

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



VASKÜLER KANALLI KENDİ KENDİNİ ONARAN CAM ELYAF
TAKVİYELİ EPOKSİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU

KUTAY ŞİRİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Sare ÇELİK (Tez Danışmanı)
Prof. Dr. Ruhan BENLİKAYA
Doç. Dr. İjlal ŞİMŞEK

BALIKESİR, KASIM - 2024

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Vasküler Kanallı Kendi Kendini Onaran Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Kutay ŞİRİN

ÖZET

**VASKÜLER KANALLI KENDİ KENDİNİ ONARAN CAM ELYAF TAKVİYELİ
EPOKSİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KUTAY ŞİRİN
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. SARE ÇELİK)
BALIKESİR, KASIM - 2024**

Geleneksel malzemelere göre daha avantajlı oldukları kabul edilmiş kompozit malzemeler günümüzde uzay, havacılık, otomotiv, denizcilik ve enerji sektörlerinde yaygınca kullanılmaktadır. Her sektörde olduğu gibi bu sektörlerde de verim ve süreklilik önem arz etmektedir. Üstün özelliklerine rağmen bazı kompozit malzemelerin gevrek bir yapıya sahip olmaları ve bu nedenle normal kullanımda bile yapı içinde mikro çatlaklar oluşturmaya meyilli olmaları istenmeyen bir durumdur. Bu sebeple kendi kendini onarma çalışmaları verim ve süreklilik için anahtar bir rol almaktadır.

Bu tez çalışmasında, polimer matrisli kompozit malzemelerde vasküler kanal yardımıyla kendi kendini onarma süreci ve optimizasyonu araştırılmıştır. Kendi kendini onarma sürecinde %0,8 ve %1,2 olmak üzere onarıcı ajan hacimleri ve 12, 18, 24 joule darbe enerjileri olmak üzere iki ana parametre kullanılmıştır. Kendi kendini onarma numunelerinin mikro ve makro yapıları dijital mikroskop ve taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri ile incelenmiştir. FTIR (fourier dönüşümlü kızılötesi) analizi ile yapısı, mekanik özellikleri ise üç nokta eğme testi ile incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucu numunelerde onarıcı ajan dağılımı ve kendi kendini onarma, morfolojik ve yapısal olarak kanıtlanmıştır. Mekanik özelliklerde ise eğilme mukavemetinde %62 onarma oranı görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELELER: Kendi kendini onarma, kompozit malzeme, polimer

ABSTRACT

CHARACTERIZATION AND PRODUCTION OF SELF-HEALING GLASS FIBER REINFORCED EPOXY COMPOSITES WITH VASCULAR CHANNELS

MSC THESIS

KUTAY ŞİRİN

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. SARE ÇELİK)

BALIKESİR, NOVEMBER - 2024

Composite materials, which are recognized to be more advantages than traditional materials, are now widely used in the aerospace, aviation, automotive, marine and energy sectors. As in every sector, efficiency and sustainability are important in these sectors. Despite their superior properties, it is undesirable that some composite materials have a brittle structure and therefore tend to form microcracks in the structure even in normal use. For this reason, self-healing studies play a key role for efficiency and sustainability.

In this thesis, the self-healing process and optimization using vascular channels in polymer matrix composite materials have been investigated. Two main parameters were utilized in the self-healing process: the volumes of healing agents at 0.8% and 1.2%, and impact energies of 12, 18, and 24 joules. The micro and macro structures of the self-healing samples were examined using digital microscopy and scanning electron microscopy (SEM) images. The structure and mechanical properties were analyzed through Fourier Transform Infrared (FTIR) and three-point bending tests. The investigations confirmed the distribution of healing agents and the self-healing process morphologically and structurally. 62% improvement in flexural strength was observed in the mechanical properties.

KEYWORDS: Self-healing, composite material, polymer

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL VE KISALTMALAR LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması.....	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER	6
2.1 Kompozit Malzemelerin Tarihçesi	6
2.2 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları	7
2.3 Kompozit Malzemelerin Yapısı ve Sınıflandırılması	7
2.3.1 Matris.....	8
2.3.1.1 Metal Matrisli Kompozitler	9
2.3.1.2 Seramik Matrisli Kompozitler	9
2.3.1.3 Polimer Matrisli Kompozitler.....	9
2.3.2 Takviye Elemanları.....	10
2.3.2.1 Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler	10
2.3.2.2 Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler	10
2.3.2.3 Tabakalı Kompozit Malzemeler	11
2.3.2.4 Hibrit Kompozit Malzemeler	11
2.4 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	11
2.4.1 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	12
2.4.1.1 Katı Hal Üretim Yöntemleri	12
2.4.1.2 Sıvı Hal Üretim Yöntemleri	14
2.4.2 Seramik Matrisli Kompozit Üretim Yöntemleri.....	19
2.4.2.1 Kimyasal Buhar İnfiltrasyonu	19
2.4.2.2 Polimer İnfiltrasyonu ve Piroliz	19
2.4.2.3 Sıcak Pres Sinterleme	20
2.4.3 Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	21

2.4.3.1 El Yatırması (Hand Lay-up) Yöntemi	21
2.4.3.2 Püskürtme Yöntemi	22
2.4.3.3 İplik (Filament) Sarma Yöntemi	23
2.4.3.4 Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi.....	24
2.4.3.5 Vakum Torbalama Yöntemi	25
2.4.3.6 Vakum İnfüzyon Yöntemi	25
2.4.3.7 Pultrüzyon Yöntemi.....	26
2.4.3.8 Reçine Transfer Kalıplama	27
2.4.3.9 Otoklav Yöntemi	28
2.4.3.10 Santrifüjle Kalıplama.....	29
2.4.3.11 Sıcak Presleme.....	29
3. POLİMERİK KOMPOZİT MALZEMELERDE KENDİ KENDİNİ ONARMA. 30	
3.1 Dahili Kendi Kendini Onarma Mekanizmaları	31
3.1.1 Tersinir Polimer Ağ Sistemi	32
3.1.2 Termoplastik/Termoset Karışımı Yöntemi.....	32
3.2 Harici Kendi Kendini Onarma Mekanizmaları	33
3.2.1 Mikrokapsül Yöntemi.....	34
3.2.1.1 Mikrokapsül Üretimi	35
3.2.2 Vasküler Ağ Yöntemi.....	36
3.2.2.1 Vasküler Ağ Ekseni	37
3.2.2.2 Vasküler Ağ Seçimi ve Üretim Yöntemleri	38
3.2.2.3 Onarıcı Ajan Seçimi ve Fazı.....	41
4. MALZEME VE YÖNTEM	43
4.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	43
4.2 Numunelerin Üretimi ve Deneye Hazırlanması	44
4.3 Üç Nokta Eğme Deneyi.....	48
4.4 Makro ve Mikro Yapı İncelemesi.....	51
4.5 FTIR Analizi.....	51
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	53
5.1 Üç Nokta Eğme Deneyi.....	53
5.2 Makro ve Mikro Yapı İnceleme	61
5.3 FTIR Analizi.....	71
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	74
KAYNAKLAR.....	76
ÖZGEÇMİŞ.....	83

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Saman takviyeli kil tuğla örneği.	6
Şekil 2.2: Kompozit malzeme bileşenleri.	8
Şekil 2.3: Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.	8
Şekil 2.4: Toz metalurjisi işleminin aşamaları.	13
Şekil 2.5: Difüzyon bağlanması yöntemi.	14
Şekil 2.6: Sıvı metal infiltrasyon teknikleri.	15
Şekil 2.7: Karıştırmalı döküm yöntemi.	16
Şekil 2.8: Püskürtme yöntemi üretim aşamaları.	17
Şekil 2.9: Sıkıştırılmı döküm yöntemi.	18
Şekil 2.10: In-situ yöntemi.	18
Şekil 2.11: Sıcak pres sinterleme yöntemi.	21
Şekil 2.12: El Yatırması Yönteminin Aşamaları.	22
Şekil 2.13: Püskürtme yöntemi üretim süreci.	23
Şekil 2.14: İplik sarma prosesi.	24
Şekil 2.15: Enjeksiyon kalıplama mekanizması.	25
Şekil 2.16: Vakum torbalama yöntemi şematik gösterimi.	25
Şekil 2.17: Vakum infüzyon yöntemi.	26
Şekil 2.18: Pultrüzyon yöntemi şematik gösterimi.	27
Şekil 2.19: Reçine transfer kalıplama şematik yöntemi.	28
Şekil 2.20: Otoklav yöntemi şematik gösterimi.	28
Şekil 2.21: Santrifüjle kalıplama yöntemi.	29
Şekil 2.22: Sıcak presleme şematik gösterimi.	29
Şekil 3.1: Science Direct internet sitesinde “polymer self healing” şeklinde arama yapıldığında yıl bazında çıkan makale miktarı.	31
Şekil 3.2: Mikrokapsül sisteminde kendi kendini onarma işlemi.	34
Şekil 3.3: Mikrokapsül üretim adımları.	36
Şekil 3.4: Çeşitli eksenlerde vasküler ağ gösterimi.	37
Şekil 3.5: Çıkarılmayan içi boş çekirdekler ile vasküler ağ oluşturma aşamaları.	38
Şekil 3.6: Dış çapı 30 µm olan içi boş cam takviyelerin SEM görüntüsü.	39
Şekil 3.7: Çıkarılabilir katı çekirdekler kullanılarak vasküler ağ oluşturma aşamaları.	40
Şekil 3.8: VaSC yöntemi ile vasküler ağ oluşturma.	41
Şekil 3.9: Farklı ajan faz seçimlerinin şematik gösterimi.	42
Şekil 4.1: Çalışmada kullanılan cam tüplerin çeşitli görüntüleri.	45
Şekil 4.2: İki vasküler kanal arası mesafenin numune kesiti üzerinden gösterimi.	46
Şekil 4.3: Hazırlanan numune tabakası.	46
Şekil 4.4: Numunelerin kesiminde kullanılan su jeti kesim cihazı.	47
Şekil 4.5: Bir grup numunenin su jeti kesimden sonraki görüntüsü.	47
Şekil 4.6: Ağırlık düşürme testi düzeneğinin şematik gösterimi.	48
Şekil 4.7: Zwick/ Roell Z250 test cihazı.	49
Şekil 4.8: Numune kodlarının sistemi.	50
Şekil 4.9: FTIR analizi cihazı.	52
Şekil 5.1: Kontrol numunelerine ait eğilme mukavemeti değerleri.	54
Şekil 5.2: %0.8 onarıcı ajan hacimli numunelerin eğilme mukavemetleri.	55
Şekil 5.3: %0.8 onarıcı ajan hacimli numunelerin onarım oranı.	55
Şekil 5.4: %1,2 onarıcı ajan hacimli numunelerin eğilme mukavemetleri.	56
Şekil 5.5: %1,2 onarıcı ajan hacimli numunelerin onarım oranı.	57

Şekil 5.6: 12 joule hasar uygulanan numunelerin eğilme mukavemetleri.	58
Şekil 5.7: 12 joule hasar uygulanan numunelerin onarıcı ajan hacmine göre onarım oranı.	58
Şekil 5.8: 18 joule hasar uygulanan numunelerin eğilme mukavemetleri.	59
Şekil 5.9: 18 joule hasar uygulanan numunelerin onarıcı ajan hacmine göre onarım oranı.	59
Şekil 5.10: 24 joule hasar uygulanan numunelerin eğilme mukavemetleri.	60
Şekil 5.11: 24 joule hasar uygulanan numunelerin onarıcı ajan hacmine göre onarım oranı.	60
Şekil 5.12: Kontrol numunesine ait kesit görüntüsü.	62
Şekil 5.13: Kontrol numunesine ait kesit görüntüsü.	63
Şekil 5.14: 12 Joule darbe uygulanmış numune kesiti.	64
Şekil 5.15: 18 Joule darbe uygulanmış numune kesiti.	65
Şekil 5.15 (devam): 18 Joule darbe uygulanmış numune kesiti.	66
Şekil 5.16: 24 Joule hasar uygulanmış numune kesiti.	67
Şekil 5.17: 24 Joule hasar uygulanmış numune kesiti.	68
Şekil 5.17 (devam): 24 Joule hasar uygulanmış numune kesiti.	69
Şekil 5.18: 24 Joule hasar uygulanmış numune kesiti.	70
Şekil 5.19: FTIR analizlerinin yapıldığı bölgeler.	71
Şekil 5.20: Epoksi Matris (I), onarıcı ajan (II) ve onarıcı ajan içeren matris bölgeye (III) ait FTIR spektrumları.	72

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 4.1: Marker As 63 epoksi reçine teknik özellikleri.....	43
Tablo 4.2: Metyx LT850 cam elyaf takviye yapısı.	44
Tablo 4.3: Metyx LT850 cam elyaf teknik özellikleri.	44
Tablo 4.4: Etil-2-siyanoakrilat yapıştırıcı teknik özellikleri.....	44
Tablo 4.5: Deney grupları.	50
Tablo 5.1: Numunelerin eğilme mukavemeti ve eğilme mukavemetlerindeki onarım oranı.	53

SEMBOL VE KISALTMALAR LİSTESİ

Al	: Alüminyum
ASTM	: American Society for Testing and Materials
cm	: Santimetre
DCPD	: Disiklopentadien
EGMA	: Etilen glisidil metakrilat
EMA	: Etilen-ko-metil akrilat
EMAA	: Etilen-ko-metakrilik asit
FTIR	: Fourier dönüşümlü kızılötesi
g	: Gram
J	: Joule
kg	: Kilogram
kN	: Kilonewton
MPa	: Megapascal
mL	: Mililitre
mm	: Milimetre
mPas	: Milipascal saniye
µL	: Mikrolitre
µm	: Mikrometre
PCL	: Polikaprolakton
PMMA	: Poli (metil metakrilat)
PTFE	: Politetrafloroetilen
SEM	: Taramalı elektron mikroskop
SiC	: Silisyum karbür
UV	: Ultraviyole
VaSC	: Vaporization of Sacrificial Component

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve bu çalışmanın her aşamasında bilgisi ve tecrübesi ile bana rehber olan danışman hocam Sn. Prof. Dr. Sare ÇELİK'e ve bu çalışmada kendilerinden destek aldığım sayın hocalarım Prof. Dr. Ruhan BENLİKAYA, Prof. Dr. Sema BAĞDAT, Prof. Dr. Taner TANRISEVER, Dr. Öğr. Üyesi Türker TÜRKOĞLU, Arş. Gör. Ahmet Çağrı KILINÇ, Arş. Gör. Harun Mert İLBEYLİ'ye ve arkadaşım Adem ÖZDİL'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Beni yetiştirip bu günlere gelmemde çok emeği olan, hiçbir zaman maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, hiçbir koşulda yalnız hissettirmeyen başta annem Güler ŞİRİN ve babam Oğuz ŞİRİN olmak üzere aileme ve ayrıca yüksek lisans eğitimim boyunca bana göstermiş olduğu her türlü desteği ve anlayışı için sevgili nişanlım Zeynep ÇAM'a teşekkür ederim.

Balıkesir, 2024

Kutay ŞİRİN

1. GİRİŞ

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, düşük termal genleşme ve yüksek sönümlenme özelliklerinden dolayı günümüzde uzay ve havacılık, otomotiv, denizcilik, enerji sektörlerinde ve hatta spor malzemeleri gibi çeşitli endüstrilerde yaygınca kullanılmaktadır. Sektörlerdeki yaygın kullanımına ve diğer malzemeler karşısındaki avantajlarına karşın kompozit malzemelerin de bazı dezavantajları da vardır. En sık karşılaşılan sorunlardan biri malzemenin iç yapısında oluşan mikro çatlaklardır. Kompozit malzemelerde matris olarak genellikle gevrek termoset reçineler kullanıldığından iç yapıda bulunan mikro çatlaklar düşük enerjili darbelerle gerçekleşebilir ve çoğu durumda malzemenin görünür yüzeylerinde bir kusur görünmediği için bu çatlakları tespit etmek her zaman kolay olmayabilir. Bu mikro çatlaklar birleşerek büyür ve malzemenin kullanım dışı kalmasına veya görevini yerine getiremeyecek olmasına sebep olur. Bu sebeple iç yapıdaki mikro çatlakları kontrol altında tutmak son derece önemlidir.

Malzemelerin kendi kendini onarması fikri doğadan esinlenilmiştir. Aynı ağaçların yaralanan bölgelerinden reçine sızdırması veya yine aynı şekilde biz memelilerin herhangi bir fiziksel yaralanmada devreye giren kanama mekanizması, açık yaraları korumak ve iyileştirmek amacıyla vücudumuzun doğal savunma mekanizmasıdır. Son 20 yılda araştırmacılar bu doğal savunma mekanizmasını malzemelere entegre etmeye çalışmaktadır ve bazı çalışmalar son derece umut vadetmektedir. Onarılmış malzemenin, hasarsız orijinal malzemenin daha yüksek mekanik özelliklere ulaştığı, onarma oranının %100'ü geçtiği çalışmalar da bulunmaktadır. Bu derecede bir onarım mekanizması bazı çalışma alanlarında önemli bir anahtar rol oynayabilir. Örneğin, uzaya fırlatılan bir uydu veya denize kurulan bir rüzgâr türbini gibi erişimi zor olan yapılarda kendi kendini onarma mekanizması bakım masraflarını azaltacaktır.

Bu tezin amacı da cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerde vasküler kanal yardımıyla farklı darbe koşullarında ve farklı onarıcı ajan hacimlerinde malzemenin kendi kendini onarma kabiliyetini gözlemlemek ve optimize etmektir.

1.1 Literatür Araştırması

Fiber takviyeli kompozit malzemelerde boş tüplerin onarıcı ajanlar için potansiyel bir hazne görevi görebileceğini ilk olarak Dry (1992) ortaya atmıştır [1]. Dry ve McMillan (1996)

tarafından ilk olarak beton malzeme üzerinde çalışılmıştır. Bu çalışmada ilk olarak içleri onarıcı ajan olarak metil metakrilat ve kümen hidroperoksit karışımı, sertleştirici olarak ise neodekanoik asit dolu cam kapiler tüpler kullanılmış ancak cam tüplerin fazla kırılğan olmasından dolayı tüplerin ana beton çatlaklarından farklı yerlerde kırılabileceği düşüncesiyle bu fikirden vazgeçilerek numuneler içi boş kanallar hazırlanarak üretilmiştir [2]. Dry (1996), çalışmalarını polimer esaslı kompozit malzemeler üzerine genişletmiştir. Bu çalışmada, 4 inç uzunluğundaki her bir cam pipet tüpe 100 µL hacminde iki aşamalı epoksi yapıştırıcı ve ayrı olarak yine aynı hacimde siyanoakrilat yapıştırıcı doldurularak bir darbe kırılım ve bükülme testleri uygulanmıştır. Testler sonucunda cam tüplerden sızan kimyasalların, çatlakları onardığı, yeniden çatlak açılmasına karşı direnç oluşturduğu, çatlak yayılmasını engellediği veya tamamen durdurduğu görülmüştür. Matristeki çatlakların onarılması optik olarak da gözlenmiştir [3].

Motoku (1999), cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler üzerinde çok çeşitli parametreler kullanarak optimize bir kendi kendini onarma sistemi oluşturmayı hedeflemiştir [4]. Bu parametrelerden bazıları, kullanılan elyaf takviye katman sayısına bağlı olarak malzeme kalınlığı, farklı epoksi reçine sistemleri, numunelerde hasar oluşturmak için kullanılan ağırlık düşürme testinde farklı darbe büyüklükleri, farklı onarıcı ajan hazneleri ve onarıcı ajan içeren haznelerin sayısıdır. Motoku, yapmış olduğu çalışmalar sonucunda kendi kendini onarma yöntemlerinin gelecek vadettiğini kanıtlamış ve bu çalışma daha sonraki çalışmalar için yol gösterici olmuştur.

Kompozit malzemelerde mikrovasküler kendi kendini onarma yöntemlerinden içi boş cam fiber kullanılan ilk çalışma Bleay ve arkadaşları (2001) tarafından gerçekleştirilmiştir [5]. Bu çalışmada, içi boş cam fiberlerin hem malzeme yapısını destekler nitelikte olabileceği hem de onarıcı ajan maddeler için hazne özelliği görebileceği anlaşılmıştır. Çalışmada onarıcı ajan madde olarak iki aşamalı epoksi yapıştırıcı ve siyanoakrilat yapıştırıcı denenmiş fakat siyanoakrilat yapıştırıcı ile içi boş cam fiberler doldurulamamıştır. İki aşamalı epoksi ile doldurulan numunelerde, darbe sonrası basma mukavemeti testi uygulanmış ve hem vakum hem de sıcaklığa maruz bırakılan numuneler yaklaşık olarak %10 onarım göstermişlerdir.

Pang ve Bond (2001), 60 µm dış çapa sahip içi boş cam fiber takviye ve epoksi matris ile ürettiği numunelerde, içi boş cam fiberlerin ([0/90]), 0 yönünü onarıcı ajan madde, 90

yönünü ise sertleştirici ile doldurmuştur. Çalışmada onarıcı ajan olarak, aseton, ultraviyole boya ve epoksi reçine kullanılmasıyla hem reçinenin viskozitesini düşürerek onarıcı ajanın yapacağı kılcal hareketi arttırmak amaçlanmış hem de gözlemlenebilirliği sağlamaya çalışılmıştır. Darbe deneyi sonrası yapılan dört nokta eğme deneyi sonuçları, darbe deneyi ile kaybedilen mekanik özelliklerin önemli bir kısmının kendi kendini onarma yöntemi ile geri kazandırılabilirdiğini göstermiştir [6]. Pang ve Bond (2005), farklı parametreler ve malzemenin iç yapısındaki onarımı daha iyi gözlemleyebilmek amacıyla çalışmalarını genişletmiştir. Bu çalışmada farklı olarak darbe deneyi öncesinde numunelerini, 0, 3, 6 ve 9 hafta olmak üzere oda sıcaklığında bekletmişler ve onarıcı ajan maddenin malzeme içinde depo edildiği süre boyunca onarıcı özellikleri dikkate değer bir biçimde azaldığı görülmüştür. Bunun ana sebebinin ise onarıcı ajan içerisinde reçinenin viskozitesini düşürmek için kullanılan aseton olduğunu belirtmişlerdir. Onarıcı ajanın içinde ultraviyole boya katkısının olması nedeniyle numunelerdeki hasar ve onarım alanının incelenmesi, ultrasonik C-tarama, ultraviyole haritalama tekniklerinin kullanılmasıyla daha gözlemlenebilir hale gelmiştir [7].

Trask ve Bond'da çalışmalarında (2006) içi boş cam elyaf takviye kullanarak polimer matrisli kompozit malzemelerde kendi kendini onarma sisteminin havacılık ve uzay alanlarında kullanımına odaklanmışlardır. Bu çalışmalarında içi boş cam elyaf takviyeleri, geleneksel cam elyaf takviyelerin arasına yerleştirerek numune üretimi gerçekleştirmişlerdir. İçi boş cam takviyeler tek yönlü olarak dört katman geleneksel cam elyaf üzerine pozisyonlandırılmış olup toplamda dört katman içi boş cam elyaf on altı katman geleneksel cam elyaf olmak üzere yirmi katmanlı numuneler üretilmiştir. Bu numunelerde hem matris hem de onarıcı ajanda iki aşamalı epoksi reçine kullanılmış olup üç nokta eğme testi cihazı ile darbe uygulanıp eğilme mukavemetleri dört nokta eğme cihazında ölçülmüştür. Çalışmanın ana amacı alçak irtifa uydu yörüngelerinde kullanılabilecek bir sistem oluşturmak olduğundan sıcaklık bu çalışmada önemli bir parametre olmuştur. Dört nokta eğme testinden alınan sonuçlarda en iyi eğilme mukavemetini, darbe sonrası onarım sürecinde 2 saat boyunca 100°C fırında muhafaza edilen numune gösterirken ısıya maruz kalmayan numunelerde onarım yok denecek kadar azdır. Bu çalışma bizlere sıcaklık faktörünün onarıcı ajan olarak epoksi kullanılan sistemlerde çok önemli bir faktör olduğunu göstermektedir [8]. Trask ve arkadaşları (2007), çalışmalarını karbon elyaf takviyeli kompozit malzemeler üzerinde de devam ettirmiştir. Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerde, ara katmanlara yerleştirilen içi boş cam elyaf takviyelerin birbirine olan

uzaklığı ve farklı darbe yükleri olmak üzere iki ana parametrenin onarım ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Sonuçlara göre, içi onarıcı ajan madde dolu takviyeler birbirine yaklaştıkça malzemenin mekanik özellikleri azalmakta ancak onarıcı ajan madde hacmi arttığından dolayı onarım süreci sonunda daha iyi mekanik özellikler gözlenmiştir. Ayrıca farklı yüklerle hasar verilen malzemelerde de yüksek çarpma yüküne maruz kalan numunelerde onarım oranları daha fazla olduğu gözlenmiştir [9].

Esser Kahn ve arkadaşları (2011), günümüzde de sıkça kullanılan kompozit malzemeler içerisinde mikrovasküler kanal oluşturma işlemlerinden biri olan VaSC (Vaporization of sacrificial component) yöntemini ilk kez kullanmışlardır. Bu yöntemde kanal oluşturmak için matris madde olan epoksi reçine, polilaktik asit (PLA) filamentten üretilen üç boyutlu yapı üzerine dökülmüş ve kürlenmesi beklenmiştir. Reçine kürlendikten sonra malzeme, 200 C° üzerinde sıcaklığa maruz bırakılarak PLA filamentin çözülmesi ve sıvı olarak epoksi matris içinden akması sağlanmıştır. Böylece epoksi yapının içerisinde içi boş kanallar oluşturmuşlardır [10].

Norris ve arkadaşları (2013), karbon elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerde içlerine onarıcı ajan madde doldurabilecekleri mikrovasküler kanalları açmak için laminatlar arasına 0.5 mm çapında PTFE (politetrafloroetilen) kaplamalı çelik tel yerleştirmişler ve kürlenme sonrasında telleri manuel olarak çıkarmışlardır. Böylelikle malzeme içerisinde herhangi bir katı hazne kullanmadan mikrovasküler kanal oluşturmuşlardır. Çalışmada farklı çarpma enerjisi aralıkları kullanarak onarım oranları gözlemlenmiştir. Darbe sonrası basma mukavemeti analizine göre çalışmış oldukları enerji aralığında (2,5J-20J) darbe enerjisinin büyüklüğü ile malzemenin onarım oranı doğrudan bağlantılıdır [11].

Narinder (2013), cam elyaf takviyeli polimer malzemelerin içinde borosilikat cam tüp kullanmış ve bu cam tüplerin içerisinde farklı solvent ve/veya epoksi reçine onarıcı ajan maddeler yerleştirerek kendi kendini onarma sistemlerinde kullanılan onarıcı ajan madde seçeneklerini değerlendirmiştir. Etil siyanoakrilat onarıcı ajan kullanılan numuneler 10 günlük onarım süresinde darbe sonrası basma mukavemetinde %88 oranda onarımla en iyi performansı göstermiştir [12].

Polimer matrisli kompozit malzemelerde onarıcı ajan madde içeren hazne kullanımına örneklerden biride polipropilen tüplerdir. Yong ve arkadaşları (2016), polipropilen tüpleri

ultraviyole ışığa maruz bırakarak gevrekletirmiş ve böylelikle kırılmasını kolaylaştırmışlardır. Ayrıca onarıcı ajan madde içerisine tütün iç basıncı artıracak ve böylece darbe anında basınçla birlikte onarıcı maddenin daha iyi yayılmasını sağlayacak olan 2,2'-Azobis-(2,4-dimethylvaleronitrile) maddesini ekleyerek sistemlerini daha verimli bir hale getirmişlerdir [13].

Wang ve arkadaşları (2016), ekstrem düşük sıcaklıklarda kendi kendini onarmayı sağlayan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Oluşturdukları cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemenin ara katmanına karbon nanotüp levha yerleştirerek elektrik akımı yoluyla levhaya ısı verilmiş ve bu sayede ortam sıcaklığı -60°C olmasına rağmen malzemenin iç ısısı yüksek olduğundan dolayı onarıcı ajan maddenin başarıyla kürlenmesi sağlanmıştır [14].

Hart ve arkadaşları (2017), polimer matrisli kompozit malzemelerde tekrarlanabilir kendi kendini onarma sistemi tasarlamayı ve bu sistemi optimize etmeyi hedeflemişlerdir. Oluşturmuş oldukları sistemde, iki aşamalı epoksi onarıcı ajan madde, ajan maddeyi iletmek üzere bir tank ve pompa sistemi, PLA eritilerek oluşturulan mikrovasküler kanallar ve epoksi matris bulunmaktadır. Sistemi optimize edebilmek adına farklı pompalama süreleri, onarıcı ajanda kullanılan reçine ve sertleştirici oranları incelenmiş ve yapılan çalışmalar neticesinde %55 ile %75 onarım oranları arasında 10 defa tekrarlı onarıma ulaşmışlardır [15].

Mohammad Amin ve arkadaşları (2020), mikrovasküler kanal oluşturmak için farklı olarak polyamid fiberleri epoksi matrisin içine yerleştirmişler ve külendikten sonra çıkartmasını kolaylaştırmak adına polyamid fiberleri silikon vaks ile kaplamışlardır. Çalışmada farklı onarma süreleri ve farklı onarıcı ajan madde hacimleri parametre alınarak çekme ve eğilme mukavemetleri gözlenmiştir [16].

Bu çalışmada ise cam elyaf takviyeli epoksi reçine matrisli kompozit malzemelerde cam tüplerden oluşan vasküler kanallar içerisine yerleştirilen, literatürde fazla çalışma yapılmamış etil-2-siyanoakrilat onarıcı ajan farklı hacimlerde kullanılarak ve farklı darbe enerjileri ile hasara maruz bırakılan numunelerin oda sıcaklığında kendi kendini onarma kabiliyeti incelenecek ve bu sürecin sonuçları gözlemlenecektir.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzeme, iki veya daha fazla malzemenin üstün özelliklerini tek bir malzemede elde etmek amacıyla makro seviyede birleştirilmesiyle oluşan malzemeler olarak tanımlanır. Örneğin karbür uçlu takımlar, sert karbürlerin yumuşak kobalt metal matris içine yerleştirilmesiyle elde edilen malzeme parçacıklı bir kompozit yapı örneğiyken çeliğin yapısında bulunan krom ve vanadyumun birleşerek oluşturduğu yapı mikroskobik düzeyde homojen olduğundan kompozit malzeme olarak sınıflandırılmaz [17].

2.1 Kompozit Malzemelerin Tarihçesi

İnsanların lifli kompozitleri ilk olarak ne zaman ve nerede öğrendiklerini söylemek oldukça zordur, doğa bize bu konuda sayısız örnek sunmaktadır. Odun temel olarak lignin matrisi içerisinde selüloz liflerinden oluşur, çoğu memeli kemiği ise protein, kalsiyum ve fosfat matrisi içerisinde katmanlı ve yönlendirilmiş kolajen liflerinden oluşur. İnsan yapımı lifli kompozitlerin ilk örnekleri, saman takviyeli kil tuğlaları (Şekil 2.1) Eski Ahit Exodus'a (İncilin 2. Kitabı) göre Antik Mısır'ın 12.Hanedan (M.Ö 19.YY) piramitlerinde kullanılmıştır. Ayrıca çömlekçilik ise Kuzey Irak'ta bulunmuştur (M.Ö 7000), Merkez ve Güney Amerika'da ise bitki lifleri içeren çömlekler yapılmıştır. Lifli takviyelerin bu örneklerdeki ilkel kullanımları muhtemelen kildeki çatlakları önleme arzusundan kaynaklanmıştır. Modern kompozitler 1930'larda reçine takviyeli cam liflerinin (fiberglas) kullanımıyla başlamış ve uçak ve gemi yapımında kullanılmıştır. 1970'lerden beri metal ve seramikten elde edilen matrisler ve yeni liflerin (karbon, bor, aramid gibi) kullanımına bağlı olarak kompozit uygulamaları oldukça genişlemiştir [18], [19].



Şekil 2.1: Saman takviyeli kil tuğla örneği.

2.2 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit malzemelerin geleneksel diğer malzemelere göre pek çok üstün özellikleri bulunmaktadır.

Kompozit malzemelerin üstün özellikleri şunlardır;

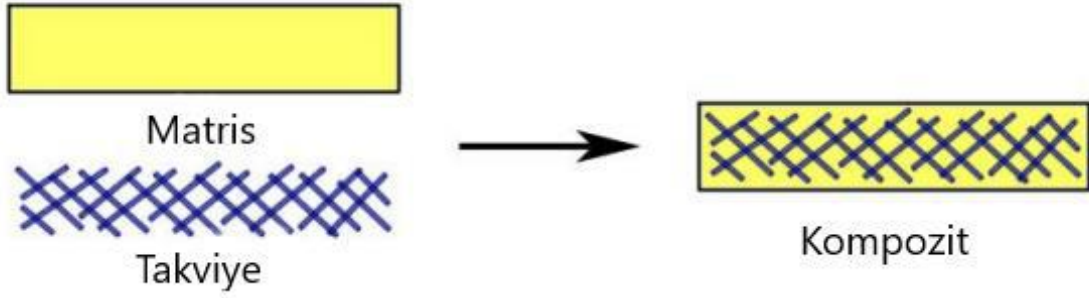
1. Yüksek mukavemet/yoğunluk oranı
2. Yüksek rijitlik/yoğunluk oranı
3. Yüksek korozyon dayanımı
4. Yüksek aşınma direnci
5. Yüksek sıcaklık dayanımı
6. Yüksek kimyasal direnç
7. Hava koşulları ve UV (ultraviyole) ışınlarına karşı dayanım
8. İyi termal ve ısı iletkenliği
9. Çok iyi elektrik ve termik yalıtım özelliği
10. Hafiflik
11. İşlenebilirlik
12. Kalıcı renklendirme
13. Titreşim sönümlenme

Kompozit malzemelerin üretim metodları ve kullanılan malzemelere bağlı olarak avantajları yanında aşağıda listelenen birtakım dezavantajları da bulunmaktadır:

1. Kompozit malzemelerin imal edilirken kullanılan üretim metodlarının kalitesiyle alakalı olarak her zaman ideal özellikler elde edilemez. Aynı kompozit malzeme için bile farklı mukavemet özellikleri gözlenebilir.
2. Üretiminin zor olması
3. İşlenme güçlüğü
4. Geri dönüşümünün olmaması
5. Maliyetinin yüksek olması [20]–[24].

