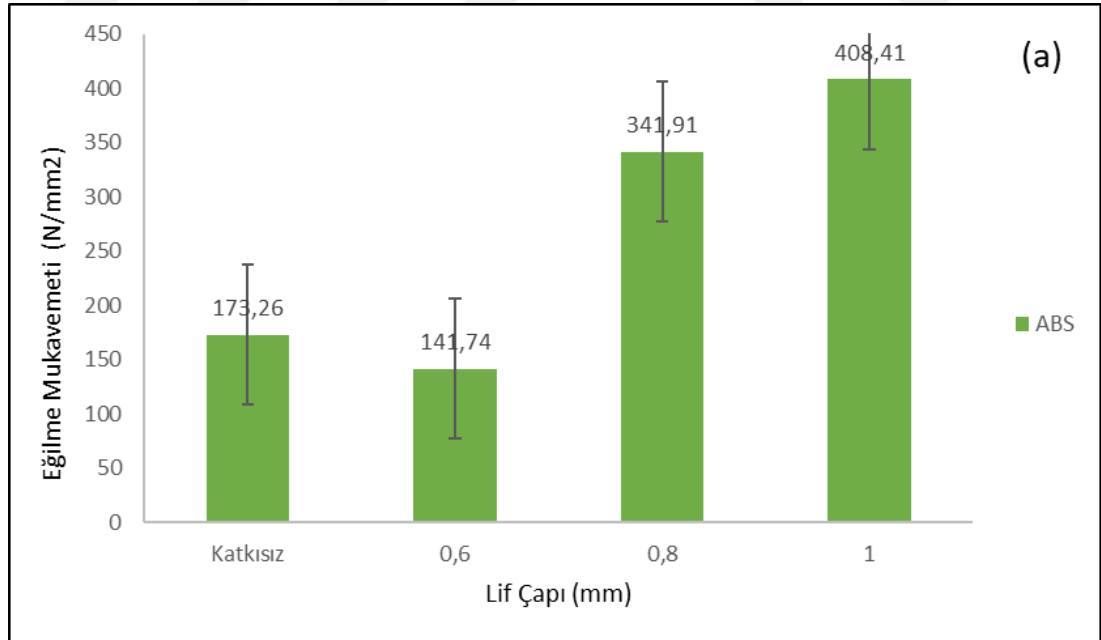
Çizelge 4.3 : EMAA, EVA ve ABS filamentleri ile hazırlanan kompozit malzemelerin eğilme mukavemeti (MPa) ve uzama oranlarının(%) filament çapına göre değişimi

Polimer Çeşidi	Filament Çapı	Eğme mukavemeti (MPa)	Standart Sapma (%)	Uzama oranı (%)	Standart Sapma (%)
Katkısız	-	173,26	19,77	1,24	0,18
EMAA	0,6	141,74	5,56	1,21	0,14
	0,8	341,91	11,97	1,33	0,17
	1	408,41	14,69	1,09	0,22
EVA	0,6	391,64	17,17	1,08	0,17
	0,8	395,73	7,25	1,23	0,23
	1	367,57	5,12	1,26	0,14
ABS	0,6	422,20	10,53	1,03	0,04
	0,8	361,09	14,81	1,21	0,23
	1	273,72	14,69	0,96	0,22

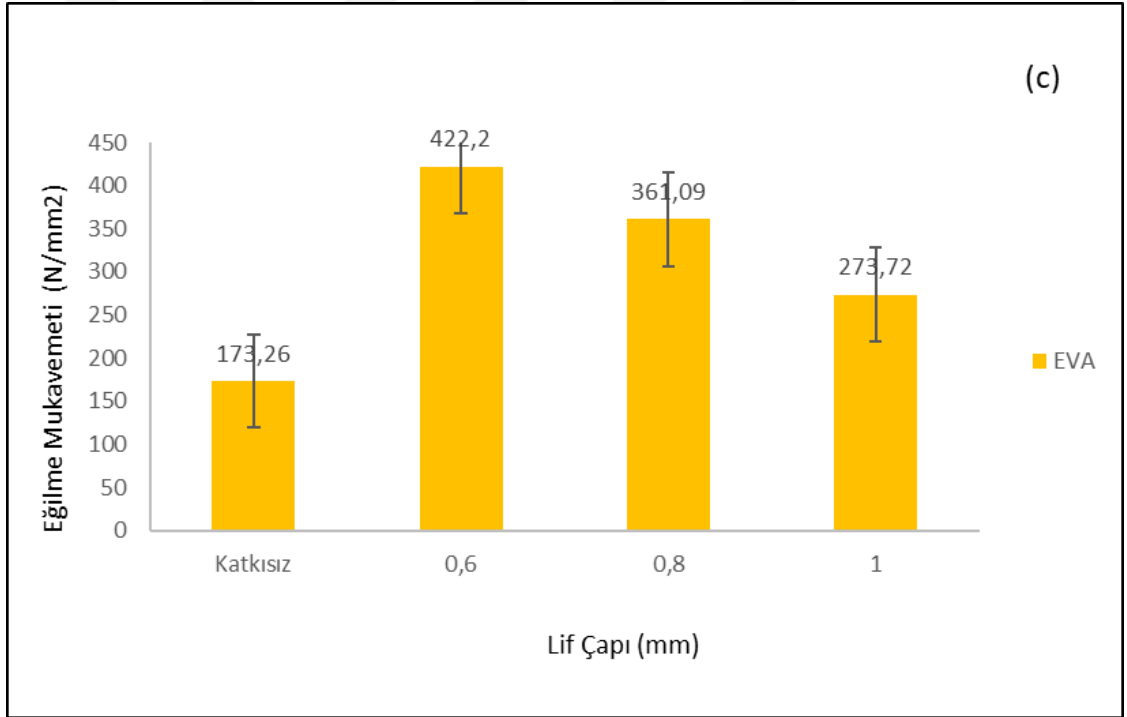
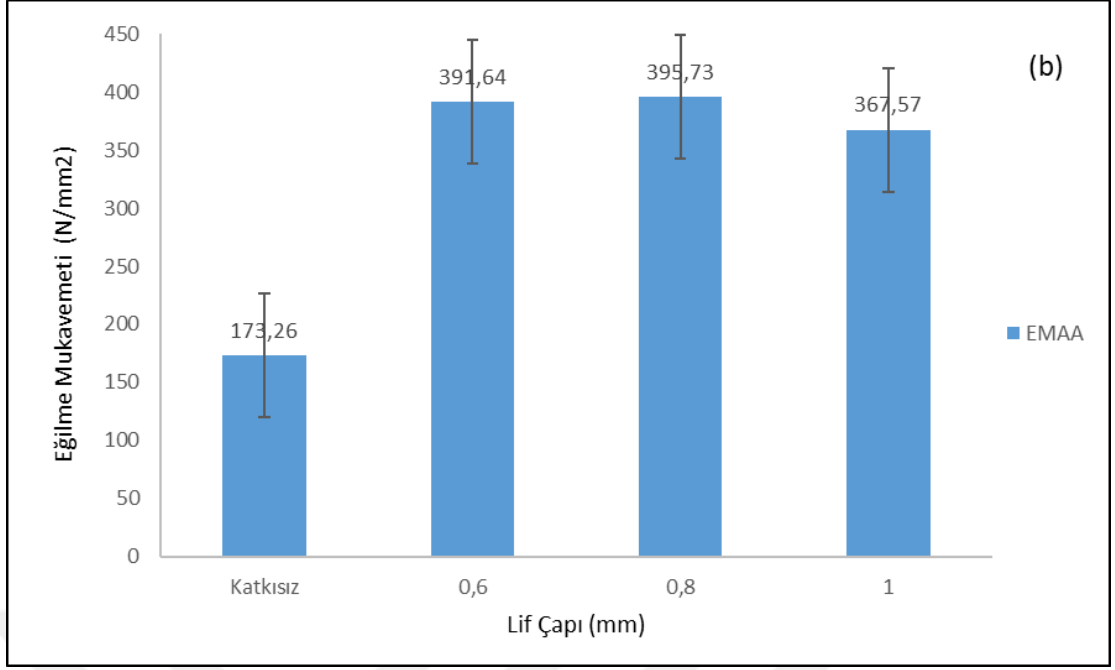
- Çizelge 4.3'te ve Şekil 4.8'de "a" grafiğinde 0,6, 0,8 ve 1mm çaplarında ABS filamentleri ile hazırlanmış kompozit malzemelerin eğilme mukavemeti değerleri gösterilmiştir. Yapılan test sonuca göre 1mm ve 0,8mm çapında ABS filamentleri ile üretilen kompozit malzemelerin eğilme mukavemeti, kontrol numunesine göre sırasıyla %118 ve %82 oranında artış gerçekleşmiştir. 0,6mm filament çapı ile üretilen kompozitin eğilme mukavemetinde ise %25 oranında düşme gerçekleşmiştir.

- Çizelge 4.3'te ve Şekil 4.8'de “b” grafiğindeki test sonucuna göre kompozitlerin eğilme mukavemeti EMAA filamentlerinin eklenmesi ile %80 üzerinde artmıştır. Şekilde de gösterildiği gibi filament çaplarının değişmesinin eğilme mukavemetinde belirgin bir etki yaratmadığı saptanmıştır (Haramina ve diğ, 2021).
- Çizelge 4.3'te ve Şekil 4.8'de “c” grafiğinde 0,6, 0,8 ve 1mm çaplarında EVA filamentleri ile hazırlanmış kompozit malzemelerin eğilme mukavemetinde görülen en önemli ve en büyük değişiklik %125 oranında artış sağlayan 0,6mm filament çapı ile üretilmiş kompozit malzemedir. Bunların dışında 0,8 ve 1mm çapları ile üretilmiş kompozit malzemelerde sırasıyla %93 ve %46 oranında artış gerçekleşmiştir.

Yapılan testlere göre, kompozit malzeme içerisinde oluşan mikroyapıdaki hasarlar ve karbon fiber oranının düşmesi nedeniyle eğilme mukavemetinin düşmesi beklenmiştir. Fakat daha önce de belirtildiği gibi dikişlerin katları sıkıştırması ve böylece kompozitin lif içeriğinin artması nedeniyle eğilme mukavemetinin arttığı test sonuçları ile kanıtlanmıştır (Mouritz, 2020; Mouritz ve diğ, 1997; Mouritz ve diğ, 2000a, 2010a).



Şekil 4.8 : Farklı çaplarda ABS(a), EMAA(b) ve EVA(c) filamentleri ile hazırlanmış kompozit malzemelerin üç nokta eğilme deneyi grafiği



Şekil 4.8 (devam) : Farklı çaplarda ABS(a), EMAA(b) ve EVA(c) filamentleri ile hazırlanmış kompozit malzemelerin üç nokta eğilme deneyi grafiği

4.1.4 Mod I tabakalar arası kırılma tokluğu test sonuçları

Bu doktora tezinde kompozit malzemelerin Mod I katmanlar arası kırılma tokluğu, ASTM D 5528-1 standardı kullanılarak çift konsol kiriş testi ile değerlendirilmiştir

(ASTM D5528 - 13). Kompozit malzemelerin onarmadan önce ve sonra katmanlar arası kırılma toklukları ve onarma verimlilikleri Çizelge 4.3’de gösterilmektedir.

Kendi kendini onaran kompozit malzemelerin üretilmesinde proses sıcaklığı (150°C) EVA(83°C) ve EMAA(90°C)’in erime sıcaklığının üzerinde olduğu için bu ajanların katmanlar arasına yayılımı sağlanmıştır. Fakat ABS erime sıcaklığı (~210 °C) yüksek olduğu için yayılmanın gerçekleşmediği Şekil 4.18’de de gösterilmiştir.

- Çizelge 4.4’de ki test sonuçlarına göre EMAA filamentleri ile üretilen kompozitin katmanlar arası kırılma tokluğunda ve onarma performansında EMAA06(%189), EMAA08(%141) ve EMAA1(%124) çok belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Sonuçlar, kompozitin kırılma tokluğunun, EMAA filamentlerinin çapının artması ile arttığını ve bunun, delaminasyonu köprüleyen dikişler tarafından kaynaklandığını göstermektedir. Onarma süreci sırasında, öncelikle bu köprü dikişleri erir. Daha sonra önceden de bahsedildiği gibi epoksi ve EMAA arasında oluşan birleşme reaksiyonu sonucunda açığa çıkan su, su buharı basıncını oluşturarak EMAA basınç dağıtım mekanizması aracılığıyla delaminasyona akar ve böylece onarma sağlanmıştır. (Meure ve diğ, 2012b; Pingkarawat, Wang, ve diğ, 2013b, 2013c; Pingkarawat ve diğ, 2015; Yudhanto ve diğ, 2014).
- ABS filamentleri ile üretilmiş kompozit malzemelerin test sonuçlarına göre; katmanlar arası kırılma tokluğunda dikişsiz kompozite göre ciddi bir artış gerçekleşmiştir. Bu da yukarıda bahsedildiği gibi filamentlerin kompozit ağ yapısı içerisinde köprü görevi göstermesinden kaynaklanmıştır. Onarma verimlilikleri incelendiğinde ABS06(%-53), ABS08(%-64) ve ABS1(%-67) filamentleri ile üretilmiş kompozitin kendini kendini onarma özelliği göstermediği saptanmıştır. ABS yapısı daha önce de bahsedildiği gibi epoksi ile reaksiyona girecek doymamış hidrokarbon ve nitril grupları içermektedir. Fakat yüksek erime sıcaklığı ve yüksek viskozitesi nedeniyle ABS katmanlar arasına yayılamamıştır ve reaksiyonun gerçekleşmesi engellenmiştir (Pingkarawat ve diğ, 2015; R. J. Varley ve diğ, 2013).
- EVA filamentleri ile üretilen kompozitin onarma performansında EVA06(%133), EVA08(%115) ve EVA1(%110) çok belirgin bir artış gözlemlenmiştir. EMAA ve ABS termoplastik onarma mekanizmasında da

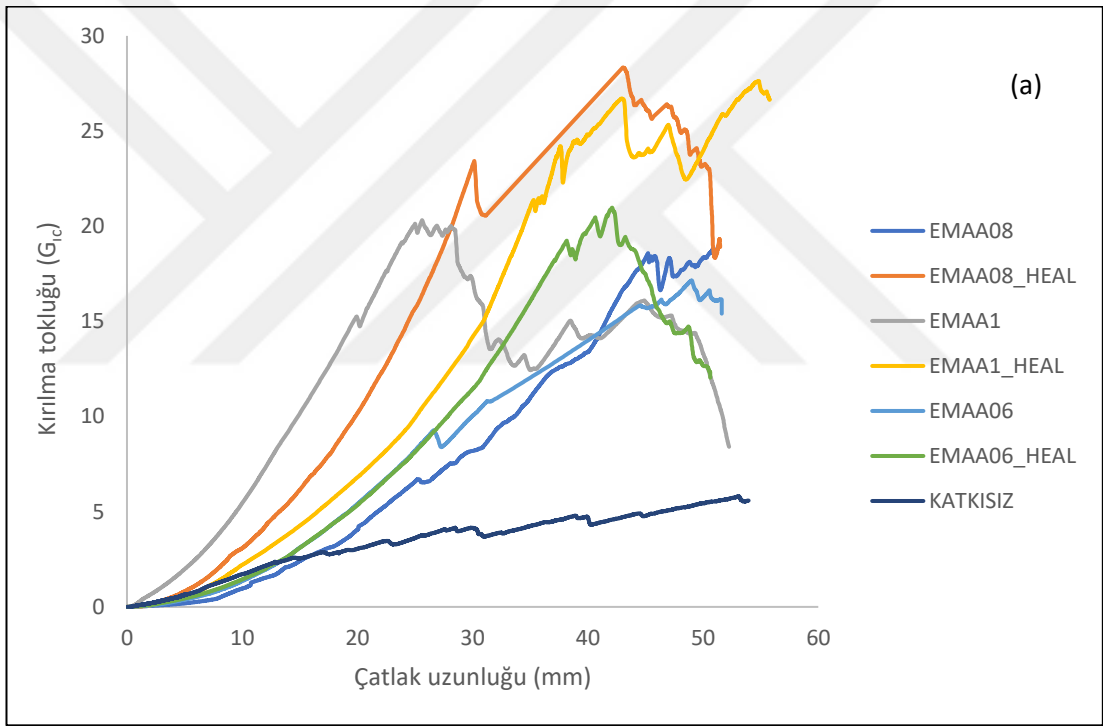
gözlendiği gibi filamentlerin çapı arttıkça, filamentlerin köprü görevi görmesinden dolayı kırılma tokluğu artmıştır. Test sonucuna göre onarma mekanizması EMAA'in gösterdiği reaksiyondan farklıdır. EVA'da reaksiyona girecek aktif bir grup bulunmamasına rağmen düşük vizkozite ($3,4 \cdot 10^{-4}$ Pa.s), düşük erime noktası ($\sim 83^{\circ}\text{C}$) ve yapışkanlık özellikleri nedeniyle katmanlar arasına kolaylıkla yayılma gerçekleşir ve soğuduktan sonra onarma gerçekleşmiştir (Meure, Furman, ve diğ., 2010b; R. J. Varley ve diğ., 2013). Bu çalışmada dikiş prosesinin diğer önemli bir avantajı, dikey yöndeki termoplastik filamentlerin yatay yöndeki filamentler ile etkileşmesinden dolayı, EVA'in delaminasyonlu bölgelerin tamamına yayılımı gerçekleşmiştir.