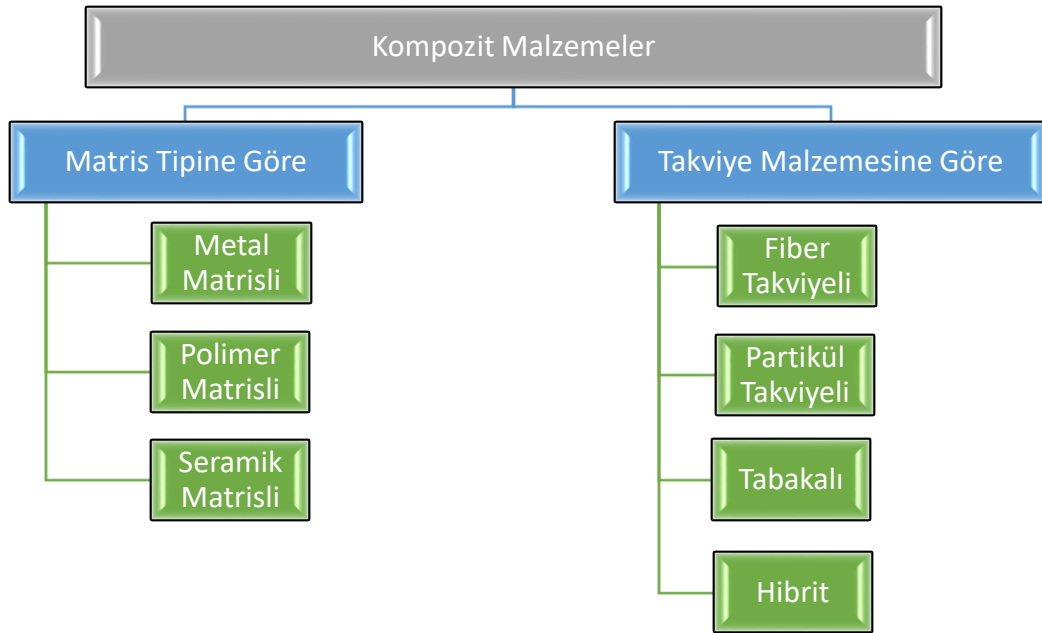
2.3 Kompozit Malzemelerin Yapısı ve Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler matris ve takviye elemanı olmak üzere iki malzemedan meydana gelmektedir. Şekil 2.2’de kompozit malzemelerin yapısı basit bir görselle verilmiştir.



Şekil 2.2: Kompozit malzeme bileşenleri [25].

Günümüzde üretim teknolojilerinin gelişmesi ve ihtiyaçların artmasıyla birlikte çok farklı yapıda kompozit malzemeler üretilmektedir. Kompozit malzemeleri basitçe sınıflandırmak mümkün olmamakla birlikte kompozit malzemelerin ana yapısını oluşturan matris ve takviye tipine göre bir sınıflandırma yapılabilmektedir. Yapılan sınıflandırma Şekil 2.3’de görülmektedir.



Şekil 2.3: Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.

2.3.1 Matris

Kompozit malzemeler matris tipine göre, metal, polimer veya seramik olarak üç grupta sınıflandırılabilir. Kompozit malzeme yapısındaki matris fazından beklenen bazı görevler bulunmaktadır. Bu görevler kullanılan takviye tipine göre değişmektedir. Örneğin, partikül

takviyeli kompozitlerde matris fazının görevi partikülleri bir arada tutmakken elyaf takviyeli kompozitlerde matris malzemenin görevleri daha fazladır [17].

Matrisin ilk görevi elyafları bir arada tutarak dışarıdan uygulanan kuvvetleri elyafa iletmektir. İkinci görevi ise elyafın yüzeyini mekanik aşınma gibi fiziksel zararlar ve kimyasal reaksiyon gibi çevresel etkilerden korumaktır. Bu tür çevresel etkiler yüzeyde daha çok çekme dayanımına neden olabilecek yüzey kusurlarına yol açabilir. Matrisin üçüncü görevi kompozit malzemeye şekil vermek ve rijit durmasını sağlamaktır. Son olarak da matris, elyafı birbirinden ayırarak göreceli bir süneklik ve plastiklik sağlayarak oluşan çatlakların elyaftan elyafa geçişini engelleyerek, ani kırılmayı önler. Böylece matris çatlak ilerlemesini önleyen bir engel görevi görmüş olur. Elyaf tek tek hasar görse bile, tüm kompozitin hasarı çok sayıda birbirine komşu elyafın kırılması kritik bir değere ulaşana kadar gerçekleşmez [19].

2.3.1.1 Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler metal veya metal alaşımlarından oluşan matris ve genellikle seramik partikül takviye elemanından meydana gelmektedir. Günümüzde yaygın olarak en çok kullanılan metal matris malzemesi Al ve alaşımlarıdır. Metal matrisli kompozitlerin genel özellikleri hafif olmaları, ısı iletkenliklerinin iyi olması, atmosfere karşı korozyon dirençlerinin yüksek olması ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmalarıdır [26].

2.3.1.2 Seramik Matrisli Kompozitler

Yüksek sıcaklık uygulamalarında polimer matris malzemelerinin kullanılmaması, seramik matris malzemelerini yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda metal matris malzemelerine iyi bir alternatif matris konumuna yerleştirmektedir. Metallere göre daha düşük yoğunluğa ve yüksek oksidasyon direncine sahip olmaları seramik matrisli kompozitlerin avantajlarıdır [27].

2.3.1.3 Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer matrisli kompozitlerde; matris malzemesi olarak polimer reçine, takviye elemanı olarak da elyaf kullanılır. Kolay üretilebilmesi ve maliyetinin düşük olması sebebiyle en yaygın kullanım alanına sahip kompozitler polimer matrisli kompozitlerdir. Kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak kullanılan reçineler polimer malzemelerin

termosetler grubu içerisinde dirler. Polimer malzemeler termosetler, termoplastikler ve elastomerler olarak üçe ayrılırlar [19].

2.3.2 Takviye Elemanları

Kompozit malzemelerde takviye elemanının asıl görevi malzemeye uygulanan yükü taşıyarak matrisin rijitliğini ve dayanımını arttırmaktır. Fakat malzemeye uygulanan yükün elyaflara iletilebilmesi ve mekanik özelliklerinin artabilmesi için elyaf ve matris arayüzündeki fiziksel ve kimyasal uyumun iyi olması gerekmektedir. Ayrıca elyaf ile matris malzemenin ısıl genleşme katsayıları arasındaki uyum, kalıcı yapısal gerilmelerin oluşması yönünden önemlidir [17].

Kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanları istenen özellik ve kullanılacağı matrise göre farklı formlarda bulunabilirler. Bu formlar partikül, sürekli ve süreksiz fiber (elyaf) şeklinde olabilir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan partikül takviyeler, karbürler (SiC, B₄C), oksitler (Al₂O₃, SiO₂), nitrürler (Si₂N₄, AlN), silisyum, karbon, gibi elementlerdir. En yaygın olarak kullanılan elyaf takviyeler ise cam, karbon, bor ve aramid elyaflarıdır. Kompozit malzemeler Şekil 2.3'de gösterildiği gibi takviye elemanlarına göre dört grupta değerlendirilmektedir [28].

2.3.2.1 Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler

Bu kompozit tipi, ince elyafların matris yapıda yer almasıyla meydana gelmiştir. Elyafların matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde edilir. İki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyelerle her iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa elyaflarla ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür. Elyafların mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından çok önemlidir [24].

2.3.2.2 Partikül Takviyeli Kompozit Malzemeler

Bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilirler. İzotrop yapılardır. Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. En yaygın tip plastik matris içinde yer alan metal parçacıklardır. Metal parçacıklar ısıl ve elektriksel

iletkenlik sağlar. Metal matris içinde seramik parçacıklar içeren yapıların, sertlikleri ve yüksek sıcaklık dayanımları yüksektir [20].

2.3.2.3 Tabakalı Kompozit Malzemeler

Tabakalı kompozit yapı, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan kompozit türüdür. Farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların bileşimi ile çok yüksek mukavemet değerleri elde edilebilmektedir. Isıya ve neme dayanıklı yapılardır. Metallere göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir. Sürekli elyaf takviyeli tabakalı kompozitler, uçak yapılarında, kanat ve kuyruk grubunda yüzey kaplama malzemesi olarak çok yaygın bir kullanıma sahiptirler. Ayrıca uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanı olan sandviç yapılar da tabakalı kompozit malzeme örneğidirler. Sandviç yapılar, yük taşıyarak sadece izolasyon özelliğine sahip olan düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemenin alt ve üst yüzeylerine mukavemetli levhaların yapıştırılması ile elde edilirler [20].

2.3.2.4 Hibrit Kompozit Malzemeler

Aynı kompozit yapıda iki ya da daha fazla elyaf çeşidinin bulunması mümkündür. Bu tip kompozitlere hibrit kompozitler denir. Bu alan yeni tip kompozitlerin geliştirilmesine uygun bir alandır. Örneğin, kevlar ucuz ve tok bir elyaftır. Ancak basma mukavemeti düşüktür. Grafit ise düşük tokluğa sahip, pahalı ancak iyi basma mukavemeti olan bir elyaftır. Bu iki elyafın bulunduğu hibrid kompozitin tokluğu grafit kompozitten iyi, maliyeti düşük ve basma mukavemeti de kevlar elyaflı kompozitten daha yüksektir [17], [19], [21].

2.4 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin geleneksel malzemeler karşısında üstün mekanik özellikler sergilemesi, son yıllarda kompozit malzeme üretim teknikleri üzerinde daha yoğun çalışmalar yapılmasına yol açmıştır. Buna rağmen kompozit malzemelerin üretim maliyetleri hala yüksektir ve problemler oluşturmaktadır. Bu nedenle yüksek teknolojilere ulaşabilmek ancak çok özel kabiliyetleri olan malzemelerin bulunması ve üretilmesiyle mümkündür. Bir kompozit üretimi için uygulamada istenilen teknik özelliklere göre takviye elemanı ve matris seçiminin yanında üretim tekniği ve konsolidasyon parametreleri de çok önemlidir [17].

2.4.1 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kendine özgü avantaj ve dezavantajları olan birbirinden oldukça farklı pek çok üretim yöntemi mevcuttur. Malzemelerin tüm özellikleri baz alınarak malzemeye uygulanacak olan üretim metodu belirlenir. Geleneksel malzemelere göre daha üstün özelliklere sahip olan metal matrisli kompozit malzemelerin üretim tekniklerinin geliştirilmesi için yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Tüm bu çalışmalara rağmen kompozit malzemelerin üretim teknikleri maliyet bakımından hala uygun değildir [29].

Kaliteli bir kompozit üretmek için birbiri ile uyum içerisinde olan ana faz ile takviye elemanı arasındaki bağın çok güçlü olması gerekir. Bu bağ sağlamasının en temel yolu matris malzemesinin takviye elemanını iyi ıslatabilmesinden geçer. İyi bir ara yüzey bağı ile matris malzemesinin katkı elemanını yeterli olacak şekilde ıslatması kompozit dayanımını artırmakta oldukça önemli bir yere sahiptir. Güçlü bir ara yüzey bağı oluşturmanın bir diğer yolu ise en uygun üretim yönteminin belirlenmesine bağlıdır [29].

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretim yöntemleri iki ana başlıkta incelenebilir:

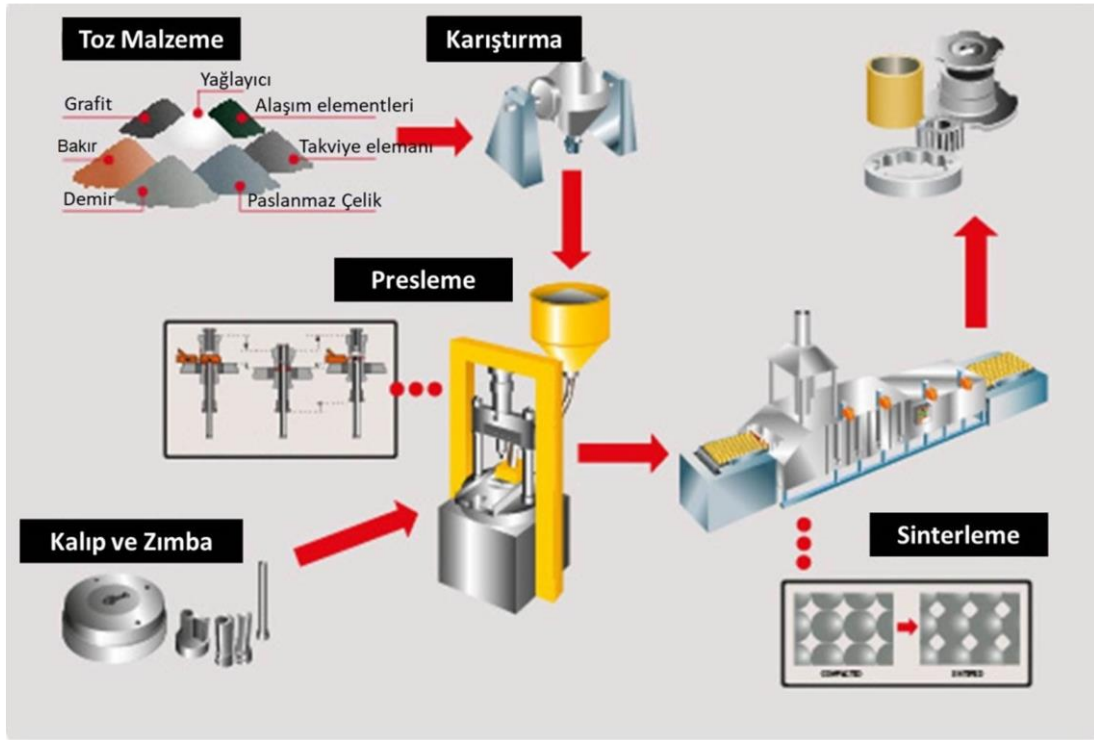
- 1.Katı hal üretim yöntemleri,
- 2.Sıvı hal üretim yöntemleridir.

2.4.1.1 Katı Hal Üretim Yöntemleri

Yaygın olarak kullanılan katı hal üretim yöntemleri toz metalurjisi ve difüzyon bağlanmasıdır.

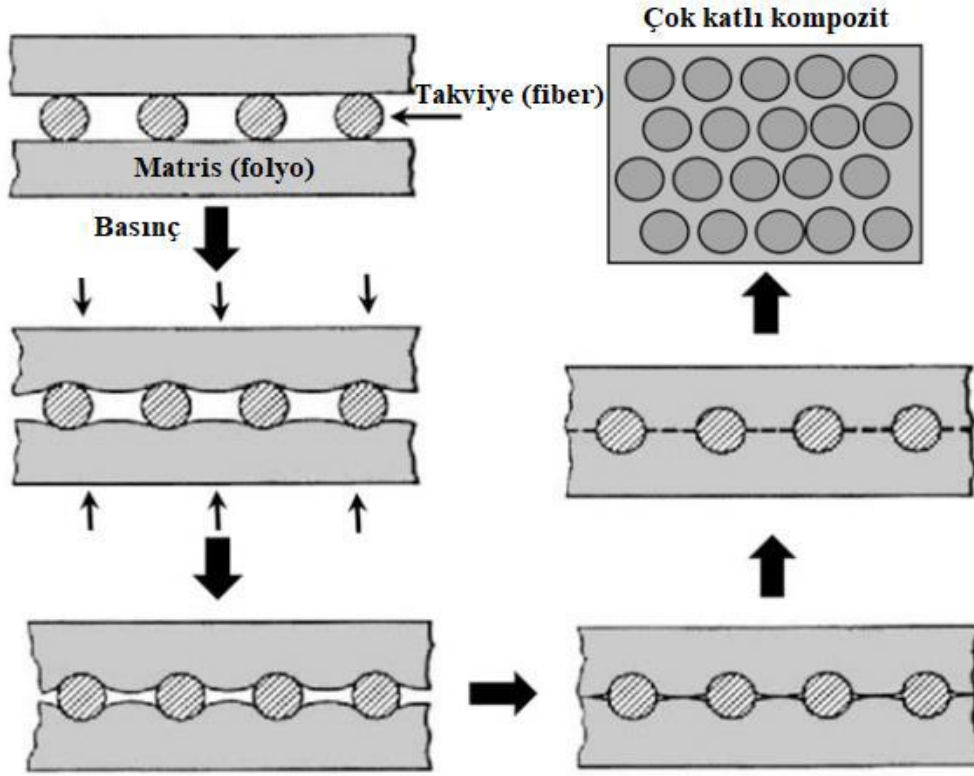
Toz metalurjisi yöntemi, Şekil 2.4'de gösterildiği gibi takviye ve matris partiküllerinin karıştırılarak üretilmesini, istenilen geometride preslenmesini ve preslenen karışımın sinterlenmesini içermektedir. Bazı durumlarda sinterlenen malzeme, dövme, haddeleme gibi ikincil işlemlerden geçirilmek suretiyle porozitelerin giderilmesi de söz konusu olmaktadır. Takviye partiküllerinin matris içerisinde homojen bir şekilde dağıtılabilmesi için takviye partikül boyutunun matris partikül boyutuna oranı önemli bir parametredir. Matris partiküllerinin büyük olması durumunda takviyeler büyük partiküller arasında kalan boşluklara doluşarak bu noktalarda kümelenmektedir. Takviye/matris boyutu oranının 1'e yakın olması durumu homojen takviye dağılımı için gerekli görülmektedir. Bu yöntem ile çok yüksek oranda takviye içeren kompozit üretimi mümkündür. Üretilebilecek parça boyutunun kısıtlı

olması ve üretim maliyetinin yüksek olması bu yöntemin dezavantajlarını oluşturmaktadır [30].



Şekil 2.4: Toz metalurjisi işleminin aşamaları [31].

Esasında bir kaynak yöntemi olarak kullanılan difüzyon bağlanması yöntemi, temizlenmiş metal yüzeylerden yüksek sıcaklık ve basınç altında atomların difüzyonu esasına dayanmaktadır. Temel avantajın kontrol edilebilir fiber oranı ve oryantasyonu olduğu işlemden yüksek sıcaklıklardaki atomlar arasında difüzyon bağı kurulmasıyla metal matrisli kompozit üretilmiş olur. Üretim aşamaları Şekil 2.5’de gösterildiği gibi olan yöntemde matris tozlarından üretilen folyo halindeki matris fazı ile fiberler istiflendikten sonra vakum altında preslenir ve ısıtılır. Yeterli sıcaklık ve basınç değerleri elde edildikten sonra atomların difüzyonu ile tabakalar arasında bağ oluşumu gerçekleşir [32].

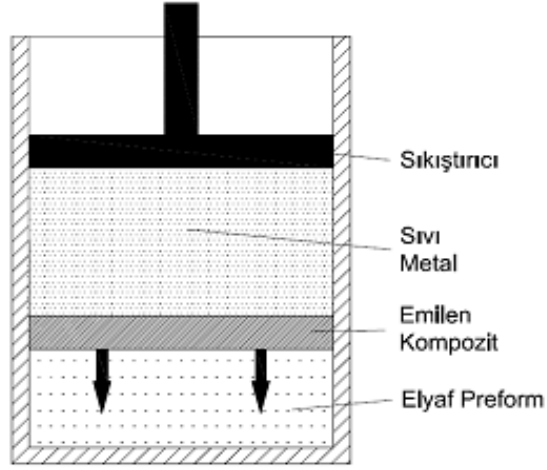


Şekil 2.5: Difüzyon bağlanması yöntemi [30].

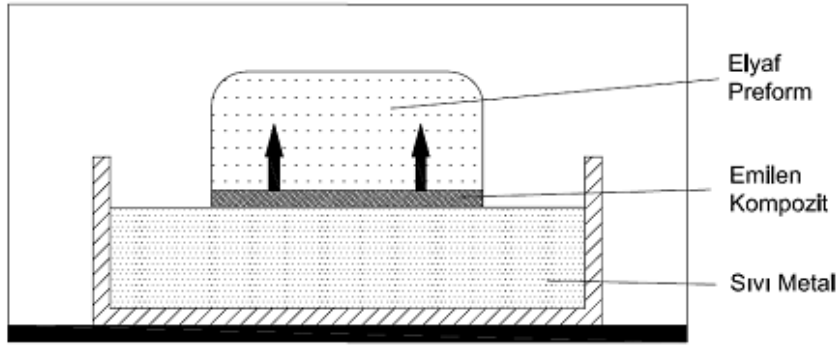
2.4.1.2 Sıvı Hal Üretim Yöntemleri

Yaygın olarak kullanılan sıvı hal üretim yöntemleri, sıvı metal infiltrasyon, karıştırmalı döküm, püskürtme yöntemi, sıkıştırımlı döküm yöntemi ve In-situ (yerinde) yöntemidir.

Sıvı metal infiltrasyon yöntemi, sürekli ya da süreksiz takviyelerin bir bağlayıcı kullanarak bir araya getirilmesiyle elde edilen preforma, sıvı metalin emdirilmesi yoluyla kompozit malzemelerin üretildiği bir yöntemdir. Sıvı metal emdirilmeden önce üretilecek parçanın şekline uygun preformlar hazırlanır. Hazırlanan preformlarda bulunan takviyeler arasındaki boşlukların sıvı metal emdirilerek doldurulmasıyla metal matrisli kompozit üretimi gerçekleştirilir. Bu yöntemde metale pozitif (gaz basıncı) ya da negatif (vakum) basınç uygulanarak metal matrisli kompozit üretimi yapılmaktadır. İki yöntemin şematik gösterimi de Şekil 2.6'da verilmiştir [33].



(a)

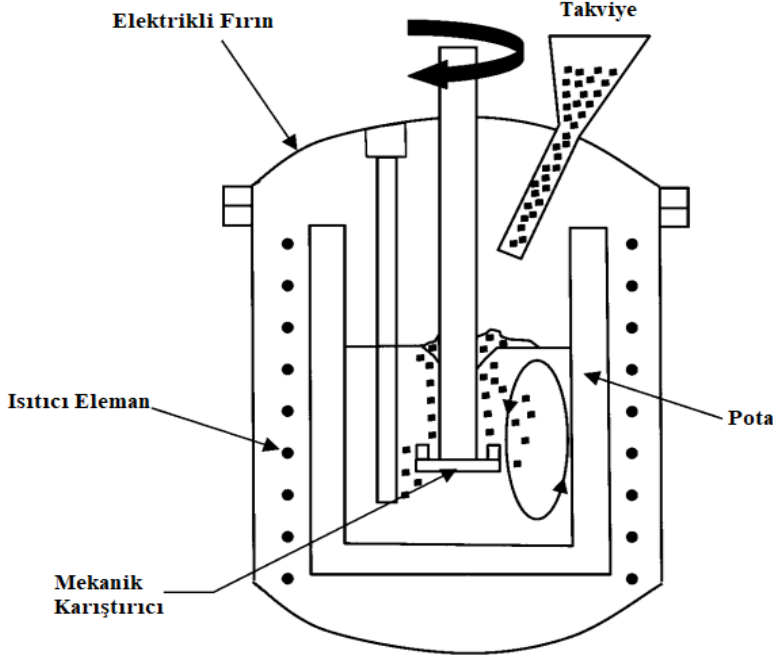


(b)

Şekil 2.6: Sıvı metal infiltrasyon teknikleri a) Pozitif basınç b) Negatif basınç [34].

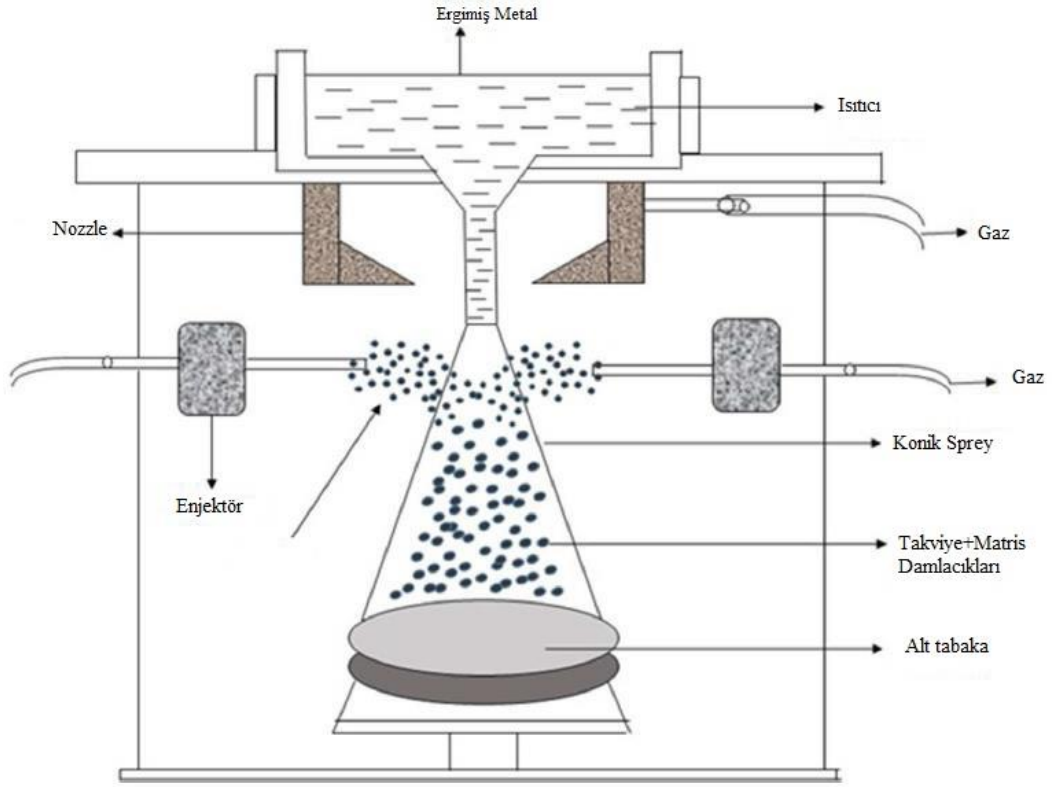
En yaygın olarak kullanılan sıvı hal üretim yöntemlerinden biri karıştırmalı dökümdür. Seramik partiküllerin sıvıya eklenerek karıştırılmasının ardından döküm yapılır. Yarı-katı döküm yöntemiyle benzerlik göstermesinin yanında bu yöntemde metalik matris tamamen sıvı halde bulunmaktadır. Yöntemle ilgili şematik gösterim Şekil 2.7’de verilmiştir. Yöntemin başarısını etkileyen en önemli husus takviyenin sıvı matris tarafından iyi bir şekilde ıslatılmasıdır. Islatılabilirliğin geliştirilmesi için takviyeler sıklıkla ön ısıtma, kaplama gibi ön işlemlere tabi tutulmaktadır. Karıştırma işlemi sırasında metalin viskozitesi düşerek seramik/metal arasındaki arayüzey enerjisinin düşmesini sağlar. Bu sayede ıslatma açısı artarak arayüzey oluşumu için elverişli şartlar sağlanır. Buna karşın, takviye malzemesinin matriste homojen olarak dağılımını sağlama zorluğu, karıştırma sırasında gaz hapsolmesi ile matriste gözenek (porozite) oluşması, karıştırmanın vakum veya soy gaz

ortamında yapılmaması durumunda matriste oksit inklüzyonlarının oluşması, sıvı metalle takviye parçacıklarının uzun süre temas etmesi nedeniyle istenmeyen kimyasal reaksiyonların oluşması, karıştırma sırasında veya karıştırma sonrası parçacık topaklanmalarının oluşması, uzun elyafların kullanılamaması ve takviye yönlendirmesinin yapılamaması gibi problemler de vardır [30], [35].



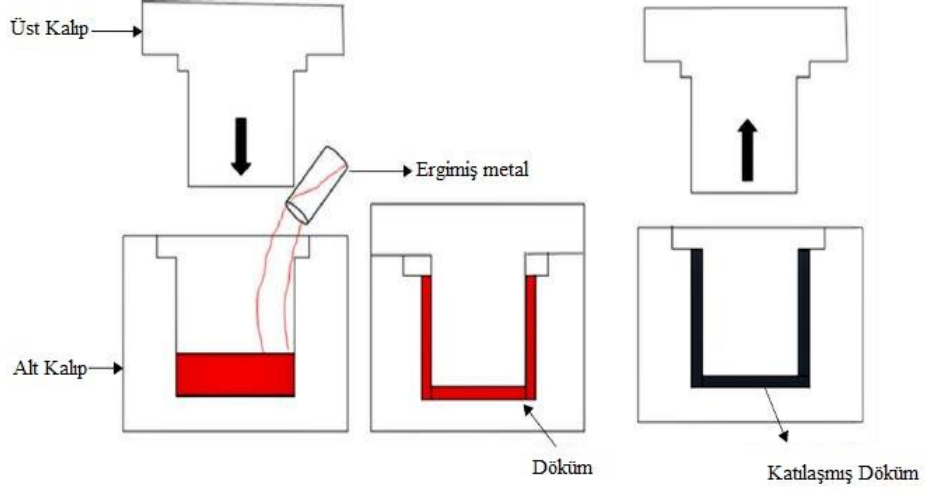
Şekil 2.7: Karıştırmalı döküm yöntemi [35].

Püskürtme yöntemi ise alaşımın bir fırın içerisinde ergitilmesi ve sıkıştırılmış inert gaz akışının yardımıyla atomize edilirken aynı anda takviye partiküllerinin enjekte edilerek katı alt tabaka üzerine biriktirilmesiyle gerçekleşir. Şekil 2.8’de üretim yöntemi gösterilmektedir. Bu yöntemle takviyelerin metal matris içerisinde homojen olarak dağılımının sağlanması zordur [36].



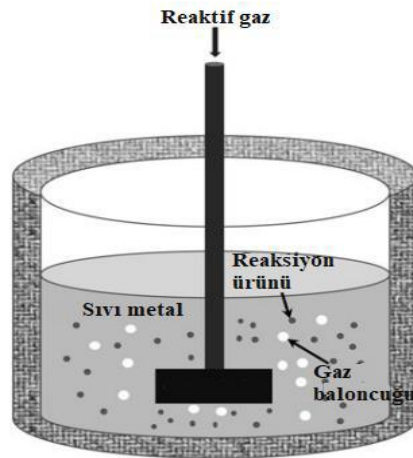
Şekil 2.8: Püskürtme yöntemi üretim aşamaları [36].

Sıkıştırımlı döküm yönteminde metalin katılaştırılması yüksek basınç altında gerçekleştirilir. Emilen ve tutulan gazların tümü, erimiş metalin fiberin içine zorla sızmasıyla dışarı atılır. Bu yöntemde emdirme işlemi, erimiş metali kalıbın küçük gözeneklerinden zorlayarak veya bastırarak vakumlu ya da vakumsuz olarak uygulanabilir. Aşamalı üretim yöntemi Şekil 2.9’da gösterilmiştir. Sıkıştırımlı döküm yöntemi, takviyenin erimiş metal tarafından iyi ıslanması ihtiyacını ortadan kaldırır. Bu proses ürünü, mükemmel yüzey kalitesiyle birlikte ince eş eksenli tane yapısı, düşük gaz veya çekinti gözenekliliği sunduğundan, yüksek kaliteli bileşenler geliştirmek için sıkıştırımlı döküm kullanılır. Sıkıştırılmış döküm malzemeleri genellikle aynı malzemelerden yerçekimi altında dökülenlerden (geleneksel döküm) daha yüksek mukavemet gösterir [37].



Şekil 2.9: Sıkıştırırmalı döküm yöntemi [37].

In-situ (yerinde) kompozit terimi, ilk olarak doğrusal katılaştırılmış çok fazlı alaşımlar için kullanılmıştır. Günümüzde ise sıvı metal içerisinde intermetalik bileşiklerin kontrollü bir şekilde oluşumu yoluyla kompozit üretimini tanımlamak için kullanılan bir terim haline gelmiştir. Sıvı içerisine kimyasal bileşiklerin eklenerek birbirleriyle etkileşime girmelerinin sağlanması ya da sıvıya dışarıdan gaz enjeksiyonu yoluyla metal matrisli kompozit üretimi gerçekleştirilebilmektedir. Katılaşmanın ya da reaksiyonun kontrolü ile takviyelerin boyutu ayarlanabilmekte ve matris içerisinde homojen bir dağılım sağlanabilmektedir. Lakin üretilebilecek matris-takviye kombinasyonlarının sınırlı olması ve proses kontrolünün hassaslığı yöntemin dezavantajlarıdır. Yöntem ile ilgili şematik gösterim Şekil 2.10'da verilmiştir [30].



Şekil 2.10: In-situ yöntemi [30].

2.4.2 Seramik Matrisli Kompozit Üretim Yöntemleri

Üstün özelliklerinden dolayı seramik matrisli kompozitler, çeşitli uygulamalarda kullanılan en iyi malzemelerden biridir. Seramikler, insan eliyle yapılan ilk cisim olarak çok iyi derecede dayanıklılık, sertlik, kimyasal kararlılık, iyi termal genleşme, oksidasyon ve korozyon direnci gibi önemli özellikler sunarlar. Seramik matrisli kompozitler, zorlayıcı ortamlarda çeşitli mühendislik amaçları için en uygun malzeme olmuşlardır. Termal şokların ve yüksek sıcaklıkların bulunduğu durumlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Kırılgan olmaları, yüksek sertlikleri ve lif, gözenek ve matristen oluşan heterojen yapıları, ayrıca ortotropik mekanik ve termal davranış kalıpları nedeniyle seramik matrisli kompozitlerin üretimi zorlu bir süreçtir. Seramik matrisli kompozitler 3 temel teknik ile üretilir. Bunlar,

- Kimyasal buhar infiltrasyonu
- Polimer infiltrasyonu ve piroliz
- Sıcak pres sinterlemedir [38].

2.4.2.1 Kimyasal Buhar İnfiltrasyonu

Kimyasal buhar infiltrasyonu yöntemi sürekli fiber takviyeli seramik matrisli kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan tekniklerden biridir. Pelet haline getirilen fiberlerin yüzeyleri öncelikle bir arayüzle kaplanır, sonra da seramik matris bu fiberlere kimyasal buhar infiltrasyonu ile emdirilir. Kimyasal buhar infiltrasyonu süreci bir seramik matrisin gözenekli bir fiber pelete kimyasal buhar çöktürme yöntemiyle çöktürülmesini içerir. Bu yöntemde kimyasal buhar infiltrasyonu malzemeleri ısıtılan peletin de içerisinde bulunduğu bir fırına pompalanır. Bu gazlar pelete sızarak ve fiber yüzeylerinde tepkimeye girerler. Fiberlerin üzerlerinde katı bir matris malzemesi oluştururlar ve bu şekilde peletin yoğunlaşmasını sağlarlar. Bu süreçle hazırlanan en yaygın matris SiC (Silisyum karbür) ve karbondur [39].

2.4.2.2 Polimer İnfiltrasyonu ve Piroliz

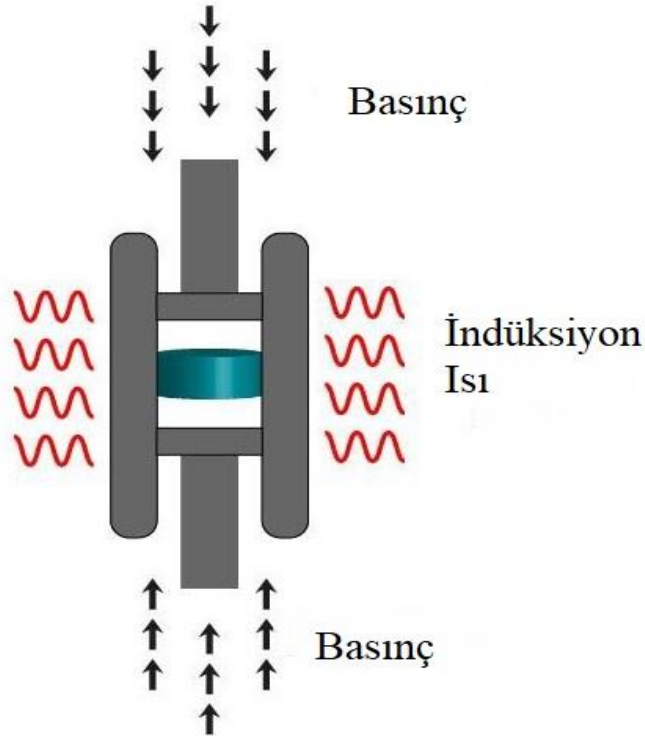
Polimer infiltrasyonu ve piroliz süreci, pre-seramik prekürsörlerin (organometalik bileşikler) termal bozunma yoluyla seramik matrise dönüştürülmesi olarak tanımlanabilir. Silikon bazlı pre-seramik prekürsörlerin, hacimli seramiklerin, seramik matrislerin, seramik liflerin ve kaplamaların üretiminde kullanıldığı bilinmektedir. Polimer infiltrasyonu ve piroliz süreci dört farklı adım içermektedir:

- i. Fiber kaplama çökertmesi,
- ii. CFRP (karbon elyaf takviyeli polimer) preform üretilmesi,
- iii. CFRP preform pirolizi,
- iv. Tekrarlanan polimer infiltrasyonu ve piroliz yoluyla yoğunlaştırma.

İlk olarak, zayıf fiber-matris arayüzü sağlamak amacıyla karbon fiber veya fiber preformları sürekli ve aralıklı olarak kimyasal buhar infiltrasyonu ya da kimyasal buhar çöktürme işlemleri ile kaplanır. Pirolitik karbon tabakasının kalınlığı 0.1-0.3 μm arasında değişebilir. İkinci adım, CFRP preformunun ıslak filament sarma, vakum destekli polimer veya reçine transfer kalıplama yoluyla üretilmesidir. Bu teknikler, sıradan polimer matrisli kompozitler için çok yaygındır ancak pre-seramik kullanımı, oksidasyonun iyileştirilmesi için daha yüksek sıcaklık ve inert atmosfer gerektirir. Üçüncü adımda, CFRP preformu inert gaz atmosferinde piroliz edilir. Piroliz sırasında organik bileşikler elimine edilir, polimer ağı ayrışır ve amorf seramik matrise dönüşür. Son adım, yüksek sıcaklıkta vakum altında veya inert atmosferde uygulanan pirolizle seramizasyondur. Kalan gözenekliliği azaltmak, matris malzemesinin yoğunluğunu artırmak ve kristalin SiC elde etmek için yeniden infiltrasyon ve piroliz adımları 5-8 kez tekrarlanır [40].

2.4.2.3 Sıcak Pres Sinterleme

Sıcak presleme, ısı ve basıncın eşzamanlı olarak uygulandığı bir sinterleme tekniğidir. Şekil 2.11'de gösterildiği gibi, sıcak presleme tek eksenli basınç uygulayan rijit bir grafit kalıba bağlıdır. İşlem, kalıbın zarar görmesini önlemek için vakum veya koruyucu bir atmosfer altında çalıştırılır. Tek eksenli basınç, başlangıç aşamasında parçacıkların yeniden düzenlenmesini artırarak sinterleme sürecini yükselten ek bir itici kuvvet sağlar, orta ve son aşamada taneler arası kayma ve difüzyonel akışı hızlandırır. Son aşamada kütle transferini teşvik eden fazlardan bir kimyasal potansiyel ve boşluk yoğunluğu gradyanı oluşturur. Ayrıca, sıcaklık ve uygulanan basınç altında parçacıklar arasındaki sürtünme direnci azalır. Harici bir hidrolik sistem, tek eksenli basınç ve kalıbın duvarlarına karşı radyal gerilme üretir. Bu radyal gerilmeler, parçacıkların yeniden düzenlenmesine ve büyük gözeneklerin çökmesine yol açan parçacıklar arası kaymayı hızlandırır. Dolayısıyla, sinterlemenin başlangıç aşamasında hızlanma, daha fazla parçacık temasının oluşturulmasından kaynaklanır. Taneler arası kayma, sıvı veya katı halde sinterleme ile desteklenen viskoz akış veya sertleşme akışı ile gerçekleştirilebilir. Yoğun seramiklerde, taneler arası kayma, basınç yardımcı sinterlemenin orta ve son aşamalarında difüzyonel akışa katkıda bulunur [41].



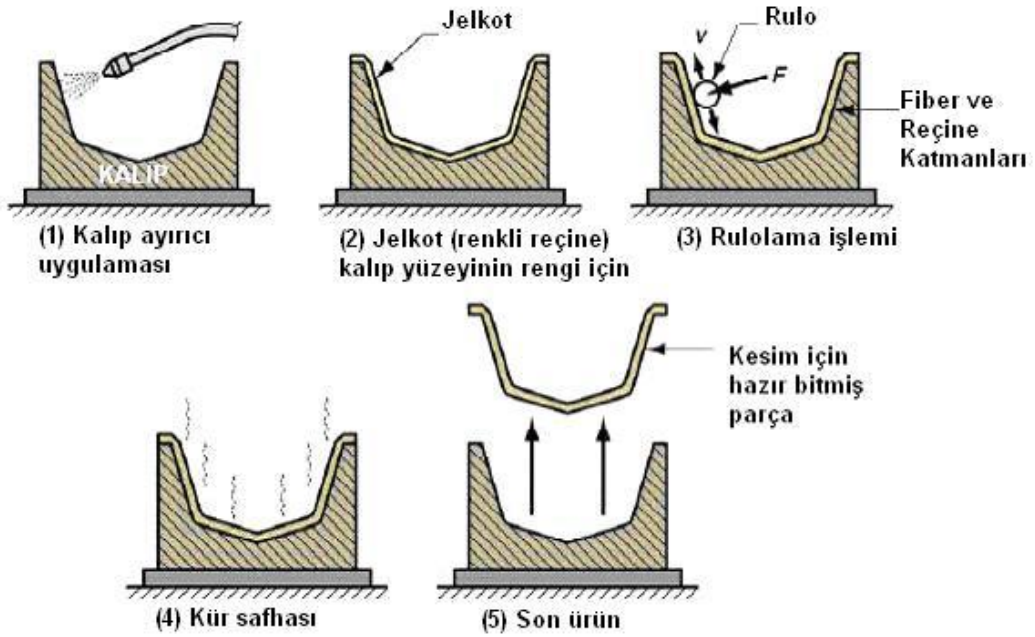
Şekil 2.11: Sıcak pres sinterleme yöntemi [41].

2.4.3 Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

2.4.3.1 El Yatırması (Hand Lay-up) Yöntemi

El yatırması yöntemi kompozit malzeme üretiminde bilinen eski ve basit yöntemlerden biridir. Uygulanması kolay olmasına karşın belirli bir seviyede el beceresi ve tecrübe gerektirir. Genellikle matris malzemesi olarak termoset reçineler (epoksi, polyester) ve takviye malzemesi olarak elyaflar tercih edilmektedir. Şekil 2.12’de üretim aşamaları verilmiştir. Elyaflar önceden kesilerek üretim için hazırlandıktan sonra malzemenin kalıptan kolay ayrılmasını sağlamak amacıyla kalıp ayırıcı maddeler ince bir tabaka halinde ve olabildiğince homojen olarak kalıba uygulanır. Kalıp ayırıcının üzerine jelkot uygulaması yapılabilir. Jelkot malzeme, özellikle cam elyaflarda yüzey görünümünü iyileştirmek ve dış ortam performansını arttırmak için kullanılır. Kesilen elyaflar kalıba yatırılır ve reçine kuru elyafların üzerine fırça yardımıyla sürülür. Bu noktada dikkat edilmesi gereken hususlardan biri reçinenin elyafı ıslatacak kadar sürülmesi, gereğinden fazla reçine kullanılmamasıdır. Fazla reçine kullanımı malzemenin mukavemetini düşürecektir. Yapılan bu işlem elyaf katmanının her katında tekrar edilir. Son olarak bir rulo yardımıyla elyaf katmanının arasındaki hava boşluklarının giderilmesi ve fazla reçinenin çıkışı sağlanır. Reçine üretici firmanın talimatına uygun şekilde belirli bir süre ve belirli bir sıcaklık aralığında

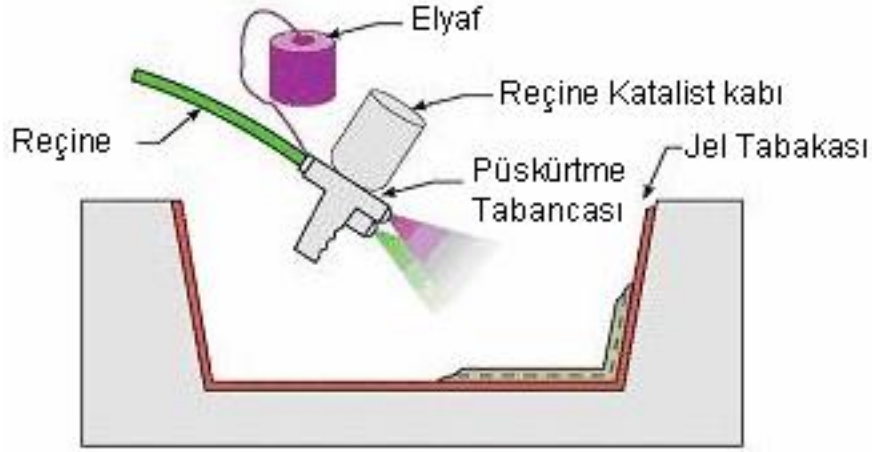
malzemenin kürlenmesi gerçekleşir. İlerleyen bölümlerde de belirtileceği üzere bu çalışmada da numune üretimi için el yatırması yöntemi kullanılmıştır.



şekil 2.12: El Yatırması Yönteminin Aşamaları [42].

2.4.3.2 Püskürtme Yöntemi

Bu retim tekniği el yatırma yöntemi gibi bir açık kalıp üretim tekniği olup el yatırma yönteminin kısmen otomatikleştirilmiş hali olarak kabul edilebilir. Üretim süreci görseli şekil 2.13'de verilmiştir. Teknikte, kırılmış elyaflar kalıp yüzeyine, içine sertleştirici katılmış reçine ile birlikte özel bir tabanca ile püskürtülür. Elyafkların kırılma işlemi tabanca üzerinde bulunan ve bağımsız çalışan bir krpıcı sayesinde yapılır. Reçine içinde kalan havayı çıkarmak ve yüzeyi düzgünleştirmek için elle yatırma yöntemindeki gibi rulo uygulanır [24].

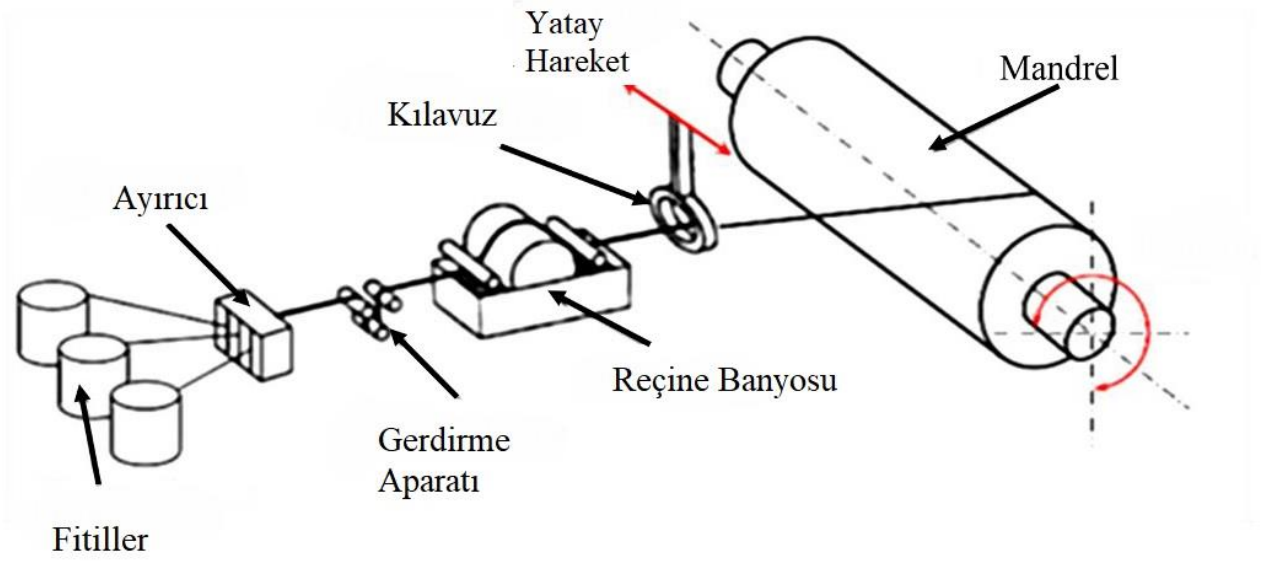


Şekil 2.13: Püskürtme yöntemi üretim süreci [22].

2.4.3.3 İplik (Filament) Sarma Yöntemi

İplik sarma kompozit malzemelerin üretiminde sıkça kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, elyaf şeritleri/filamentleri destekleyici şekilli bir form veya mandrel üzerine sürekli olarak sarılır. İplik sarma, yüksek mukavemetli fiberlerin etkin bir şekilde kullanılmasını sağlayarak, stres yolu boyunca yapıya uyumlu bir şekilde hassas bir desende fiberleri konumlandırma konusunda ucuz ve otomatik bir yöntemdir.

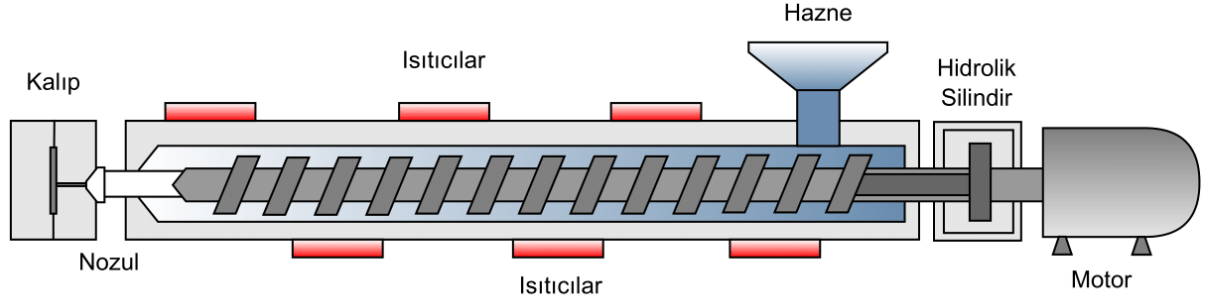
Şekil 2.14’de iplik sarma yönteminin şematik diyagramı gösterilmektedir. İplik sarma sürecinde sabit bir dönen mandrel kullanılır ancak bir taşıma kolu, mandrel ile yatay olarak hareket eder. Kol, gruplar halinde ve fitil olarak adlandırılan ön emprenye edilmiş lifleri dağıtan bir sarım yönlendirici içerir; fitiller genellikle karbon, aramid, cam elyafı veya hibrit liflerdir. Mandrel döndükçe, fitiller etrafına sarılır ve mandrelin yüzeyi üzerinde bir kompozit sarma oluşturur. Kompozit sarmasının yönü tam olarak ilerleme hızı ve mandrelin dönme hızı tarafından belirlenir. Lifler, mandrelin üzerine sarılmadan önce reçine tankından geçirilerek reçine emdirilir ve daha sonra lif ile birlikte katılır. Liflerin sarılması tamamlandıktan sonra mandrel ve kompozit sarım katmanları, kurlaşması için gereken sıcaklıklarda fırında bekletilir. Kompozit reçine tamamen kurlaştığında mandrel çıkarılır. Bununla birlikte, ürünün gerekli nihai kalitesini sağlamak için reçine türü, lif türü, lif gerilimi, sarım kalınlığı, sarım açısı ve hızı vb. gibi optimizasyonlar gereklidir [43].



Şekil 2.14: İplik sarma prosesi [43].

2.4.3.4 Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi

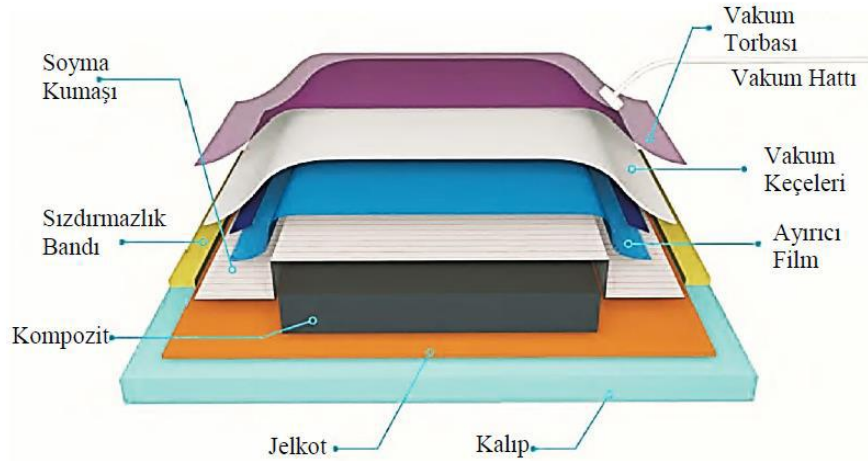
Enjeksiyon kalıplama yönteminde, takviye olarak genellikle kısa fiber ve parçacık formundaki takviyeler kullanılarak kompozit malzeme üretimi yapılmaktadır. Bu yöntem boyutsal kararlılığı yüksek, karmaşık şekilli malzemelerin üretimine uygundur. Yüksek hacimli seri üretimlerde de kullanılabilinen bir tekniktir. Temelde plastik granül veya tozların ısı ve basınç altında kalıba enjekte edilerek istenilen boyut ve geometride parçanın üretilmesini sağlar. Üretim aşamaları malzeme hazırlığı, ısıtma, enjeksiyon, soğuma ve kalıptan çıkarma şeklinde sıralanabilir. Çalışma mekanizması ısıtıcılar, barel, hidrolik silindir, nozul ve kalıp gibi bileşenlerden meydana gelir. Şekil 2.15’de görüldüğü üzere sürekli dönen sonsuz bir vida içerisinde takviye ve matris malzemesi karıştırılır. Bu dönme hareketi belirli bir sıcaklık ve süre içinde takviye ile matrisin homojen bir şekilde karışmasını sağlar. Homojen karışım, basınç etkisi altında kalıp boşluğuna itilir ve soğuma gerçekleşir. Malzeme kalıp içerisinde katılaşıp istenilen boyut ve geometride ürün elde edilmiş olur [44].



Şekil 2.15: Enjeksiyon kalıplama mekanizması [44].

2.4.3.5 Vakum Torbalama Yöntemi

Vakum torbalama yönteminde elle yatırma yöntemine ek olarak kompozit malzemeye vakum uygulanarak içerideki fazla reçinenin malzemenin dışına atılması sağlanır. Bu sebeple gerekli görüldüğü durumlarda elle yatırma yönteminin devamı gibi düşünülebilir. Maliyeti düşük ve uygulaması basit bir yöntem olduğundan sıklıkla kullanılmaktadır. Bu yöntemde, naylon ile kapalı devre bir sistem oluşturulur ve içerideki hava bir vakum pompası ile çekilir, oluşan negatif basınç, reçine ve kumaş birleşimini baskı altında tutar, hava kaçak kontrolü yapılır ve sistem sabitlenir, reçinenin sabit basınç altında kürleşmesi için beklenir. Vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.16’da verilmiştir [45].



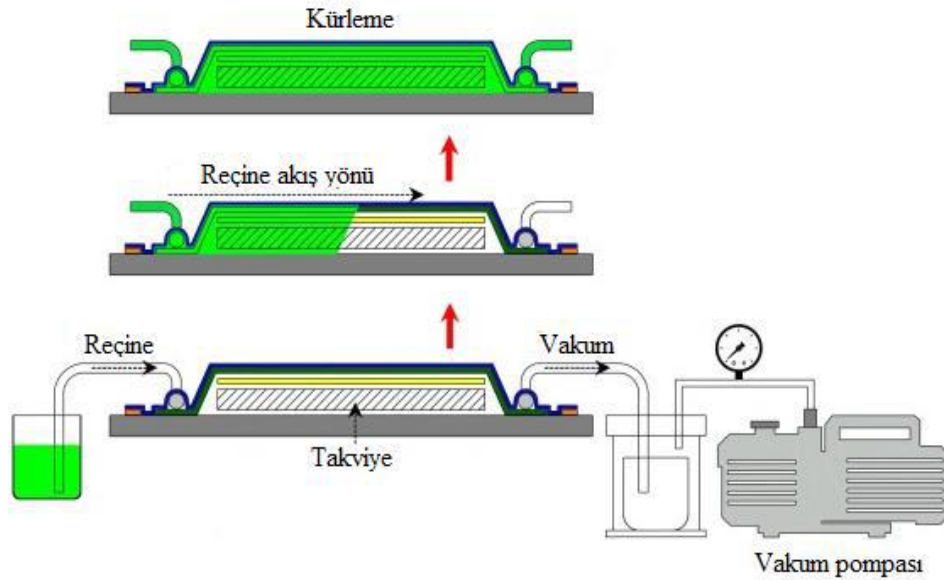
Şekil 2.16: Vakum torbalama yöntemi şematik gösterimi [45].

2.4.3.6 Vakum İnfüzyon Yöntemi

Vakum infüzyon yöntemi, uzun süredir farklı sanayii alanlarında kullanılmakta olan bir kompozit malzeme imalat yöntemidir. Basitçe çalışma prensibi, vakumlanmış ortam içerisinde reçinenin ilerlemesine dayanır. Çoğu zaman karmaşık yapılara sahip kompozit

malzemelerin üretimi için kullanılan bu yöntemde, matris olarak kullanılan reçinenin viskozitesi önem taşımaktadır [46].

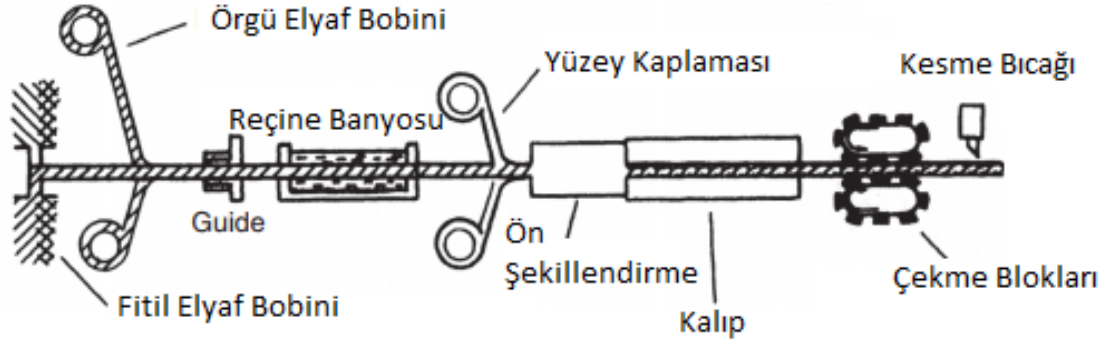
Vakum infüzyon yöntemi Şekil 2.17’de gösterildiği gibi vakum pompası, vakum tankı, kalıp ve reçine kovası olmak üzere dört kısımdan oluşmaktadır.



Şekil 2.17: Vakum infüzyon yöntemi [46].

2.4.3.7 Pultrüzyon Yöntemi

Pultrüzyon yöntemi, reçine emdirilmiş elyafların bir kalıptan çekildiği düşük maliyetli olmasına karşın sürekli üretime olanak sağlayan bir üretim yöntemidir. Metal ekstrüzyon yöntemine benzemektedir. Ekstrüzyon işleminde malzeme bir kalıptan itilirken pultrüzyon işleminde malzeme kalıptan çekilir. Katı çubuklar, içi boş borular gibi belirli sabit geometrilere sahip uzun parçaların üretimine oldukça uygun bir yöntemdir. Yöntemle ilgili şematik gösterim Şekil 2.18’de verilmiştir [47].



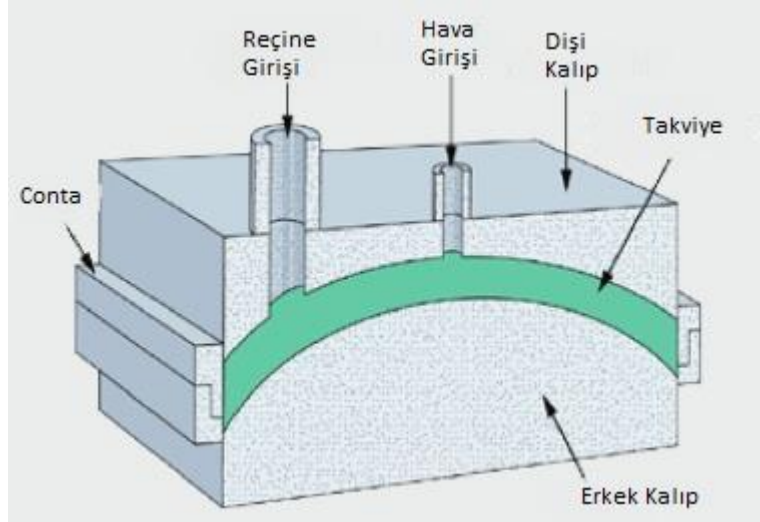
Şekil 2.18: Pultrüzyon yöntemi şematik gösterimi [47].

2.4.3.8 Reçine Transfer Kalıplama

Reçine transfer kalıplama metodu, 1950 yıllarında geliştirilen “Makro Yöntemi” adı verilen eski bir kalıplama yönteminin modern versiyonudur. Prensip olarak, işlem hem enjeksiyon kalıplama hem de presleme özelliklerini birleştiren düşük basınçlı bir yaklaşımdır.

Şekil 2.19’da görüldüğü gibi bu yöntemde kullanılan takviye, bir erkek ve bir dişi kalıp arasına yerleştirilir. Cam elyaf kumaşlar veya yapısal köpükler gibi istenilen herhangi bir takviye malzemesi kullanılabilir. Jelkot kalıbın bir veya her iki tarafında da kullanılabilir. Kalıbın çevresinin conta yardımı ile sıkıştırılmasından ardından sertleştirici ilaveli reçine, kalıbın en yüksek noktasında bulunan bir havalandırma deliğine yerleştirilen şeffaf bir tüp ve pompa aracılığıyla kalıba transfer edilir. Bazı uygulamalarda havalandırma hattına eklenen bir vakum kaynağı, reçine transferi ve havanın uzaklaştırılmasına yardımcı olur.

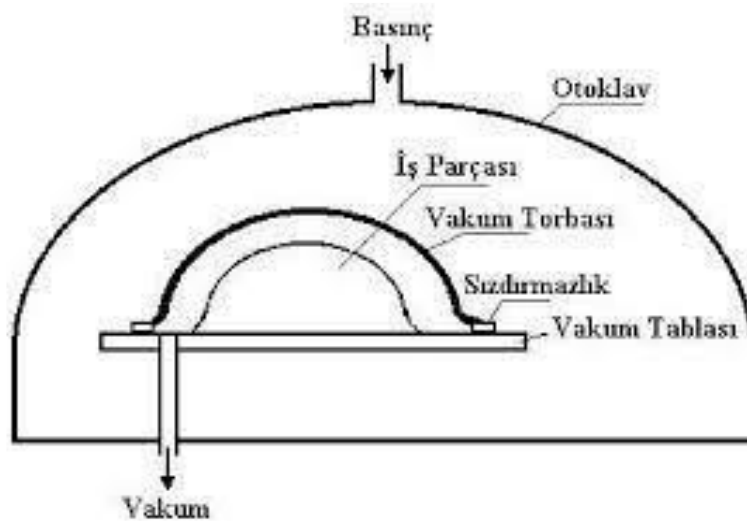
Reçine transfer kalıplama yöntemi orta ölçekli üretim hacimlerinin üretimi için uygundur. Üretilen ürünlerin kalitesi, uygulanan vakum veya basınç koşullarının hava kabarcıklarının giderilmesinde etkili olması, göreceli olarak yüksek elyaf takviyeleri kullanılabilmesinden dolayı genel olarak iyidir. Yöntemde genel olarak oda sıcaklığında kürlenmiş reçineler kullanılır. Basınç gereksinimlerini azaltmak ve takviye malzemesinin ıslanmasını kolaylaştırmak için düşük viskoziteli reçinelere ihtiyaç duyulabilir [48].



Şekil 2.19: Reçine transfer kalıplama şematik yöntemi [48].

2.4.3.9 Otoklav Yöntemi

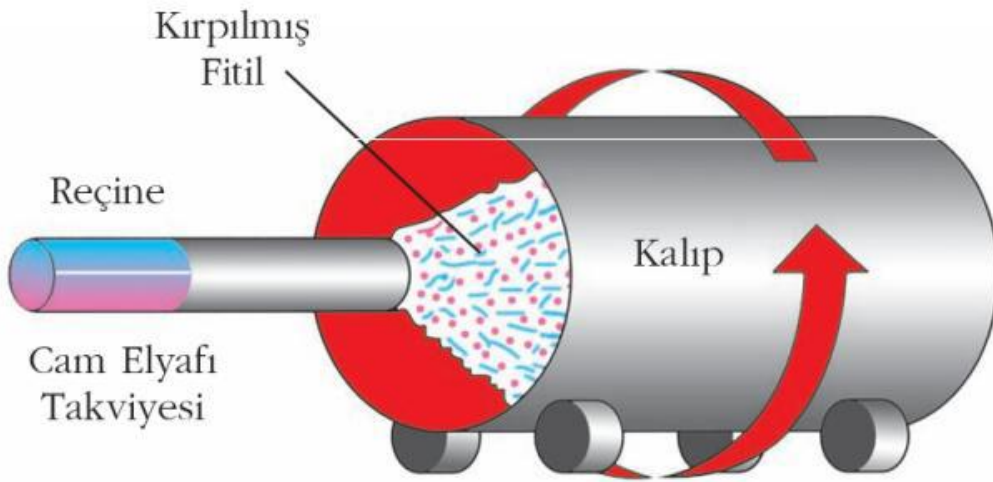
Otoklav yöntemi, büyük parçaların imalatında tercih edilen bir tekniktir. Şekil 2.20'de gösterildiği gibi üretilmek istenen kompozit numune, basıncı ayarlanabilen bir bölmeye yerleştirildikten sonra basınca maruz bırakılır. Basınç altındaki numune bir yandan da sıcaklığın etkisiyle kürlenmeye maruz kalır. Etki eden sıcaklığın iki aşamada olmasının sebebi ilk seviyede kabarcıkları gidermek ve viskoziteyi düşürmek olurken ikinci seviyede ise malzemenin polimerizasyonunu sağlamak yani numunenin kürlenmesini sağlamaktır. Uzun süreli ve pahalı bir yöntem olmasına karşın genel olarak havacılık sektöründe kullanıldığı görülmektedir [49].