Çizelge 4.4 : Kompozit malzemelerin onarmadan önce ve sonra, kırılma toklukları ve onarma verimliliği

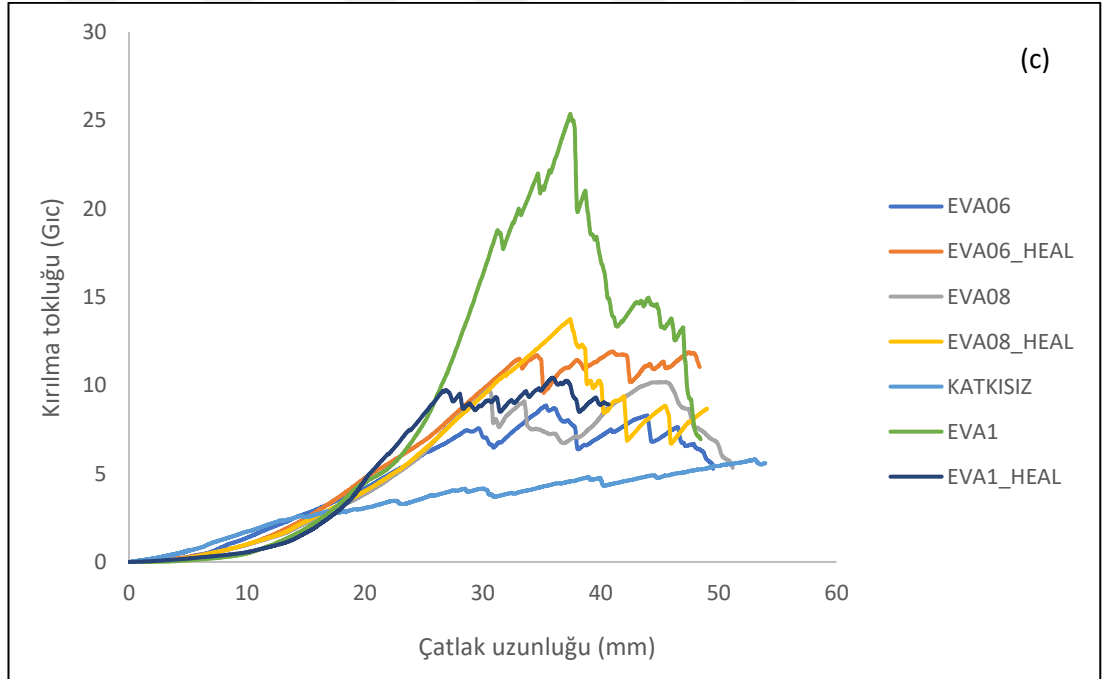
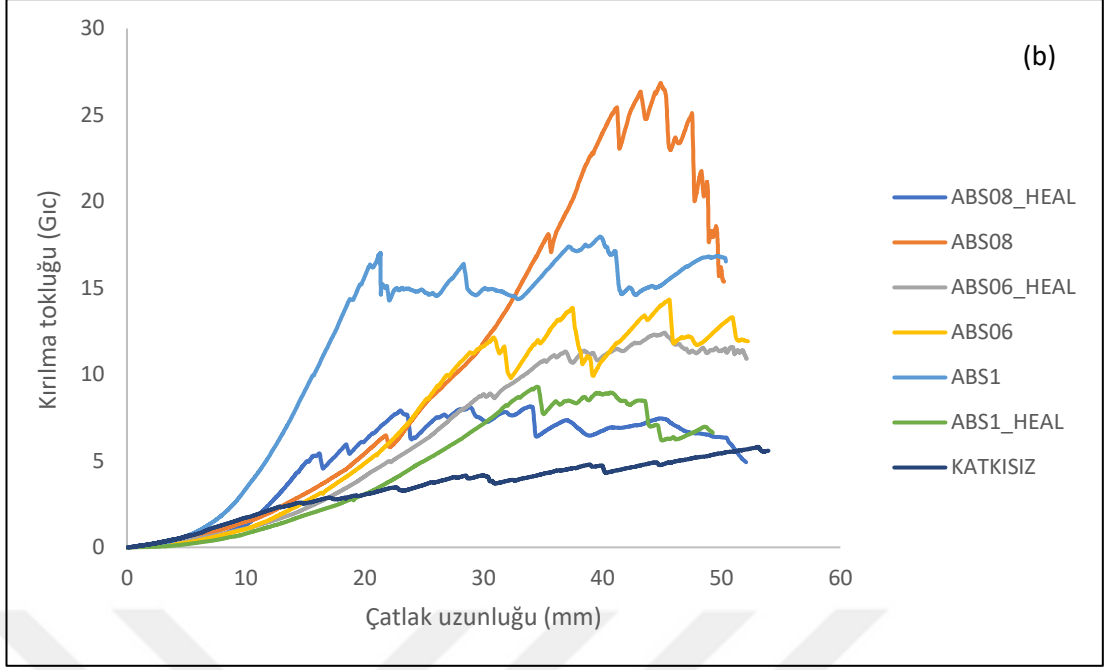
Kompozit malzeme	Onarmadan önce kırılma tokluğu MPa	Standart Sapma (%)	Onarmadan sonra kırılma tokluğu MPa	Standart Sapma (%)	Onarma verimliliği (%)
Dikişsiz kompozit	152,50	11,27	-	-	-
ABS06	573,50	5,56	303,99	4,12	-53 %
ABS08	515,54	11,97	328,01	3,47	-64 %
ABS1	666,90	10,29	448,99	4,69	-67 %
EMAA06	342,54	14,71	648,03	7,17	% 189
EMAA08	297,46	7,25	420,26	7,79	% 141
EMAA1	541,84	5,26	671,42	3,12	% 124
EVA06	435,17	10,35	579,73	5,17	% 133
EVA08	534,59	12,61	613,12	4,81	% 115
EVA1	550,50	11,72	607,08	6,69	% 110

Dikişsiz karbon-epoksi kompozitin ve EMAA, ABS ve EVA filamentleri ile dikilmiş karbon epoksi kompozitlerin, Mod I katmanlar arası kırılma tokluğunun, çatlak uzunluğu arasındaki ilişkisi Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

Şekil 4.9 tüm termoplastik onarıcı ajanlarla yapılmış test sonuçlarına göre dikişsiz kompozitte, başlangıç eğrisi çatlak başlangıcından ilk çatlak oluşumu bitene kadar daha stabil olarak artmıştır. Dikişli kompozit malzemelerin yapısı incelendiğinde stabil giden başlangıç eğrisinde daha sonra ani yük kayıpları ve artışları gerçekleşmiştir. Bunun nedenleri incelendiğinde; öncelikle dikişlerin çatlak sırasında köprü görevi görmesi ve kırılma direncini arttırması olarak değerlendirilmiştir. Çatlak büyümesi sırasında bir noktadan sonra kırılma tokluğu düşmeye başlamıştır ve bu durum filamentlerin çatlak köprüleme bölgelerini tamamen oluşturduğunu göstermiştir. Ayrıca diğer bir neden de delaminasyon çatlak büyüme sürecinin yapışma/kayma davranışından dolayı daha kararsız ilerlediği değerlendirilmiştir (Pingkarawat, 2014).



Şekil 4.9 : Farklı çaplarda EMAA, ABS ve EVA filamentleri ile üretilmiş kompozitlerin, ÇAK numunelerine ait kırılma tokluğu ve çatlak uzunluğu grafiği



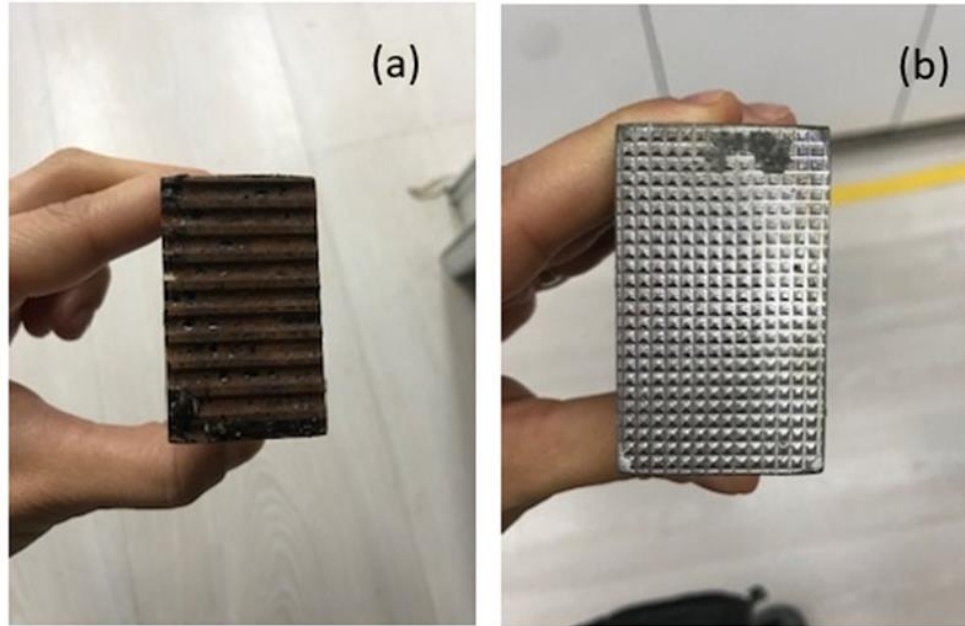
Şekil 4.9 (devam) : Farklı çaplarda EMAA, ABS ve EVA filamentleri ile üretilmiş kompozitlerin, ÇAK numunelerine ait kırılma tokluğu ve çatlak uzunluğu grafiği

MOD-I testi sırasında çeşitli sorunlarla karşılaşılmıştır ve bu nedenle çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları;

- Hazırlanan kompozit malzemeler başlangıçta çift taraflı zımpara kâğıdı ile zımparalanmıştır. Bu sayede yapıştırıcı ile numuneler arasındaki temas alanı arttırılarak yüzeye daha iyi yapıştırılması sağlanmıştır. Fakat malzeme yüzeyi

çok pürüzsüz olduğu için test sırasında, kompozit malzemenin hem malzemeden hem de metal yüzeyden kayması gerçekleşmiştir.

- Daha sonra kompozit malzeme yüzeyinde Şekil 4.10 “a” şeklinde gösterildiği gibi daha fazla ve derin zımparalama işlemi yapılırken, aynı zamanda metal malzemenin yüzeyinde de zımparalama işlemleri yapılmıştır. Bu yöntemle az da olsa bazı numunelerde başarılı sonuç verse de aynı şekilde hem malzeme hemde metalden ayrılma tekrarlanmıştır. Test stabil halde gerçekleşmemiştir.
- Ayrıca farklı yapıştırıcılar denenerek 1. ve 2. adımdaki şartlarda testler sürekli tekrarlanmıştır.
- Daha sonra metal yüzeye CNC tezgahında Şekil 4.10 “b” şeklinde gösterildiği gibi farklı bir teknik uygulanmıştır ve bu sayede testler daha stabil bir şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.10 : Test plakalarının ve kompozit malzeme yüzeyinin modifikasyonu

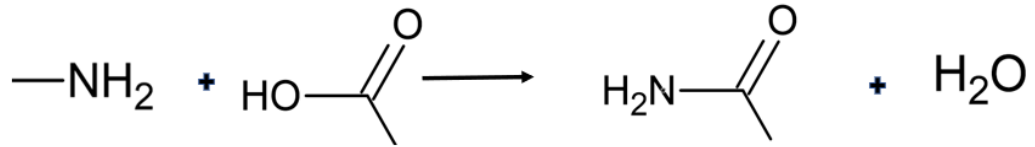
4.2 Yapısal Analiz Sonucu

4.2.1 Fourier dönüşümlü infrared spektroskopi analizi

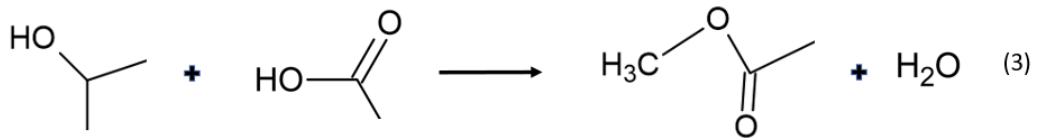
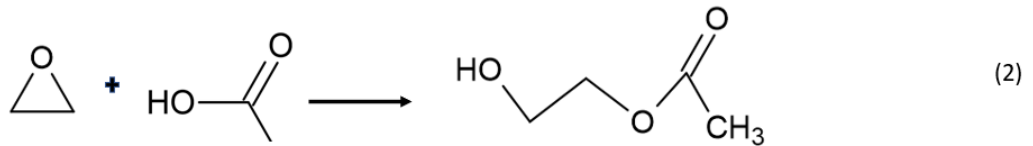
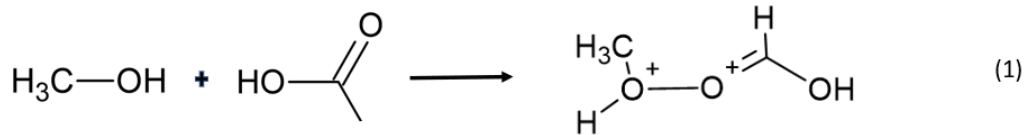
EMAA, ABS ve EVA filamentleri ile hazırlanan kompozit malzemelerin, karbon prepreg içerisinde bulunan epoksi ile arasındaki reaksiyon, reaksiyon basamakları ve FT-IR spektrumları sırasıyla Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13'te gösterilmiştir.

Şekil 4.13 “a” şeklindeki FT-IR spektrumu EMAA ile epoksi arasındaki reaksiyonu göstermektedir. FT-IR spektrumuna göre 2850-2960 cm^{-1} civarındaki pikler EMAA’deki alkanlara 1700 cm^{-1} ve 930 cm^{-1} pikleri EMAA’deki asit gruplarını göstermektedir. 830 cm^{-1} , 1030 cm^{-1} , 1180 cm^{-1} , 1225 cm^{-1} , 1510 cm^{-1} ve 1610 cm^{-1} pikleri ise epoksi grubu ile ilişkilidir. 1530 cm^{-1} , 1580 cm^{-1} ve 1650 cm^{-1} piki Şekil 4.11’de gösterildiği gibi EMAA ve amin grubunun reaksiyona girdiğini kanıtlamıştır (Meure ve diğ., 2012b; Meure, Wu, ve diğ., 2010).

Ayrıca Şekil 4.12’deki reaksiyon basamaklarından da gösterildiği gibi EMAA ile epoksinin reaksiyona girdiğinin bir diğer kanıtı, 830 cm^{-1} , 915 cm^{-1} ve 1035 cm^{-1} piki eter grubuna ait olduğu için hidrojen bağına (1) yada asit-oksiran (2) ve asit-hidroksil (3) gruplarına karşılık gelmektedir. Ayrıca asit ve alkan gruplarının şiddetinin azalması reaksiyonun gerçekleştiği sonucuna ait olduğu atfedilebilir (Azevedo do Nascimento ve diğ., 2020a; Meure ve diğ., 2012b; Meure, Wu, ve diğ., 2010).



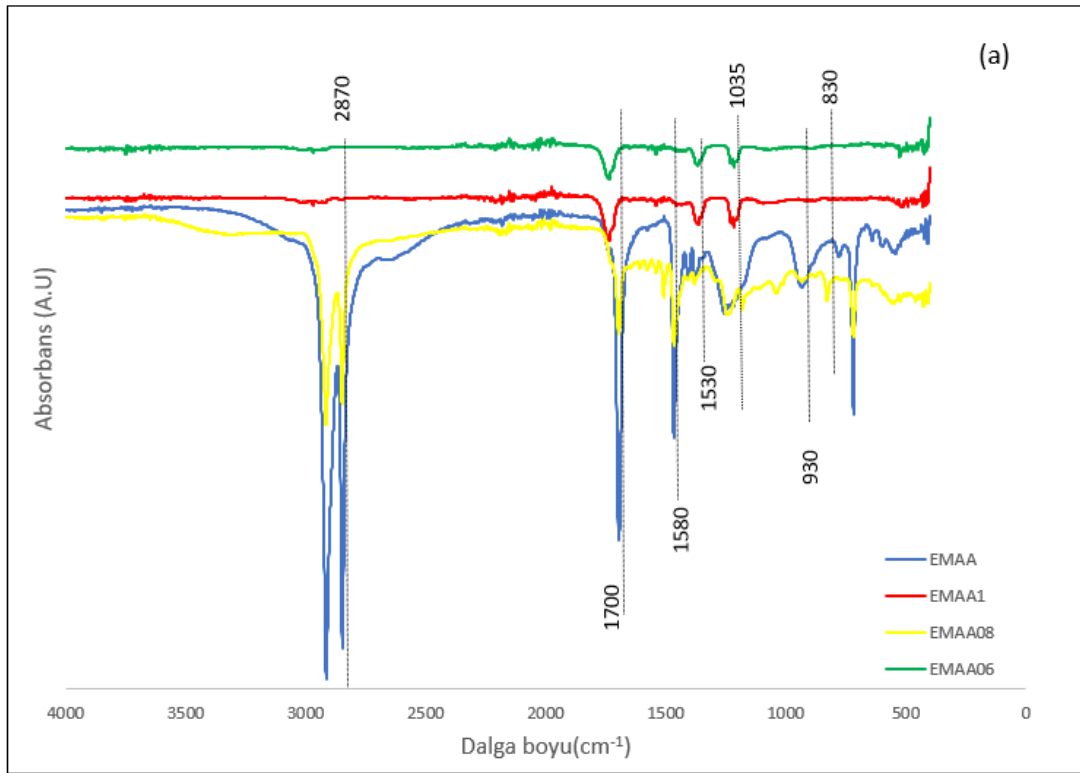
Şekil 4.11 : EMAA ve epoksi arasında geçen birleşme reaksiyonu (Azevedo do Nascimento ve diğ., 2020a; Meure ve diğ., 2012b; Meure, Wu, ve diğ., 2010)