Şekil 2.20: Otoklav yöntemi şematik gösterimi [50].

2.4.3.10 Santrifüjle Kalıplama

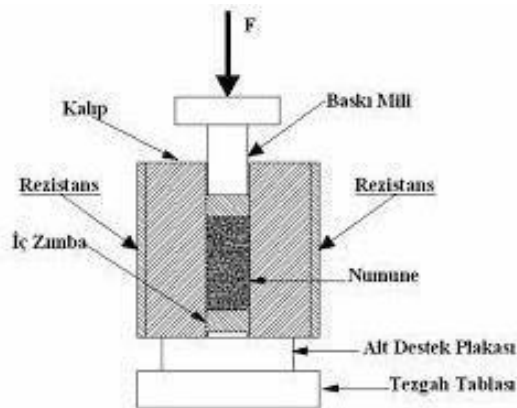
Santrifüj kalıplamada takviye malzemeleri ve reçineler yüksek bir çevresel hızla dönmekte olan kalıp iç yüzeyine uygulanır. Bu kalıplama yöntemi sayesinde her iki yüzü düzgün, rijit, borusal parçaların üretimi mümkündür. Santrifüjün yarattığı merkezkaç kuvveti, reçine ile temas eden takviye liflerinin ıslanmasını sağlamaktadır. Bu yöntemle üretilen parçanın kalıbın iç yüzeyine temas eden dış kısmı, ürünün düzgün yüzünü temsil eder. Şekil 2.21’de santrifüj yönteminin şematik gösterimi verilmiştir [51].



Şekil 2.21: Santrifüjle kalıplama yöntemi [51].

2.4.3.11 Sıcak Presleme

Şekil 2.22’de gösterildiği gibi sıcak presleme yönteminde alt ve üst olmak üzere iki kalıp kullanılır. Alt kalıba, kullanılan takviye ve reçine yerleştirilerek üzerine üst kalıp kapatılır. Üst kalıba sıcaklık ve basınçlı hava verilerek presleme işlemi yapılır bu sayede fazla reçine hava kabarcıklarıyla beraber dışarı atılarak üretim gerçekleştirilir [52].



Şekil 2.22: Sıcak presleme şematik gösterimi [52].

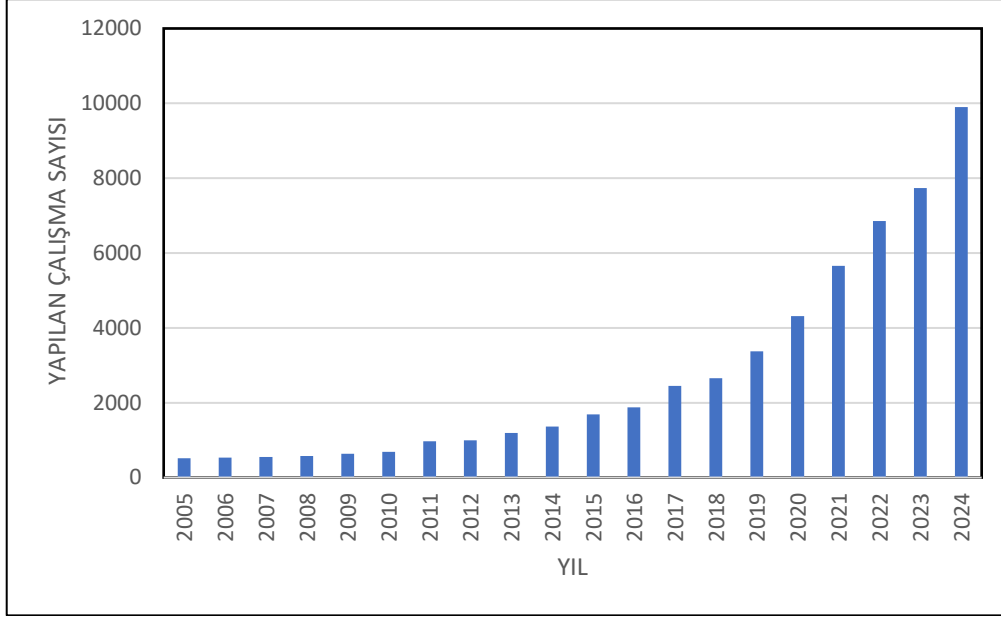
3. POLİMERİK KOMPOZİT MALZEMELERDE KENDİ KENDİNİ ONARMA

Polimer matrisli kompozitler, hafif olmalarına rağmen yüksek mekanik özelliklere sahip olmalarından dolayı çeşitli yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelerin, çalışma koşullarındaki değişiklikler ve mekanik yüklemeler sebebiyle zamanla iç yapılarında hasar ve mikro çatlaklar meydana gelebilir. Bu matris hasarları, mikro çatlakların birleşmesi ve daha büyük çatlaklar oluşturmaya yol açabilir ve bu da tespit ve müdahalenin zor ve/veya uygulanamaz olduğu durumda, malzemenin mekanik performansını ve yapısal bütünlüğünü tehlikeye atar. Termoset matris ve elyaf takviyeli polimerler malzemelerde bu iç hasarların onarımıyla ilgili zorlukların üstesinden gelmek için geleneksel onarım yöntemlerine alternatif olarak kendi kendini onaran malzemeler önerilmiştir [53], [54].

Kendi kendini onaran malzemeler, mevcut kaynakları kullanarak kendilerini onarmak üzere tasarlanmışlardır. Yapılan onarım, hasara bağlı olarak kısmi veya tam olabilir ve bileşenin hizmet ömrü boyunca minimum harici müdahaleyle veya hiç müdahale olmaksızın gerçekleşebilir. Gerçekleşen onarım işlemi, kompozit yapıdaki gözle görülmeyen mikro çatlakların onarılmasını sağlayabilir, bakım süresini ve maliyetini azaltmanın yanı sıra bileşenlerin servis ömrünü ve güvenliğini uzatmak için uygulanan geleneksel bakım yöntemlerine alternatif olabilir [55], [56].

Biyolojik sistemlerden ilham alan sentetik malzemelerin kendi kendini onarması üç adımda gerçekleşir. Başlangıçta hasar nedeniyle onarım mekanizması tetiklenir. İkinci aşamada ise onarıcı ajan yani hasarı onarmaktan sorumlu olan malzeme hasarlı bölgeye nakledilir. Son olarak çatlak onarılarak onarım işlemi gerçekleşir. Onarımın süresi ve verimliliği, kullanılan kendi kendini onarma mekanizmasına bağlıdır [57], [58].

Kendi kendini onaran polimerik malzemeler son yıllarda büyük ilgi görmektedir. Kendi kendini onarma yeteneğinin, mekanizmalarının, çalışma zorluklarının ve her sistemin sınırlarının nasıl aşılabileceğinin daha iyi anlaşılması için çalışmalar geliştirilmiştir. Yakın geçmişten günümüze konu ile ilgili yapılan çalışma artışına örnek olabilmesi için Şekil 2.23'te son 20 yıl için yıl bazında yapılan çalışma sayıları gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Science Direct internet sitesinde “polymer self healing” şeklinde arama yapıldığında yıl bazında çıkan makale miktarı.

Polimerik malzemelere kendi kendini onarma özelliğini kazandırabilmek için farklı mekanizmalar kullanılabilir. Kendi kendini onaran malzemeler için, onarma özelliği harici (otonom) olarak ya da ısı ve/veya radyasyon gibi dışarıdan bir uyarının etkisiyle dahili (otonom olmayan) bir şekilde kazandırılabilir. Son yıllarda polimer kompozitler için farklı kendi kendini onarma mekanizmaları rapor edilmiştir. Her mekanizmanın zayıf yanları ve geliştirilmesi gereken yönleri bulunmaktadır. Kendi kendini onarma mekanizmaları genel olarak harici ve dahili şeklinde iki ana gruba ayrılabilir [59].

3.1 Dahili Kendi Kendini Onarma Mekanizmaları

Dahili kendi kendini onarma mekanizması kavramı, polimer matrise verilen onarma özelliğinden gelmektedir. Geliştirilen sistemlerin çoğunda, harici bir uyarın altında hasarın onarılması sağlanır. Bu uyarıcı etkenler, ısı, ışık, elektrik hatta nem bile olabilmektedir.

Onarım kabiliyetine sahip termoset polimer matrisler, takviye liflerindeki hasar aşırı olmadığı veya çok lokalize olmadığı durumlarda çoklu onarma avantajına sahip olabilirler. Onarım kabiliyeti polimer matrisin kimyasal yapısının değiştirilmesi veya yapısına termoplastik/termoset karışımı ekleyerek düzenlenmesi ile elde edilir. Dahili kendi kendini onarma sistemleri, tersinir polimer ağ ve termoplastik/termoset karışımli olarak iki grup altında incelenebilmektedir [60].

3.1.1 Tersinir Polimer Ağ Sistemi

Tersinir polimer ağ sistemi için polimerik matris, harici uyarıcıların bulunması durumunda tersinir reaksiyonlar gösteren fonksiyonel gruplarla kimyasal olarak modifiye edilir. Daha sonra, yük taşıyan bağların dinamik ayrışması ve yeniden birleşmesinden kaynaklanan konformasyon değişiklikleri nedeniyle onarım sağlanır. Bu yöntem altında çeşitli dinamik kovalent bağlar ve kovalent olmayan (supramoleküler etkileşimler) bağlar literatürde araştırılmıştır. Onarım genellikle sıcaklıkla başlatılır ancak pH değişiklikleri, kimyasal katkı maddeleri ve ışınlamanın uyarıcı olduğunu gösteren çalışmalar da bulunmaktadır [61], [62].

Diels-Alder ve hidrojen bağlama aktif grupları, termal tersinir özelliklerinden dolayı polimer ağ sistemleri üretmek için yaygın bir şekilde araştırılmaktadır. Bu sistemlerde, onarımı mümkün kılan bağların yeniden bağlanması farklı sıcaklıklar ve koşullar altında gerçekleşebilir. Tanıtılan fonksiyonel gruplar, onarma olayı için belirleyicidir ve bu gruplar arasındaki oran, geri dönüşümlü etkileşimleri tetiklemek için gereken koşulları kontrol eder. Ayrıca, tanıtılan fonksiyonel gruplar, onarma verimliliği içinde belirleyicidir, çünkü bir molekülün birleşme, esneklik ve molekülün mimarisi gibi özellikleri dikkate alınmalıdır ve bunlar onarım başarısına etki edebilmektedir [63].

Supramoleküler etkileşimler, zayıf doğalarından dolayı mekanik yük altında kolayca ayrışır. Bununla birlikte, bu bağlar herhangi bir minimal dış tetikleyici ile tekrar bir araya gelebilir. Supramoleküler etkileşimlere dayalı dahili kendi kendini onarma sistemleri, düşük sıcaklıklarda onarma yeteneği sunma avantajına sahiptirler. Ancak tersinir bağların dinamik doğası sıcaklığa bağlı davranışı beraberinde getirir ve uzun vadeli mekanik stabilite bir sorundur. Diğer yandan, kovalent tersinir bağlara sahip polimer ağları, potansiyel olarak daha yüksek sıcaklık aralığında çalışabilirler ve daha fazla mekanik özellik stabilitesi sunarlar ancak bununla birlikte onarma aktivasyonu için daha yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyarlar. Ek olarak, tersinir polimer ağlarının tasarımı, uzun süren, maliyetli ve karmaşık sentez adımlarını içerebilir [64], [65].

3.1.2 Termoplastik/Termoset Karışımı Yöntemi

Termoset reçinelere termoplastik düzenleyiciler eklenmesinin dahili onarma mekanizması olarak gelecek vadettiği düşünülmektedir. Bu yöntem, katı halde termoplastik onarıcı ajanın termoset matrise dahil edilmesine dayanmaktadır. Malzemeye ısı verildiğinde moleküllerin

hareketi, onarıcı ajanın hasarlı bölgelere akışını hızlandırarak çatlakları doldurur ve termoset matrisin onarılmasını sağlar.

Termoplastiklerin akışkanlık, fonksiyonel grupların reaktivitesi ve yapışkanlık özellikleriyle öne çıkan üç özelliği, bu polimerlerin onarıcı ajan olarak kullanılması açısından kritik kabul edilir.

Termoplastik, termoset matrisin grupları ile kimyasal olarak reaksiyona giren fonksiyonel gruplara sahip olmasının yanı sıra, çatlaklar içerisinde akışı sağlayacak bir erime noktasına ve viskoziteye sahip olmalıdır. Termoplastik ayrıca çatlak onarımı sırasında matris ile güçlü bir bağlanma sağlayan iyi yapışma özelliklerine sahip olmalıdır. Ek olarak bu yöntemde, onarımı daha verimli yapılabilmek için harici aktivasyon gereklidir. Termoplastik onarma maddesinin akışını arttırmak için en uygun parametrelerin seçilmesi oldukça önemlidir. Onarımı sağlamak için genellikle sıcaklık ve basınç uygulanır. Sıcaklık açısından, aktivasyon sıcaklığının termoplastiğin akışını sağlayacak kadar yüksek olması gereklidir ki bu sıcaklık termoplastiğin erime noktasının üzerinde olmalıdır. Uygulamada, onarım aktivasyonunun matrisin camsı geçiş sıcaklığının üzerinde gerçekleşmesi de önerilir. Çapraz bağlı matrisin hareketliliği, termoplastik ile matris arasındaki difüzyonu artırabilir ve onarıcı ajanın matris ağlarına yapışmasını kolaylaştırabilir.

Bu gereksinimleri dikkate alarak, bazı termoplastik polimerlerin epoksi reçine için potansiyel onarıcı ajanlar olarak önerildiği görülmektedir. Poli bisfenol-A-koepiklorohidrin, polikaprolakton (PCL), poli (metil metakrilat) (PMMA), poli (etilen-ko-metil akrilat) (EMA), poli (etilen-ko-metakrilik asit) (EMAA) ve poli (etilen glisidil metakrilat) (EGMA), epoksi reçine için onarıcı ajanlar olarak incelenen termoplastik polimerlerin örnekleridir [58], [66]–[68].

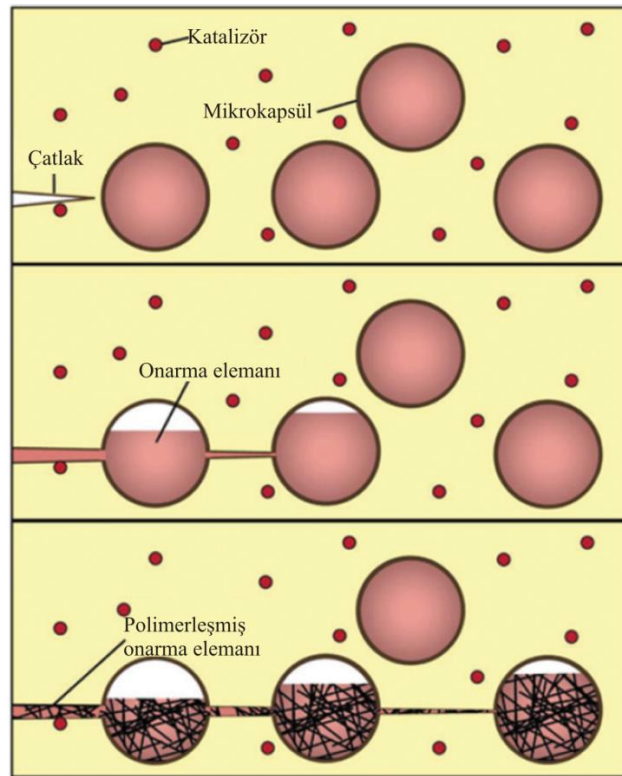
3.2 Harici Kendi Kendini Onarma Mekanizmaları

Harici kendini onarma mekanizmaları malzeme içindeki hasarın, önceden hazırlanmış ve matrise gömülmüş onarıcı ajanlar tarafından izole bir faz olarak gerçekleştiği otonom bir onarma mekanizması olarak kabul edilir. Mikrokapsül ve mikrovasküler ağ kendi kendini onarma mekanizmaları olarak iki ana grupta incelenebilir. Bu iki mekanizmanın kendini onarma kavramları benzerdir, bir çatlak oluştuğunda ve onarıcı ajanları muhafaza eden

kaplar (konteynırlar) kırıldığında, kapların içindeki onarma maddesi serbest bırakılır ve çatlak düzlemleri onarılır [67].

3.2.1 Mikrokapsül Yöntemi

Mikrokapsül kullanılarak ilk başarılı otonom kendi kendini onarma mekanizması White ve ark. tarafından termoset bir reçine olan epoksi ile test edilmiştir. Bu sistemde epoksi matris içerisine onarıcı ajan olarak kullanılan disiklopentadien (DCPD) mikrokapsüller ve Grubbs katalizörü eklenmiştir. Mikrokapsül yaklaşımında kendi kendini onarma çatlak oluşumu ile tetiklenir. Hasar meydana geldiğinde mikrokapsül içerisindeki onarıcı ajan ile yapıda bulunan Grubbs katalizörü bir araya gelerek polimerizasyon reaksiyonunu başlatırlar ve böylece çatlak oluşan bölge kapanarak yapının yüzey bütünlüğü geri kazandırılır. Mikrokapsül yönteminde kendi kendini onarma işlemi Şekil 3.2’de şematik olarak gösterilmiştir [69].



Şekil 3.2: Mikrokapsül sisteminde kendi kendini onarma işlemi [69].

Burada malzemenin, kendi kendini onarma mekanizması, matris malzeme ile mikrokapsül malzemelerinin kompliyansları arasındaki fark nedeniyle, çatlak yolunun mikrokapsüllere doğru yönelmesine dayanmaktadır [69].

Mikrokapsül sisteminin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Yorulma çatlaklarının oluşumu, yapıda meydana gelen hasar sebebiyle açılan mikrokapsüllerden salınan fazla miktardaki onarıcı ajanın ek çapraz bağlanması sonucu azalır.
- Bu yöntem yüksek çapraz bağ yoğunluğuna sahip termoset yapılar için uygulanabilir.
- Çok sayıda farklı mikrokapsülleme tekniği ve onarma ajanı kullanılarak farklı matrisler için de uygun onarma mekanizması oluşturulabilir.

Mikrokapsül yönteminin dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Eğer yapı üzerindeki çatlak oluşumu aynı yerde birden fazla kez tekrarlanırsa onarım görülmez. Çünkü onarıcı ajanın hacmi sınırlıdır, bu nedenle onarım olayı sadece bir kez gerçekleşir.
- Çatlak oluşumundan sonra boşluğu doldurmak için yeterli miktarda onarıcı ajan serbest kalamayabilir, bu durumda oluşan boşluk tamamen kapanamaz.
- Mikrokapsüllerin boyu, et kalınlığı ve mekanik özellikleri her uygulama için ayrı değerlendirilmelidir. Tek yöntem yaklaşımı kendi kendini onaran polimer matrisler için doğru değildir.
- Polimerizasyon reaksiyonunu tetikleyen Grubbs katalizörü pahalı bir malzemedir. Bu durum kendi kendini onaran malzemenin maliyetini de artırmaktadır [69], [70].

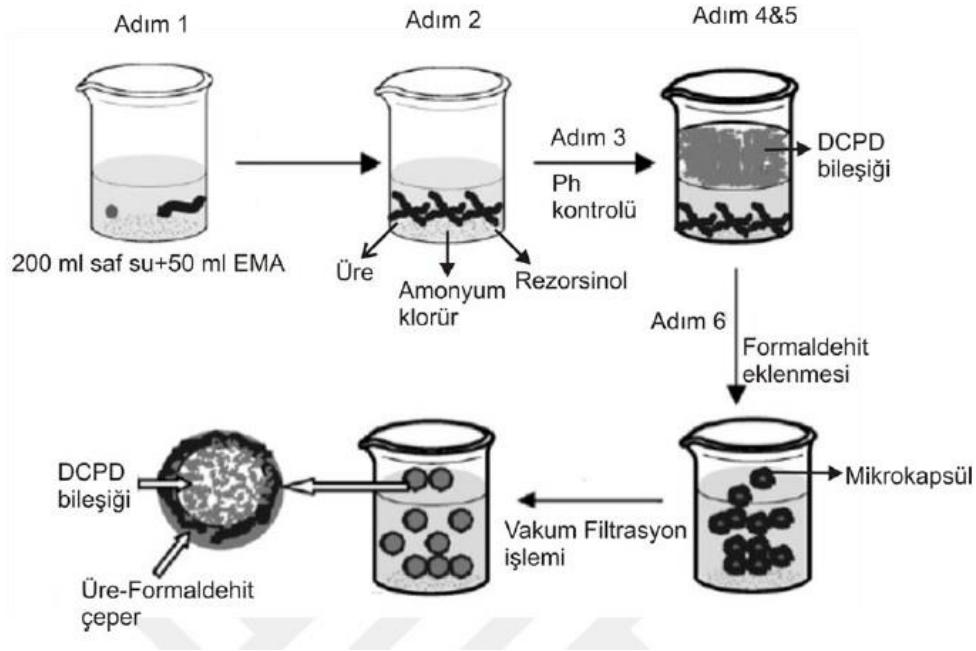
3.2.1.1 Mikrokapsül Üretimi

Mikrokapsüllerin üretimi oldukça zor olmasına karşın çeşitli üretim teknikleri ve yöntemleri vardır. Literatürde üre formaldehit dış çeperli mikrokapsül üretimi adım adım açıklanmıştır;

Mikrokapsüller oda sıcaklığında su içinde yağ emülsiyonu ile yerinde polimerizasyon işlemi ile hazırlanmıştır. 1000 mL beher içerisinde 200 mL deiyonize su ve 50 mL ağırlıkça %2,5 etilen maleik anhidrit sulu çözeltisi karıştırılmıştır. Sonrasında çözeltiliye 5 g üre, 0,5 g amonyum klorür ve 0,5 g rezorsinol eklenmiştir. Ardından karışımın pH derecesi 3,5 olana kadar damla damla sodyum hidroksit ve hidroklorik asit eklenmiştir. Karışımın yüzeyindeki hava kabarcıklarını önlemek için 1-2 damla 1-oktanol ilave edilmiştir. Onarıcı ajan görevi görecek madde olan DCPD, yavaş yavaş karışıma eklenerek emülsiyon oluşturulmuştur ve

stabilizasyonu için 10 dakika beklemeye bırakılmıştır. Emülsiyon stabil hale geldikten sonra üre ile tepkimeye girerek mikrokapsüllerin kaplamasını oluşturması için 12,67 g ağırlıkça %37 oranında formaldehit sulu çözeltisi 1 mol üre, 1,9 mol formaldehit olacak şekilde molar oranda eklenmiştir. Sonrasında emülsiyonun üzeri kapatılarak ısıtıcı plaka üzerinde 1°C/dakika hızında ısıtılarak 55°C hedef sıcaklığa ulaşılmıştır. 4 saat boyunca sürekli olarak karıştırma uygulandıktan sonra ısıtıcı plaka ve karıştırıcı kapatılarak oda sıcaklığına soğutulmuştur. Oluşan mikrokapsüller vakum altında filtre ile ayrılmış, deiyonize su ile durulanmış ve 24-48 saat hava ile kurutulmuştur [71].

Şekil 3.3’de örnek bir mikrokapsül üretim yönteminin aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 3.3: Mikrokapsül üretim adımları [69].

3.2.2 Vasküler Ağ Yöntemi

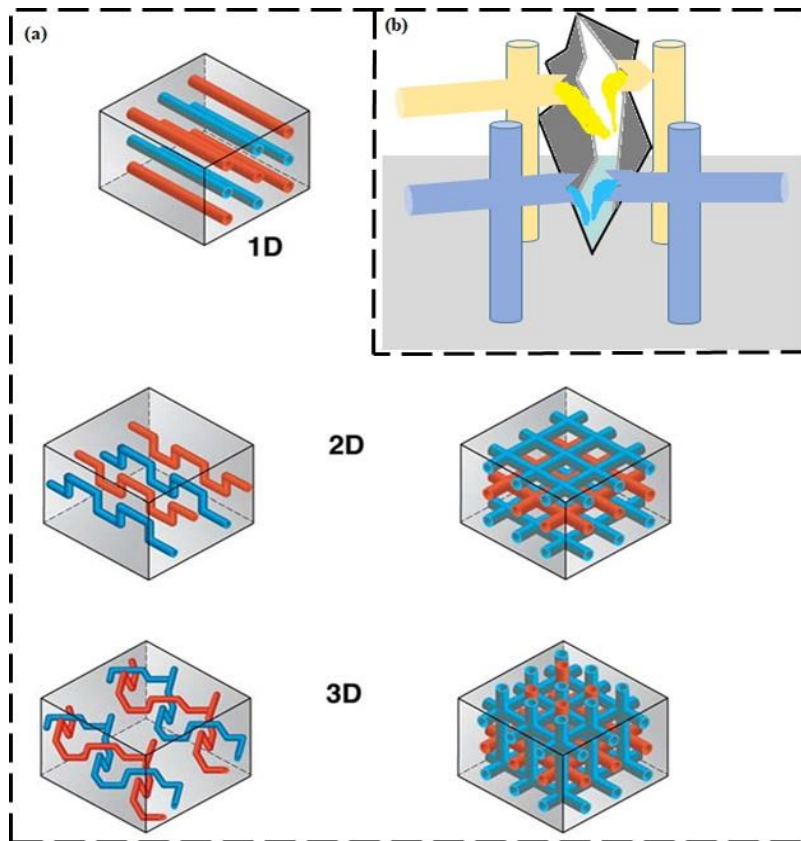
Vasküler ağ yönteminde içi boş tüpler veya kanallar ile vasküler ağlar oluşturulur. Bu içi boş tüpler veya kanallar onarıcı ajanları matris fazına taşımak için kullanılır. Vasküler onarma sistemi, çalışma prensibi açısından mikrokapsül yöntemine benzer. Hasarla birlikte tüpler kırılır ya da kanallarda çatlak oluşarak hasarlı bölgeye doğru hareket eder fakat üretim ve matris entegrasyon yöntemi açısından mikrokapsül yönteminden farklılık gösterir.

Literatürde vasküler ağ yöntemi kullanarak kendi kendini onarma çalışması yapılmış çok çeşitli araştırmalar bulunmaktadır. Yapılan araştırmalar temel olarak aşağıdaki maddelerde farklılık göstermektedir;

- Vasküler ağ eksenli,
- Vasküler ağ seçimi ve üretimi,
- Onarıcı ajan seçimi ve fazı.

3.2.2.1 Vasküler Ağ Ekseni

Vasküler ağ eksenleri bir, iki ya da üç eksenli olabilir. Şekil 3.4'te farklı eksenlere ait vasküler ağ tasarımları şematik görsel olarak verilmiştir. Genellikle iki ve üç eksenli ağlar birbirleri ile bağlantılı olarak tasarlandığından, malzemede birden fazla kez kendi kendini onarma mümkün kılınabilir.



Şekil 3.4: Çeşitli eksenlerde vasküler ağ gösterimi a) tek eksenli, iki eksenli ve üç eksenli vasküler ağ gösterimi b) vasküler ağ yöntemi ile kendi kendini onarmanın şematik gösterimi [72].

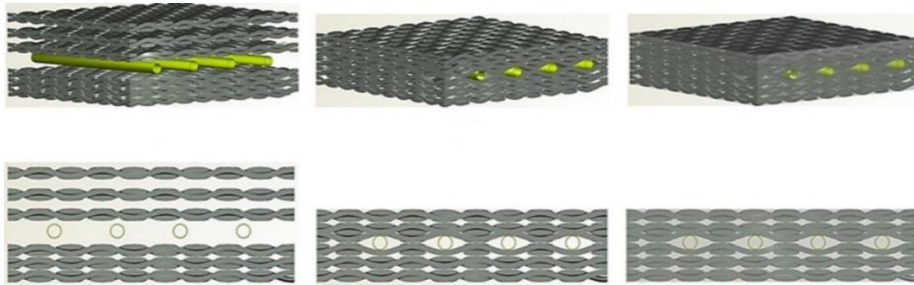
3.2.2.2 Vasküler Ağ Seçimi ve Üretim Yöntemleri

Literatürde birçok vasküler ağ çeşidi çalışmalarda kullanılmış olsa da her birinin kendine has sınırları, avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin; Şekil 3.4'te gösterilen yapılardan 3 eksenli yapıda olan vasküler ağlar spesifik üretim metotları gerektirmektedir. Bu sebeple araştırmacılar sürekli olarak vasküler ağ üretiminin yeni yollarını geliştirmişlerdir. Bu alanda yapılan çalışmalar çok çeşitli olsa da çoğunlukla 3 ana yöntem kullanılmaktadır. Bunlar;

- Çıkarılmayan içi boş çekirdekler,
- Çıkarılabilir katı çekirdekler,
- VaSC yöntemidir.

Yukarıda belirtilen 3 ana yöntem ek olarak talaşlı veya lazerle işleme (micromachining/laser processing), doğrudan mürekkep yazımı (direct ink writing), elektrik boşalımı (electric discharge) gibi yöntemler de literatürde kullanılmıştır.

Çıkarılmayan içi boş çekirdekler, uygulaması en kolay vasküler ağ oluşturma yöntemlerinden biridir. Şekil 3.5'te gösterildiği gibi kompozit malzeme üretimi sırasında takviye katmanlarının arasına önceden içi onarıcı ajan madde doldurulmuş olan çekirdekler yerleştirilir. Kürleşmenin ardından bu gömülü çekirdekler vasküler ağı oluşturmuş olur.



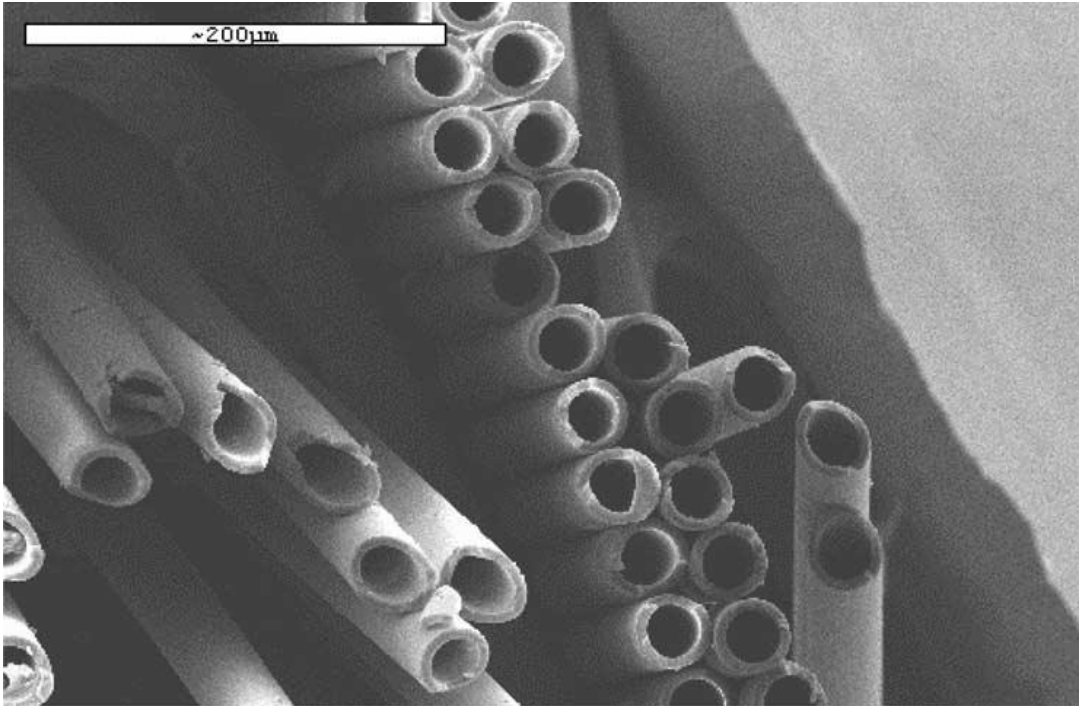
Şekil 3.5: Çıkarılmayan içi boş çekirdekler ile vasküler ağ oluşturma aşamaları [73].

Literatürde kullanılmış olan çıkarılmayan içi boş çekirdek tipleri aşağıdaki gibidir:

- İçi boş cam tüpler (Hollow glass tubes),
- İçi boş cam elyaflar (hollow glass fibers),
- İçi boş polimer tüpler (hollow polymer tubes).

İçi boş cam tüpler polimer matrisli kompozit malzemede vasküler ağ oluşturmak için kullanılan ilk yöntem olmuştur [74]. Kompozit malzeme üretimi sırasında uygulanmasının kolay olması, çoğu kompozit malzeme üretim tekniğine uyarlanabilir olması, piyasada çok çeşitli çaplarda ve boyutlarda bulunabilir olması içi boş cam tüpleri çok iyi bir vasküler ağ malzeme adayı yapmıştır. Belirtilen bu avantajlarına rağmen içi boş cam tüpler, kompozit malzemenin mekanik özelliklerini düşürür ve cam tüp-reçine arayüzü etkileşimleri zayıftır.

İçi boş cam takviyeler, ilk olarak Bristol Üniversitesi'ndeki bir grup araştırmacının çalışmalarının sonucunda üretilmiş ve kendi kendini onarma çalışmalarında kullanılmaya başlanmıştır [6]. Yapılan çalışmalarla içi boş cam takviyelerin dış çapları 15 μm 'ye kadar düşmüştür. Bu sebeple polimer matrisli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini daha az etkilemiştir. İçi boş cam takviyeler, içi boş cam tüplerin dezavantajlarını taşımakla beraber içlerine onarıcı ajan doldurma işlemi, çaplarının çok daha küçük olmasından dolayı daha zorlu bir süreçtir. Şekil 3.6'da içi boş cam takviyelerin taramalı elektron mikroskobunda kaydedilmiş görüntüleri verilmiştir.

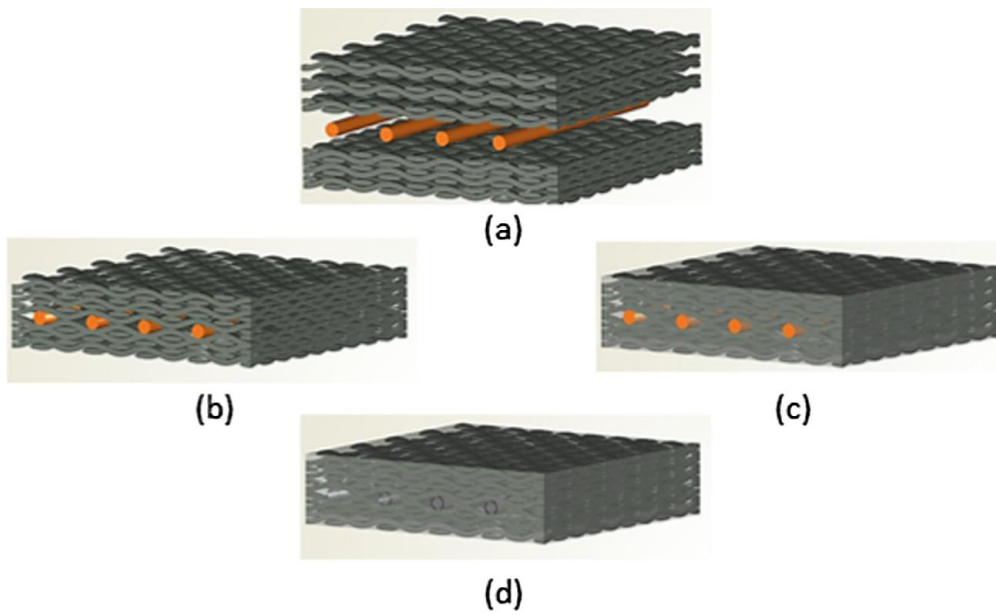


Şekil 3.6: Dış çapı 30 μm olan içi boş cam takviyelerin SEM görüntüsü [75].

İçi boş polimer tüpler, kullanılan polimer malzemeye göre çalışmalarda çeşitlilik (polipropilen, polivinil klorür, silikon) göstermiş olup cam tüp veya cam takviyelere göre malzemenin mekanik özelliklerini daha az etkilemiştir. Bu yönden diğer vasküler ağ

yöntemlerine göre avantaj sağlamış olsa da tüp-reçine arayüzünün zayıf olması ve ağın tek ekseninde düz bir şekilde oluşturulabilmesi gibi dezavantajlar bu yöntemde de ortaya çıkmaktadır [13], [76], [77].

Çıkarılabilir katı çekirdekler ile vasküler ağ oluşturma prosedürü, çıkarılmayan içi boş çekirdekler ile oldukça benzerdir. Şekil 3.7’de gösterildiği gibi ilk olarak polimer veya metalik çekirdekler kalıp ayırıcı gibi çekirdeklerin matrise yapışmasını engelleyecek bir madde ile kaplanarak takviyelerin arasına yerleştirilir. Kürleşmenin ardından çekirdekler çıkarılarak içi boş kanallar ile vasküler ağ oluşturulmuş olur.

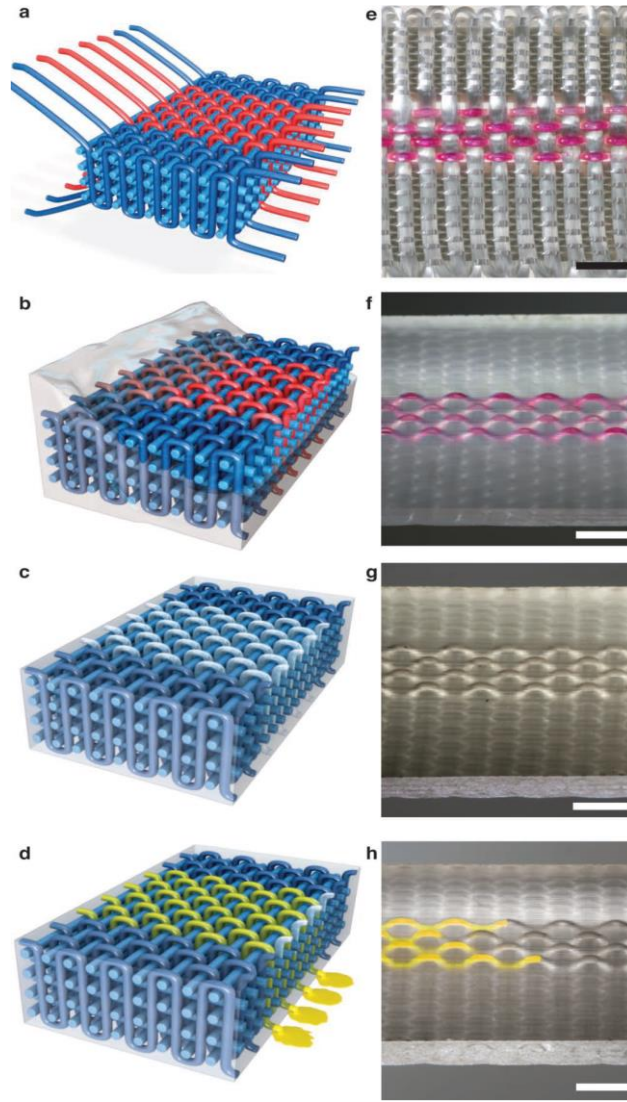


Şekil 3.7: Çıkarılabilir katı çekirdekler kullanılarak vasküler ağ oluşturma aşamaları [73].

Çıkarılabilir katı çekirdekler yönteminin avantajı malzemenin mekanik özelliklerine daha az etki etmesi ve özellikle çıkarılmayan içi boş çekirdekler yönteminde de bulunan zayıf reçine arayüzü problemini minimize etmiştir.

VaSC yönteminde vasküler ağ oluşturmak için PLA (polilaktik asit) kullanılır. Tekniğin püf noktası PLA'nın 200°C civarında erimesidir. Kompozit malzeme üretimi sırasında yerleştirilen PLA dizilerinin, malzeme kürleştikten sonra fırında bekletilerek erimesi sağlanır. Eriyik PLA'nın vasküler ağ içinde artık kalmasına karşın aseton ile malzeme içerisinden temizlenir ve böylece vasküler ağ oluşturulmuş olur. İlgili yöntemle ait şematik gösterim Şekil 3.8’de verilmiştir. Bu teknikte malzemenin mekanik özellikleri ve iç yapısında minimum zarar verecek şekilde küçük çaplarda 3 boyutlu ve en önemlisi birbirine

bağlı vasküler ağlar oluşturulmaktadır. Buna karşın üretimi diğer yöntemlere göre daha karmaşık ve beceri gerektirir. Ayrıca ısıya dayanıklı reçine gerektirmektedir [10], [14], [15].



Şekil 3.8: VaSC yöntemi ile vasküler ağ oluşturma a,e) çözgü (warp) ve atkı (weft) mavi renk, PLA ise kırmızı renkte gösterilmiştir b,f) reçine emdirme işlemi c,g) PLA'nın eritilmesi d,h) vasküler ağın sarı boya ile doldurulması [10].

3.2.2.3 Onarıcı Ajan Seçimi ve Fazı

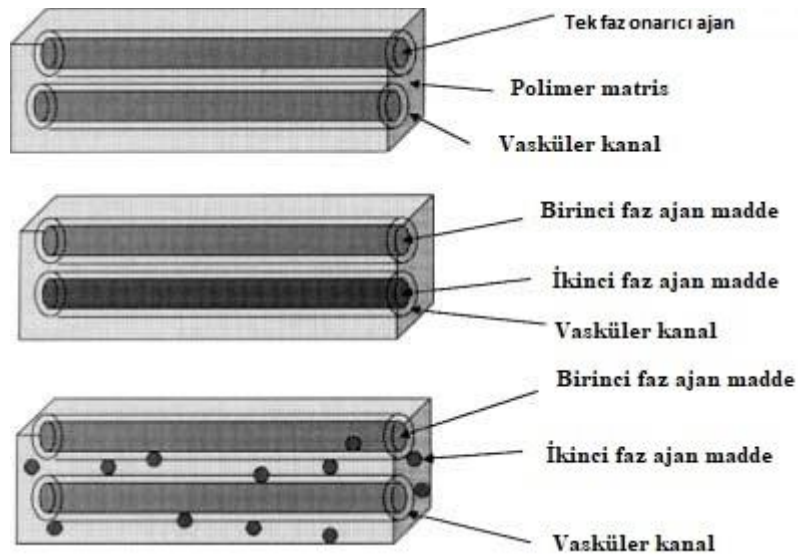
Onarıcı ajan seçimi ve fazı kendi kendini onarmada en önemli unsurlardan biridir. Çalışmanın amacına ve kendi kendini onarma yapacak malzemenin çalışma şartlarına göre farklılık göstermektedir. Örneğin; alçak dünya yörüngesinde çalışacak bir uyduda 90°C'de kürlenecek iki fazlı, reçine ve sertleştiriciden oluşan onarıcı ajan sistemi arzu edilirken, ekstrem koşullarda çalışmayan parçalar için oda sıcaklığında kürlenen tek faz etil siyanoakrilat onarıcı ajan tercih edilebilir [8], [12]. Kullanılacak onarıcı ajanın viskozitesinin

düşük olması hasar sonrası iç yapıda oluşacak kılcal hareket için hayati önem taşımaktadır. Bu sebeple yapılan çalışmalarda her zaman düşük viskoziteli onarıcı ajan seçimleri yapılmıştır.

Onarıcı ajan fazları genellikle 2 şekilde tercih edilmektedir:

- Tek fazdan oluşan onarıcı ajanlar (Ultraviyole ile kürleşen reçine, siyanoakrilatlar gibi),
- İki fazlı reçine sistemleri (reçine-sertleştirici veya reçine-katalizör).

Farklı ajan seçimlerine ait şematik görüntü şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9: Farklı ajan faz seçimlerinin şematik gösterimi [9].

4. MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerde vasküler kanal yöntemi ile kendi kendini onarma yeteneği araştırılmıştır. Kendi kendini onarmada çeşitli darbe enerjilerinin ve farklı onarıcı ajan hacimlerinin etkileri incelenmiştir.

Üretilen numuneler hasara maruz bırakılarak üç nokta eğme testleri uygulanacak, eğilme mukavemetleri ve kendi kendini onarma yeteneğine bağlı olarak onarım oranları belirlenecek dijital, elektron mikroskobu ve FTIR analizi ile onarma bölgeleri araştırılacaktır.

4.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Üretilen numunelerde matris malzemesi olarak temin edilen Marker As 63 marka laminasyon epoksi reçine, takviye olarak ise 850 g/m², 0/90 biaksiyel Metxy LT850 marka cam elyaf kullanılmış olup teknik özellikleri sırasıyla Tablo 4.1, Tablo 4.2 ve Tablo 4.3’de verilmiştir. Vasküler kanal oluşturmak için iç çapı 1,2 mm, dış çapı 1,6 mm ve uzunluğu 75 mm olan borosilikat camdan üretilmiş mikro-hematokrit tüpler kullanılmıştır. Onarıcı ajan olarak Etil-2-siyanoakrilat tercih edilmiştir. Onarıcı ajan maddeye ait teknik özellikler Tablo 4.4’de verilmiştir. Onarıcı ajana renk vermek için Rhodamine B floresan kimyasal boya, mikro-hematokrit tüplerin iki ucunu da mühürlemek için Sista marka universal silikon kullanılmıştır. Matris malzeme epoksi reçine ve cam tüpler arasında zayıf olan cam tüp-reçine arayüzünü güçlendirmek amacıyla hekzan içinde çözündürülmüş stearik asit çözeltisi kullanılmıştır.

Tablo 4.1: Marker As 63 epoksi reçine teknik özellikleri.

Görünüm	Opak, sıvı
Renk (GARDNER)	1 maksimum
Viskozite 23°C (mPas) (Karışım A+B)	700-900
Yoğunluk 23°C	1,11 g/mL
Karışım Oranı (Reçine:Sertleştirici,A:B)	100:50 veya 2:1 (ağırlıkça)
Çalışma Süresi 23°C (200 g için)	60 dakika
Kürleşme Süresi 23°C (3 mm kalınlık için)	18-24 saat- Dokunma Kuruluşu 36-48 saat- Mekanik Kuruma 7 gün- Tamamen kurlenme
Sertlik (7 gün)	81 Shore D
Basma Mukavemeti (7 gün)	92 N/mm ²
Eğilme Mukavemeti (7 gün)	56 N/mm ²
Camsı Geçiş Sıcaklığı (Tg)	74°C

Tablo 4.2: Metyx LT850 cam elyaf takviye yapısı.

Katman	Fiber Tipi	Alan Ağırlığı
0°	1200 Tex	401 g/m ²
90°	1200 Tex	426 g/m ²
Dikiş	76 Dtex	10 g/m ²

Tablo 4.3: Metyx LT850 cam elyaf teknik özellikleri.

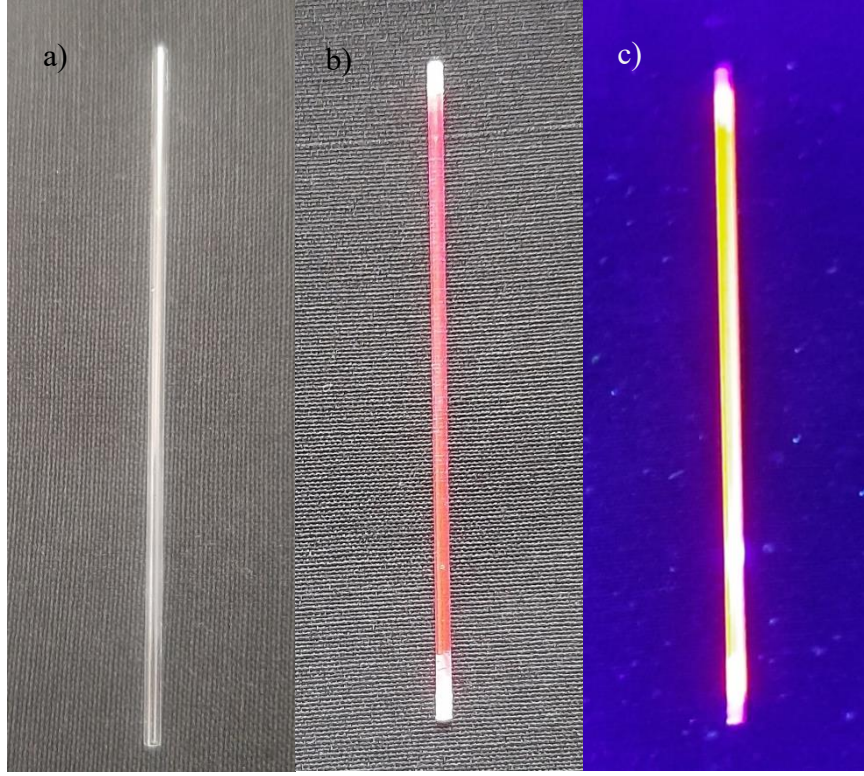
Yoğunluk	2,6 g/cm ³
Ergime Noktası	800-850 °C

Tablo 4.4: Etil-2-siyanoakrilat yapıştırıcı teknik özellikleri.

Kürlenmemiş Monomer	
Görünüm	Opak, sıvı
Özgül Ağırlık 25°C	1,05
Viskozite 25°C (CPS)	2-3
Parlama Noktası	>82°C
Raf Ömrü 20°C (Ay)	12
Kürlenmiş Yapıştırıcı	
Boşluk Doldurma	0,04 mm
Çekme Mukavemeti (Çelik-Çelik ASTM D-2095)	25~30 N/mm ²
Kesme Mukavemeti (Çelik-Çelik ASTM D-1002)	15~20 N/mm ²
Çalışma Sıcaklığı Aralığı	-55~82°C
Tamamen Kürlenme Süresi	24 saat

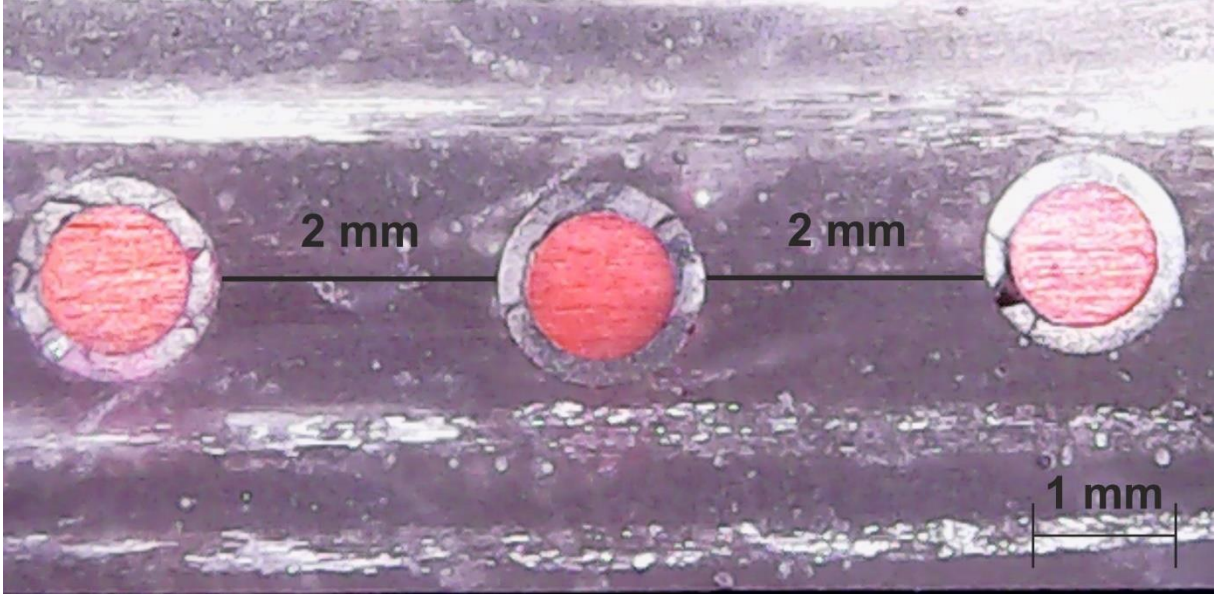
4.2 Numunelerin Üretimi ve Deneye Hazırlanması

İlk olarak hasar esnasında onarıcı ajanın yayılımını sağlayacak numune içerisinde vasküler kanal görevi görecekt tüpler hazırlanmıştır. İki ucu açık borosilikat cam tüplerin içleri ince uçlu enjektör yardımıyla onarıcı ajanla (etil-2-siyanoakrilat) doldurulmuştur. Onarıcı ajanın tüp içerisinde hava ile temasını kesmek ve kürlenmesini engellemek için iki ucu silikon ile mühürlenmiştir. Silikon kurduktan sonra ise tüpler iki kat stearik asit-hekzan çözeltisi ile kaplanmıştır. İçi boş, onarıcı ajan dolu ve UV ışık kaynağı altındaki cam tüplerin görüntüleri Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1: Çalışmada kullanılan cam tüplerin çeşitli görüntüleri a) içi boş cam tüp b) içi renklendirici madde ile karıştırılmış onarıcı madde dolu cam tüp c) içi dolu ve UV ışık altında cam tüp.

Numunelerin üretimi için el yatırması yöntemi tercih edilmiştir. 540X500 mm boyutunda 4 kat cam elyaf takviye kullanılmıştır. Üretim yapılacak alana numune tabakasının kolay ayrılması için kalıp ayırıcı uygulanmıştır. Numune üretiminde takviye dizilimi olarak $[0/90]_{2s}$ tercih edilmiş olup iki kat takviyeye sırayla reçine uygulandıktan sonra içleri onarıcı ajan dolu cam tüpler vasküler kanal olarak yerleştirilmiştir. Kanalların dış çaplarının göreceli olarak büyük olması, iki kanal arasına reçinenin kolaylıkla nüfus edebilmesi ve porozite oluşumunu olabildiğince engellemek adına içi onarıcı ajan dolu vasküler kanallar Şekil 4.2’de gösterildiği üzere 2 mm arayla yerleştirilmiştir. Bu işlemten sonra $[90/0/90/0]$ olarak iki kat daha takviyeye reçine uygulanıp üretici firmanın tavsiyesi üzerine oda sıcaklığında 7 gün kürlenmeye bırakılmıştır. Hazırlanan numune tabakası Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: İki vasküler kanal arası mesafenin numune kesiti üzerinden gösterimi.



Şekil 4.3: Hazırlanan numune tabakası.

Kürlenme sonrası numunelerin 180x25 mm boyutlarında kesilmesi için su jeti kullanılmıştır. 540x500 mm boyutlarındaki tabaka su jeti ile kesilerek 60 eşit parçaya bölünmüştür. Su jeti kesim, numuneleri arzu edildiği şekilde eşit parçalara bölmesi, kesim kolaylığı ve geleneksel daire testerelere göre kesim kalınlığının çok daha az olması nedeniyle tercih edilmiştir. Su jeti kesim cihazının görüntüsü Şekil 4.4’de görülmektedir. Su jeti kesimden çıkan parçalar ise Şekil 4.5’de verilmiştir.



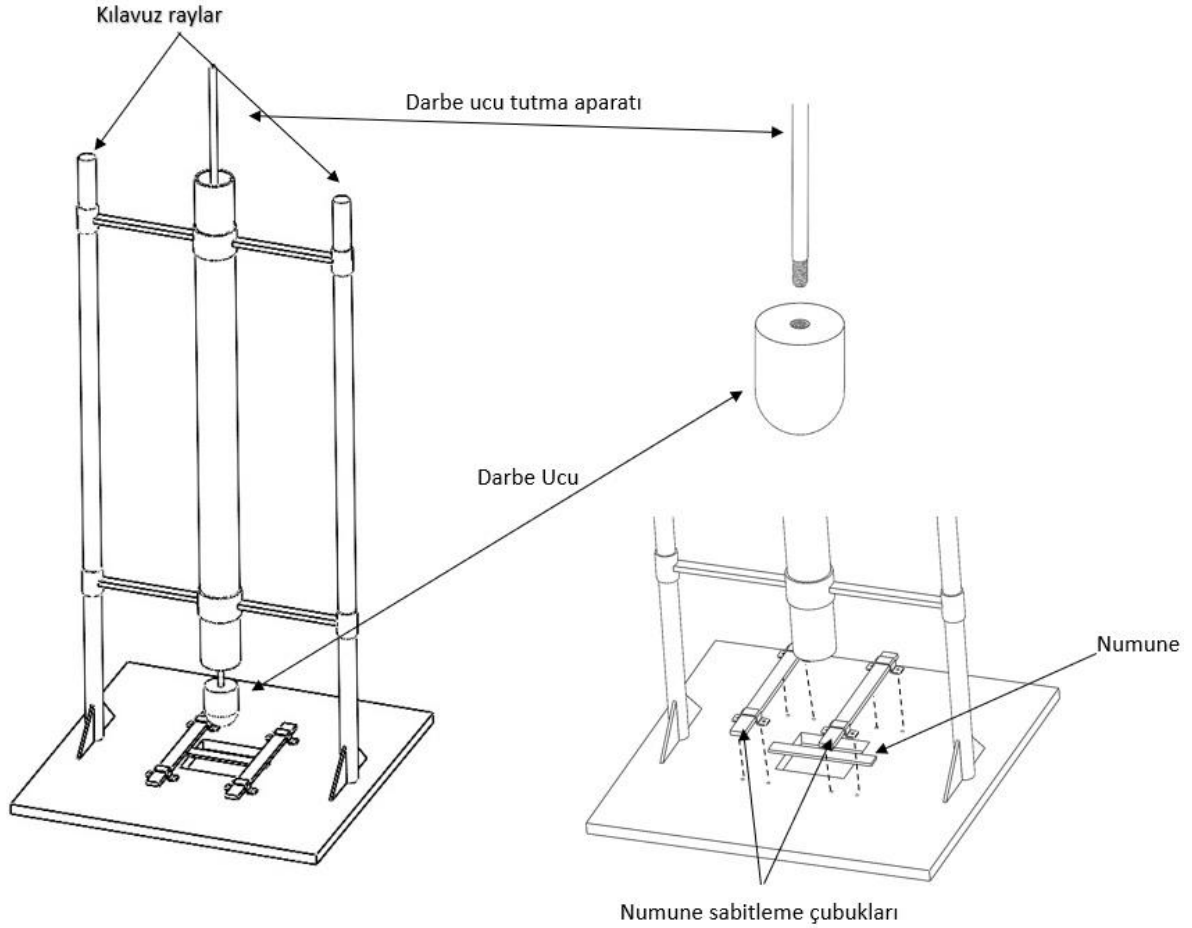
Şekil 4.4: Numunelerin kesiminde kullanılan su jeti kesim cihazı.



Şekil 4.5: Bir grup numunenin su jeti kesimden sonraki görüntüsü.

Numunelerin kesilmesinden sonra malzemede hasar oluşturmak için ASTM D7136 standardına göre ağırlık düşürme testi yapılmıştır. Ağırlık düşürme testleri küresel uçlu 2 kg ağırlık kullanılarak uygulanmıştır. Oluşturulan deney düzeneği Şekil 4.6'da verilmiştir. Hasar oluşumu için üç farklı darbe enerjisi uygulanmış olup 12, 18 ve 24 joule darbe

enerjileri, sırasıyla 61cm, 92cm ve 122 cm yüksekliklerden ağırlık bırakılarak elde edilmiştir. Sonrasında numunelerin darbe sonrası kendi kendini onarma kabiliyetlerinin oluşabilmesi için 3 nokta eğme deneyi yapılmadan önce 2 gün oda sıcaklığında bekletilmiştir.



Şekil 4.6: Ağırlık düşürme testi düzeneğinin şematik gösterimi.

4.3 Üç Nokta Eğme Deneyi

Üretilen numunelerin eğilme mukavemetlerini ve eğilme mukavemetlerindeki artışı saptayabilmek için üç nokta eğme deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney, EN ISO 14125 standartına uygun şekilde Zwick Roell Z250 test cihazında 250 kN yük hücresi, 120 mm destekler arası mesafe ve 2 mm/dk deney hızı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.7).

Numunelerin eğilme mukavemetindeki onarım oranı 4.1 numaralı eşitlikle hesaplanmıştır [78],

$$\sigma_{\text{onarım oranı}} = \frac{\sigma_{\text{onarılmış}} - \sigma_{\text{hasarlı}}}{\sigma_{\text{kontrol}} - \sigma_{\text{hasarlı}}} \times 100 \quad (4.1)$$

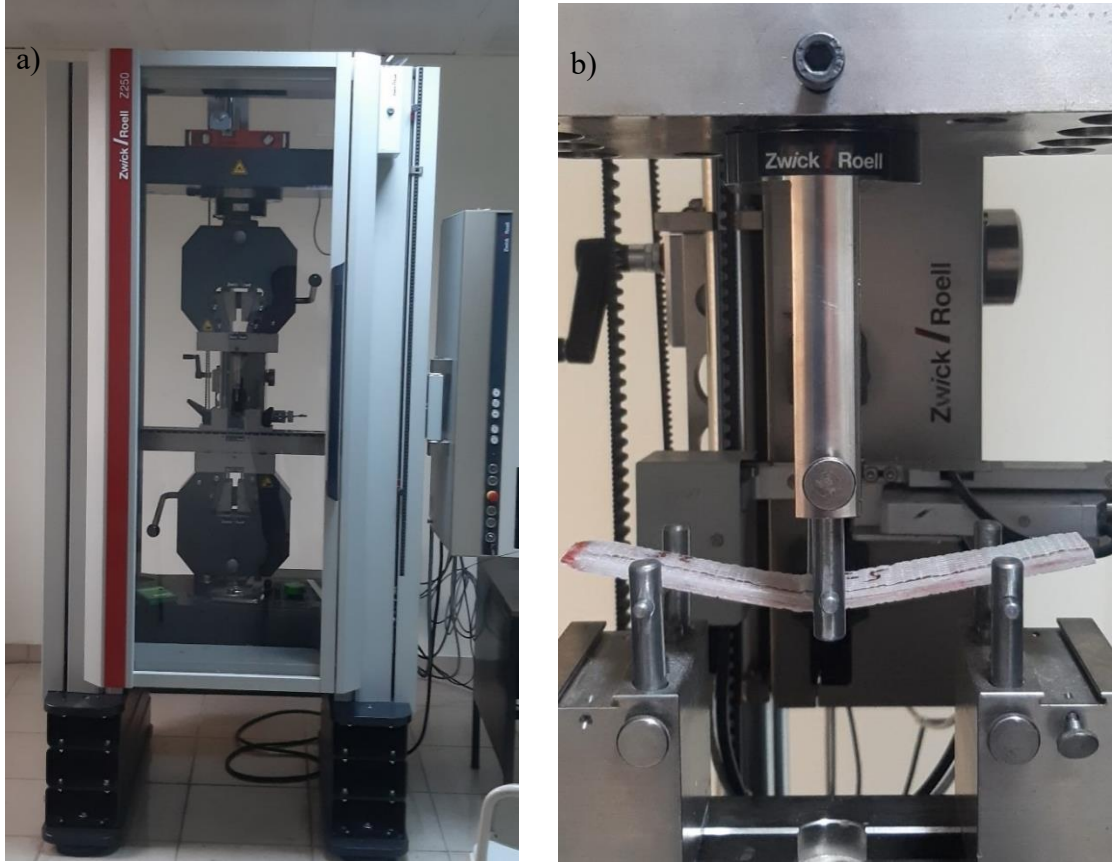
Burada;

$\sigma_{\text{onarım oranı}}$: Eğilme mukavemetindeki onarım oranı [%],

$\sigma_{\text{onarılmış}}$: Onarılmış numunenin eğilme mukavemeti [MPa],

$\sigma_{\text{hasarlı}}$:Hasarlı numunenin eğilme mukavemeti [MPa],

σ_{kontrol} :Vasküler kanal bulunmayan kontrol numunesinin eğilme mukavemeti [MPa]

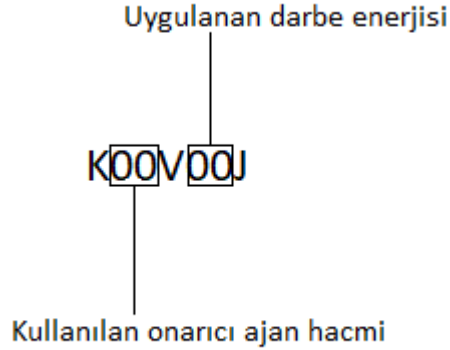


Şekil 4.7: Zwick/ Roell Z250 test cihazı a) cihaz görseli b) deney sırasında alınmış görsel.

Üç nokta eğme deneyinde 12 deney grubu ve her gruptan 5'er adet numunenin eğilme mukavemetleri ölçülmüştür. Bu gruplara ait numune kodları, numune adları ve açıklamalar Tablo 4.5'de, numune kodlarının sistemi ise Şekil 4.8'de verilmiştir.

Tablo 4.5: Deney grupları.

Numune kodu	Numune Adı	Açıklama
K00V00J	Kontrol	Kontrol numuneleri (vasküler kanal ve onarıcı ajan bulunmuyor)
K00V12J	12J Hasarlı Kontrol	12J hasarlı kontrol numuneleri (vasküler kanal ve onarıcı ajan bulunmuyor)
K00V18J	18 J Hasarlı Kontrol	18J hasarlı kontrol numuneleri (vasküler kanal ve onarıcı ajan bulunmuyor)
K00V24J	24 J Hasarlı Kontrol	24J hasarlı kontrol numuneleri (vasküler kanal ve onarıcı ajan bulunmuyor)
K08V00J	%0,8 Kontrol	0,8 vasküler kanal hacimli-hasarsız kontrol numuneleri (onarıcı ajan bulunmuyor)
K12V00J	%1,2 Kontrol	1,2 vasküler kanal hacimli-hasarsız kontrol numuneleri (onarıcı ajan bulunmuyor)
K08V12J	%0,8-12J	0,8 vasküler kanal hacimli-12J hasarlı numuneler
K12V12J	%1,2-12J	1,2 vasküler kanal hacimli-12J hasarlı numuneler
K08V18J	%0,8-18J	0,8 vasküler kanal hacimli-18J hasarlı numuneler
K12V18J	%1,2-18J	1,2 vasküler kanal hacimli-18J hasarlı numuneler
K08V24J	%0,8-24J	0,8 vasküler kanal hacimli-24J hasarlı numuneler
K12V24J	%1,2-24J	1,2 vasküler kanal hacimli-24J hasarlı numuneler



Şekil 4.8: Numune kodlarının sistemi.