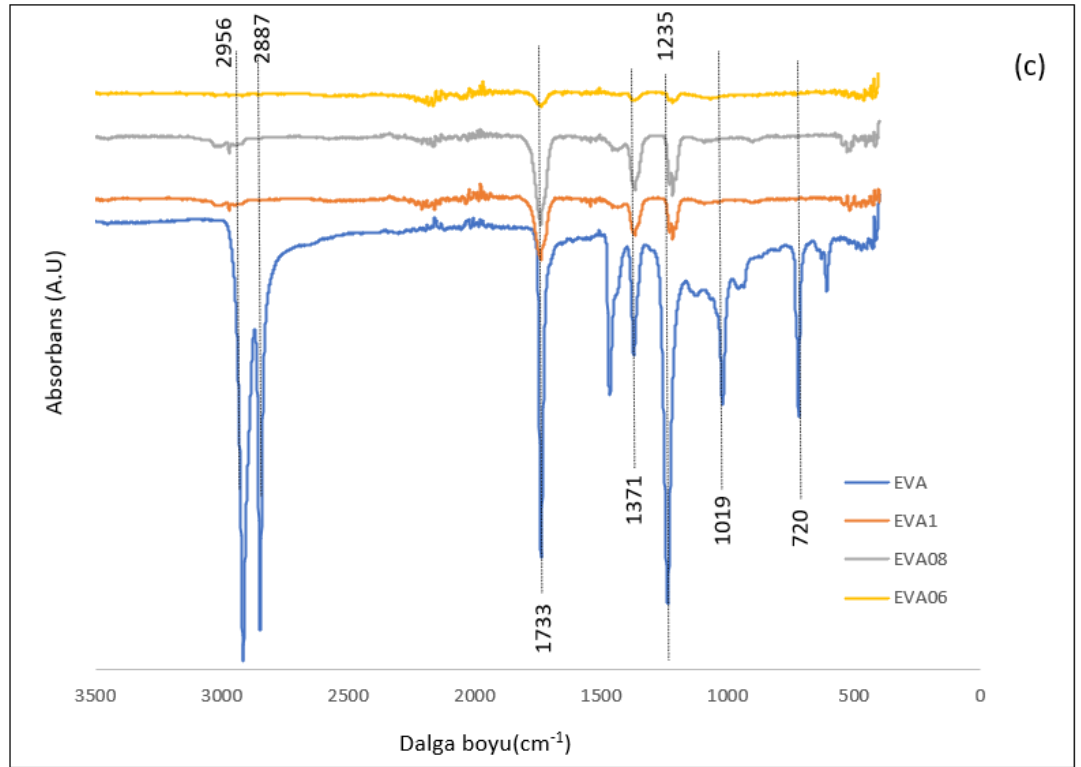
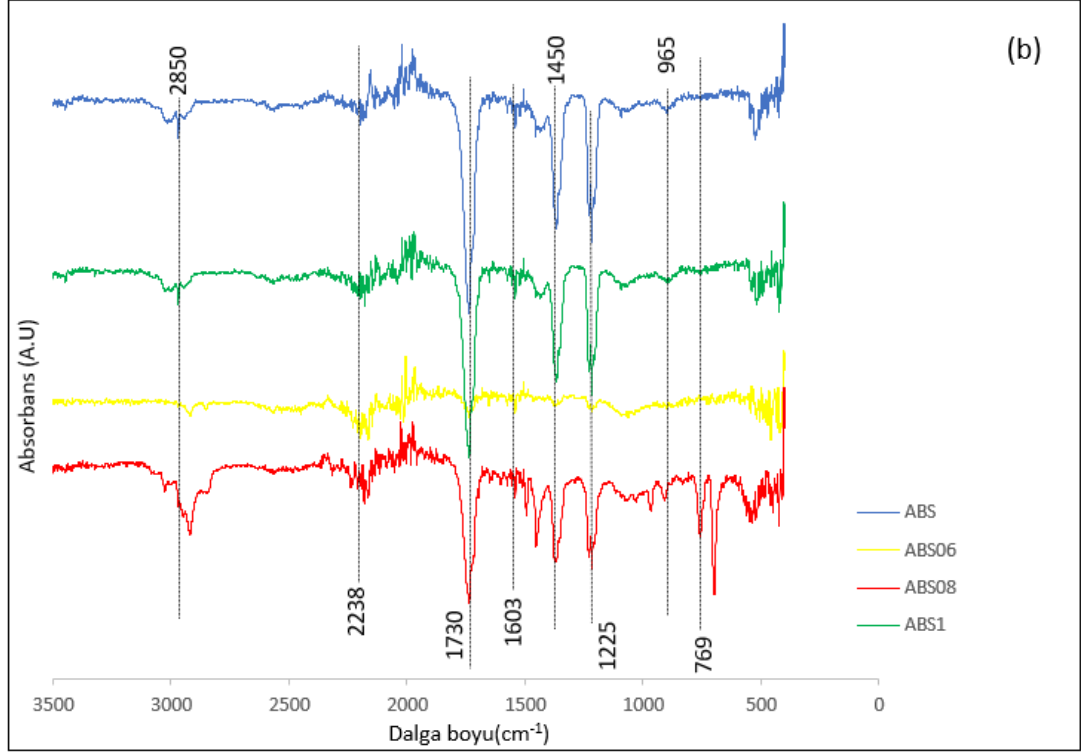
Şekil 4.12 : EMAA ve epoksi arasında geçen reaksiyon basamakları (Azevedo do Nascimento ve diğ., 2020a; Meure, Wu, ve diğ., 2010)

Şekil 4.13 “b” şeklindeki FTIR spektrumu, ABS ile epoksi arasındaki reaksiyonu göstermektedir. Spectruma göre 2238 cm^{-1} piki akrilonitril grubundaki CN, 965 cm^{-1} piki bütadiene ve 1603 cm^{-1} piki stiren grubunda halkalı yapıdaki C=C gerilimine, 1450 cm^{-1} ve 1703 cm^{-1} pikleri ise stiren grubunda halkalı yapıdaki C-C gerilimi olarak tanımlanmaktadır. 830 cm^{-1} , 1225 cm^{-1} , 1610 cm^{-1} ve 1730 cm^{-1} piklerinin ise epoksi grubu ile ilişkili olduğu gösterilmiştir (Cress ve diğ, 2021; J. Wang ve diğ, 2015).

Şekil 4.13 “c” spektrumu EVA ile epoksi arasındaki reaksiyonu göstermektedir. EVA polimerindeki 1738 cm^{-1} piki, ester gruplarına karşılık gelen karbonil (C=O) grubunu, 2956 ve 2887 cm^{-1} pikler ise metilen, 1035 cm^{-1} piki C-O(asetat), 1235 cm^{-1} piki eter (C-O-C) ve 830 cm^{-1} piki CH=CH gruplarına karşılık gelmiştir (Dikobe ve diğ, 2009; Giurcinca ve diğ, 2003).



Şekil 4.13 : EMAA(a), ABS(b) ve EVA(c) filamentleri ile hazırlanan kompozit malzemelerin FT-IR spektrumu



Şekil 4.13 (devam) : EMAA(a), ABS(b) ve EVA(c) filamentleri ile hazırlanan kompozit malzemelerin FT-IR spektrumu

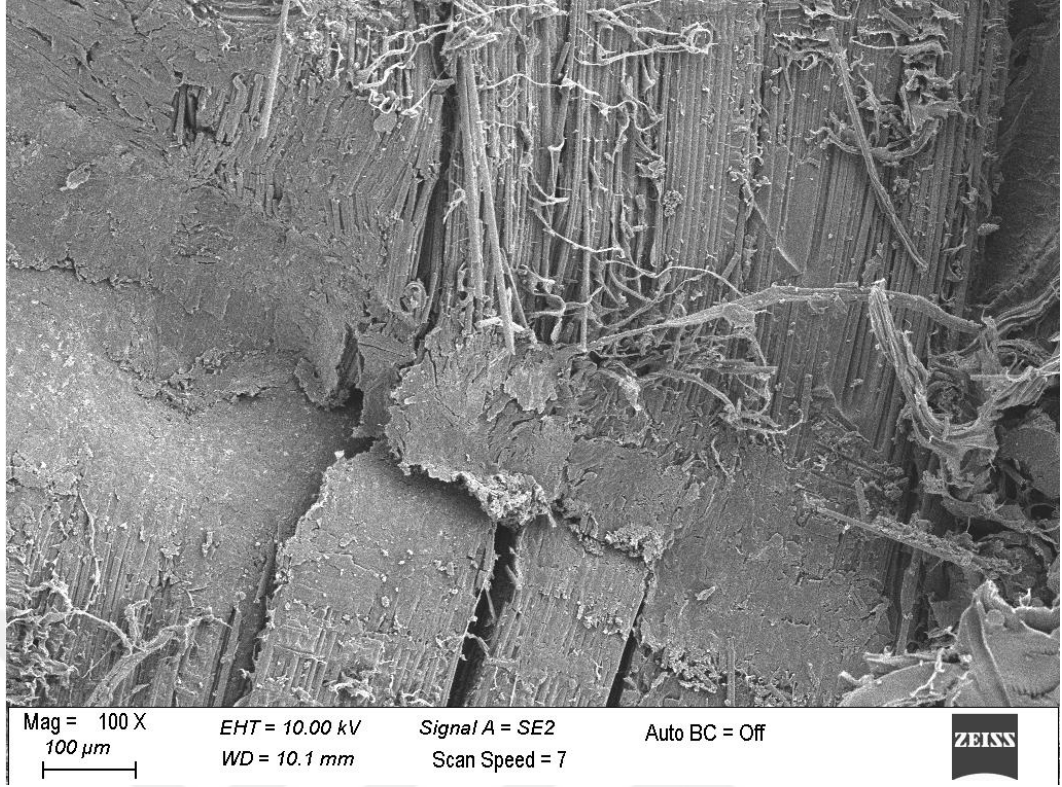
4.3 Morfolojik Analiz Sonuçları

4.3.1 Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntü analizleri

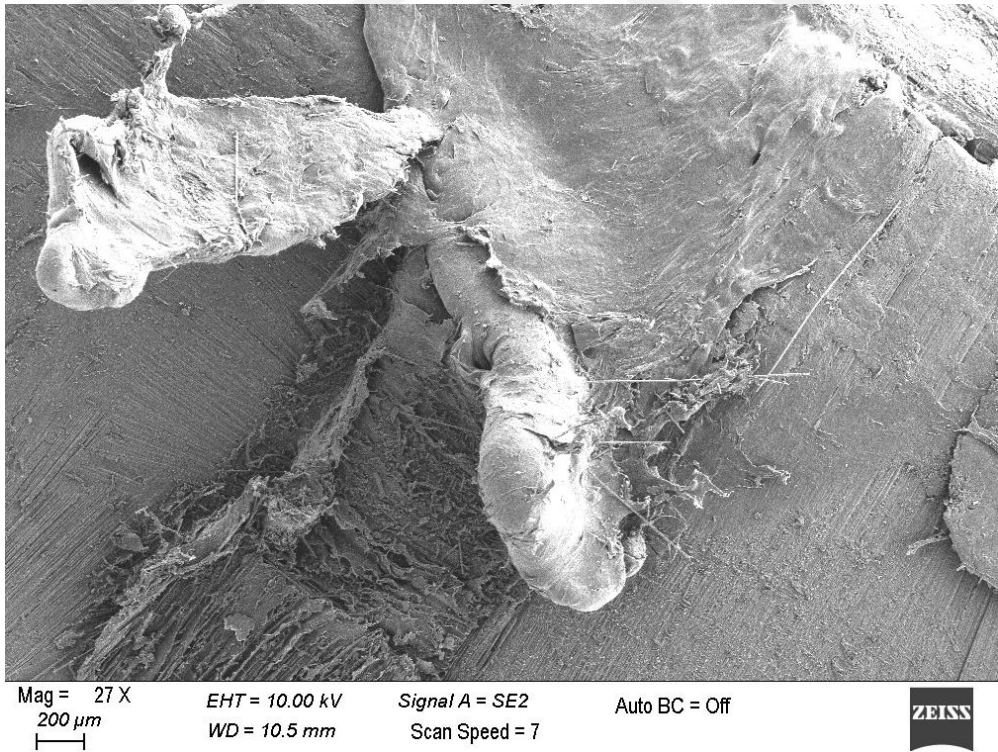
Şekil 4.14, 4.15, 4.16 ve 4.17’de dikiş prosesi ve ABS, EVA ve EMAA polimerleri ile dikilmiş numunelerin tipik kırılma yüzeyleri gösterilmiştir. Şekil 4.14’te onarma prosesi gerçekleşmeden önce katmanlar arasında tipik dikiş yüzeyi gösterilmiştir. Şekil 4.15’te EVA termoplastik onarıcı ajanın kullanımı gösterilmiştir. EVA, EMAA’de olduğu gibi katmanlar arasına basınç etkisi ile yayılma reaksiyonu göstermemiştir. Fakat EVA’in reolojik özellikleri incelendiğinde erime noktası ($\sim 83^{\circ}\text{C}$) düşüktür, ABS ve EMAA’a göre çok düşük viskozitelidir, elastomerik davranış gösterir ve yapışkanlık özelliği bulunmaktadır (R. J. Varley ve diğ, 2013). Bu nedenle ısı varlığında hasarlı bölgelerin arasına kolayca yayılarak, epoksi ile daha fazla etkileşecek yüzey alanı oluşturmuştur. Fakat EVA’in epoksi ile reaksiyonu kısıtlıdır, ama yapışkanlık özelliğinden dolayı soğuduktan sonra kırılma yüzeylerine yapışarak kendi kendine onarma verimliliği EMAA kadar yüksek olmasa da gerçekleşmiştir (Rodriguez et. al., 2011; Varley et. al., 2013; Mouritz et. al., 2020)

Şekil 4.16’te EMAA termoplastik onarıcı ajanın kullanımı gösterilmiştir. EMAA ve epoksi fazları arasında asit-hidroksil yoğunlaşma reaksiyonu gerçekleşmektedir. Reaksiyon sonucunda, EMAA eriyiğini hasarlı bölgeye zorlayan yüksek basınçlı kabarcıklar oluşturan su buharı üretir, EMAA böylece katmanlar arasına kolayca yayılır, burada katılaşıp ve soğuduktan sonra onarma gerçekleşir (Khomkrit ve diğ, 2013; Loh ve diğ, 2021a; Meure ve diğ, 2012a; Pingkarawat, Wang, ve diğ, 2013b, 2013a, 2013c; R. J. Varley ve diğ, 2012b; R. J. Varley ve diğ, 2012).

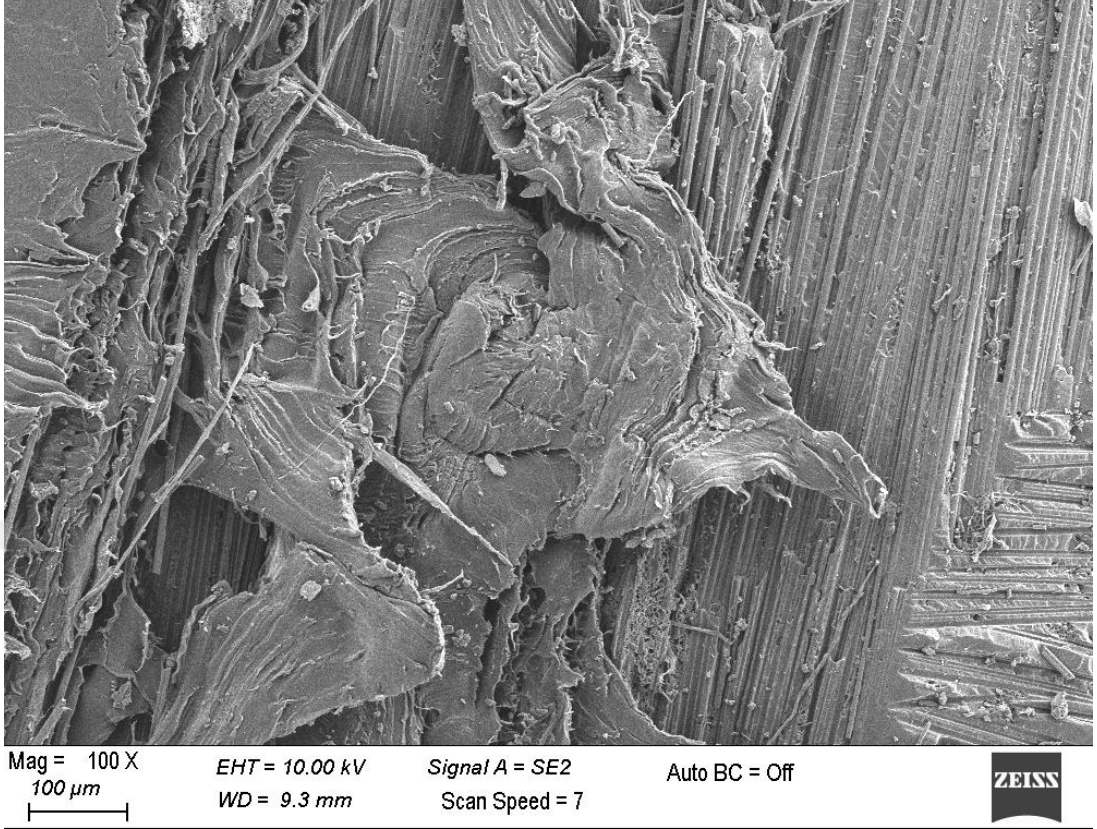
Şekil 4.17’de ABS termoplastik onarıcı ajanın kullanımı gösterilmiştir. Şekile göre ABS termoplastik polimerinin yüksek viskozitesi ve yüksek erime sıcaklığından dolayı hasarlı yüzeylere yayılımı zordur. Yapısında epoksi ile reaksiyona girebilecek doymamış hidrokarbon ($\text{C}=\text{OH}$) ve nitril ($\text{C}=\text{N}$) grupları olmasına rağmen, hasarlı yüzeylerin arasına kısıtlı olarak yayılmaktadır (Pingkarawat, Bhat, ve diğ, 2013b; Pingkarawat ve diğ, 2014b; R. J. Varley ve diğ, 2013).