Yukarıdaki Tablo 4.5’de belirtilen deney grupları iki ana parametre olan onarıcı ajan hacmi ve numunelerin maruz kaldığı darbe enerjisine bağlı olarak oluşturulmuştur. Bu iki ana parametrenin seçilme sebepleri aşağıda belirtilmiştir.

Çalışmada onarıcı ajan hacimlerinin bu şekilde seçilmesinin sebepleri,

- Kullanılan vasküler kanalın çapının büyük olması,

- Poroziteyi en aza indirmek için matris malzemenin vasküler kanalların arasına da uygun şekilde nüfuz etmesi arzu edildiğinden ve üretimde kolaylık sağlamak adına kanallar arasında 2 mm boşluk bırakılması,
- Numune boyutlarının üç nokta eğme deneyi standartlarına uygun şekilde seçilmesidir.

Uygulanan darbe enerjileri ise yapılan ön deneylere dayanmaktadır.

4.4 Makro ve Mikro Yapı İncelemesi

Numunelerin iç yapısında oluşan hasarı ve onarımı gözlemleyebilmek için USB bağlantısına sahip 1000 kata kadar büyütme özelliğine sahip dijital mikroskop kullanılmıştır. Ayrıca onarıcı ajanda bulunan floresan maddeyi etkinleştirerek numune iç yapısında onarıcı ajan dağılımını gözlemleyebilmek için harici UV ışık kaynağından yararlanılmıştır.

Numunelerin yapısal bütünlüğü ve özellikle çatlak bölgelerini daha detaylı inceleyebilmek amacıyla ODTÜ Merkez Laboratuvarında SEM görüntüleri (FEI QUANTA 400F) alınmıştır. Numuneler yalıtkan olduğundan dolayı altın-paladyum kaplama yapılarak iletken hale getirilmiştir. Görüntüler 43 büyütmeden 2000 büyütmeye kadar 20-30 kV çalışma aralığında kaydedilmiştir.

4.5 FTIR Analizi

Onarıcı ajanın numune içindeki dağılımını sadece görsel olarak değil yapısal olarak da incelemek amacıyla FTIR analizi yapılmıştır. Analiz “PerkinElmer” marka “Spectrum Two” model cihazda gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.8). Karakteristik moleküler absorpsiyon pikleri 4 cm^{-1} çözünürlüğünde ve $0,2 \text{ cm/s}$ tarama hızında ve $600-4000 \text{ cm}^{-1}$ tarama aralığında bulunan bölgede belirlenmiştir. FTIR analizinde numunelerin çeşitli noktalarından alınan FTIR spektrumları analiz edilerek ilgili noktalardaki fonksiyonel gruplar incelenmiştir.



Şekil 4.9: FTIR analizi cihazı.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

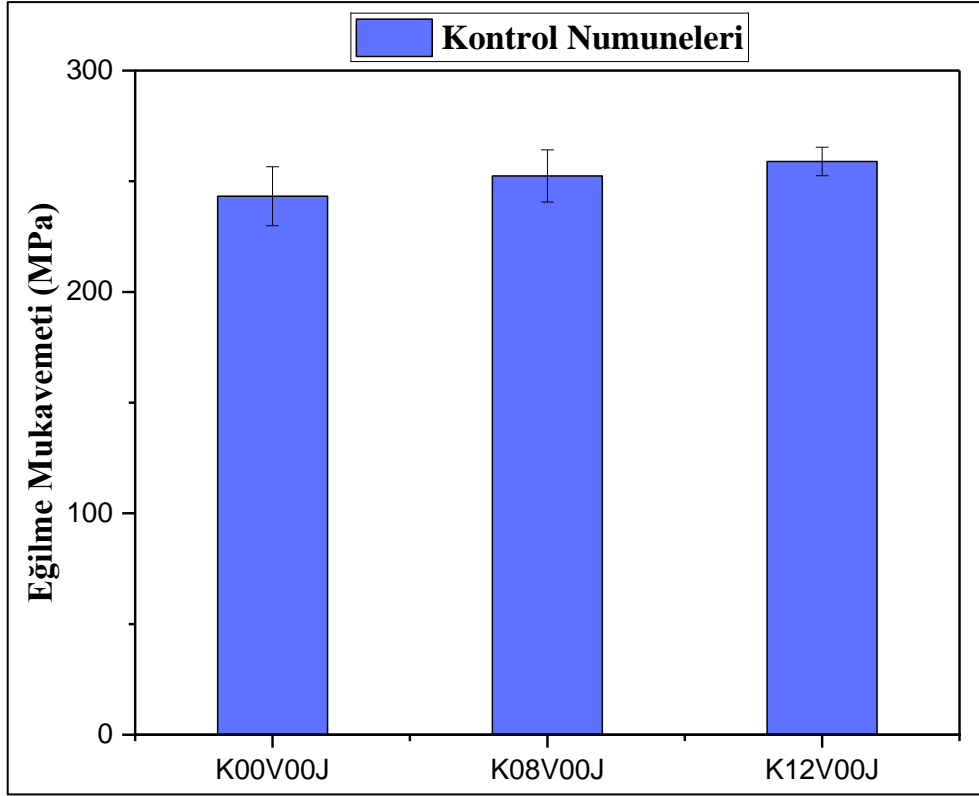
5.1 Üç Nokta Eğme Deneyi

Bölüm 4.3'te belirtilen numune gruplarına ait eğilme mukavemeti ve onarım oranları Tablo 5.1'de verilmiştir. Tablo 5.1'de belirtilen değerler her grup için 5'er adet numunenin aritmetik ortalama değeridir.

Tablo 5.1: Numunelerin eğilme mukavemeti ve eğilme mukavemetlerindeki onarım oranı.

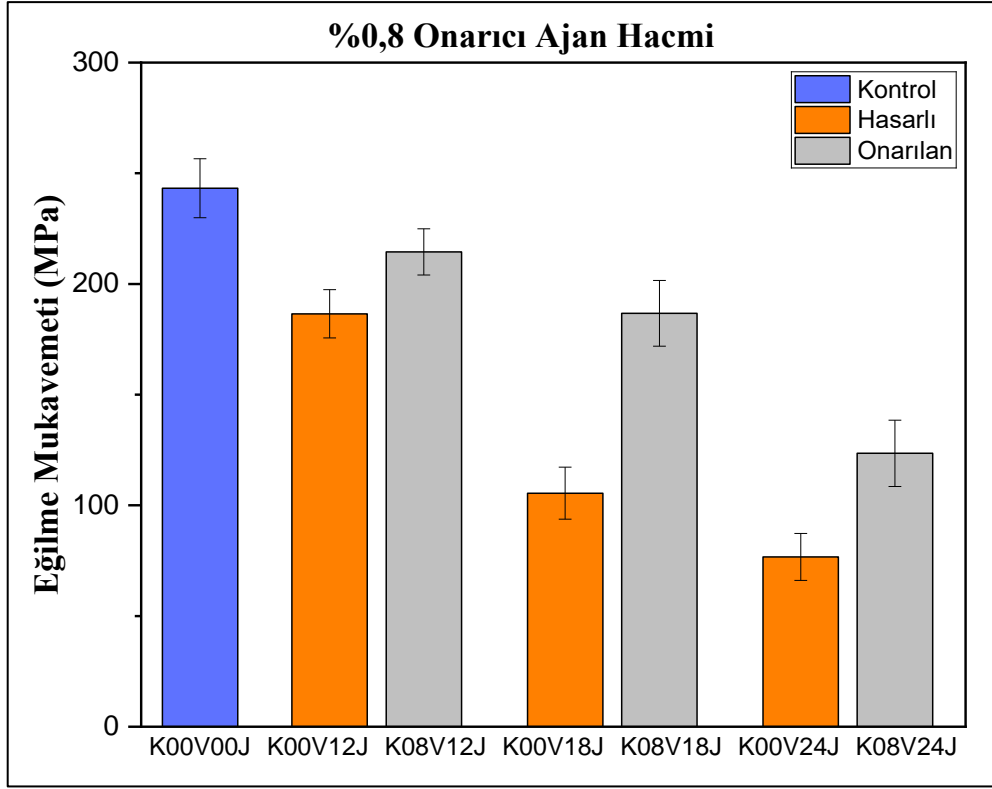
Numune kodu	Numune Adı	Eğilme Mukavemeti (MPa)	Standart Sapma	Onarım Oranı (%)
K00V00J	Kontrol	243,25	13,31	-
K00V12J	12J Hasarlı Kontrol	186,50	10,90	-
K00V18J	18 J Hasarlı Kontrol	105,50	11,72	-
K00V24J	24 J Hasarlı Kontrol	76,72	10,59	-
K08V00J	%0,8 Kontrol	252,43	11,78	-
K12V00J	%1,2 Kontrol	258,92	6,43	-
K08V12J	%0,8-12J	214,48	10,42	49,31
K12V12J	%1,2-12J	205,36	10,86	33,23
K08V18J	%0,8-18J	186,74	14,84	58,98
K12V18J	%1,2-18J	191,84	16,91	62,68
K08V24J	%0,8-24J	123,49	14,99	28,09
K12V24J	%1,2-24J	130,42	17,41	32,24

Vasküler kanalların kompozit numune yapısı üzerindeki etkisini görebilmek için hazırlanan deney gruplarına ait eğilme mukavemeti değerleri Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Bölüm 4.3'de de açıklandığı gibi bir grupta vasküler kanal bulunmuyorken diğer iki grupta farklı hacimlerde, onarıcı ajan kullanılmayan vasküler kanal bulunmaktadır. Bu da bize vasküler kanalların numunelerin mekanik özelliklerinde yarattığı etkiyi göstermektedir. Şekil 5.1'den görüldüğü üzere içerisinde vasküler kanal bulunan numunelerin eğilme mukavemetinin az da olsa içerisinde vasküler kanal bulunmayan kontrol numunesine göre fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar ilginç olmakla beraber yapılan ön deney çalışmalarının bir sonucudur. Yapılan ön çalışmalarda ve literatür çalışmalarında [8], [9], [79], [80] görüldüğü üzere vasküler kanalların varlığı malzemenin mekanik özelliklerini %20'ye kadar azaltmaktadır. Bu problemin üzerinden gelebilmek üzere stearik asit-hekzan çözeltisi ile vasküler kanallara kaplama yapılmıştır. Bu çözelti, vasküler kanalla reçine arasında köprü görevi görerek apolar olan cam yüzeyini polarize ederek zayıf arayüzü ortadan kaldırır. Bu sayede vasküler kanal kullanılan kontrol numunelerinin eğilme mukavemetinde iyileşme görülmüştür.

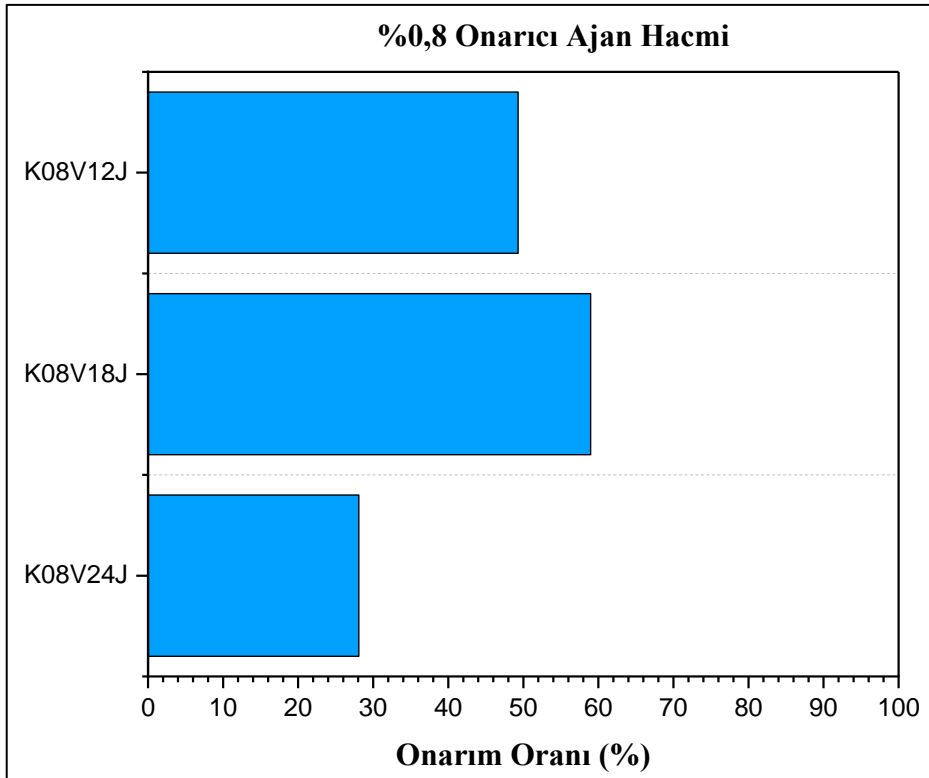


Şekil 5.1: Kontrol numunelerine ait eğilme mukavemeti değerleri.

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de %0,8 onarıcı ajan hacmi kullanılan numunelere ait eğilme mukavemeti ölçümleri ve onarım oranları görülmektedir. Bu grafiklere göre numunelere uygulanan darbe değeri arttıkça eğilme mukavemetleri azalmıştır. %0,8 onarıcı ajan hacmine sahip numune gruplarının hepsinde onarma kabiliyeti görülmüş en fazla onarım oranı ise %58,98 ile 18 joule hasar uygulanan numunede hesaplanmıştır. 24 joule hasar uygulanan numune %28,09 ile en düşük onarım oranına sahiptir. Hasarın fazla olması ve onarıcı ajan hacminin yeterli olmaması muhtemel sebeplerdir.

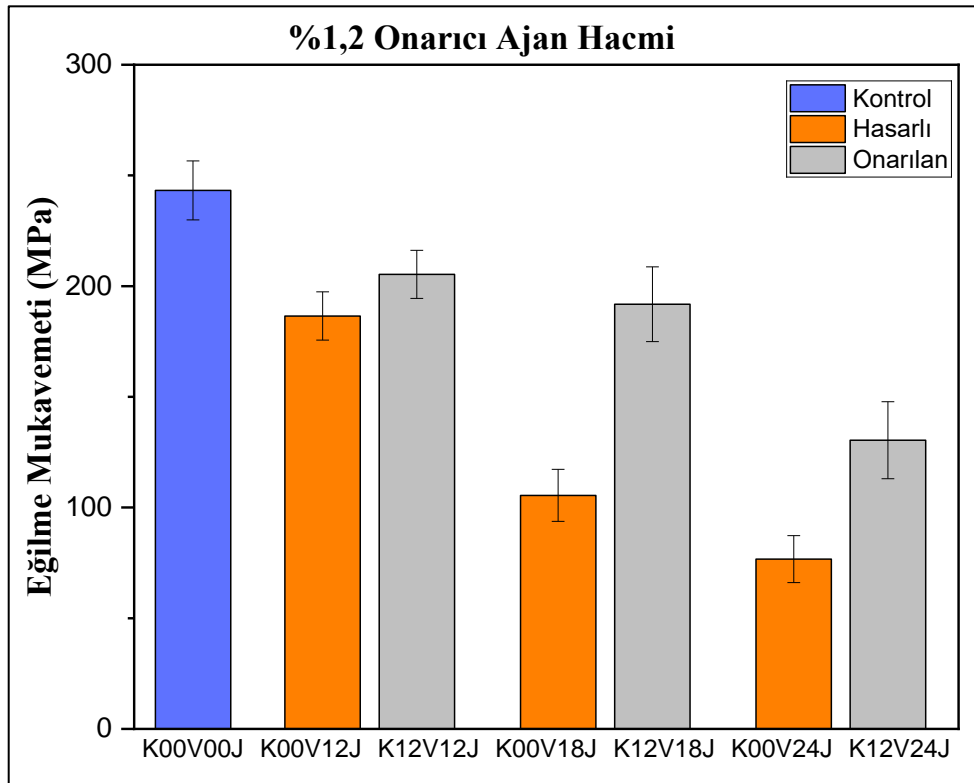


Şekil 5.2: %0.8 onarıcı ajan hacimli numunelerin eğilme mukavemetleri.

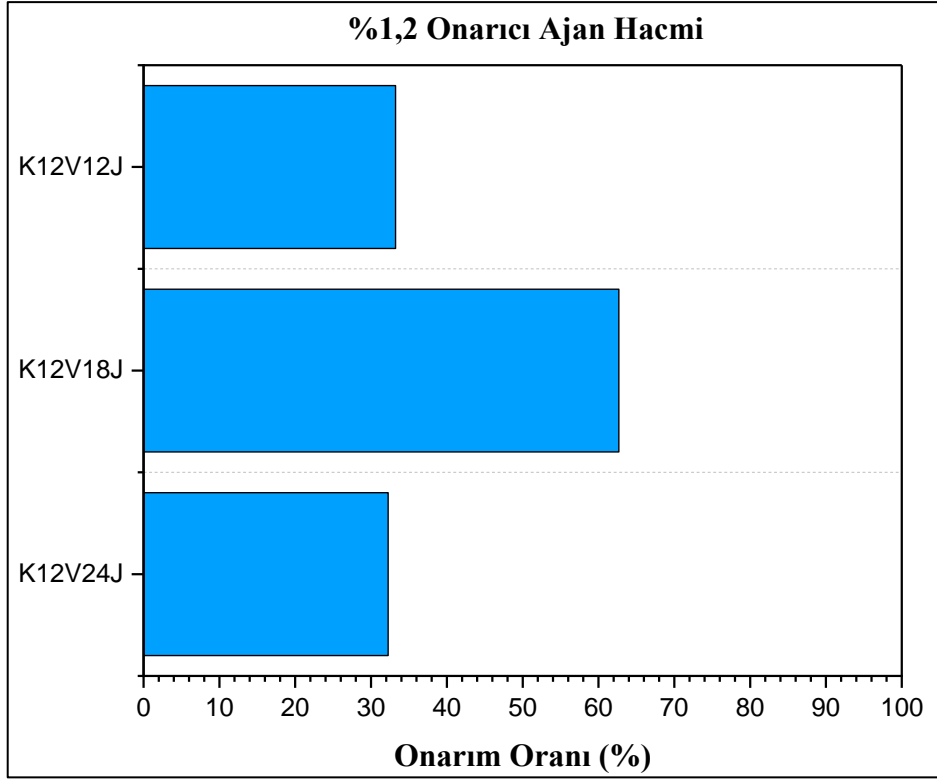


Şekil 5.3: %0.8 onarıcı ajan hacimli numunelerin onarım oranı.

%1,2 onarıcı ajan hacmine sahip numunelerin eğilme mukavemetleri ve onarım oranları Şekil 5.4 ve 5.5’de verilmiştir. Bu grafiklerde görüldüğü üzere numune gruplarına uygulanan darbe enerjisi arttıkça numunelerin eğilme mukavemetinde azalma olmasına rağmen bütün hasar verilen numune gruplarında onarma kabiliyeti görülmüştür. Onarım oranının en fazla olduğu numune grubu, 18 joule hasar uygulanan numune grubu olup ortalama onarım oranı %62,68 dir. 12 ve 24 joule hasar uygulanan numunelerde ise onarım oranları sırasıyla %33,23 ve %32,25’dir. Trask ve arkadaşları da çalışmalarında [9] yüksek hasara maruz kalan malzemelerde onarım oranının daha fazla olduğunu belirtmiştir ancak bu şartın sağlanması için onarıcı ajan hacminin yeterli olması ve malzemenin delaminasyon seviyesinde hasara maruz kalmaması gerekmektedir. Bu sebeple 24 joule hasara maruz kalan numunelerde, 18 joule hasara maruz kalan numunelere göre daha az onarım oranı gözlenmiştir.

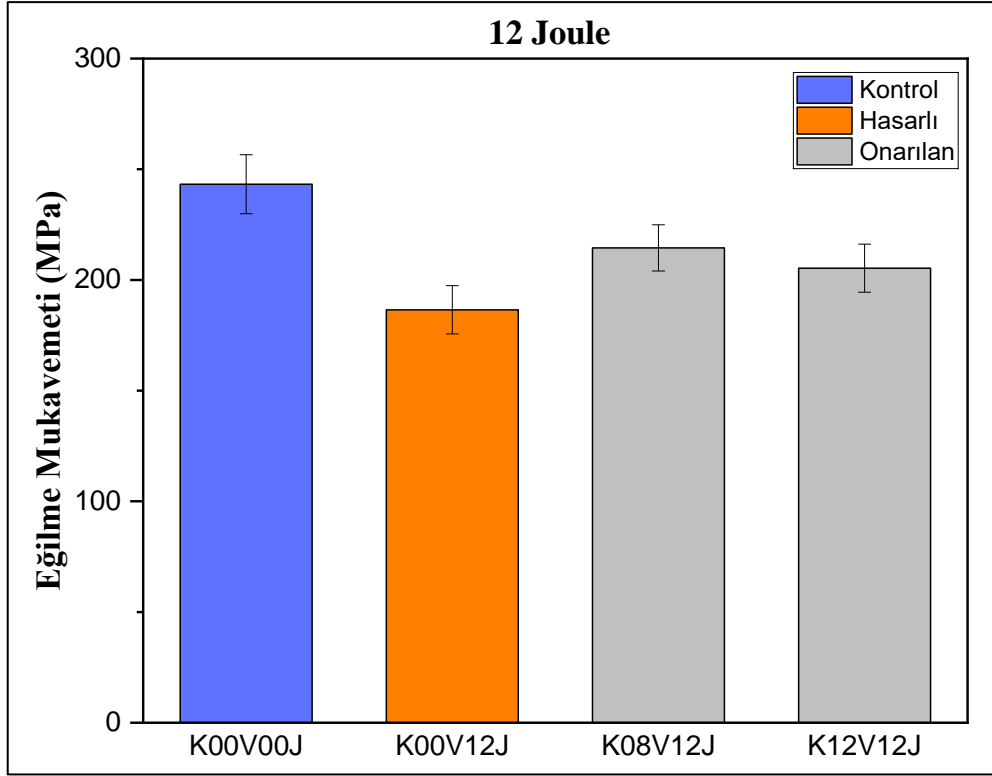


Şekil 5.4: %1,2 onarıcı ajan hacimli numunelerin eğilme mukavemetleri.

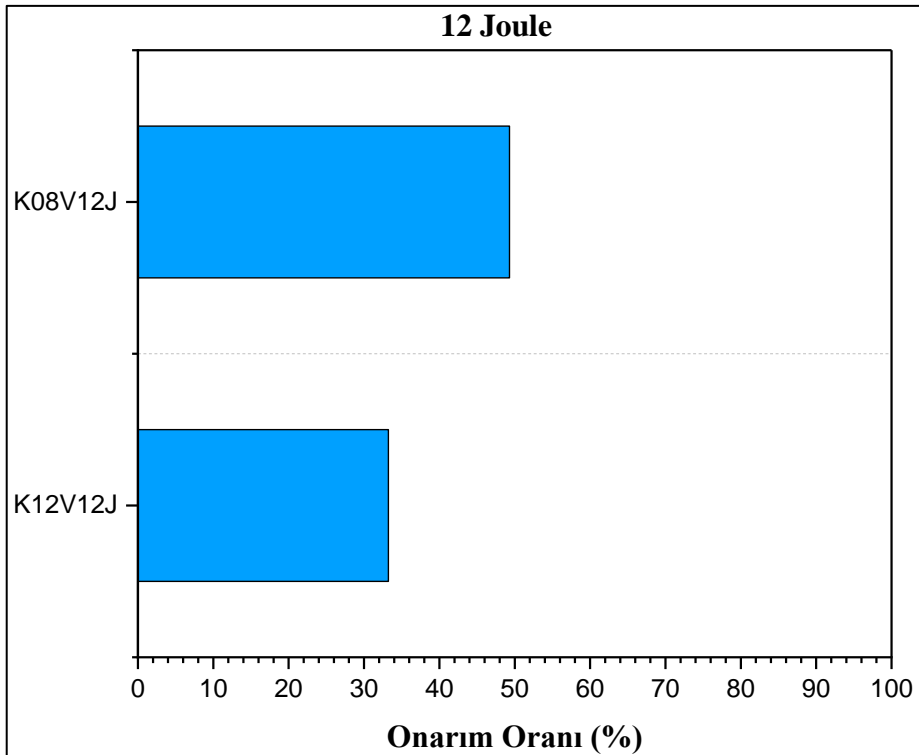


Şekil 5.5: %1,2 onarıcı ajan hacimli numunelerin onarım oranı.

Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de 12 joule hasar uygulanan numunelere ait eğilme mukavemeti ölçümleri ve onarım oranları verilmiştir. İki farklı onarıcı ajan hacmi kullanılan numune gruplarının hem hasarlı numunelerin hem de onarılmış numunelerin eğilme mukavemetleri benzer seviyelerdedir. Onarım oranı tarafına baktığımızda ise %0,8 onarıcı ajan hacminde %1.2’ye göre büyük bir fark görülmektedir. Bunun sebebi 12 joule hasar uygulanan numunelerin, hasarsız kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında eğilme mukavemetlerindeki düşüşün az olmasıdır. İki hacim grubunun eğilme mukavemetleri (214 MPa, 205 MPa) arasındaki fark 9 MPa olmasına karşın onarım oranları (%49, %33) için bu fark %16’dır.

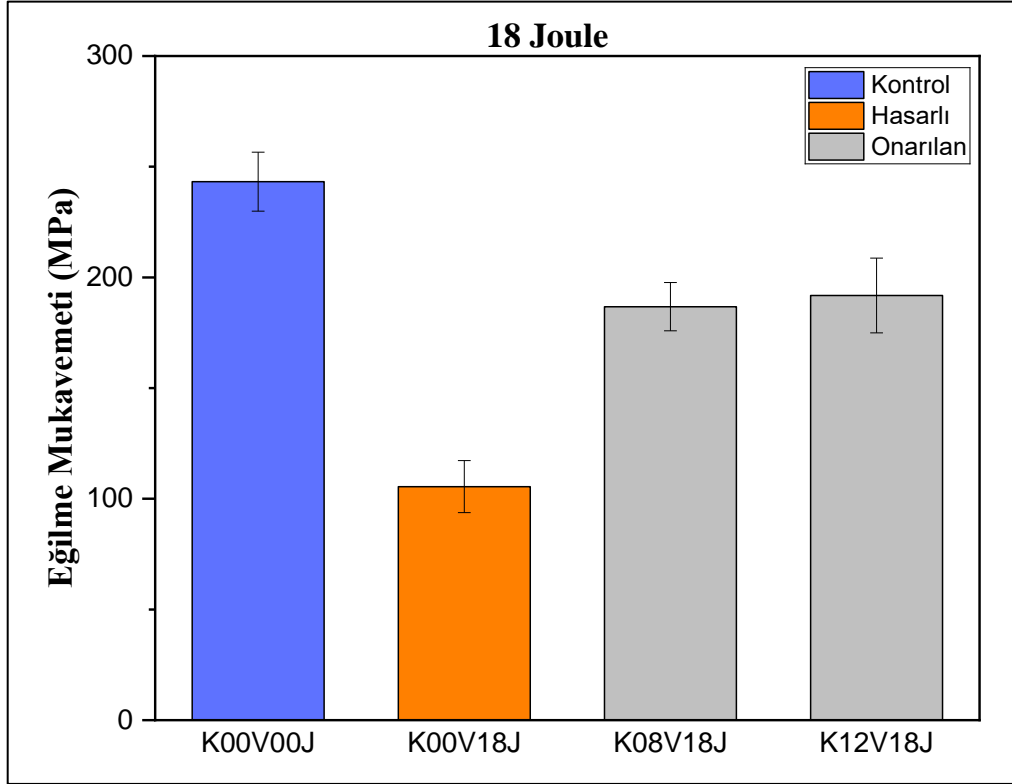


Şekil 5.6: 12 joule hasar uygulanan numunelerin eğilme mukavemetleri.

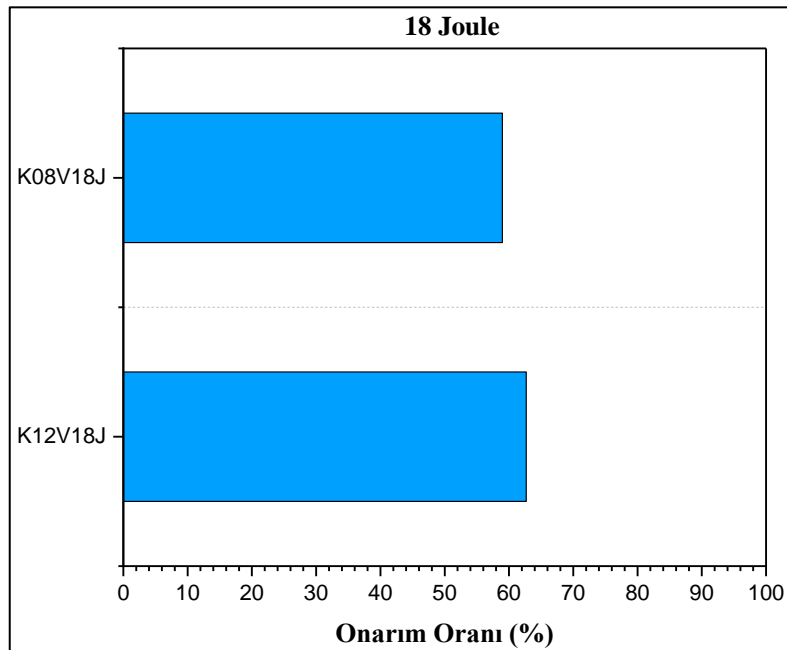


Şekil 5.7: 12 joule hasar uygulanan numunelerin onarıcı ajan hacmine göre onarım oranı.

18 joule hasar uygulanan numune gruplarına ait eğilme mukavemeti ve onarım oranları Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da verilmiştir. Numune gruplarının hem eğilme mukavemetleri hem de onarım oranları benzer seviyelerdedir.

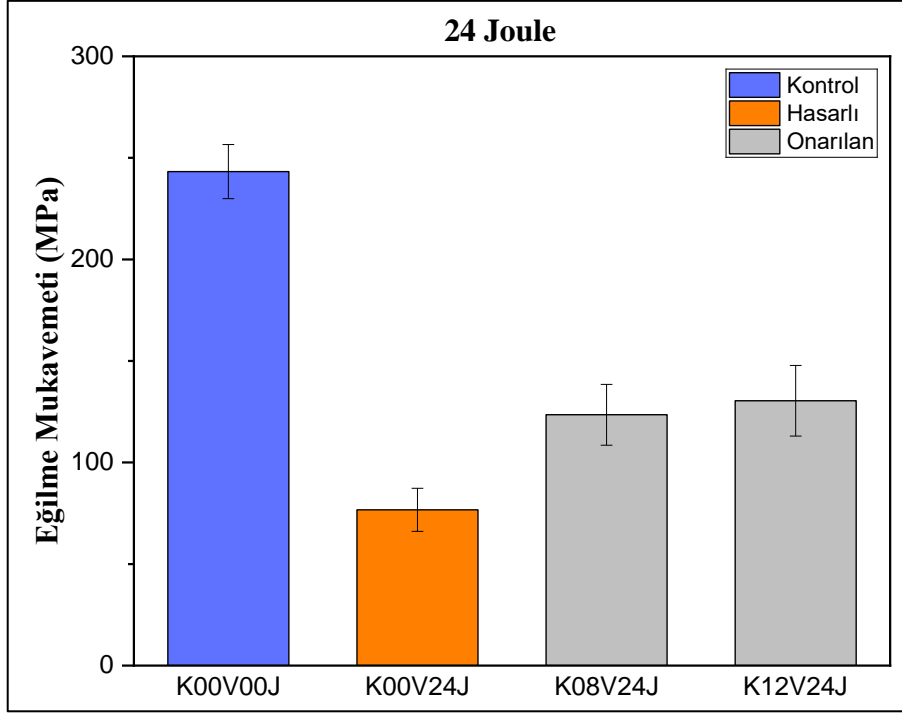


Şekil 5.8: 18 joule hasar uygulanan numunelerin eğilme mukavemetleri.

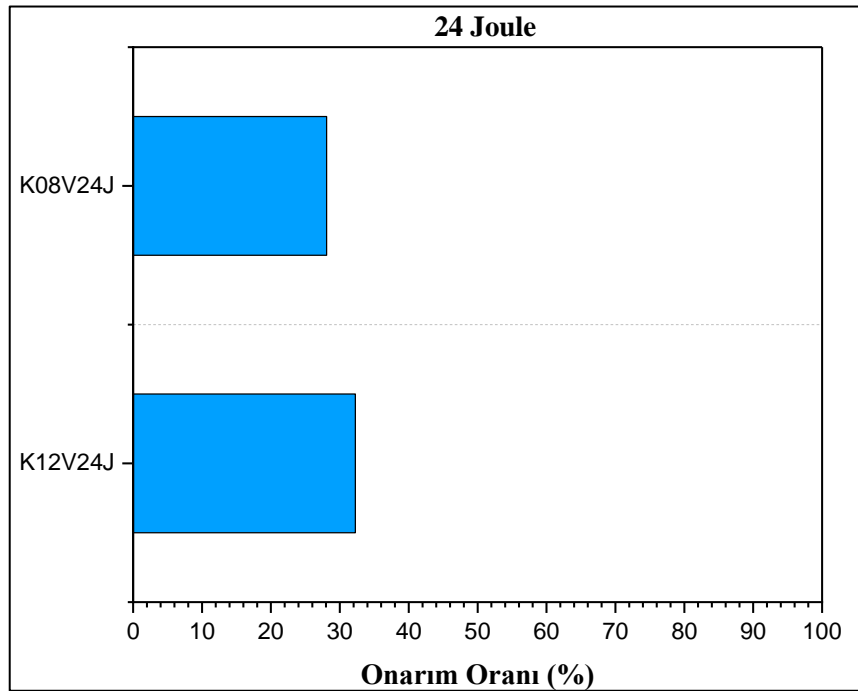


Şekil 5.9: 18 joule hasar uygulanan numunelerin onarıcı ajan hacmine göre onarım oranı.