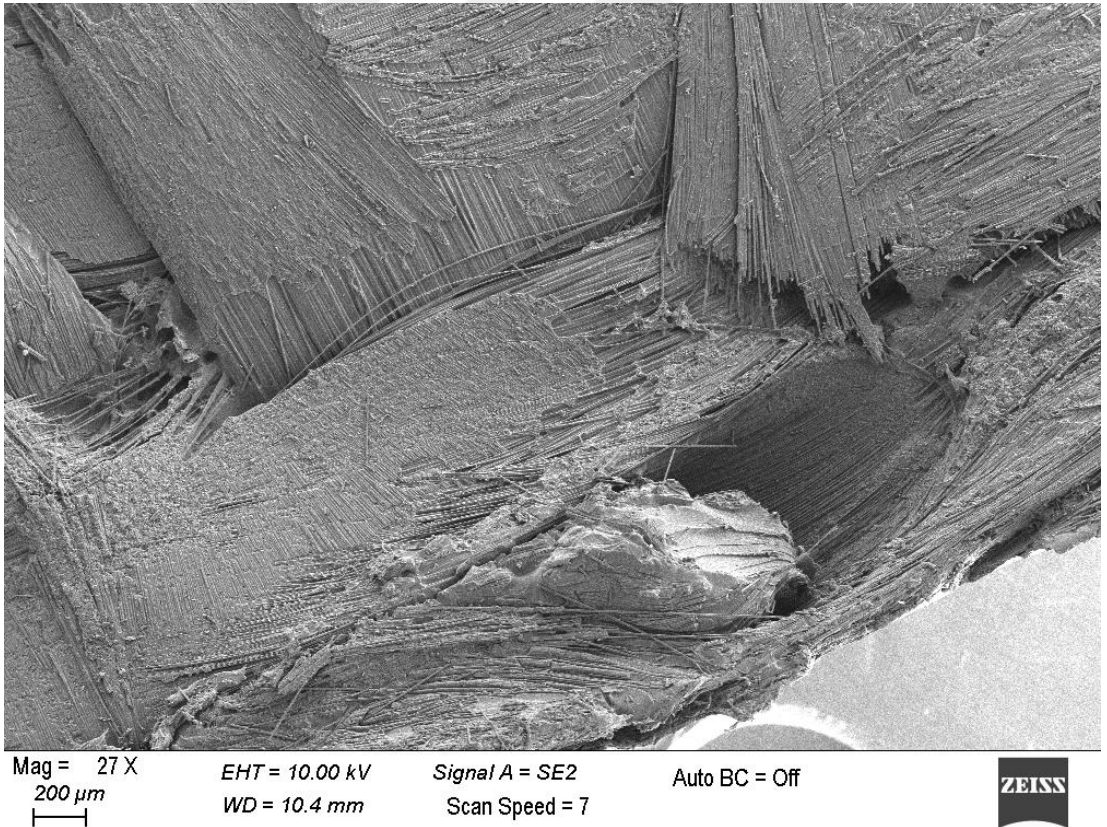
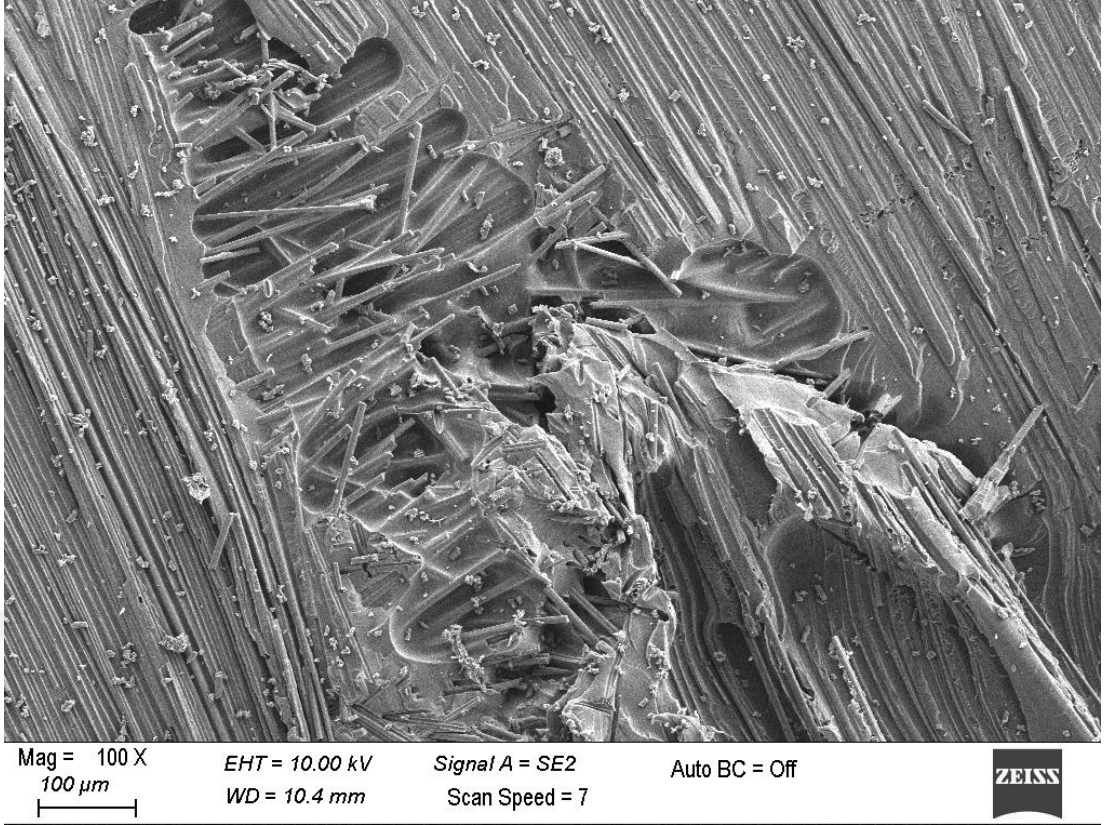
Şekil 4.14 : Onarma prosesi başlangıcındaki katmanlar arası dikişin SEM görüntüleri



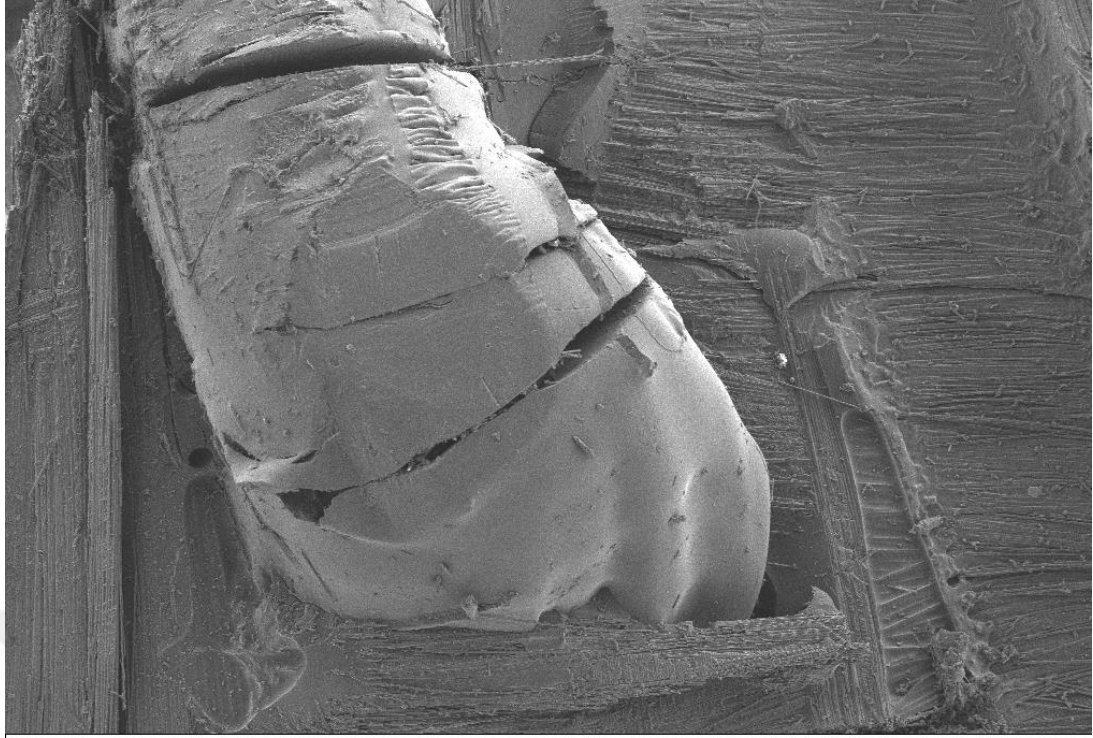
Şekil 4.15 : EVA filamentleri ile üretilmiş kompozit malzemelerin onarma prosesinden sonraki SEM görüntüleri



Şekil 4.15 (devam) : EVA filamentleri ile üretilmiş kompozit malzemelerin onarma prosesinden sonraki SEM görüntüleri



Şekil 4.16 : EMAA filamentleri ile üretilmiş kompozit malzemelerin onarma prosesinden sonraki SEM görüntüleri

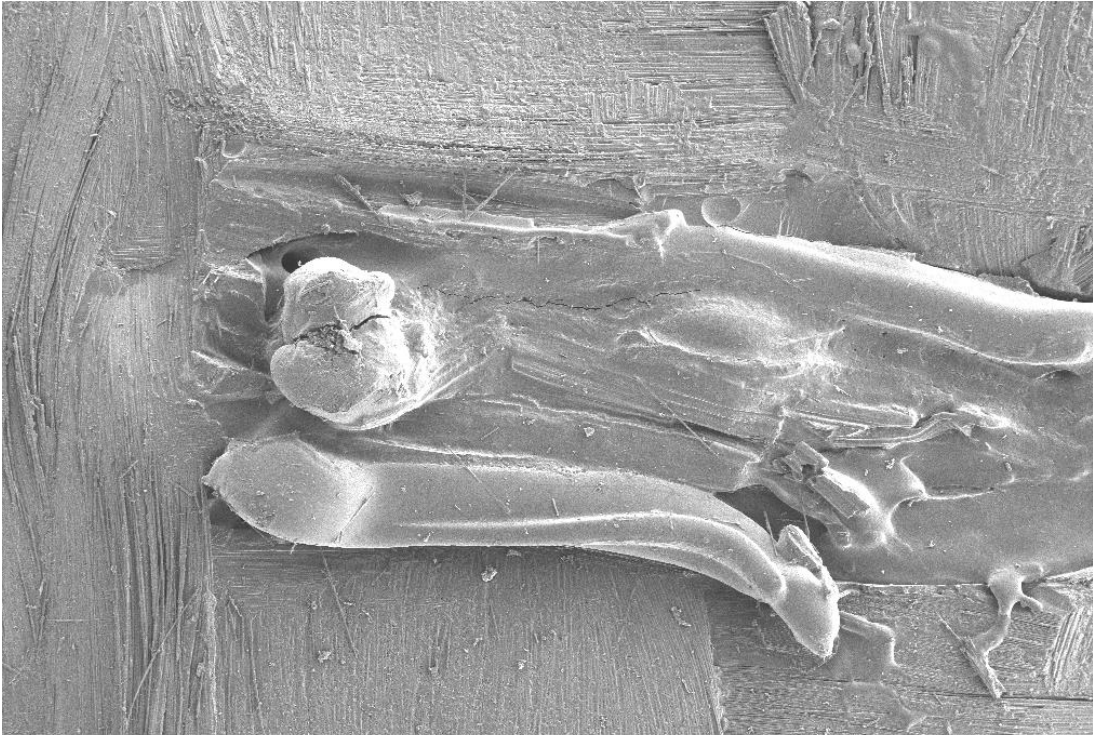


Mag = 27 X
200 μ m

EHT = 10.00 kV
WD = 10.6 mm

Signal A = SE2
Scan Speed = 7

Auto BC = Off



Mag = 21 X
300 μ m

EHT = 10.00 kV
WD = 15.5 mm

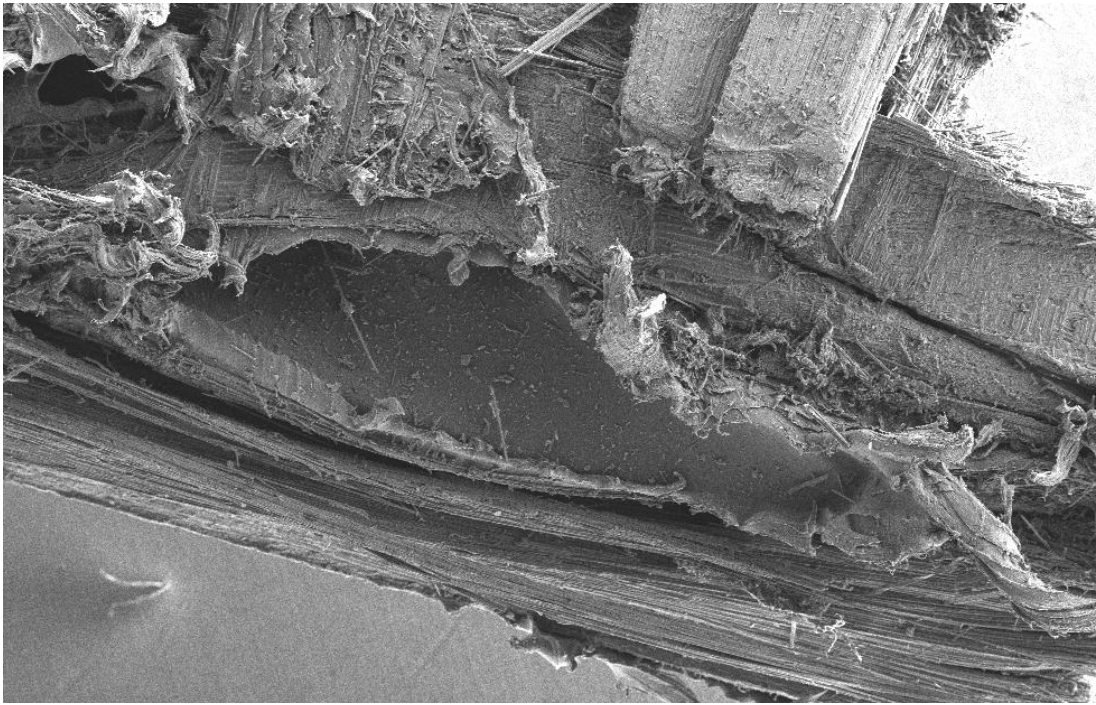
Signal A = SE2
Scan Speed = 7

Auto BC = Off



Şekil 4.17 : ABS filamentleri ile üretilmiş kompozit malzemelerin onarma prosesinden sonraki SEM görüntüleri

Şekil 4.18’de 0,6, 0,8 ve 1,0mm çapında üretilmiş EMAA, ABS ve EVA filamentleri ile dikişin neden olduğu elyaf dalgalanması ve reçine açısından zengin bölgelerin oluşması gösterilmiştir. Dikiş, kompozitte düzlem içi fiber dalgalılığı, düzlem dışı fiber kıvrılması, fiber kırılması ve reçine açısından zengin bölgeler gibi çeşitli mikroyapısal hasarlar oluşturmaktadır. Bu hasar türleri dikişli malzemelerde yaygındır ve geleneksel dikiş yöntemleriyle önlenmesi zordur. Kürlenmemiş prepreg içindeki karbon fiberler, dikiş işlemi sırasında dikiş iğnesi çapı ve çeşidi ve aynı zamanda termoplastik filament cinsine ve çapına bağlı olarak artmaktadır (Farley ve diğ, 2016b; Mouritz ve diğ, 2000c; Pingkarawat, Bhat, ve diğ, 2013c).



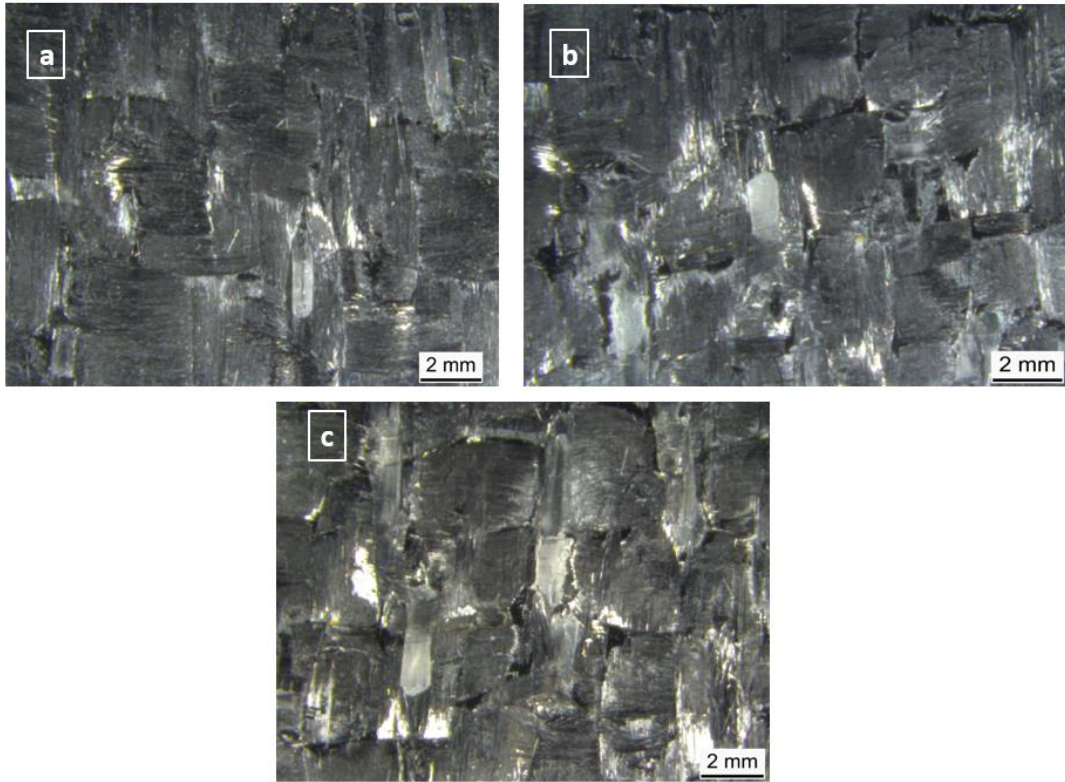
Şekil 4.18 : Termoplastik dikişin neden olduğu düzlem içi elyaf dalgalanması ve reçine açısından zengin bölge

4.3.2 Optik mikroskop analizi

MOD-I katmanlar arası kırılma tokluğu testi sonucunda, kendi kendini onarma prosesi tamamlanmış kompozit numunelerinin, test sonrası kırılma bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.19, Şekil 4.20 ve Şekil 4.21’de gösterilmiştir. MOD-I testi ile, ısı varlığında termoset matris ile termoplastik onarıcı ajanların tepkimesi sonucunda kompozit malzemelerin kendi kendini onardığı kanıtlanmıştır. Onarma verimlilikleri termoplastik ajanların katmanlar arasına yayılımı ve gerçekleştirdikleri

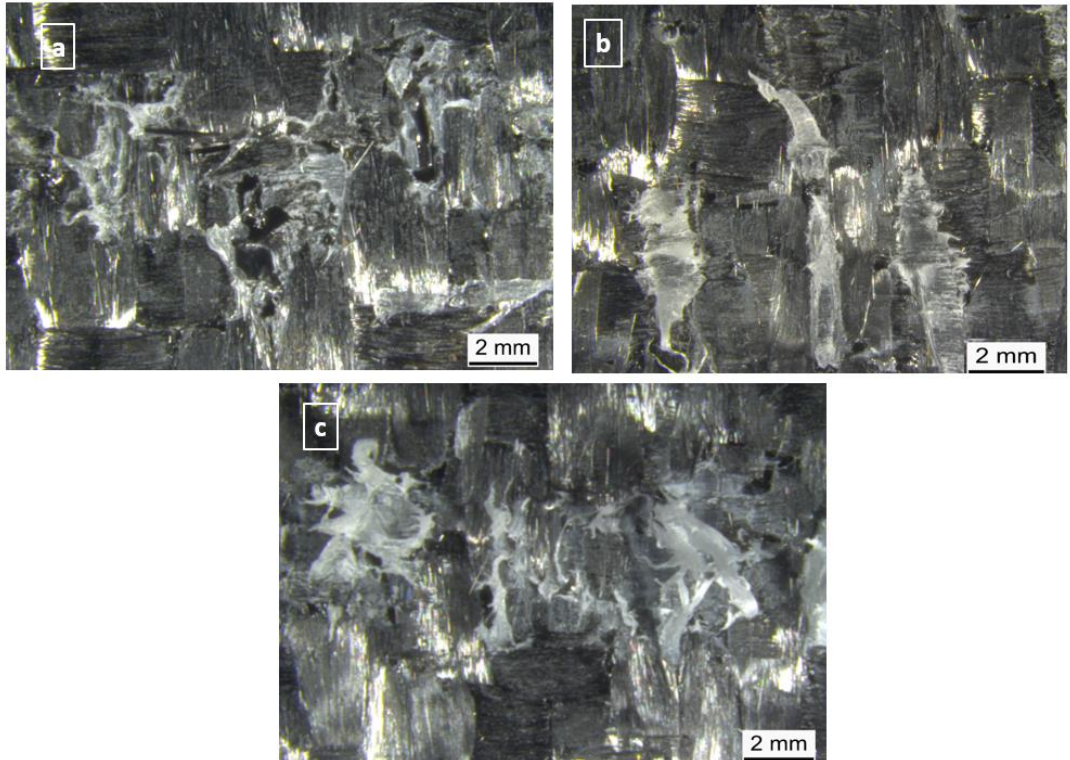
reaksiyona göre değişkenlik göstermektedir. Bu proje de optik mikroskop görüntüleri ile bu malzemelerin katmanlar arasına yayılımını incelenmiştir.

Şekil 4.19’da EMAA filamentleri ile dikilmiş kompozit malzemenin katmanlar arası optik görüntüleri gösterilmiştir. EMAA onarıcı ajanı erime noktası yaklaşık $\sim 90^{\circ}\text{C}$ civarındadır. EMAA-epoksi ile reaksiyona girmesi için erime sıcaklığının üstünde olması gerekmektedir. Bu nedenle kompozit malzemelerin kürlenmesi ve EMAA’in katmanlar arasında eriyebilmesi için $\sim 150^{\circ}\text{C}$ aktivasyon sıcaklığında çalışılmıştır. EMAA’in polimer zincirlerindeki asit grupları ile epoksi reçinesindeki amin gruplarının reaksiyonu sonucunda kompozit malzeme ile EMAA arasında güçlü ara-yüzey yapışması gerçekleşmiştir (Khomkrit ve diğ, 2013; Loh ve diğ, 2021a, 2021b; Meure ve diğ, 2012a; Pingkarawat ve diğ, 2014a; Pingkarawat, Wang, ve diğ, 2013b, 2013c; R. J. Varley ve diğ, 2013; R. J. Varley ve diğ, 2012a; R. J. Varley ve diğ, 2012; T. Yang ve diğ, 2012b). Şekil 4-19’da gösterildiği gibi EMAA filamentlerinin çapı küçüldükçe EMAA’in katmanlar arasına daha fazla yayıldığı ve dolayısı ile EMAA ile kompozit malzeme arasındaki ara-yüzey yapışması arttığından onarma verimliliğinin arttığı Mod-I testi ile de kanıtlanmıştır.



Şekil 4.19 : EMAA optik mikroskop görüntüsü (a) 0,6mm, (b)0,8 ve (c)1,0mm

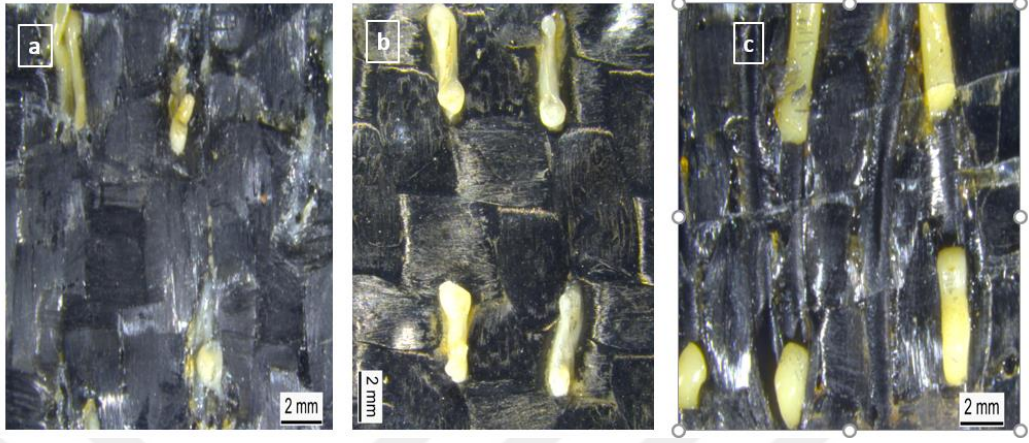
Şekil 4.20’de EVA filamentleri ile dikilmiş kompozit malzemenin katmanlar arası optik görüntüleri gösterilmiştir EVA termoplastik polimerin erime noktası yaklaşık (~83°C) civarındadır. Prosesi aynı koşullarda gerçekleştirdiğimiz için aktivasyon enerjisi olarak ~150°C’ ısıtılmıştır. Bu da EVA’ın erime sıcaklığının (~83°C) üzerinde gerçekleştiğini ve EVA’ın katmanlar arasına kolayca yayılmasına neden olmuştur. EVA ile epoksi arasında tam olarak reaksiyon gerçekleşmediği için onarma verimliliği EMAA kadar etkin değildir. Fakat EVA güçlü bir yapışkan özellik göstermektedir (Pingkarawat, Bhat, ve diğ, 2013b; Pingkarawat ve diğ, 2015; R. J. Varley ve diğ, 2013). Şekil 4.20’de gösterildiği gibi EVA’da filament çapı arttıkça, katmanlar arasına yayılım daha az gerçekleşmiş olsa da epoksi ile yapışma alanı artmıştır. Ancak 0,6mm çapında kullanılan EVA filamentleri ile üretilen kompozitlerde katmanlar arasına yayılma daha fazla gerçekleşmiştir. Böylece hem EVA ile epoksi arasındaki reaksiyonun arttığı hemde epoksi yüzeyleri ile daha fazla yapışmanın gerçekleşmesi nedeniyle onarma verimliliğinin yüksek olduğu Mod-I testi ile de kanıtlanmıştır.



Şekil 4.20 : EVA optik mikroskop görüntüsü (a) 0,6mm, (b)0,8 ve (c)1,0mm

Şekil 4.21’de ABS filamentleri ile dikilmiş kompozit malzemenin katmanlar arası optik görüntüleri gösterilmiştir ABS onarıcı ajanın erime noktası ~210°C. Proses koşulları sabit olduğu için aktivasyon enerjisi ~ 150°C kompozit malzeme üretilmiştir.

Fakat ABS'nin erime sıcaklığı ($\sim 210^{\circ}\text{C}$) ve viskozitesi ($3,4 \cdot 10^{-4}$ Pa.s) yüksek olduğu için erimenin ve katmanlar arasında yayılmanın tam anlamı ile gerçekleşemediği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.21 : ABS optik mikroskop görüntüsü (a) 0,6mm, (b)0,8 ve (c)1,0mm

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezin temel amacı, farklı çaplarda üretilen EMAA, EVA ve ABS filamentlerinin, dikiş prosesi ile karbon elyaf prepreg malzemelere uygulanarak 3 boyutlu kompozit malzemelerin elde edilmesidir. Kompozit malzemelere dikiş prosesi uygulanmasının temel amacı, dikey yöndeki filamentlerin, paralel sıradaki filamentler ile etkileşmesi, ve hasar oluşumu sırasında onarıcı ajanların tüm katmanlar arasına kolay yayılımı ile onarma performansının artırılmasıdır.

Genel olarak kompozit malzemelerin içerisindeki filament yoğunluğu arttıkça malzeme içerisindeki karbon oranı azalmaktadır. Aynı şekilde dikiş prosesi kompozit içerisinde lif kıvrılması, kat dalgalanması, lif kırılması ve/veya matris çatlaması gibi mikro yapısal hasarlar oluşturmaktadır. Tüm bu etkenlerde kompozitlerin mekanik özelliklerinin düşmesine neden olmaktadır (Gao et. al., 2019; Mouritz et. al., 2010; Karpal et. al., 2014).

Şekil 4.5-a, b ve c'de 0,6, 0,8 ve 1mm çaplarındaki sırasıyla EMAA, EVA ve ABS filamentleri ile hazırlanmış kompozit malzemelerin çekme mukavemeti test sonuçları gösterilmiştir. Buna göre, 0,6mm ve 0,8mm çapında EMAA filamentleri ile üretilmiş kompozit malzemelerin çekme mukavemeti, kontrol numunesine göre sırasıyla %17 ve %8 artış gerçekleştirmişken, 1mm çapında filament ile üretilen kompozit malzemenin kopma mukavemetinde ise %6 oranında düşme gerçekleşmiştir. 0,6mm ve 0,8mm çapında kullanılan EVA filamentleri ile üretilmiş kompozit malzemenin çekme mukavemeti, kontrol numunesine göre yaklaşık %14 oranında düşmüştür. 1mm çapında kullanılan EVA filamentleri ile üretilmiş kompozit malzemenin mukavemetinde ise %17 oranında artış gerçekleşmiştir. Diğer yandan, 0,6mm ve 0,8mm çapında kullanılan ABS filamentleri ile üretilen kompozit malzemenin çekme mukavemeti, kontrol numunesine göre yaklaşık %30 oranında düşmüştür. 1mm çapında filament ile üretilen kompozitin çekme mukavemetinde ise belirgin bir değişiklik gerçekleşmemiştir. Ayrıca Çizelge 4.3'te ve Şekil 4.8-a, b ve c'de 0,6, 0,8 ve 1mm çaplarındaki sırasıyla ABS, EMAA ve EVA filamentleri ile hazırlanmış kompozit malzemelerin eğilme mukavemeti değerleri gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar göz önünde tutulduğunda, dikiş prosesi, kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemetlerinde genel bir artış olmasına sebep olmuştur. Bunun da, dikişlerin, katları sıkıştırması, böylece kompozitin lif içeriğini artırması ve filamentlerin

kompozit yapı içerisinde köprü görevi görmesinden kaynaklandığı düşünülmüştür (Mouritz, 2020; Mouritz ve diğ., 1997; Mouritz ve diğ., 2000a, 2010a).

Bu projede onarıcı ajan olarak EMAA, EVA ve ABS termoplastik polimerleri seçilmiştir. Çünkü EMAA'nın asit grupları ile epoksideki hidroksil grupları arasında ısı varlığında birleşme reaksiyonu oluşturmaktadır ve basınç etkisi ile onarma prosesi sağlanmaktadır. EVA düşük viskoziteli ve yapışkanlık özelliği bulunmaktadır. ABS ise epoksi ile reaksiyona girecek doymamış hidrokarbon ve nitril grupları içermesidir (Pingkarawat ve diğ., 2015; R. J. Varley ve diğ., 2013). 4.13'te gösterilen FT-IR spektrumları, hazırlanan kompozit malzemelerin içinde, EMAA, ABS ve EVA filamentleri ile karbon prepreg içerisinde bulunan epoksi arasında oluşan reaksiyonu kanıtlamıştır.

Şekil 4.15, 4.16 ve 4.17'de, sırasıyla EVA, EMAA ve ABS filamentlerinin, hazırlanan kompozit yapılarının içindeki durumunu gösteren SEM görüntüleri sunulmuştur. Şekil 4.19, 4.20 ve 4.21'de, ise sırasıyla EMAA, EVA ve ABS filamentlerinin, hazırlanan kompozit yapılarının içindeki durumunu gösteren optik mikroskop görüntüleri sunulmuştur. Görüldüğü üzere, EVA düşük viskozitesi, düşük erime noktası ve yapışkanlığı nedeniyle, EMAA ise epoksi ile iyi bir şekilde reaksiyona girmesi sebebiyle kompozit içerisinde daha iyi dağılım gösterirken, ABS filamentlerinin çoğu yerde erimeden kaldığı görülmüştür.

Mod-I katmanlar arası test sonuçları incelendiğinde, dikiş prosesinde filamentlerin çapları arttıkça kırılma tokluklarının arttığı gözlenmiştir. Onarma verimliliği en fazla, EMAA06 (%189), EMAA08 (%141) ve EMAA1 (%124) numunelerinde elde edilmiştir. Ayrıca EVA06 (%133), EVA08 (%115) ve EVA1 (%110) numuneleri de onarma verimliliği sağlanmıştır. Fakat ABS06 (%-53), ABS08 (%-64) ve ABS1 (%-67) numunelerinde, elde edilen sonuçlar gözönüne alındığında, onarma gerçekleşmediği sonucuna varılmıştır.

Bu aşamadan sonra, bu alanda çalışılabilecek konular arasında, EMAA ve EVA gibi daha iyi iyileşme özelliği gösteren termoplastik polimerlerin üzerine yoğunlaşıp farklı katkılandırmalar (örneğin karbon türevi katkılandırma) yapılarak, daha ince termoplastik filamentler üretilmesi ve kompozitlerin bu ince filamentler ile dikim yapılması sayılabilir.

6. KAYNAKLAR

- A, S. M., & Cadambi, R. M.** (2020). Development of Cost Effective Out-of-Autoclave Technology-Vacuum Infusion Process with Tailored Fibre Volume Fraction. *Materials Today: Proceedings*, 21, 1293–1297.
- Abdalla, FH, Megat, MH, Sapuan, MS, ve diğ.** (2008), Determination of volume fraction values of filament wound glass and carbon fiber reinforced Composites. *J Eng Appl Sci*, 4, 7–11.
- Aguirresarobe, R. H., Martin, L., Aramburu, N., Irusta, L., & Fernandez-Berridi, M. J.** (2016). Coumarin based light responsive healable waterborne polyurethanes. *Progress in Organic Coatings*, 99, 314–321.
- Aguirresarobe, R. H., Nevejans, S., Reck, B., Irusta, L., Sardon, H., Asua, J. M., & Ballard, N.** (2021). Healable and self-healing polyurethanes using dynamic chemistry. *Progress in Polymer Science*, 114, 101362.
- Ahangaran, F., Hayaty, M., Navarchian, A. H., Pei, Y., & Picchioni, F.** (2019). Development of self-healing epoxy composites via incorporation of microencapsulated epoxy and mercaptan in poly(methyl methacrylate) shell. *Polymer Testing*, 73, 395–403.
- Ahn, H., & Yu, W. R.** (2017). Mechanical analysis of 3D braided and woven composites using fiber-based continuum analysis. *Composite Structures*, 160, (1105-1118)
- Akkerman, R., Bouwman, M., & Wijskamp, S.** (2020). Analysis of the Thermoplastic Composite Overmolding Process: Interface Strength. *Frontiers in Materials*, 0, 27.
- Akkerman, R., & Haanappel, S. P.** (2015). Thermoplastic composites manufacturing by thermoforming. *Advances in Composites Manufacturing and Process Design*, 111–129.
- Almeida, A., Possemiers, S., Boone, M. N., de Beer, T., Quinten, T., van Hoorebeke, L., Remon, J. P., & Vervaet, C.** (2011). Ethylene vinyl acetate as matrix for oral sustained release dosage forms produced via hot-melt extrusion. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 77(2), 297–305.
- Amiri, A., & Cavalli, M. N.** (2013). Experimental investigation of fatigue behavior of carbon fiber composites using fully reversed four point bending test. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, 7, 131–137.
- An, S., Lee, M. W., Yarin, A. L., & Yoon, S. S.** (2018). A review on corrosion-protective extrinsic self-healing: Comparison of microcapsule-based systems and those based on core-shell vascular networks. *Chemical Engineering Journal*, 344, 206–220.
- An, W. J., Kim, C. H., Choi, J. H., & Kweon, J. H.** (2019). Static strength of RTM composite joint with I-fiber stitching process. *Composite Structures*, 210, 348–353.