24 joule hasar uygulanan numune gruplarına ait eğilme mukavemeti ve onarım oranları Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de verilmiştir. Numune gruplarının eğilme mukavemetleri benzer seviyelerde olmasına karşın %1.2 onarıcı ajan hacmine sahip numunede onarım oranı biraz da olsa daha iyi seviyededir.



Şekil 5.10: 24 joule hasar uygulanan numunelerin eğilme mukavemetleri.



Şekil 5.11: 24 joule hasar uygulanan numunelerin onarıcı ajan hacmine göre onarım oranı.

Şekil 5.2 ve Şekil 5.4 kullanılan onarıcı ajan hacimleri bakımından karşılaştırıldığında onarıcı ajan hacminin dolayısıyla vasküler kanal hacminin %0,8 veya %1,2 olmasının numunelerin eğilme mukavemetinde büyük bir fark yaratmadığı görülmektedir.

Çalışmada onarım oranları her darbe enerjisi grubunun ortalama eğilme mukavemetine göre hesaplanmıştır. Farklı darbe enerjilerinde farklı onarım oranları gözlenmiştir. En yüksek onarım oranı %62,68 ile 18 joule darbe uygulanmış %1,2 onarıcı ajan hacmine sahip numunelere aitken en düşük onarım oranı ise %28,09 ile 24 joule darbe verilen ve %0,8 onarıcı ajan hacmine sahip numunelere aittir. Onarım oranının 12 joule ve 24 joule hasara maruz kalan numunelerde 18 joule hasara maruz kalan numunelere göre daha düşük olmasının sebepleri bu iki grup için farklılık göstermektedir. 12 joule hasara maruz kalan numunelerde iç yapıda oluşan hasar diğer numunelere göre oldukça azdır. Kontrol numunelerinin eğilme mukavemetlerini baz aldığımızda yaklaşık 243 MPa'dan 176 MPa'a %28'lik bir düşüş söz konusudur. 18 joule hasar verilen numunelerde ise bu değer yaklaşık 105 MPa'a düşmektedir ki bu da eğilme mukavemetinde %57'lik bir düşüş demektir. En basit tabirle hasarlı bölge az olduğundan onarım oranı da düşüktür. Bu düşünce ile 24 joule hasar uygulanan numunelerde en yüksek onarım oranını gözlemlemeyi beklerken hem %0,8 (Şekil 5.3) hem de %1,2 (Şekil 5.5) onarıcı ajan hacminde en düşük onarım oranlarının ortaya çıktığı görülmektedir. Bunun sebebi 24 joule hasar uygulanan numunelerde görmeyi beklediğimiz çatlakların yanı sıra malzemenin delaminasyona uğramasıdır. Kullanılan onarıcı ajanın boşluk doldurma özelliği düşük olduğundan dolayı delaminasyona uğrayan numunelerde onarım oranı düşük kalmıştır ancak bu da düşük viskoziteli bir onarım ajan seçiminin sonucudur. Onarıcı ajan olarak daha yüksek viskoziteli bir ajan kullanılsaydı bu seferde çatlaklardaki kılcal hareket azalacağından yine onarım oranının düşük kalabileceği düşünülmektedir.

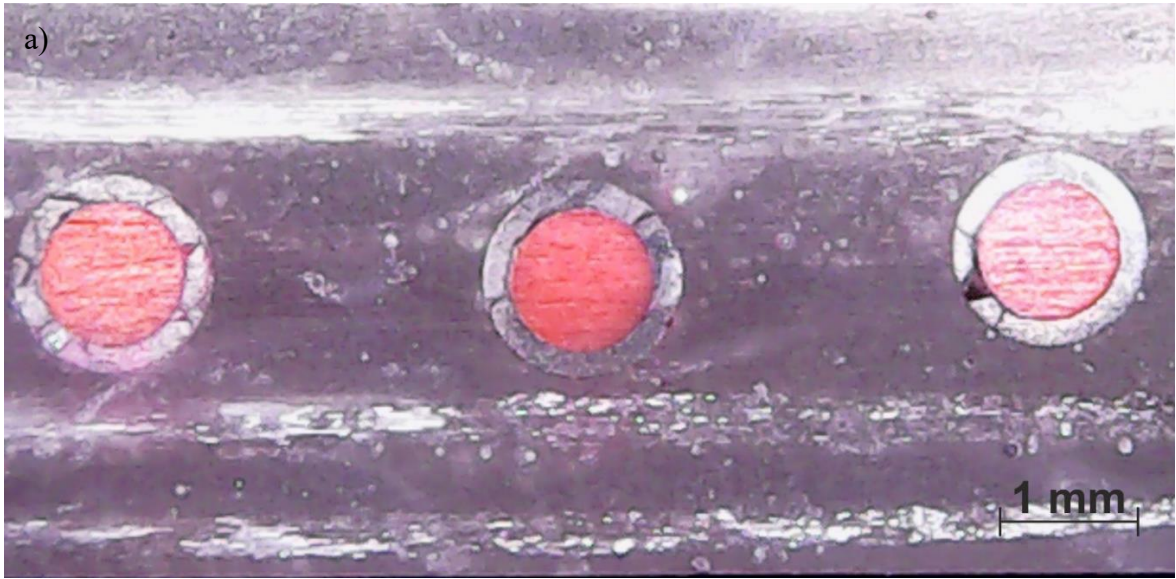
5.2 Makro ve Mikro Yapı İnceleme

Numunelerin eğilme mukavemetlerindeki artışın yanı sıra numunelerde gerçekleşen kendi kendini onarma süreci morfolojik analizlerle de incelenmiştir.

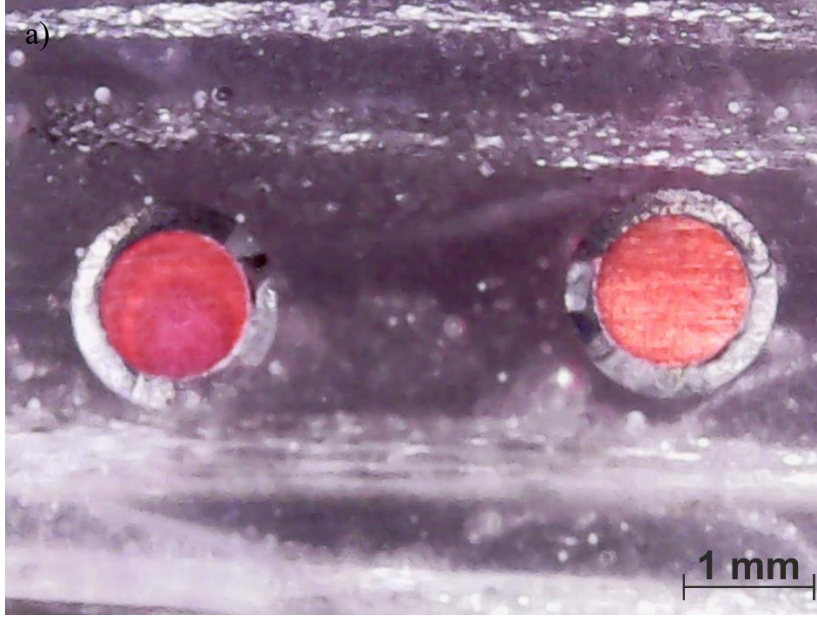
Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'de herhangi bir darbe uygulanmamış, hasar oluşturulmamış numunelere ait görüntüler verilmiştir. Bu numunelere darbe uygulanmadığından dolayı iç yapıda herhangi bir şekilde onarıcı ajan dağılımı gözlenmemektedir. Dijital mikroskop

görüntülerinden görüldüğü üzere onarıcı ajan madde vasküler kanal içerisinde mevcudiyetini korumaktadır.

Stearik asit-hekzan çözeltisi kullanılmadan önce yapılan ön çalışmalarda vasküler kanalların varlığından dolayı vasküler kanallar çevresinde matriste boşluklar gözlenmiştir. Bu boşlukların zayıf reçine-cam arayüzeyinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Stearik asit-hekzan çözeltisi kullanılarak üretilen numunelerde vasküler kanalların çevresinde boşluk oluşmadığı Şekil 5.12 ve Şekil 5.13’de görülmektedir.

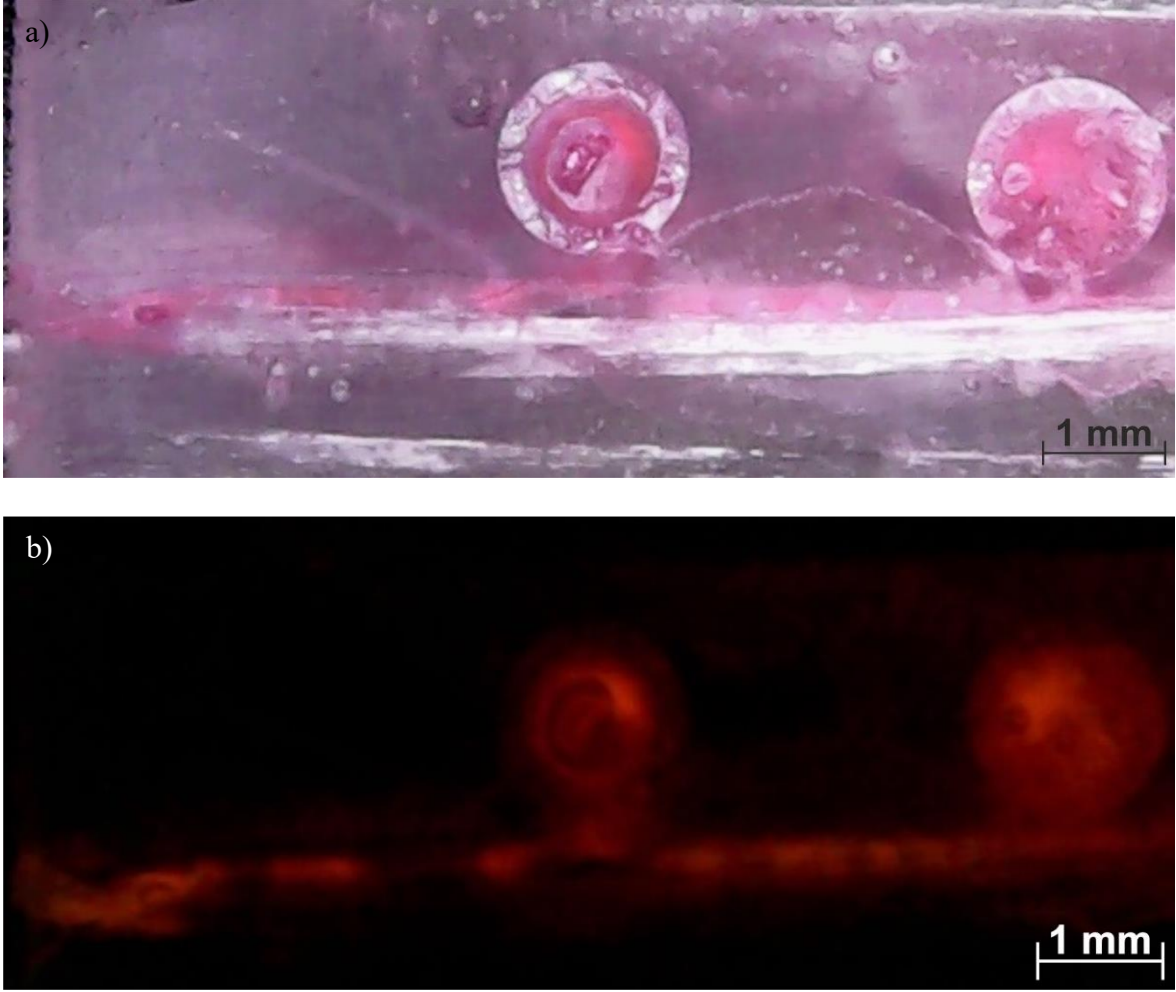


Şekil 5.12: Kontrol numunesine ait kesit görüntüsü a) Dijital mikroskop görüntüsü b) UV ışık altında dijital mikroskop görüntüsü.



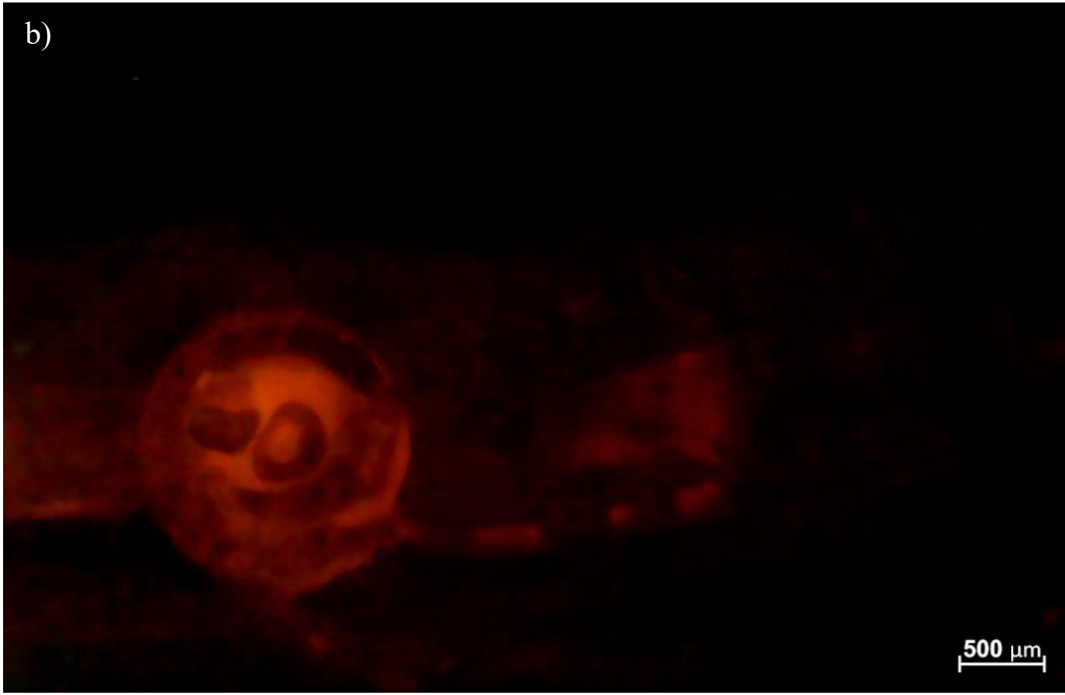
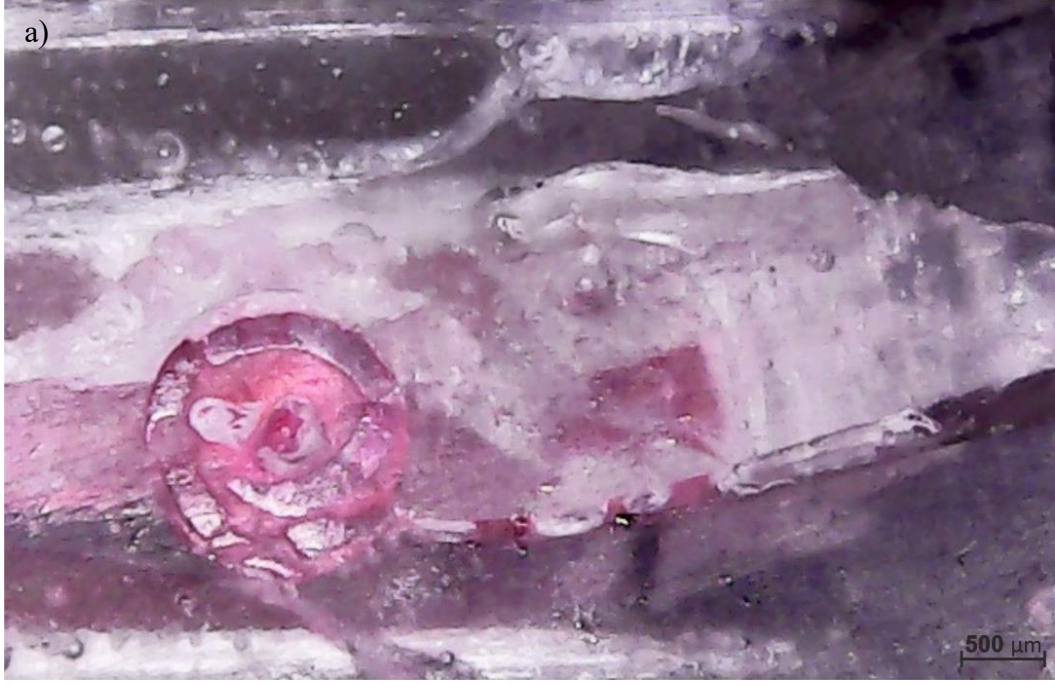
Şekil 5.13: Kontrol numunesine ait kesit görüntüsü a) Dijital mikroskop görüntüsü b) UV ışık altında dijital mikroskop görüntüsü.

Şekil 5.14’de 12 joule darbe uygulanmış numunede yaklaşık 10 cm uzunluğunda merkezden numunenin kenarına kadar ilerlemiş enine bir çatlak gözlemlenmektedir. Dijital mikroskop görüntüsünde belirlenen çatlak ve onarıcı ajan dağılımı UV ışık kaynağı ile birlikte de desteklenmiştir. Çatlak sonucunda numunenin kenar bölgesinde matriste kırılma gözlemlense de delaminasyon gözlemlenmemiştir.

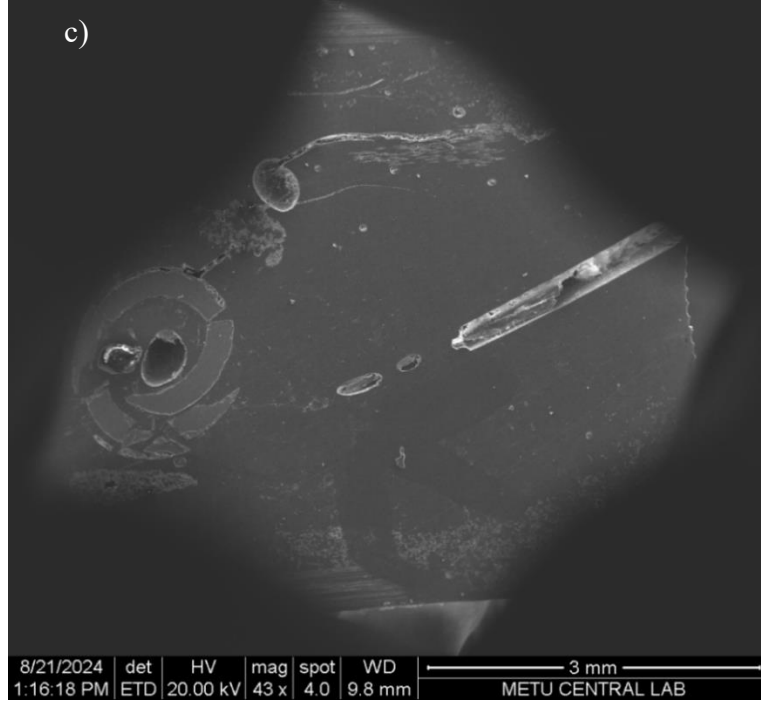


Şekil 5.14: 12 Joule darbe uygulanmış numune kesiti a) Dijital mikroskop görüntüsü b) UV ışık altında dijital mikroskop görüntüsü.

Şekil 5.15'te 18 joule darbe uygulanmış bir numune kesitinin dijital mikroskop ve SEM ile elde edilen görüntüleri verilmiştir. Dijital mikroskop görüntüsünde (Şekil 5.15 a) birçok çatlak oluşumu görülmektedir. Bazı çatlaklara onarıcı ajan dağılmışken bazı çatlaklarda dağılım gözlemlenmemiştir. İlgili görüntüye göre vasküler kanalın sağ alt kısmından başlayan 4 mm uzunluğunda 0,2 mm genişliğindeki çatlağın 0,3mm ye kadar genişleyerek numunenin kenarına ulaştığı görülmektedir. UV ışık altında da daha net görüldüğü üzere (Şekil 5.15 b) bu çatlak üzerinde de kısmi olarak bir onarım söz konusudur. Ayrıca numune kesitinin arkasında kalan bölgelerde de dikey olarak oluşan çatlaklarda onarıcı ajan dağılımı gözlemlenmiştir. SEM görüntüleri (Şekil 5.15 c) ve dijital mikroskop görüntüleri (Şekil 5.15 a-b) karşılaştırıldığında kesit yüzeyinde görülen vasküler kanalın tam alt tarafındaki çatlağın tamamen onarıldığı, 4 mm uzunluğundaki çatlağın ise kısmi olarak onarılmış olduğu SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır.

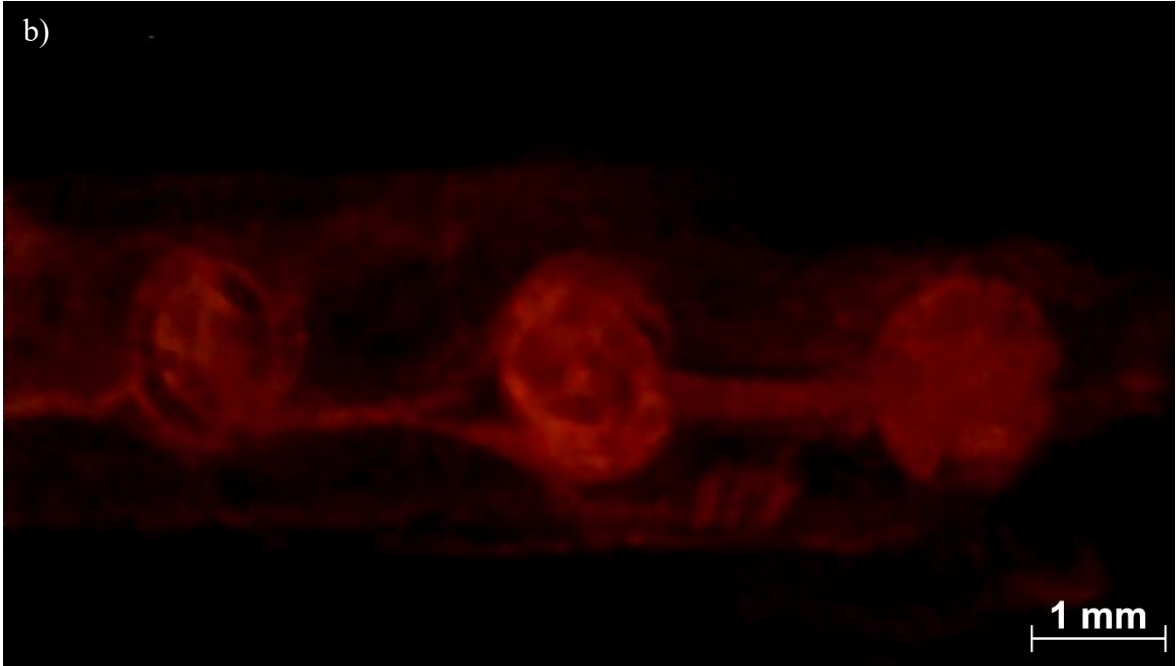
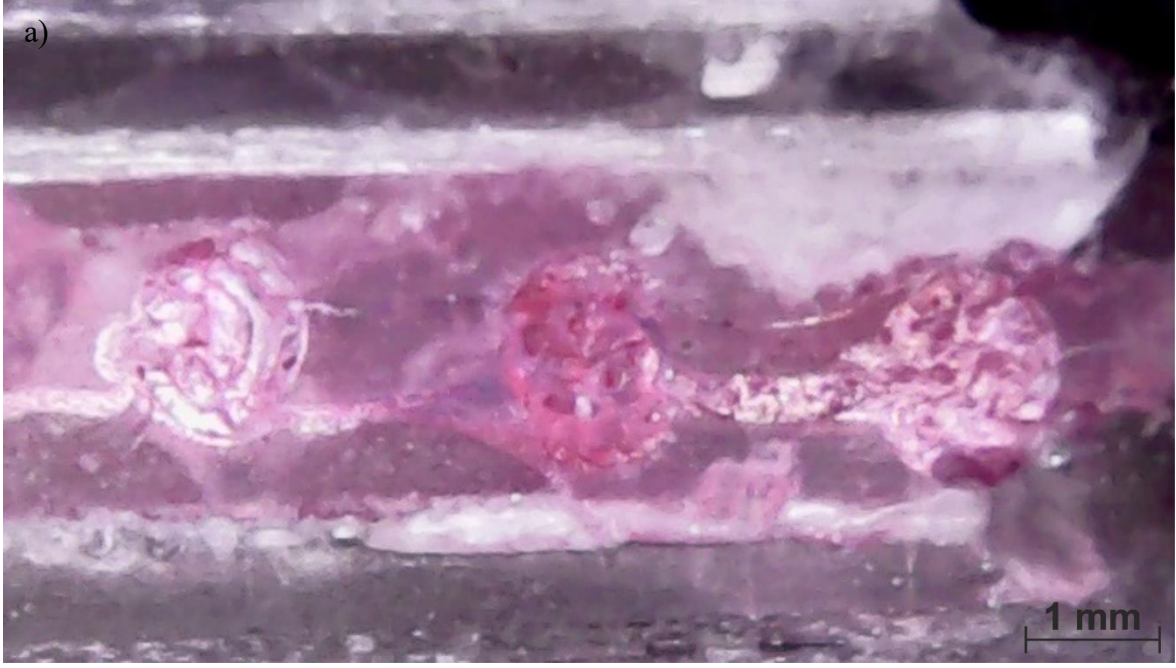


Şekil 5.15: 18 Joule darbe uygulanmış numune kesiti a) Dijital mikroskop görüntüsü b) UV ışık altında dijital mikroskop görüntüsü c) SEM görüntüsü.



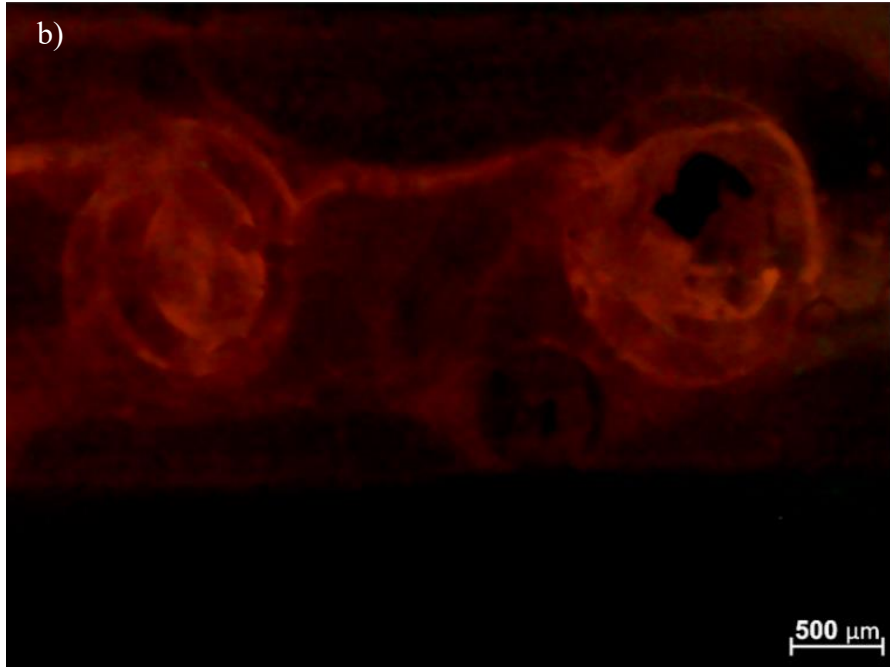
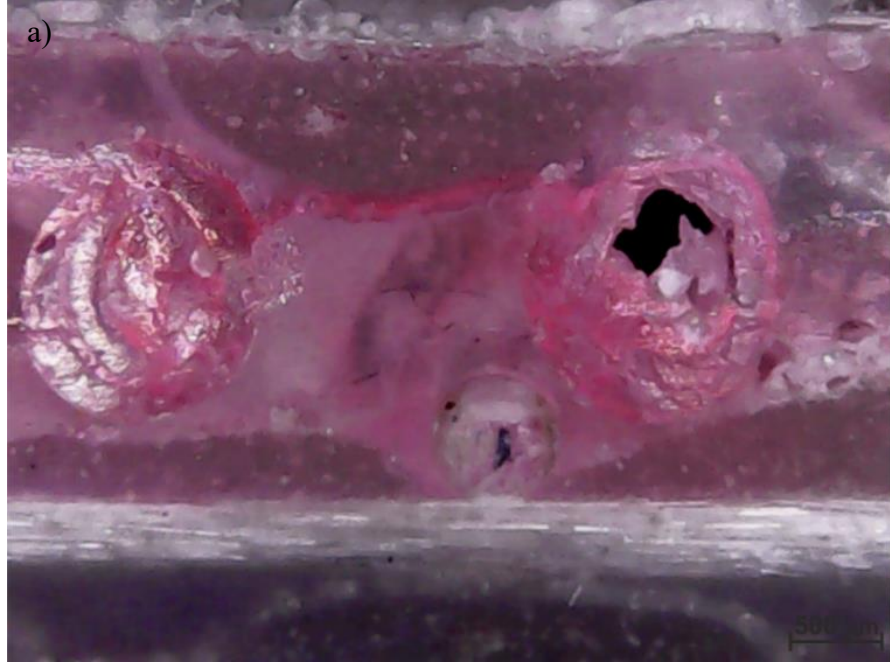
Şekil 5.15 (devam): 18 Joule darbe uygulanmış numune kesiti a) Dijital mikroskop görüntüsü b) UV ışık altında dijital mikroskop görüntüsü c) SEM görüntüsü.

Şekil 5.16'da 24 Joule hasar uygulanmış numuneden alınan dijital mikroskop görüntülerindeki vasküler kanalların arasında çatlaklar oluştuğu ve bu çatlaklara onarıcı ajan yerleşimi açıkça görülmektedir.

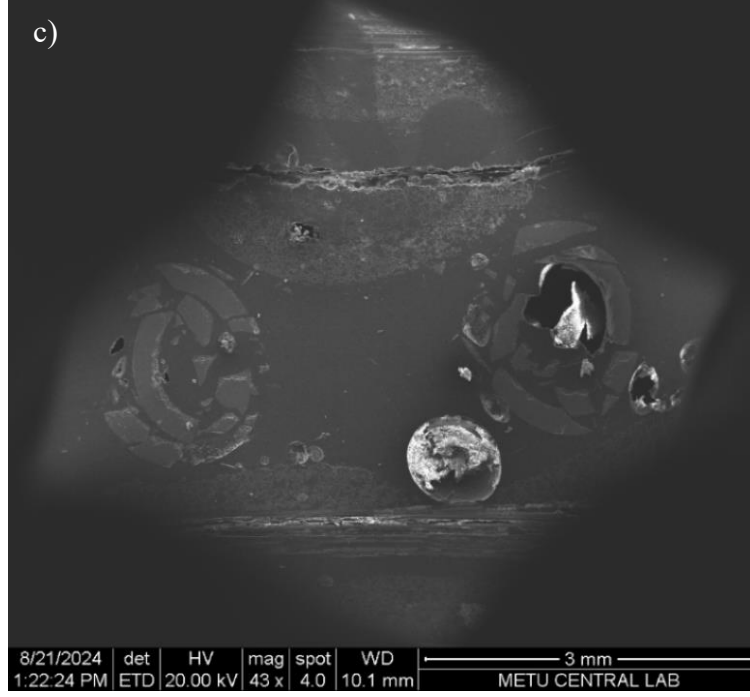


Şekil 5.16: 24 Joule hasar uygulanmış numune kesiti a) Dijital mikroskop görüntüsü b) UV ışık altında dijital mikroskop görüntüsü.

Şekil 5.17’de 24 Joule hasar uygulanmış numunede iki vasküler kanal arası çıplak gözle bile çok net görülebilen bir çatlak oluşumu gözlenmiştir. Şekilde görülen sağ taraftaki vasküler kanalın içinde bulunan onarıcı ajanın neredeyse boşaldığı, hasarlı bölgeye yayılmış olduğu görülmektedir.