- Andrew, J. J., Srinivasan, S. M., Arockiarajan, A., & Dhakal, H. N.** (2019). Parameters influencing the impact response of fiber-reinforced polymer matrix composite materials: A critical review. In *Composite Structures*, 224, 111007.
- Durgun,** (2013). *II. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu Vakum İnfüzyon Yöntemi İle Karbon Fiber Motor Kaput Üretimi*, İzmir.
- Argüelles, A., Viña, J., Canteli, A. F., Castrillo, M. A., & Bonhomme, J.** (2008). Interlaminar crack initiation and growth rate in a carbon-fibre epoxy composite under mode-I fatigue loading. *Composites Science and Technology*, 64, 2325-2331.
- Arsac, A., Carrot, C., & Guillet, J.** (2000). Determination of Primary Relaxation Temperatures and Melting Points of Ethylene Vinyl Acetate Copolymers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 2000* 61:3, 61(3), 681–685.
- Asi, D.** (2018). *Polimer matrisli kompozit malzemelerde ilave olarak kullanılan parçacıkların geometrisinin kompozit malzemelerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerine etkisinin araştırılması*. (Doktora Tezi), Uşak Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uşak
- ASTM.** (2017). *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials (D3039/D3039M-17)*. Retrieved from In *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM** (2019). *Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials (ASTMD7264 / D7264M-07)*. Retrieved from <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D7264D7264M-07.htm>
- ASTM** (2014a). *Standard Test Method for Tensile Properties of Single Textile Fibers. ASTM D3822/D3822M - Standards*.
- ASTM** (2014b). *Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites. (ASTM D5528-13)*. Retrieved from In American Standard of Testing Methods.
- ASTM** (2021) *Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins. (ASTM D2584-18)* Retrieved from <https://standards.globalspec.com/std/13067682/astm-d2584-18>
- Aveyard, R., Binks, B. P., & Clint, J. H.** (2003). Emulsions stabilised solely by colloidal particles. *Advances in Colloid and Interface Science*, 100–102, 503–546.
- Avrupa Birliği'nin Düşük Karbon Emisyonlu Ulaştırma Sektörü Stratejileri Ve Türk Otomotiv Sektörü.** (2017), Retrieved from, <https://www.dunyaenerji.org.tr/avrupa-birliginin-dusuk-karbon-emisyonlu-ulastirma-sektoru-stratejileri-ve-turk-otomotiv-sektoru/>
- Aymerich, F., Priolo, P., & Sun, C. T.** (2003). Static and fatigue behaviour of stitched graphite/epoxy composite laminates. *Composites Science and Technology*, 63(6), 907–917.

- Azevedo do Nascimento, A., Fernandez, F., S. da Silva, F., P.C. Ferreira, E., José, J. D., & Cysne Barbosa, A. P.** (2020a). Addition of poly (ethylene-co-methacrylic acid) (EMAA) as self-healing agent to carbon-epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 137, 106016.
- Azevedo do Nascimento, A., Fernandez, F., S. da Silva, F., P.C. Ferreira, E., José, J. D., & Cysne Barbosa, A. P.** (2020b). Addition of poly (ethylene-co-methacrylic acid) (EMAA) as self-healing agent to carbon-epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 137, 106016.
- Azevedo do Nascimento, A., Fernandez, F., S. da Silva, F., P.C. Ferreira, E., José, J. D., & Cysne Barbosa, A. P.** (2020c). Addition of poly (ethylene-co-methacrylic acid) (EMAA) as self-healing agent to carbon-epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 137, 106016.
- Balasubramanian, M.** (2014). *Composite materials and processing*. New York, USA, CRC Press.
- Barczewski, M., Matykiewicz, D., Andrzejewski, J., & Skórczewska, K.** (2016). Application of waste bulk moulded composite (BMC) as a filler for isotactic polypropylene composites. *Journal of Advanced Research*, 7(3), 373–380.
- Bayraktar, Ö.** (2016). *Öngeriimli karbon elyaf takviyeli kompozit üretimi için sistem tasarımı, imalatı ve kompozit malzeme üretimi*. (Yüksek Lisans), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Behzadnasab, M., Mirabedini, S. M., Esfandeh, M., & Farnood, R. R.** (2017). Evaluation of corrosion performance of a self-healing epoxy-based coating containing linseed oil-filled microcapsules via electrochemical impedance spectroscopy. In *Progress in Organic Coatings*, 105, 212–224
- Beier, U., Fischer, F., Sandler, J. K. W., Altstädt, V., Weimer, C., & Buchs, W.** (2007). Mechanical performance of carbon fibre-reinforced composites based on stitched preforms. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(7), 1655–1663.
- Beiss, T., Menacher, M., Feulner, R., Huelder, G., & Osswald, T. A.** (2010). Vibration joining of fiber-reinforced thermosets. *Polymer Composites*, 31(7), 1205–1212.
- Benson Dexter, H., & Funk, J. G.** (1986). Impact Resistance And Interlaminar Fracture Toughness Of Through-The-Thickness Reinforced Graphite/Epoxy. *27th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, San Antonio, TX, U.S.A.
- Bergman, S. D., & Wudl, F.** (2008). Mendable polymers. *Journal of Materials Chemistry*, 18(1), 41–62.
- Bi, H., Ye, G., Sun, H., Ren, Z., Gu, T., & Xu, M.** (2021). Mechanically robust, shape memory, self-healing and 3D printable thermoreversible cross-

linked polymer composites toward conductive and biomimetic skin devices applications. *Additive Manufacturing*, 49, 102487.

- Billiet, S., Hillewaere, X. K. D., Teixeira, R. F. A., & Du Prez, F. E.** (2013). Chemistry of crosslinking processes for self-healing polymers. In *Macromolecular Rapid Communications*, 34(4), 290-309
- Blaiszik, B. J., Kramer, S. L. B., Olugebefola, S. C., Moore, J. S., Sottos, N. R., & White, S. R.** (2010). Self-healing polymers and composites. *Annual Review of Materials*, 40, 179-211
- Bleay, S. M., Loader, C. B., Hawyes, V. J., Humberstone, L., & Curtis, P. T.** (2001). A smart repair system for polymer matrix composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32(12), 1767–1776.
- Bode, S., Zedler, L., Schacher, F. H., Dietzek, B., Schmitt, M., Popp, J., Hager, M. D., & Schubert, U. S.** (2013). Self-healing polymer coatings based on crosslinked metallosupramolecular copolymers. *Advanced Materials*, 25(11), 1634-1638
- Brown, E. N., Sottos, N. R., & White, S. R.** (2002). Fracture testing of a self-healing polymer composite. *Experimental Mechanics*, 42(4), 372–379.
- Brown, E. N., White, S. R., & Sottos, N. R.** (2004). Microcapsule induced toughening in a self-healing polymer composite. *Journal of Materials Science* 2004 39:5, 39(5), 1703–1710.
- Bulut, M.** (2014). *Türkiyede kompozit malzeme üretimi ve kompozit malzeme sektörünün genel değerlendirilmesi.* (Yüksek Lisans). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Calderón-Villajos, R., López, A. J., Peponi, L., Manzano-Santamaría, J., & Ureña, A.** (2019). 3D-printed self-healing composite polymer reinforced with carbon nanotubes. *Materials Letters*, 249, 91–94.
- Campbell, F. C.** (2003). *Manufacturing Processes for Advanced Composites.* Missouri, USA, Elsevier Science
- Canadell, J., Goossens, H., & Klumperman, B.** (2011). Self-Healing Materials Based on Disulfide Links. *Macromolecules*, 44(8), 2536–2541.
- Canary, S. A., & Stevens, M. P.** (1992). Thermally reversible crosslinking of polystyrene via the furan–maleimide Diels–Alder reaction. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 30(8), 1755–1760.
- Centea, T., Grunenfelder, L. K., & Nutt, S. R.** (2015a). A review of out-of-autoclave prepregs – Material properties, process phenomena, and manufacturing considerations. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 70, 132–154.
- Centea, T., Grunenfelder, L. K., & Nutt, S. R.** (2015b). A review of out-of-autoclave prepregs – Material properties, process phenomena, and manufacturing considerations. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 70, 132–154.

- CFIP - Technology of carbon fibre injection in 3D printing.** (2020). Retrieved August 16, 2021, from <https://eurecat.org/en/portfolio-items/cfip/>
- Chaudhari, A. B., Tatiya, P. D., Hedao, R. K., Kulkarni, R. D., & Gite, V.** (2013). Polyurethane Prepared from Neem Oil Polyesteramides for Self-Healing Anticorrosive Coatings. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(30), 10189–10197.
- Cheng, Y., Xiao, X., Pan, K., & Pang, H.** (2020). Development and application of self-healing materials in smart batteries and supercapacitors. In *Chemical Engineering Journal*, 380, 122565
- Chuo, T. W., Wei, T. C., & Liu, Y. L.** (2013). Electrically driven self-healing polymers based on reversible guest-host complexation of β -cyclodextrin and ferrocene. *Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry*, 51(16), 3395–3403.
- Iciewicz, L. B.,** *Composite Aircraft Structure - an overview | ScienceDirect Topics.* (n.d.). Retrieved December 16, 2020, from <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/composite-aircraft-structure>
- Continuous Fiber Injection Process increases strength of plastic, metals and ceramics - Compositi Magazine.** (2020). Retrieved December 29, 2021, from <https://www.compositimagazine.it/continuous-fiber-injection-process-increases-strength-of-plastic-metals-and-ceramics/>
- Coope, T. S., Wass, D. F., Trask, R. S., & Bond, I. P.** (2014). Repeated self-healing of microvascular carbon fibre reinforced polymer composites. *Smart Materials and Structures*, 23(11), 115002.
- Cress, A. K., Huynh, J., Anderson, E. H., O'Neill, R., Schneider, Y., & Keleş, Ö.** (2021). Effect of recycling on the mechanical behavior and structure of additively manufactured acrylonitrile butadiene styrene (ABS). *Journal of Cleaner Production*, 279, 123689.
- Curved auto part made with pultrusion.** (2020). *Reinforced Plastics*, 64(4), 172, from <https://doi.org/10.1016/J.REPL.2020.06.051>
- Curved pultrusions enter production | CompositesWorld.** (2021). Retrieved August 16, 2021, from <https://www.compositesworld.com/articles/curved-profiles-radius-pultrusion>
- Das, S., Warren, J., West, D., & Schexnayder, S. M.** (2016). *Global Carbon Fiber Composites Supply Chain Competitiveness Analysis.* www.osti.gov/scitech
- Dau, F., Dano, M. L., & Duplessis-Kergomard, Y.** (2016). Experimental investigations and variability considerations on 3D interlock textile composites used in low velocity soft impact loading. *Composite Structures*, 153
- Deniz, M. E.** (2005). *Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ve ısıl işleme presleme tekniğini kullanarak kompozit malzeme üretecek bir düzeneğin tasarım ve imalatı.* (Yüksek Lisans), Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.

- Dikobe, D. G., & Luyt, A. S.** (2009). Morphology and properties of polypropylene/ethylene vinyl acetate copolymer/wood powder blend composites. *Express Polymer Letters*, 3(3), 190–199.
- Domun, N., Paton, K. R., Hadavinia, H., Sainsbury, T., Zhang, T., & Mohamud, H.** (2017). Enhancement of Fracture Toughness of Epoxy Nanocomposites by Combining Nanotubes and Nanosheets as Fillers. *Materials*, 10(10), 1179.
- Dong, C., Zhou, J., Ji, X., Yin, Y., & Shen, X.** (2019). Study of the curing process of carbon fiber reinforced resin matrix composites in autoclave processing. *Procedia Manufacturing*, 37, 450-458
- Drake, D. A., Sullivan, R. W., Clay, S. B., & DuBien, J. L.** (2021). Influence of stitching on the fracture of stitched sandwich composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 145, 106383.
- Dransfield, K., Baillie, C., & Mai, Y. W.** (1993). On stitching as a method for improving the delamination resistance of CFRPs. *Proceedings of the International Conference on Advanced Composite Materials*.
- Dransfield, K., Baillie, C., & Mai, Y. W.** (1994b). Improving the delamination resistance of CFRP by stitching—a review. *Composites Science and Technology*, 50(3), 305–317.
- E., B.** (2017). Introduction to Composite Materials Design by Ever J. Barbero. *CRC Press*, 573.
- Elektron Mikroskobu – Nükleer Bilimler Enstitüsü.** (2021). Retrieved September 6, 2021, from <http://nukbilimler.ankara.edu.tr/elektron-mikroskobu/>
- Esser-Kahn, A. P., Thakre, P. R., Dong, H., Patrick, J. F., Vlasko-Vlasov, V. K., Sottos, N. R., Moore, J. S., & White, S. R.** (2011). Three-Dimensional Microvascular Fiber-Reinforced Composites. *Advanced Materials*, 23(32), 3654–3658.
- Fang, Y., Du, X., Du, Z., Wang, H., & Cheng, X.** (2017). Light- and heat-triggered polyurethane based on dihydroxyl anthracene derivatives for self-healing applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(17), 8010–8017.
- Farley, G. L., & Dickinson, L. C.** (2016). Removal of Surface Loop from Stitched Composites Can Improve Compression and Compression-after-Impact Strengths:, *11*(6), 633–642.
- Farley, G. L., Smith, B. T., & Maiden, J.** (2016a). Compression Response of Thick Layer Composite Laminates with Through-the-Thickness Reinforcement:, *11*(7), 787–810.
- Farley, G. L., Smith, B. T., & Maiden, J.** (2016b). Compression Response of Thick Layer Composite Laminates with Through-the-Thickness Reinforcement:, *11*(7), 787–810.
- Faruk, O., Tjong, J., & Sain, M.** (2017). Lightweight and sustainable materials for automotive applications. New York, CRC Press

- F.C. Campbell.** (2006). *Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials*. USA, Elsevier.
- Fouirer Transform Infrared Spektrofotometre (FTIR) | ArelPOTKAM - Polimer Teknolojiler ve Kompozit Uygulama ve Araştırma Merkezi.** (2021). Retrieved September 6, 2021, from <https://potkam.arel.edu.tr/cihazlar/fouirer-transform-infrared-spektrofotometre-ftir>
- Fu, L., Zhang, M., Zhai, Z., & Jiang, F.** (2022). The influence of preheating temperature on the mechanical properties of injection-overmolded hybrid glass fiber reinforced thermoplastic composites. *Polymer Testing*, *105*, 107425.
- Fuel Quality | Climate Action.** (2021). Retrieved August 16, 2021, from https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/fuel_en
- Gao, Y., Liu, L., Wu, Z., & Zhong, Z.** (2019). Toughening and self-healing fiber-reinforced polymer composites using carbon nanotube modified poly (ethylene-co-methacrylic acid) sandwich membrane. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *124*, 105510.
- Garcia, S. J.** (2014). Effect of polymer architecture on the intrinsic self-healing character of polymers. *European Polymer Journal*, *53*(1), 118–125.
- Ghosh, S. K.** (2006a). Functional Coatings and Microencapsulation: A General Perspective. In *Functional Coatings: By Polymer Microencapsulation*, 1 – 28.
- Ghosh, S. K.** (2006b). Functional Coatings: By Polymer Microencapsulation. In *Functional Coatings: By Polymer Microencapsulation*. <https://doi.org/10.1002/3527608478>
- Ghosh, S. K.** (2009). Self-Healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and Applications. In *Self-Healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and*
- Giurginca, M., Popa, L., & Zaharescu, T.** (2003). Thermo-oxidative degradation and radio-processing of ethylene vinyl acetate elastomers. *Polymer Degradation and Stability*, *82*(3), 463–466.
- Go, S., Yun, S., Lee, M.-S., Lee, J.-H., Kwac, L., & Kim, H.-G.** (2018). Investigation of Mechanical Properties of CFRP/EVA Laminated Composites According to Tensile and Flexure Test. *Materials Science*, *Undefined*.
- Gonzalez, F., Garpelli, F., Silveira, N. N., Sales, R., Shiino, M., Arbelo, M., & Donadon, M.** (2017). Modes I and II fatigue induced delamination in co-cured composite structural joints. *24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, COBEM 2017*, Curitiba, Brazil, December 3-8
- Greenhouse gas emissions: drivers and impacts - Canada.ca.** (2021). Retrieved August 16, 2021, from <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/environmental-indicators/greenhouse-gas-emissions-drivers-impacts.html>

- Gurit Holding AG.** (2000). Guide to Composites. Available in URL: [Http://Www.Netcomposites. Com/](http://www.netcomposites.com/) <https://doi.org/GTC-3-0509>
- Hager, M. D., Greil, P., Leyens, C., Van Der Zwaag, S., & Schubert, U. S.** (2010). Self-healing materials. *Advanced Materials*, 22 (47), 5424-5430,
- Haghshenas, M.** (2016). Metal–Matrix Composites. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Elsevier Publications*, 1-28.
- Hand Lay-up - an overview | ScienceDirect Topics.** (2020). Retrieved January 10, 2020, from <https://0210bs6do-y-https-www-sciencedirect-com.proxy.uludag.deep-knowledge.net/topics/engineering/hand-lay-up>
- Hao, Z., Tao, F., Wang, Z., Cui, X., & Pan, Q.** (2018). An Omni-healable and Tailorable Aqueous Lithium-Ion Battery. *ChemElectroChem*. 5,637-42.
- Haraguchi, K., Uyama, K., & Tanimoto, H.** (2011). Self-healing in nanocomposite hydrogels. *Macromolecular Rapid Communications*, 32,1253–1258
- Haramina, T., Pugar, D., Ivančević, D., & Smojver, I.** (2021). Mechanical properties of poly(Ethylene-co-methacrylic acid) reinforced with carbon fibers. *Polymers*, 13(1), 1–14.
- Hashim, D. M., Man, Y. B. C., Norakasha, R., Shuhaimi, M., Salmah, Y., & Syahariza, Z. A.** (2010). Potential use of Fourier transform infrared spectroscopy for differentiation of bovine and porcine gelatins. *Food Chemistry*, 118(3).
- Havacılığın geleceği kompozit malzemede.** (2020), Retrieved August 19, 2021, from <https://www.youtube.com/watch?v=29JebYhdoZY>
- Hayes, S. A., Jones, F. R., Marshiya, K., & Zhang, W.** (2007). A self-healing thermosetting composite material. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(4), 1116–1120.
- Hayes, S. A., Zhang, W., Branthwaite, M., & Jones, F. R.** (2007). Self-healing of damage in fibre-reinforced polymer-matrix composites. *Journal of the Royal Society Interface*, 4(13), 381.
- He, L., Fullenkamp, D. E., Rivera, J. G., & Messersmith, P. B.** (2011). PH responsive self-healing hydrogels formed by boronate-catechol complexation. *Chemical Communications*, 47(26), 7497
- He, Z., Jiang, S., An, N., Li, X., Li, Q., Wang, J., Zhao, Y., & Kang, M.** (2019). Self-healing isocyanate microcapsules for efficient restoration of fracture damage of polyurethane and epoxy resins. *Journal of Materials Science* 2019 54:11, 54(11), 8262–8275.
- Head, P.** (1996). Advanced composite materials. *Engineering Designer*. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0773-36>
- Henning, F., Kärger, L., Dörr, D., Schirmaier, F. J., Seuffert, J., & Bernath, A.** (2019). Fast processing and continuous simulation of automotive structural composite components. *Composites Science and Technology*, 171, 261–279.

- Hia, I. L., Vahedi, V., & Pasbakhsh, P.** (2016). Self-Healing Polymer Composites: Prospects, Challenges, and Applications. In *Polymer Reviews*. 56(2), 225–61
- Hull, D., & Clyne, T. W.** (1996). An Introduction to Composite Materials. 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge.
- Imamura, T., & Yamaguchi, Y.** (1995). Composite Materials for Aircraft Structures. *Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 43, 213-223.
- Izdebska, J.** (2016). Corona Treatment. *Printing on Polymers: Fundamentals and Applications*, 123–142.
- Jain, L. K., Dransfield, K. A., & Mai, Y. W.** (1998). On the effects of stitching in CFRPs - II. Mode II delamination toughness. *Composites Science and Technology*, 58, 815–827.
- James, N. K., Lafont, U., Van Der Zwaag, S., & Groen, W. A.** (2014). Piezoelectric and mechanical properties of fatigue resistant, self-healing PZT-ionomer composites. *Smart Materials and Structures*, 23(5), 055001
- JE, P. C., Sultan, M. T., Selvan, C. P., Irulappasamy, S., Mustapha, F., Basri, A. A., & Safri, S. N. A.** (2020). Manufacturing challenges in self-healing technology for polymer composites a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 7370–7379.
- Kalista, S. J. Jr.** (2003). *Self-Healing of Thermoplastic Poly(Ethylene-co-Methacrylic Acid) Copolymers Following Projectile Puncture. Mechanics of advanced materials and structures*, 14 (5), 391-397
- Kalista, S. J., & Ward, T. C.** (2007). Thermal characteristics of the self-healing response in poly(ethylene-co-methacrylic acid) copolymers. *Journal of the Royal Society Interface*, 4(13), 405–411.
- Kalista, S. J., Ward, T. C., & Oyetunji, Z.** (2007). Self-healing of poly(ethylene-co-methacrylic acid) copolymers following projectile puncture. *Materials Science*
- Kanu, N. J., Gupta, E., Vates, U. K., & Singh, G. K.** (2019a). Self-healing composites: A state-of-the-art review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 121, 474–486.
- Kanu, N. J., Gupta, E., Vates, U. K., & Singh, G. K.** (2019b). Self-healing composites: A state-of-the-art review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 121, 474–486.
- Karpat, Y., Bahtiyar, O., Değer, B., & Kaftanoğlu, B.** (2014). A mechanistic approach to investigate drilling of UD-CFRP laminates with PCD drills. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 63, 81-84
- Keller, M. W.** (2013). CHAPTER 2: Encapsulation-Based Self-Healing Polymers and Composites. 16–61.
- Kendi Kendini İyileştiren Kompozitler Pazarı – Küresel Endüstri Eğilimleri ve 2028'e Kadar Tahmin | Veri Köprüsü Pazar Araştırması.** (2021). Retrieved August 16, 2021, from

<https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-self-healing-composites-market>

- Kessler, M. R., Sottos, N. R., & White, S. R.** (2003). Self-healing structural composite materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(8), 743–753.
- Khan, L. A., & Mehmood, A. H.** (2016a). Cost-effective composites manufacturing processes for automotive applications. *Lightweight Composite Structures in Transport: Design, Manufacturing, Analysis and Performance*, 93–119.
- Khan, L. A., & Mehmood, A. H.** (2016b). Cost-effective composites manufacturing processes for automotive applications. *Lightweight Composite Structures in Transport: Design, Manufacturing, Analysis and Performance*, 93–119.
- Khomkrit, P., Wang Chun-Hui, Russell, V., & Mouritz, A. P.** (2013). Thermoplastic fibre stitching: a new self-healing method for carbon-epoxy composites. *Materials Science*
- Kompozit Hammaddede Seçiminde Bilinmesi Gerekenler - YouTube.** (n.d.). Retrieved December 13, 2021, https://www.youtube.com/watch?v=rv98Tco1_KI&t=1s
- Korkmaz, N.** (2014). *Karbon Elyaf Takviyeli Dokuma Kumaş İçeren Kompozit Malzeme Üretimi Ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma.* (Yüksek Lisans). Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta
- Korkmaz, N., Çakmak, E., & Dayik, M.** (2016). Dokuma Karbon Elyaf Takviyeli Karbon Nano Tüp-Epoksi Kompozit Malzemelerin Mekanik ve Termal Karakterizasyonu. *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences*, 20(2), 338–353.
- Koruvatan, A.** (2008). *Farklı kür sıcaklığı ve sürelerinde üretilen tabakalı kompozit plakaların pimli/civatalı bağlantılarının hasar analizinin incelenmesi,* (Doktora Tezi). Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir
- Krogsgaard, M., Behrens, M. A., Pedersen, J. S., & Birkedal, H.** (2013). Self-healing mussel-inspired multi-pH-responsive hydrogels, *Biomacromolecules*. 14(2):297-301
- Kumar, N., Jain, P. K., Tandon, P., & Mohan Pandey, P.** (2018). Experimental investigations on suitability of polypropylene (PP) and ethylene vinyl acetate (EVA) in additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 4118–4127.
- Kuponu, O. S., Kadirkamanathan, V., Bhattacharya, B., & Pope, S. A.** (2016). Using feedback control to actively regulate the healing rate of a self-healing process subjected to low cycle dynamic stress. *Smart Materials and Structures*, 25(5), 055028.

- Kuppusamy, R. R. P., Rout, S., & Kumar, K.** (2020). Advanced manufacturing techniques for composite structures used in aerospace industries. *Modern Manufacturing Processes*, 3–12.
- Ladani, R. B., Pingkarawat, K., Nguyen, A. T. T., Wang, C. H., & Mouritz, A. P.** (2018). Delamination toughening and healing performance of woven composites with hybrid z-fibre reinforcement. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 110, 258–267.
- Lafleur, P. G., Vergnes, B., Lafleur, P. G., & Vergnes, B.** (2014). Co-Rotating Twin-Screw Extrusion. In *Polymer Extrusion*, London: ISTE-Wiley, 337
- Lafont, U., Zeijl, H. van, & Zwaag, S. van der.** (2012). Influence of Cross-linkers on the Cohesive and Adhesive Self-Healing Ability of Polysulfide-Based Thermosets. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 4(11), 6280–6288.
- Lautenschläger, M. I., Mayer, L., Gebauer, J., Weidenmann, K. A., Henning, F., & Elsner, P.** (2018). Comparison of filler-dependent mechanical properties of jute fiber reinforced sheet and bulk molding compound. *Composite Structures*, 203, 960–967.
- Lee, J. G., Joshi, B. N., Lee, J. H., Kim, T. G., Kim, D. Y., Al-Deyab, S. S., Seong, I. W., Swihart, M. T., Yoon, W. Y., & Yoon, S. S.** (2017). Stable High-Capacity Lithium Ion Battery Anodes Produced by Supersonic Spray Deposition of Hematite Nanoparticles and Self-Healing Reduced Graphene Oxide. *Electrochimica Acta*, 228, 604–610
- Li, G.** (2014). Self-Healing Composites: Shape Memory Polymer Based Structures. In *Self-Healing Composites: Shape Memory Polymer Based Structures.*, 392, Seiten, Hardcover Wiley & Sons Ltd.
- Li, G., & Meng, H.** (2015a). *Recent advances in smart self-healing polymers and composites*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science
- Li, H., Wang, R., & Liu, W.** (2011). Toughening Self-healing Epoxy Resin by Addition of Microcapsules, *Polymers and Polymer Composites*, 19(2–3), 223–226.
- Li, K.-M., Choi, Y.-H., Lee, I.-Y., & Lee, Y.-W.** (2015). Study of the Fluid Flow on Proportional Valve in Spool Displacement using CFD. *Journal of Power System Engineering*, 19(2), 22–26.
- Li, V. C., Lim, Y. M., & Chan, Y. W.** (1998). Feasibility study of a passive smart self-healing cementitious composite. *Composites Part B: Engineering*, 29(6), 819–827.
- Ling, J., Rong, M. Z., & Zhang, M. Q.** (2011). Coumarin imparts repeated photochemical remendability to polyurethane. *Journal of Materials Chemistry*, 21(45), 18373–18380.
- Ling, J., Rong, M. Z., & Zhang, M. Q.** (2012b). Photo-stimulated self-healing polyurethane containing dihydroxyl coumarin derivatives. *Polymer*, 53(13), 2691–2698.

- Liu, D.** (1987). Delamination resistance in stitched and unstitched composite plates subjected to impact loading," *J. Reinforced Plastics and Compos.*, 9(1), 59-69.
- Liu, X., & Wang, G.** (2007). Progressive failure analysis of bonded composite repairs. *Composite Structures*, 81(3), 331-340
- Liu, Y., & Hsu, S. H.** (2018). Synthesis and biomedical applications of self-healing hydrogels. In *Frontiers in Chemistry*, 6(49), 141 .
- Liu, Y. L., Hsieh, C. Y., & Chen, Y. W.** (2006). Thermally reversible cross-linked polyamides and thermo-responsive gels by means of Diels–Alder reaction. *Polymer*, 47(8), 2581–2586.
- Loh, T. W., Ladani, R. B., Orifici, A., & Kandare, E.** (2021a). Ultra-tough and in-situ repairable carbon/epoxy composite with EMAA. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 143, 106206.
- Lubin, G.** (1982). *Handbook of Composites*. New York: Van Nostrand Reinhold. Chicago,
- Lukaszewicz, D. H. J. A., Ward, C., & Potter, K. D.** (2012). The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future. *Composites Part B: Engineering*, 43(3), 997–1009.
- Lv, Z., & Chen, H.** (2013a). Analytical models for determining the dosage of capsules embedded in self-healing materials. *Computational Materials Science*. 68(1), 81-89
- Magana, S., Zerroukhi, A., Jegat, C., & Mignard, N.** (2010). Thermally reversible crosslinked polyethylene using Diels–Alder reaction in molten state. *Reactive and Functional Polymers*, 70(7), 442–448.
- Making prepreg tape more accessible | Composites World.** (2021). Retrieved December 29, 2021, from <https://www.compositesworld.com/articles/making-prepreg-tape-more-accessible>
- Mallick, P. K.** (2007). *Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design.*, Boca Raton, CRC Press, 638
- Mallick, P. K.** (2010). *Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles.* Boca Raton, Fla, CRC Press, Oxford
- Mallick, P. K.** (2021). Thermoset matrix composites for lightweight automotive structures. *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, 229–263.
- Marathe, R., Tatiya, P., Chaudhari, A., Lee, J., Mahulikar, P., Sohn, D., & Gite, V.** (2015). Neem acetylated polyester polyol—Renewable source based smart PU coatings containing quinoline (corrosion inhibitor) encapsulated polyurea microcapsules for enhance anticorrosive property. *Industrial Crops and Products*, 77, 239–250.
- Ocak, G., Baba E., Terlemezoğlu, A.,** (2018). *Masaüstü Plastik Ekstrüzyon Makinesi Tasarımı Ve İmalatı.* (Bitirme Projesi), Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Trabzon

- Mazumdar, S. K.** (2001). Composites manufacturing: Materials, product, and process engineering. In *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*.
- McKeen, L. W.** (2010). Styrenic Plastics. *Fatigue and Tribological Properties of Plastics and Elastomers*, 51–71.
- Melendi-Espina, S., Morris, C.N., Turner, T.A. and Pickering, S.J.** (2016) Recycling of carbon fibre composites, *In: Carbon*, Penn State University.
- Meure, S., Furman, S., & Khor, S.** (2010a). Poly[ethylene-co-(methacrylic acid)] healing agents for mendable carbon fiber laminates. *Macromolecular Materials and Engineering*, 295(5), 420–424.
- Meure, S., Furman, S., & Khor, S.** (2010b). Poly[ethylene-co-(methacrylic acid)] healing agents for mendable carbon fiber laminates. *Macromolecular Materials and Engineering*, 295(5), 420–424.
- Meure, S., Varley, R. J., Wu, D. Y., Mayo, S., Nairn, K., & Furman, S.** (2012a). Confirmation of the healing mechanism in a mendable EMAA-epoxy resin. *European Polymer Journal.*, 48(3):524-531
- Meure, S., Wu, D. Y., & Furman, S.** (2009). Polyethylene-co-methacrylic acid healing agents for mendable epoxy resins. *Acta Materialia*, 57(14), 4312–4320.
- Meure, S., Wu, D. Y., & Furman, S. A.** (2010). FTIR study of bonding between a thermoplastic healing agent and a mendable epoxy resin. *Vibrational Spectroscopy*, 52(1), 10–15.
- Motuku, M., Vaidya, U. K., & Janowski, G. M.** (1999). Parametric studies on self-repairing approaches for resin infused composites subjected to low velocity impact. *Smart Materials and Structures*, 8(5), 623.
- Mouritz, A. P.** (1995). The damage to stitched GRP laminates by underwater explosion shock loading. *Composites Science and Technology*, 25(6), 431-437
- Mouritz, A. P.** (2020). Review of z-pinned laminates and sandwich composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 139, 106128.
- Mouritz, A. P., & Cox, B. N.** (2000b). A mechanistic approach to the properties of stitched laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31(1), 1–27.
- Mouritz, A. P., & Cox, B. N.** (2010a). A mechanistic interpretation of the comparative in-plane mechanical properties of 3D woven, stitched and pinned composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.*, 41(6), 709-728
- Mouritz, A. P., & Jain, L. K.** (1999). Further validation of the Jain and Mai models for interlaminar fracture of stitched composites. *Composites Science and Technology*, 59, 1653–1662.
- Mouritz, A. P., Leong, K. H., & Herszberg, I.** (1997). A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced

- polymer composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 28 (12), 979–991.
- Murphy, E. B., Bolanos, E., Schaffner-Hamann, C., Wudl, F., Nutt, S. R., & Auad, M. L.** (2008). Synthesis and Characterization of a Single-Component Thermally Remendable Polymer Network: Staudinger and Stille Revisited. *Macromolecules*, 41 (14), 5203–5209.
- Murphy, E. B., & Wudl, F.** (2010). The world of smart healable materials. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 35 (1–2), 223–251.
- Nabi, G., Malik, N., Tahir, M. B., Raza, W., Rizwan, M., Maraj, M., Siddiqua, A., Ahmed, R., & Tanveer, M.** (2021). Synthesis of graphitic carbon nitride and industrial applications as tensile strength reinforcement agent in red Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS). *Physica B: Condensed Matter*, 602, 412556.
- Norris, C. J., Bond, I. P., & Trask, R. S.** (2011). Interactions between propagating cracks and bioinspired self-healing vasculature embedded in glass fibre reinforced composites. *Composites Science and Technology*, 71(6), 847–853.
- Norris, C. J., Meadway, G. J., O’Sullivan, M. J., Bond, I. P., & Trask, R. S.** (2011). Self-Healing Fibre Reinforced Composites via a Bioinspired Vasculature. *Advanced Functional Materials*, 21 (19), 3624–3633.
- Oromiehie, E., Prusty, B. G., Compston, P., & Rajan, G.** (2019). Automated fibre placement based composite structures: Review on the defects, impacts and inspections techniques. *Composite Structures*, 224, 110987.
- Padmanabhan, B.** (2008). Understanding the Extruder Processing Zone: the heart of a twin screw extruder. *Plastics, Additives and Compounding*, 10 (2), 30-35.
- Pang, J. W. C., & Bond, I. P.** (2005). A hollow fibre reinforced polymer composite encompassing self-healing and enhanced damage visibility. *Composites Science and Technology*, 65(11–12), 1791–1799.
- Parghi, A., & Alam, M. S.** (2018). A review on the application of sprayed-FRP composites for strengthening of concrete and masonry structures in the construction sector. In *Composite Structures*, 187, 518-534
- Pepels, M., Filot, I., Klumperman, B., & Goossens, H.** (2013). Self-healing systems based on disulfide–thiol exchange reactions. *Polymer Chemistry*, 4(18), 4955–4965.
- Pingkarawat, K.** (2014). *Healing of aerospace carbon-epoxy composites using thermoplastic agents*. (Doctor of Philosophy (Aerospace)), RMIT University, Mechanical and Manufacturing Engineering, Australia
- Pingkarawat, K., Bhat, T., Craze, D. A., Wang, C. H., Varley, R. J., & Mouritz, A. P.** (2013b). Healing of carbon fibre–epoxy composites using thermoplastic additives. *Polymer Chemistry*, 4(18), 5007–5015.
- Pingkarawat, K., Dell’Olio, C., Varley, R. J., & Mouritz, A. P.** (2016). Poly(ethylene-co-methacrylic acid) (EMAA) as an efficient healing

agent for high performance epoxy networks using diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA). *Polymer*, 92, 153–163.