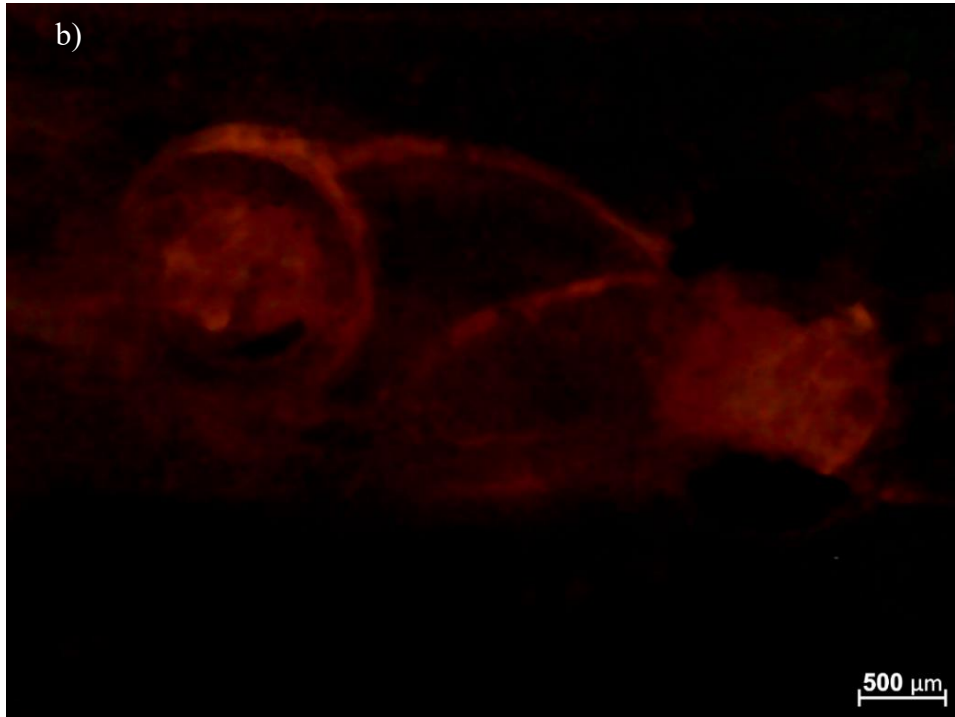
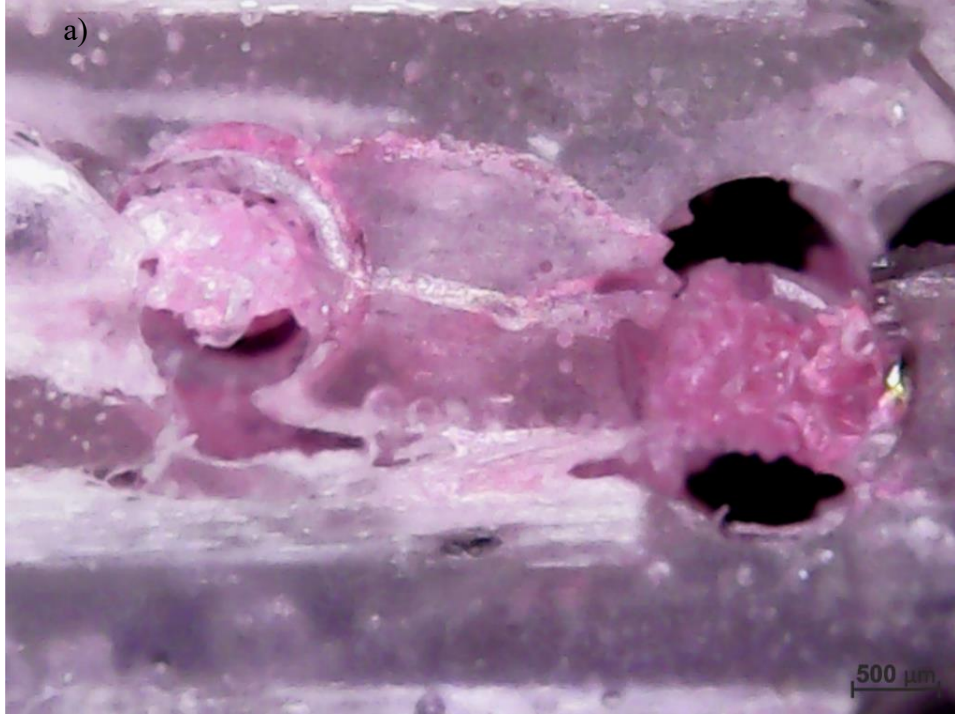


Şekil 5.17: 24 Joule hasar uygulanmış numune kesiti a) Dijital mikroskop görüntüsü b) UV ışık altında dijital mikroskop görüntüsü c) SEM görüntüsü.



Şekil 5.17 (devam): 24 Joule hasar uygulanmış numune kesiti a) Dijital mikroskop görüntüsü b) UV ışık altında dijital mikroskop görüntüsü c) SEM görüntüsü.

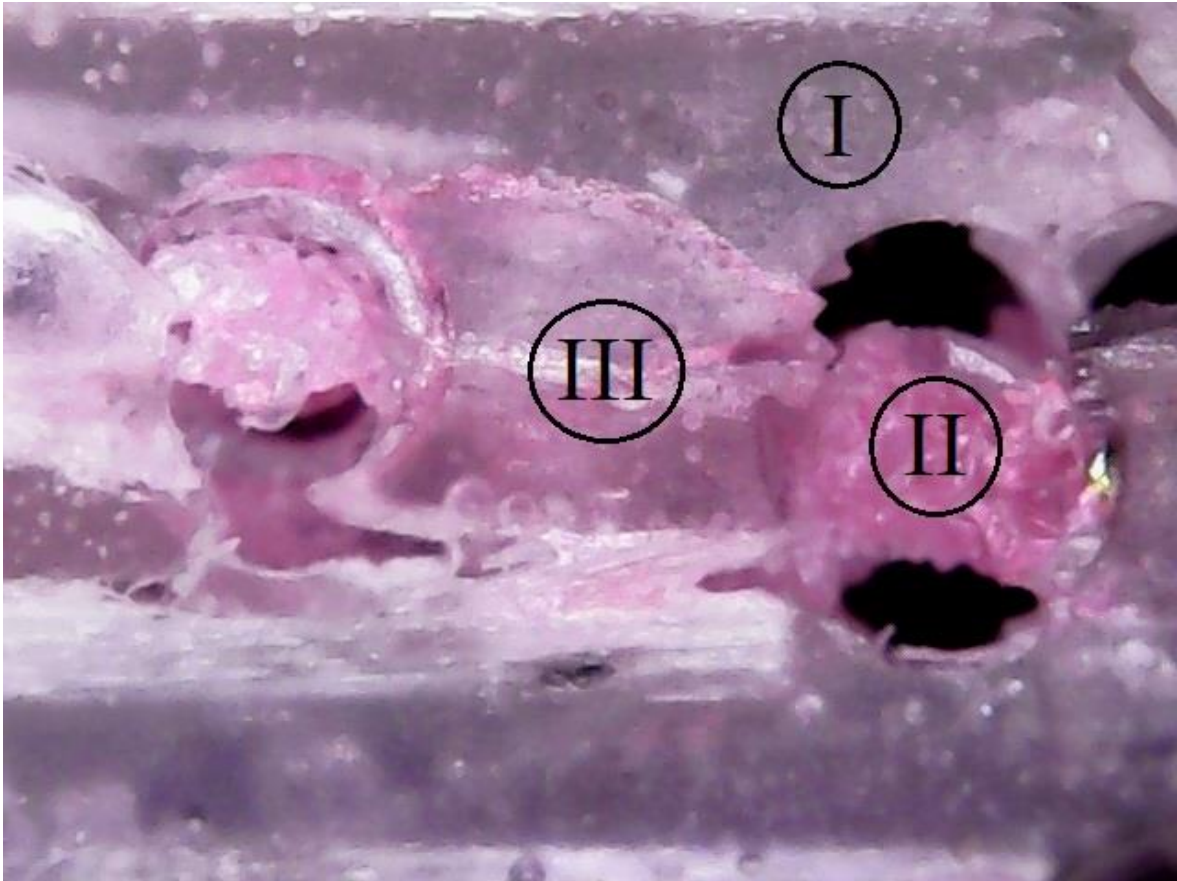
Şekil 5.18'de de diğer numune kesitlerinde olduğu gibi çatlaklar ve onarıcı ajan dağılımı görülmektedir. Ancak bu numune kesitinde vasküler kanalların formu ciddi şekilde bozulmuş ve iç yapıda boşluklara sebep olmuştur. Burada oluşan hasar oldukça fazladır. Bunun sebebi bu numune kesitindeki görüntülerin numunenin merkezinden alınması yani bir diğer deyişle ağırlık düşürme testinde en fazla hasar gören bölgeden alınmış olmasıdır.



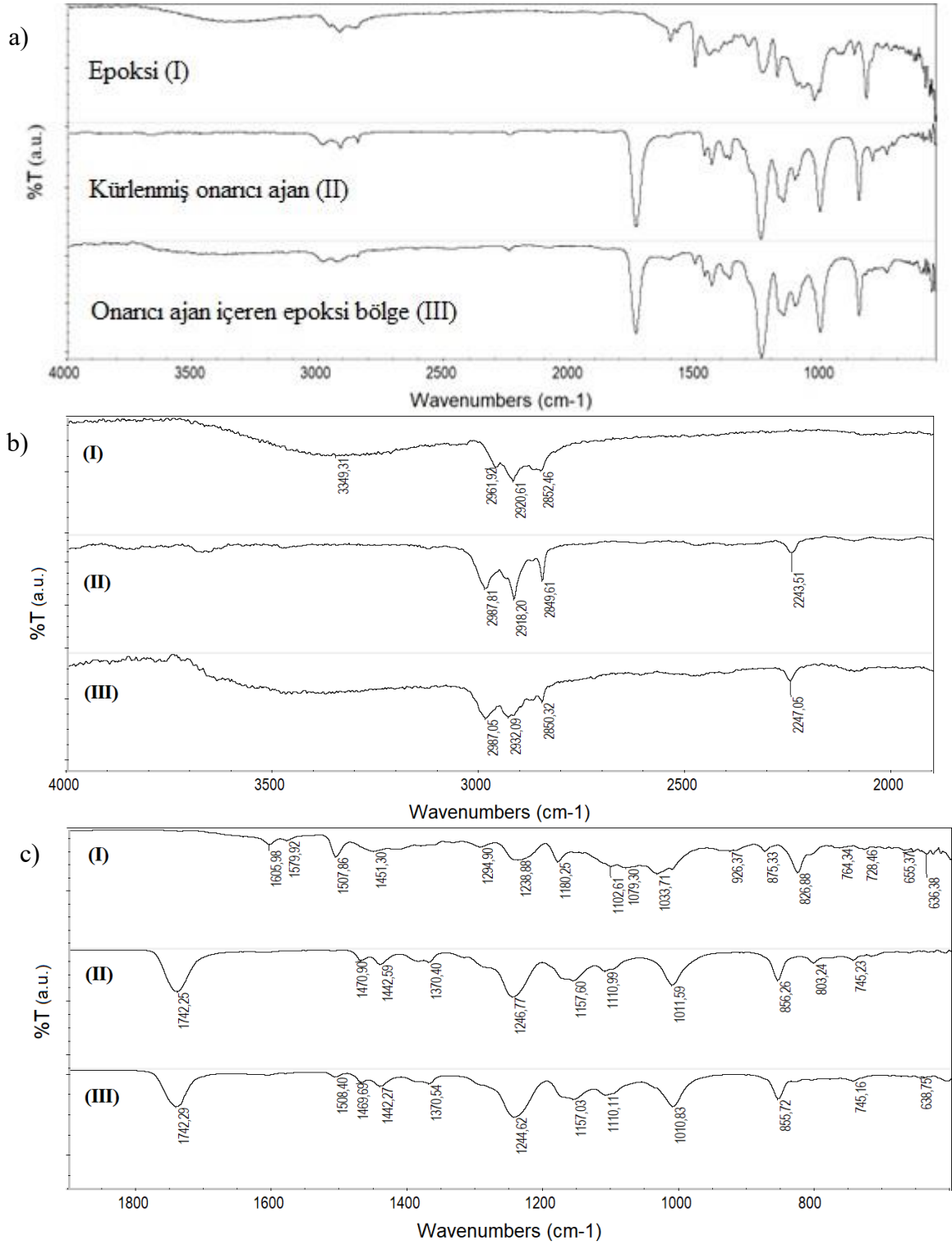
Şekil 5.18: 24 Joule hasar uygulanmış numune kesiti a) Dijital mikroskop görüntüsü b) UV ışık altında dijital mikroskop görüntüsü.

5.3 FTIR Analizi

Çalışmada onarıcı ajanın numune içinde dağılımı yapısal analizlerle de incelenmiştir. Bu sebeple Şekil 5.19’da gösterilen bölgelerde FTIR analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.19’da görüleceği üzere 1 numaralı bölge matris malzemesi olan kürlenmiş epoksiyi, 2 numaralı bölge onarıcı ajanı, 3 numaralı bölge ise çatlak bölgesi olup epoksi ve onarıcı ajan karışımını içeren yüzeyi temsil etmektedir. Bu bölgelere ait FTIR spektrumları Şekil 5.20’de verilmiştir.



Şekil 5.19: FTIR analizlerinin yapıldığı bölgeler.



Şekil 5.20: Epoksi Matris (I), onarıcı ajan (II) ve onarıcı ajan içeren matris bölgeye (III) ait FTIR spektrumları a) 600-4000 cm⁻¹ b) 1800-4000 cm⁻¹ c) 600-1800 cm⁻¹.

Şekil 5.20’de verilen matris (I), onarıcı ajan (II) ve kompozit yapıda onarıcı ajan içeren matris bölgeye (III) ait FTIR spektrumları karşılaştırıldığında; III no’lu bölgede epoksiden gelen -O-H grubuna ait 3000-3700 arasındaki geniş bandın, 2800-3000 cm^{-1} aralığında CH, CH₂ ve CH₃ gruplarına ait titreşimlere ve 1451, 1508, 1580 ve 1606 cm^{-1} ’de epoksideki aromatik halkanın C-C gerilme titreşimlerine [81] ait piklerin yer aldığı görülmektedir. Onarıcı ajandan gelen temel pikler ise 2244 cm^{-1} ’de C≡N, 1742 cm^{-1} ’de C=O, 1247 cm^{-1} ’de C-O-C[82] ve 1012 cm^{-1} ’de C-O gerilmelerini içermektedir. Onarıcı ajan içeren matris bölgesinde gözlenen C-O-C piki (1245 cm^{-1}), onarıcı ajana göre az da olsa daha düşük dalga sayısına kayarken, C≡N piki daha yüksek dalga sayısına (2243,51 cm^{-1} →2247,05 cm^{-1}) kaymıştır. Bunun yanı sıra ilgili matris bölgesinde 2930 cm^{-1} civarında yeni C-H piklerinin varlığı gözlenmektedir. Bu bulgular, kompozitte onarıcı ajan ve epoksi içeren bölgenin hem epoksiden hem de onarıcı ajandan daha farklı bir yapıya sahip olduğunu ve epoksinin onarıcı ajan ile etkileşime girdiğini göstermektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

-Cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerde kendi kendini onarma özelliği oda sıcaklığında vasküler kanallar ve vasküler kanalların içindeki tek fazlı onarıcı ajan madde etil-2-siyanoakrilat aracılığıyla başarıya ulaşmıştır.

-Maksimum onarım oranı %1,2 onarıcı ajan hacmi ve 18 joule darbe enerjisi uygulanarak hasara maruz kalan numunede %62,68 olarak, minimum onarım oranı ise %0,8 onarıcı ajan hacmi ve 24 joule darbe enerjisi uygulanan numunede gözlenmiştir.

-Numunelere uygulanan darbe enerjisi ile eğilme mukavemetleri arasında ters orantı gözlenmiştir. Darbe enerjisi ile onarım oranı arasında ise beklenildiği gibi bir noktaya kadar doğru orantı görülmüştür ancak hasar oranı arttığında, 24 joule darbe uygulanan numunelerde olduğu gibi delaminasyon seviyesinde yüksek hasar gözlemlendiğinden onarım oranı düşmüştür.

-Çalışmada kullanılan onarıcı ajan hacimlerinin numunelerin eğilme mukavemetinde ve onarım oranlarında büyük bir fark yaratmadığı gözlenmiştir.

-Vasküler kanalların varlığından dolayı oluşan zayıf cam-reçine arayüzü ve bu sebeple oluştuğu düşünülen boşluklu malzeme yapısı, vasküler kanalların stearik asit-hekzan çözeltisi kaplanmasıyla aşılmış ayrıca vasküler kanalların bulunduğu numunelerde eğilme mukavemetinde bir miktar artış gözlenmiştir.

-Kendi kendini onarma sürecinin sonuçları numune kesiti üzerinden dijital mikroskop, SEM görüntüleri ve FTIR analizleri ile desteklenmiştir.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda bundan sonra yapılacak çalışmalarla ilgili sunulan öneriler aşağıda belirtilmiştir:

-Onarıcı ajanın boşluk doldurma özelliği az olduğundan özellikle çalışmada kullanılan 24 Joule darbe enerjisi gibi yüksek hasarlarda oluşan büyük çatlaklar tamamen kapanmamıştır.

Bu sebeple yine oda sıcaklığında k rleŖen, viskozitesi d Ŗ k farklı bir onarıcı ajan araŖtırılabilir.

-Onarıcı ajan hacminin kendi kendini onarma sürecindeki etkisini daha iyi araŖtırabilmek için daha k  k vasküler kanallarla birlikte birbirinden hacim olarak daha farklı parametreler kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] C. Dry, “Passive Tuneable Fibers and Matrices”, *Int. J. Mod. Phys. B*, c. 06, sayı 15&16, ss. 2763–2771, 1992.
- [2] C. Dry ve W. McMillan, “Three-part methacrylate adhesive system as an internal delivery system for smart responsive concrete”, *Smart Mater. Struct.*, c. 5, sayı 3, ss. 297–300, 1996.
- [3] C. Dry, “Procedures developed for self-repair of polymer matrix composite materials”, *Compos. Struct.*, c. 35, sayı 3, ss. 263–269, 1996.
- [4] M. Motuku, G. M. Janowski ve U. K. Vaidya, “Self-Repairing Approaches for Resin Infused Composites Subjected To Low Velocity Impact”, *ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo. Proc.*, c. 8, ss. 623–638, 1999.
- [5] S. M. Bleay, C. B. Loader, V. J. Hawyes, L. Humberstone ve P. T. Curtis, “A smart repair system for polymer matrix composites”, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, c. 32, sayı 12, ss. 1767–1776, 2001.
- [6] J. W. C. Pang ve I. P. Bond, “‘Bleeding composites’ - Damage detection and self-repair using a biomimetic approach”, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, c. 36, sayı 2 SPEC. ISS., ss. 183–188, 2005.
- [7] J. W. C. Pang ve I. P. Bond, “A hollow fibre reinforced polymer composite encompassing self-healing and enhanced damage visibility”, *Compos. Sci. Technol.*, c. 65, sayı 11–12, ss. 1791–1799, 2005.
- [8] R. S. Trask ve I. P. Bond, “Biomimetic self-healing of advanced composite structures using hollow glass fibres”, *Smart Mater. Struct.*, c. 15, sayı 3, ss. 704–710, 2006.
- [9] R. S. Trask, G. J. Williams ve I. P. Bond, “Bioinspired self-healing of advanced composite structures using hollow glass fibres.”, *J. R. Soc. Interface*, c. 4, sayı 13, ss. 363–71, Nis. 2007.
- [10] A. P. Esser-Kahn vd., “Three-dimensional microvascular fiber-reinforced composites”, *Adv. Mater.*, c. 23, sayı 32, ss. 3654–3658, 2011.
- [11] C. J. Norris, I. P. Bond ve R. S. Trask, “Healing of low-velocity impact damage in vascularised composites”, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, c. 44, sayı 1, ss. 78–85, 2013.
- [12] N. K. Mehta, “Self-healing Fiber-reinforced Epoxy Composites: Solvent-epoxy Filled Hollow Glass Fibers”, *Int. J. Compos. Mater.*, c. 3, sayı 6, ss. 145–155, August, 2013.

- [13] Y. Zhu, X. J. Ye, M. Z. Rong ve M. Q. Zhang, “Self-healing glass fiber/epoxy composites with polypropylene tubes containing self-pressurized epoxy and mercaptan healing agents”, *Compos. Sci. Technol.*, c. 135, ss. 146–152, 2016.
- [14] Y. Wang *vd.*, “Sustainable self-healing at ultra-low temperatures in structural composites incorporating hollow vessels and heating elements”, *R. Soc. Open Sci.*, c. 3, sayı 9, 2016.
- [15] K. R. Hart *vd.*, “Repeated healing of delamination damage in vascular composites by pressurized delivery of reactive agents”, *Compos. Sci. Technol.*, c. 151, ss. 1–9, 2017.
- [16] M. A. Mohammadi, R. Eslami-Farsani ve H. Ebrahimnezhad-Khaljiri, “Experimental investigation of the healing properties of the microvascular channels-based self-healing glass fibers/epoxy composites containing the three-part healant”, *Polym. Test.*, c. 91, sayı September, s. 106862, 2020.
- [17] Y. Şahin, *Kompozit malzemelere giriş*, 3.Baskı. Seçkin Yayıncılık, 2015.
- [18] A. A. A. H. Al-Shawk, “Meso-scale finite element modeling of microvascular channels in composites”, Master Thesis, University Of Turkish Aeronautical Association Institute Of Sciences and Technology, 2017.
- [19] D. Asi, “Polimer matrisli kompozit malzemelerde ilave olarak kullanılan parçacıkların geometrisinin kompozit malzemelerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerine etkisinin araştırılması”, Doktora Tezi, Uşak Üniversitesi, Uşak, 2018.
- [20] H. Yıldırım, “Değişik kompozit malzemelerin mekanik davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2009.
- [21] K. Erbay, “Silah gövdeleri için polimer esaslı kompozit malzeme üretimi ve özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2009.
- [22] M. E. Deniz, “Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ve ısı ile işleme presleme tekniğini kullanarak kompozit malzeme üretecek bir düzeneğin tasarım ve imalatı”, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, 2005.
- [23] S. Fidan, “Polimer matrisli kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi ve oluşan hasarların mikro tomografi yöntemiyle incelenmesi”, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 2011.
- [24] M. Bağcı, “Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin erozyon aşınma davranışının incelenmesi”, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 2010.
- [25] A. Şanlıtürk, “Doğal Parçacıklar İle Takviye Edilmiş Polimer Matrisli Kompozitlerin Deneysel Ve Hesaplamalı Mekanik Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal

- Bayar Üniversitesi, Manisa, 2022.
- [26] M. C. Şenel, M. Gürbüz ve E. Koç, “Toz Metalürjisi Metoduyla Üretilen Al-Si₃N₄ Metal Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Mühendis ve Makina*, c. 59, sayı 693, ss. 33–46, 2018.
- [27] A. Kalemtaş, “Seramik matrisli kompozit malzemeler”, *Putech Compos.*, sayı April, ss. 20–26, 2015.
- [28] E. Köseadağ ve R. Ekici, “Partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin darbe davranışları üzerine bir derleme”, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, c. 8, sayı 1, ss. 384–393, 2019.
- [29] B. Bülbül, “Al-Ni/GO ve Al-Ni/TiO₂ Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi, Batman, 2020.
- [30] A. Kabil, “Bor karbür takviyeli metal matrisli kompozit malzeme üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2020.
- [31] M. Aydın, “Plazma elektrolitik oksidasyon yönteminin Al/Al₂O₃ metal matrisli kompozit malzemelere uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, 2018.
- [32] C. Yolcu, “Metal matrisli kompozitlerin farklı dövme yöntemleri ile dövülerek yüzey özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2018.
- [33] İ. Aritman, “Soğuk izostatik presleme ile üretilen Al/SiCp metal matrisli kompozitlerde faktör etkileşimlerinin mekanik özelliklere etkisi ve karakterizasyon çalışmaları”, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, 2014.
- [34] İ. Kayabaşı, “Metal matrisli kompozit malzeme üretim sistemi imalatı ve performansının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, 2016.
- [35] M. Koral, “5052 alüminyum alaşım oranı 0,6 olan metal matrisli kompozit malzeme ile mekanik araç krikosu gerilme analizi ve taguchi metodu”, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osman Gazi Üniversitesi, Eskişehir, 2018.
- [36] P. S. Sahu ve R. Banchhor, “Fabrication methods used to prepare Al metal matrix composites- A review”, *Int. Res. J. Eng. Technol.*, c. 03, sayı 10, ss. 123–132, 2016.
- [37] M. Patel, B. Pardhi, D. Prasad Sahu ve S. K. Sahu, “Different Techniques Used for Fabrication of Aluminium Metal Matrix Composites”, *Int. J. Eng. Tech.*, c. 7, sayı 1, 2021.

- [38] S. Dhanasekar *vd.*, “A Comprehensive Study of Ceramic Matrix Composites for Space Applications”, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, c. 2022, 2022.
- [39] A. Kalemtaş, “Seramik matrisli kompozit malzemeler”, *Putech Compos.*, c. April, May, ss. 20–26, 2015.
- [40] S. Tülbez, “Processing and characterization of carbon fiber reinforced silicon carbide (CC-SiC) matrix composites”, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 2015.
- [41] A. Indurkar, R. Choudhary, K. Rubenis ve J. Locs, “Advances in sintering techniques for calcium phosphates ceramics”, *Materials (Basel)*., c. 14, sayı 20, 2021.
- [42] A. Işık, “Kompozit malzemeden imal edilmiş bir takviye elemanının eğilme ve burulma yükü altında deneysel ve sayısal olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2008.
- [43] M. Azeem *vd.*, “Application of Filament Winding Technology in Composite Pressure Vessels and Challenges: A Review”, *J. Energy Storage*, c. 49, sayı August 2021, 2022.
- [44] S. Kabave Kılınçarslan, “Polimer matrisli kemik tozu takviyeli kompozit malzemelerin üretimi, karakterizasyonu ve tribolojik performansının incelenmesi”, Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, 2023.
- [45] H. Dinkci, “Vakum torbalamada basınç değişkeninin karbon elyaf matrisli epoksi yapılarda estetik ve mekanik özelliklere etkisi”, *Int. J. Sci. Technol. Des.*, c. 1, sayı 1, 2020.
- [46] S. Altunç, “Vakum infüzyon ile üretilmiş parçacık takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2023.
- [47] Ç. Subaşı, “Vakum infüzyon yöntemi ile Karbon/H-BNNS modifiyeli epoksi kompozit malzeme üretimi ve karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, 2022.
- [48] A. İpekçi, “Production of continuous fiberglass reinforced UV-curable polymer matrix composite material with 90 degree elbow products by robotic additive manufacturing”, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, 2022.
- [49] M. Tay, “Farklı açılarla sarılmış cam elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitten üretilen silindirik çarpışma kutularının enerji sönümleyebilme kabiliyetlerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, 2023.
- [50] M. Bilge, “Polimer matris kompozit malzemelerde çeşitli bor bileşiklerinin katkısının

- mekanik ve termal özellikler üzerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2023.
- [51] G. Açıkbaş, “Seramik sağlık gereçlerine alternatif polimer matrisli kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve karakterizasyonu”, Doktora Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, 2016.
- [52] M. Arıcı, “Farklı fiber yönlerinde üretilen epoksi polimer matrisli karbon elyaf takviyeli kompozit borularda işlenebilirliğin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Düzce, 2023.
- [53] D. Wu, S. Meure ve D. Solomon, “Self-healing polymeric materials: A review of recent developments”, *Prog. Polym. Sci.*, c. 33, ss. 479–522, May. 2008.
- [54] M. Kessler, “Self-healing: A new paradigm in materials design”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part G-journal Aerosp. Eng. - PROC INST MECH ENG G-J A E*, c. 221, ss. 479–495, Nis. 2007.
- [55] P. S. Tan, A. A. Somashekar, P. CASARI ve D. Bhattacharyya, “Healing efficiency characterization of self-repairing polymer composites based on damage continuum mechanics”, *Compos. Struct.*, c. 208, ss. 367–376, Eyl. 2018.
- [56] M. Scheiner, T. Dickens ve O. I. Okoli, “Progress Towards Self-Healing Polymers for Composite Structural Applications”, *Polymer (Guildf)*., c. 83, ss. 260–282, Ara. 2015.
- [57] P. JE vd., “Manufacturing challenges in self-healing technology for polymer composites — a review”, *J. Mater. Res. Technol.*, c. 9, ss. 7370–7379, Tem. 2020.
- [58] B. Blaiszik, S. Kramer, S. Olugebefola, J. Moore ve N. Sottos, “Self-Healing Polymers and Composites”, *Annu. Rev. Mater. Res.*, c. 40, ss. 179–211, Haz. 2010.
- [59] D. Bekas, K. Tsirka, D. Baltzis ve A. Paipetis, “Self-healing materials: A review of advances in materials, evaluation, characterization and monitoring techniques”, *Compos. Part B Eng.*, c. 87, ss. 92–119, Eki. 2015.
- [60] A. Cohades, C. Branfoot, S. Rae, I. Bond ve V. Michaud, “Progress in Self-Healing Fiber-Reinforced Polymer Composites”, *Adv. Mater. Interfaces*, c. 5, sayı 17, ss. 1–20, 2018.
- [61] S. García, “Effect of polymer architecture on the intrinsic self-healing character of polymers”, *Eur. Polym. J.*, c. 53, ss. 118–125, Nis. 2014.
- [62] C. Hornat ve M. Urban, “Shape Memory Effects in Self-Healing Polymers”, *Prog. Polym. Sci.*, c. 102, s. 101208, Mar. 2020.

- [63] R. Araya Hermosilla *vd.*, “Intrinsic self-healing thermoset through covalent and hydrogen bonding interactions”, *Eur. Polym. J.*, c. 81, ss. 186–197, Haz. 2016.
- [64] I. Gadwal, “A Brief Overview on Preparation of Self-Healing Polymers and Coatings via Hydrogen Bonding Interactions”, *Macromol.*, c. 1, sayı 1. ss. 18–36, 2021.
- [65] A. Grande, R. Martin, I. Odriozola, S. Zwaag ve S. García, “Effect of the polymer structure on the viscoelastic and interfacial healing behaviour of poly (urea-urethane) networks containing aromatic disulphides”, *Eur. Polym. J.*, c. 97, ss. 120–128, Eki. 2017.
- [66] K. Pingkarawat, C. Dell’Olio, R. Varley ve A. P. Mouritz, “Poly(ethylene-co-methacrylic acid) (EMAA) as an efficient healing agent for high performance epoxy networks using diglycidyl ether of bisphenol A (DGEBA)”, *Polymer (Guildf.)*, c. 92, ss. 153–163, Mar. 2016.
- [67] I. Hia, V. Vahedi ve P. Pasbakhsh, “Self-Healing Polymer Composites: Prospects, Challenges and Applications”, *Polym. Rev.*, c. 56, ss. 225–261, Oca. 2016.
- [68] R. Varley, D. Craze, A. P. Mouritz ve C. Wang, “Thermoplastic Healing in Epoxy Networks: Exploring Performance and Mechanism of Alternative Healing Agents”, *Macromol. Mater. Eng.*, c. 298, ss. 1232–1242, Kas. 2013.
- [69] E. Erbayrak, “Termoplastik Takviyeli Epoksi Yapıştırıcıların Kendi-Kendini Onarma Davranışının Nümerik ve Deneysel Olarak Belirlenmesi”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2018.
- [70] S. Ünçe, “Kendi Kendini Onarabilen Polibenzoksazin Esaslı Nanokompozit Malzemelerin Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2019.
- [71] E. N. Brown, M. R. Kessler, N. R. Sottos ve S. R. White, “In situ poly(urea-formaldehyde) microencapsulation of dicyclopentadiene”, *J. Microencapsul.*, c. 20, sayı 6, ss. 719–730, 2003.
- [72] F. Mashkoo, S. J. Lee, H. Yi, S. M. Noh ve C. Jeong, “Self-Healing Materials for Electronics Applications”, *Int. J. Mol. Sci.*, c. 23, sayı 2, 2022.
- [73] M. Saeed, Z. Chen, ve B. Li, “Composites : Part A Manufacturing strategies for microvascular polymeric composites : A review”, *Compos. PART A*, c. 78, ss. 327–340, 2015.
- [74] C. M. Dry ve N. R. Sottos, “Passive smart self-repair in polymer matrix composite materials”, *Smart Struct. Mater. 1993 Smart Mater.*, c. 1916, sayı July 1993, ss. 438–444, 1993.

- [75] M. J. Hucker, I. P. Bond, S. Haq, S. Bleay ve A. Foreman, “Influence of manufacturing parameters on the tensile strengths of hollow and solid glass fibres”, *J. Mater. Sci.*, c. 37, sayı 2, ss. 309–315, 2002.
- [76] H. R. Williams, R. S. Trask ve I. P. Bond, “Self-healing sandwich panels: Restoration of compressive strength after impact”, *Compos. Sci. Technol.*, c. 68, sayı 15–16, ss. 3171–3177, 2008.
- [77] H. R. Williams, R. S. Trask ve I. P. Bond, “Self-healing composite sandwich structures”, *Smart Mater. Struct.*, c. 16, sayı 4, ss. 1198–1207, 2007.
- [78] K. R. Hart, E. D. Wetzel, N. R. Sottos ve S. R. White, “Self-healing of impact damage in fiber-reinforced composites”, *Compos. Part B Eng.*, c. 173, sayı February, s. 106808, 2019.
- [79] A. Kousourakis ve A. P. Mouritz, “The effect of self-healing hollow fibres on the mechanical properties of polymer composites”, *Smart Mater. Struct.*, c. 19, sayı 8, 2010.
- [80] G. Williams, R. Trask ve I. Bond, “A self-healing carbon fibre reinforced polymer for aerospace applications”, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, c. 38, sayı 6, ss. 1525–1532, 2007.
- [81] P. Rachtanapun *vd.*, “Effect of Plasma Treatment on Bamboo Fiber-Reinforced Epoxy Composites”, *Polymers (Basel)*, c. 16, sayı 7, 2024.
- [82] D. Li *vd.*, “Multifunctional Chemical Sensing Platform Based on Dual-Resonant Infrared Plasmonic Perfect Absorber for On-Chip Detection of Poly(ethyl cyanoacrylate)”, *Adv. Sci.*, c. 8, sayı 20, ss. 1–12, 2021.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Kutay Şirin

Doğum tarihi ve yeri : 30.04.1993- ÇANKAYA

e-posta : kutaysirinn@gmail.com

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Makine Mühendisliği	2024
Lisans	Balıkesir Üniversitesi/Makine Mühendisliği	2017
Lise	Ali Naili Erdem Anadolu Lisesi	2011