- Pingkarawat, K., & Mouritz, A. P.** (2015). Stitched mendable composites: Balancing healing performance against mechanical performance, *Composite Structures*, 123, 54-64.
- Pingkarawat, K., Wang, C. H., Varley, R. J., & Mouritz, A. P.** (2012b). Self-healing of delamination fatigue cracks in carbon fibre-epoxy laminate using mendable thermoplastic. *Journal of Materials Science*, 47(10), 4449–4456.
- Pingkarawat, K., Wang, C. H., Varley, R. J., & Mouritz, A. P.** (2013b). Thermoplastic fibre stitching: a new self-healing method for carbon-epoxy composites, *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Integrity and Failure*, (pp. 708–711). Melbourne, Australia, July 11-13.
- Pingkarawat, K., Wang, C. H., Varley, R. J., & Mouritz, A. P.** (2013c). Effect of mendable polymer stitch density on the toughening and healing of delamination cracks in carbon-epoxy laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 50, 22–30.
- Pingkarawat, K., Wang, C. H., Varley, R. J., & Mouritz, A. P.** (2014a). Healing of fatigue delamination cracks in carbon-epoxy composite using mendable polymer stitching. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 25(1), 75–86.
- Pingkarawat, K., Wang, C. H., Varley, R. J., & Mouritz, A. P.** (2014b). Mechanical properties of mendable composites containing self-healing thermoplastic agents. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 65, 10-18.
- Carolyn D.** (1996), Procedures developed for self-repair of polymer matrix composite materials, *Composite Structures*, 35 (3), 263-269
- Prof. Dr. Bilsen Beşergil: Polimer Matris Kompozitler; Üretim Prosesleri (production processes).** (n.d.). Retrieved August 16, 2021, from http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_96.html
- Qiu, J., Lai, X., Li, H., Gao, J., Zeng, X., & Liao, X.** (2019). Facile fabrication of a novel polyborosiloxane-decorated layered double hydroxide for remarkably reducing fire hazard of silicone rubber. *Composites Part B: Engineering*, 175, 107068.
- Rajak, D. K., Pagar, D. D., Kumar, R., & Pruncu, C. I.** (2019). Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials. In *Journal of Materials Research and Technology*, 8 (6), 6354-6374.
- Ravandi, M., Teo, W. S., Tran, L. Q. N., Yong, M. S., & Tay, T. E.** (2016). The effects of through-the-thickness stitching on the Mode I interlaminar fracture toughness of flax/epoxy composite laminates. *Materials and Design*, 109, 659–669

- Razzell, A. G., Venkata Siva, S. B., & Rama Sreekanth, P. S.** (2016). Joining and Machining of Ceramic Matrix Composites. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Elsevier.
- Reisch, A., Roger, E., Phoeung, T., Antheaume, C., Orthlieb, C., Boulmedais, F., Lavallo, P., Schlenoff, J. B., Frisch, B., & Schaaf, P.** (2014). On the benefits of rubbing salt in the cut: Self-healing of saloplastic PAA/PAH compact polyelectrolyte complexes. *Advanced Materials*, 26 (16):2547-51
- Ren, Y., Abbas, N., Zhu, G., & Tang, J.** (2020). Synthesis and mechanical properties of large size silica shell microcapsules for self-healing cementitious materials. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 587, 124347
- Resin Transfer Molding - an overview | ScienceDirect Topics.** (2011.). Retrieved January 16, 2020, from <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/resin-transfer-molding>
- Rodriguez, E. D., Luo, X., & Mather, P. T.** (2011). Linear/network poly(ϵ -caprolactone) blends exhibiting shape memory assisted self-healing (SMASH). *ACS Applied Materials and Interfaces*, 3(2), 152–161.
- Sarasini, F., & Santulli, C.** (2013). Vinylester resins as a matrix material in advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites. *Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications*, 69–87.
- Şahin, Y.**, (2000). *Kompozit Malzemelere Giriş*. Seçkin Yayıncılık, Ankara
- Scheiner, M., Dickens, T. J., & Okoli, O.** (2016). Progress towards self-healing polymers for composite structural applications. *Polymer*, 83, 260–282.
- Schneider, C., Langer, R., Loveday, D., & Hair, D.** (2017). Applications of ethylene vinyl acetate copolymers (EVA) in drug delivery systems. *Journal of Controlled Release*, 262, 284–295.
- Self-Healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science.** (2014). *Chemistry International -- Newsmagazine for IUPAC*.
- Sera gazı emisyonlarının azaltımı — Avrupa Çevre Ajansı.** (2020). Retrieved August 16, 2021, from <https://www.eea.europa.eu/tr/themes/climate/intro>
- Shah, S. Z. H., Karuppanan, S., Megat-Yusoff, P. S. M., & Sajid, Z.** (2019). Impact resistance and damage tolerance of fiber reinforced composites: A review. In *Composite Structures*, 217 100–21.
- Sibel Topuz.** (2021). *Farklı takviye malzemelerinin polyester esaslı kompozit üretiminde değerlendirilmesi ve karakterizasyonu*. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp>
- Sijbesma, R. P., Beijer, F. H., Brunsveld, L., Folmer, B. J. B., Hirschberg, J. H. K. K., Lange, R. F. M., Lowe, J. K. L., & Meijer, E. W.** (1997). Reversible polymers formed from self-complementary monomers using quadruple hydrogen bonding. *Science*, 278 (5343), 1601-4.

- Song, C., Fan, W., Liu, T., Wang, S., Song, W., & Gao, X.** (2021). A review on three-dimensional stitched composites and their research perspectives. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 153, 106730.
- Song, W., Fan, W., Liu, T., Chen, X., Wang, S., Zhao, Y., Song, C., Mi, P., Dou, H., & Gao, X.** (2021). Flexural fatigue properties and failure propagation of 3D stitched composites under 3-point bending loading. *International Journal of Fatigue*, 153, 106507.
- Sridhar, N., Massabò, R., Cox, B. N., & Beyerlein, I. J.** (2002). Delamination dynamics in through-thickness reinforced laminates with application to DCB specimen. *International Journal of Fracture*, 118, 119-144.
- Stephen J Kalista, J., & Ward, T. C.** (2006). Thermal characteristics of the self-healing response in poly(ethylene-co-methacrylic acid) copolymers. *Journal of The Royal Society Interface*, 4(13), 405–411.
- Strong, A. Brent.** (2008). *Fundamentals of composites manufacturing : materials, methods and applications, Edition: 2nd ed. Imprint: Dearborn, Mich.*
- Sun, J., Wang, Y., Li, N., & Tian, L.** (2019). Tribological and anticorrosion behavior of self-healing coating containing nanocapsules. *Tribology International*, 136, 332-341.
- Tada, Y., & Ishikawa, T.** (1989). Experimental evaluation of the effects of stitching on CFRP laminate specimens with various shapes and loadings. *Mechanical and Corrosion Properties. Series A, Key Engineering Materials*, 37, 305-316.
- Tempelman, E., Shercliff, H., & van Eyben, B. N.** (2014). Resin Transfer Molding. *Manufacturing and Design*, 171–186.
- Tian, Q., Rong, M. Z., Zhang, M. Q., & Yuan, Y. C.** (2010). Synthesis and characterization of epoxy with improved thermal remendability based on Diels-Alder reaction. *Polymer International*, 59(10), 1339–1345.
- Topuz Sibel.** (2021). *Metal Matrisli Kompozitlerin polyester esaslı kompozit üretiminde değerlendirilmesi ve karakterizasyonu.* (Yüksek Lisans), İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul .
- Trask, R. S., Williams, H. R., & Bond, I. P.** (2007). Self-healing polymer composites: mimicking nature to enhance performance. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2(1), P1.
- Urban, M. W.** (2012). The chemistry of self-healing. *Nature Chemistry* 2012 4:2, 4(2), 80–82.
- Urdl, K., Kandelbauer, A., Kern, W., Müller, U., Thebault, M., & Zikulnig-Rusch, E.** (2017). Self-healing of densely crosslinked thermoset polymers—a critical review. *Progress in Organic Coatings*, 104, 232–249.
- Van Acker, K., Verpoest, I., De Moor, J., Duflou, J. R., & Dewulf, W.** (2009). Lightweight materials for the automotive: Environmental impact analysis of the use of composites. *Revue de Metallurgie. Cahiers D'Informations Techniques*, 58 (2), 227—236.

- Van der Zwaag, S.** (2010). Routes and mechanisms towards self healing behaviour in engineering materials. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 58(2), 227–236.
- Van Tittelboom, K., Wang, J., Araújo, M., Snoeck, D., Gruyaert, E., Debbaut, B., Derluyn, H., Cnudde, V., Tsangouri, E., van Hemelrijck, D., & de Belie, N.** (2016). Comparison of different approaches for self-healing concrete in a large-scale lab test. *Construction and Building Materials*, 107, 125-137.
- Varley, R.** (2007). Ionomers as Self Healing Polymers. *Springer Series in Materials Science*, 100, 95–114.
- Varley, R. J., & Charve, F.** (2012a). EMAA as a healing agent for mendable high temperature epoxy amine thermosets. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(7), 1073–1080.
- Varley, R. J., Craze, D. A., Mouritz, A. P., & Wang, C. H.** (2013). Thermoplastic healing in epoxy networks: Exploring performance and mechanism of alternative healing agents. *Macromolecular Materials and Engineering*, 298 (11), 1232-1242.
- Varley, R. J., & Parn, G. P.** (2012). Thermally activated healing in a mendable resin using a non woven EMAA fabric. *Composites Science and Technology*, 72(3), 453–460.
- Varley, R. J., & van der Zwaag, S.** (2008). Towards an understanding of thermally activated self-healing of an ionomer system during ballistic penetration. *Acta Materialia*, 56 (19), 5737-5750.
- Vita, A., Castorani, V., Germani, M., & Marconi, M.** (2019). Comparative life cycle assessment of low-pressure RTM, compression RTM and high-pressure RTM manufacturing processes to produce CFRP car hoods. *Procedia CIRP*, 80, 352–357.
- Wang, C. H., Sidhu, K., Yang, T., Zhang, J., & Shanks, R.** (2012). Interlayer self-healing and toughening of carbon fibre/epoxy composites using copolymer films. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(3), 512–518.
- Wang, H., & Zhou, Q.** (2018). Evaluation and failure analysis of linseed oil encapsulated self-healing anticorrosive coating. *Progress in Organic Coatings*, 8 (11):404.
- Wang, J., Li, Y., Song, J., He, M., Song, J., & Xia, K.** (2015). Recycling of acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) copolymers from waste electrical and electronic equipment (WEEE), through using an epoxy-based chain extender. *Polymer Degradation and Stability*, 112, 167–174.
- Wang, X. F., Yang, Z. H., Fang, C., Han, N. X., Zhu, G. M., Tang, J. N., & Xing, F.** (2019). Evaluation of the mechanical performance recovery of self-healing cementitious materials – its methods and future development: A review. In *Construction and Building Materials*, 2012, 400-421.

- Wang, X., Liu, F., Zheng, X., & Sun, J.** (2011). Water-enabled self-healing of polyelectrolyte multilayer coatings. *Angewandte Chemie - International Edition*, 25, 50 (48), 11378-81
- Wang, Y., Pham, D. T., & Ji, C.** (2015). Self-healing composites: A review. In *Cogent Engineering* 2, 1-28.
- Wen, N., Song, T., Ji, Z., Jiang, D., Wu, Z., Wang, Y., & Guo, Z.** (2021). Recent advancements in self-healing materials: Mechanicals, performances and features. *Reactive and Functional Polymers*, 168, 105041.
- White, S. R., Blaiszik, B. J., Kramer, S. L. B., Olugebefola, S. C., Moore, J. S., & Sottos, N. R.** (2011a). Self-healing polymers and composites. *American Scientist*.
- White, S. R., Sottos, N. R., Geubelle, P. H., Moore, J. S., Kessler, M. R., Sriram, S. R., Brown, E. N., & Viswanathan, S.** (2001). Autonomic healing of polymer composites. *Nature* 2001 409:6822, 409(6822), 794–797.
- Whiteley, J. M., Taynton, P., Zhang, W., & Lee, S. H.** (2015). Ultra-thin Solid-State Li-Ion Electrolyte Membrane Facilitated by a Self-Healing Polymer Matrix. *Advanced*, 27 (43), 922-6927
- Whittingham, B., Baker, A. A., Harman, A., & Bitton, D.** (2009). Micrographic studies on adhesively bonded scarf repairs to thick composite aircraft structure. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(9), 1419–1432.
- Williams, G., Trask, R., & Bond, I.** (2007). A self-healing carbon fibre reinforced polymer for aerospace applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(6), 1525–1532.
- Wittig, J.** (2001). Recent development in the robotic stitching technology for textile structural composites. *International SAMPE Technical Conference*, 33, 540–550.
- Wu, D. Y., Meure, S., & Solomon, D.** (2008). Self-healing polymeric materials: A review of recent developments. *Progress in Polymer Science*, 33(5), 479–522.
- Wu, Y., Huang, L., Huang, X., Guo, X., Liu, D., Zheng, D., Zhang, X., Ren, R., Qu, D., & Chen, J.** (2017). A room-temperature liquid metal-based self-healing anode for lithium-ion batteries with an ultra-long cycle life. *Energy and Environmental Science*. 10(8).
- X, C., MA, D., K, O., A, M., H, S., SR, N., K, S., & F, W.** (2002). A thermally remendable cross-linked polymeric material. *Science (New York, N.Y.)*, 295(5560), 1698–1702.
- Yang, S., Du, X., Deng, S., Qiu, J., Du, Z., Cheng, X., & Wang, H.** (2020). Recyclable and self-healing polyurethane composites based on Diels-Alder reaction for efficient solar-to-thermal energy storage. *Chemical Engineering Journal*, 398, 125654.
- Yang, T., Wang, C. H., Zhang, J., He, S., & Mouritz, A. P.** (2012b). Toughening and self-healing of epoxy matrix laminates using mendable polymer stitching. *Composites Science and Technology*, 72(12), 1396–1401.

- Yang, T., Zhang, J., Mouritz, A. P., & Wang, C. H.** (2013). Healing of carbon fibre-epoxy composite T-joints using mendable polymer fibre stitching. *Composites Part B: Engineering*, 45 (1), 1499-1507.
- Yang, Y., Davydovich, D., Hornat, C. C., Liu, X., & Urban, M. W.** (2018). Leaf-Inspired Self-Healing Polymers. *Chem*, 4(8), 1928–1936.
- Yang, Y., Wang, H., Zhang, S., Wei, Y., He, X., Wang, J., Zhang, Y., & Ji, Y.** (2021). Vitriimer-based soft actuators with multiple responsiveness and self-healing ability triggered by multiple stimuli. *Matter*, 4(10), 3354–3365.
- Yassin, K., & Hojjati, M.** (2017). Processing of thermoplastic matrix composites through automated fiber placement and tape laying methods: A review., *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 31 (12),
- Yuan, Y. C., Yin, T., Rong, M. Z., & Zhang, M. Q.** (2008). Self healing in polymers and polymer composites. Concepts, realization and outlook: A review. *Express Polymer Letters*, 2(4), 238–250.
- Yudhanto, A., Watanabe, N., Iwahori, Y., & Hoshi, H.** (2014). Effect of stitch density on fatigue characteristics and damage mechanisms of stitched carbon/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 60, 52–65.
- Zeng, W., Shu, L., Li, Q., Chen, S., Wang, F., & Tao, X. M.** (2014). Fiber-based wearable electronics: A review of materials, fabrication, devices, and applications. In *Advanced Materials*, 26 (33), 5310-5336
- Zhang, H., He, R., Hou, B., Li, Y., Cui, H., & Yang, W.** (2021). Artificial hail ice impact damage of laminated composite T-joint with stitching reinforcement. *Composite Structures*, 278, 114714.
- Zhang, J., Chevali, V. S., Wang, H., & Wang, C. H.** (2020). Current status of carbon fibre and carbon fibre composites recycling. *Composites Part B: Engineering*, 193, 108053.
- Zhang, P., & Li, G.** (2016). Advances in healing-on-demand polymers and polymer composites. In *Progress in Polymer Science*, 57, 32-63.
- Zhang, Y., Broekhuis, A. A., & Picchioni, F.** (2009). Thermally Self-Healing Polymeric Materials: The Next Step to Recycling Thermoset Polymers? *Macromolecules*, 42(6), 1906–1912.
- Zhong, N., & Post, W.** (2015). Self-repair of structural and functional composites with intrinsically self-healing polymer matrices: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 69, 226–239.
- Zhu, D. Y., Rong, M. Z., & Zhang, M. Q.** (2015a). Self-healing polymeric materials based on microencapsulated healing agents: From design to preparation. *Progress in Polymer Science*, 49–50, 175–220.
- Zhu, J., Wu, Y., Huang, X., Huang, L., Cao, M., Song, G., Guo, X., Sui, X., Ren, R., & Chen, J.** (2019). Self-healing liquid metal nanoparticles encapsulated in hollow carbon fibers as a free-standing anode for lithium-ion batteries. *Nano Energy*. 62, 883-889

Zor, M. (2008.). *Kompozit Malzemelerle İlgili Genel Bilgiler.*



7. ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : GÖKÇENUR İŞLEK

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2012 Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya

Yüksek Lisans : 2014 Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya

Doktora :2020 Bursa Teknik Üniversitesi, Polimer Malzeme Müh-
Devam ediyor.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER/SUNUMLAR:

Makaleler:

- **Saglam G.; Bedeloglu A.** (2021). Mechanical properties of thermoplastic filament stitched carbon fiber reinforced composites, *Journal of Innovative Science and Technology (JISE)* (Basım aşamasında)
- **Saglam G.; Bedeloglu A.** (2021). Healing carbon fiber composites with thermoplastic polymers, *Journal of Innovative Science and Technology (JISE)*. (Yayın sürecinde)

DİĞER ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Makale:

- **Saglam G.; Borazan I.; Hos L.; Ali D.; Bedeloglu A.** (2017) Effect of Molar Ratio of PVP/AgNO₃ and Molecular Weight of PVP on the Synthesis of Silver Nanowires, *Nonlinear Optics and Quantum Optics*, 2017 Uluslararası - Chemical Abstracts Engineering Info., USA Opto Laser Info, USA

Kongreler:

- **Altın Y.; Tas M.; Saglam G.; Bedeloglu A.** (2015). Flexible Nanocomposite Electrodes Alternative to ITO For Polymer-Based Organic Solar Cell Applications, SOLARTR-3, Ankara, TURKEY
- **Saglam G.; Bedeloglu A.** (2016), Nanokompozit Sentezi Ve Otomotiv Malzemelerinde Kullanımı, *International Workshop On Special Topics On Polymeric Composites-Polikom*, İzmir, 24.02.2016-26.02.2016/Bildiri yayını
- **Saglam G.; Bedeloglu A.** (2015), Gümüş nanoteller ve tekstildeki uygulamaları, *15. Tekstil Teknolojisi ve Kimyasındaki Son Gelişmeler Sempozyumu 2015*, Bursa/Bildiri yayını

