



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**KOROZİF ORTAMA MARUZ KARBON
NANOFİBER TAKVİYELİ KARBON ELYAF
NANOKOMPOZİTLERİN
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN VE DELAMİNASYON
HASARININ GÖRÜNTÜ İŞLEME
TEKNİKLERİ İLE İNCELENMESİ**

Ahmet Can GÜNGÖR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2026
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ahmet Can GÜNGÖR tarafından hazırlanan “Korozif Ortama Maruz Karbon Nanofiber Takviyeli Karbon Elyaf Nanokompozitlerin İşlenebilirliğinin ve Delaminasyon Hasarının Görüntü İşleme Teknikleri ile İncelenmesi” adlı tez çalışması 07/01/2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Engin ÖZÇELİK

.....

Danışman

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim DEMİRCİ bu tez çalışmasının ikinci danışmanıdır.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ahmet Can GÜNGÖR

Tarih: 07.01.2026

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOROZİF ORTAMA MARUZ KARBON NANOFİBER TAKVİYELİ KARBON ELYAF NANOKOMPOZİTLERİN İŞLENEBİLİRLİĞİNİN VE DELAMİNASYON HASARININ GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ İLE İNCELENMESİ

Ahmet Can GÜNGÖR

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

2025, 117 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

Prof. Dr. Engin ÖZÇELİK

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI

Bu çalışmada, karbon/epoksi (CFRP) ve CNF (karbon nanofiber) takviyeli karbon/epoksi kompozitlerin çekme, üç nokta eğme ve delme davranışları HCl (asidik) ve NaOH (bazik) ortamlara maruz bırakılmalarının ardından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Delme işlemleri, 2500-3000-3500 dev/dak iş mili devirlerinde ve 110-550 mm/dak ilerleme hızlarında, 5 mm TiN kaplı karbür matkap ucu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çıkış tarafındaki hasar, mikroskopi ve görüntü işleme ile elde edilen delaminasyon faktörü (F_d) ve düzeltilmiş delaminasyon faktörü (F_{da}) ile nicel olarak değerlendirilmiştir. Korozyon ortamlar hem mekanik performansı hem de işlenebilirliği önemli ölçüde etkilemiştir: Çekme ve üç nokta eğme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre, dayanıma bağlı en yüksek kuvvetler sırasıyla korozyona maruz kalmamış numunelerde, HCl ortamına maruz kalmış numunelerde ve NaOH ortamına maruz kalmış numunelerde elde edilmiştir. Ayrıca CNF takviyesi ile birlikte, tüm numunelerde aynı koşullar altında kuvvet artışları gerçekleşmiştir. Delme sırasında en düşük F_d/F_{da} değerleri 3500 dev/dak-110 mm/dak koşulunda, en yüksek değerler ise 2500 dev/dak-550 mm/dak koşulunda elde edilmiştir. Kritik koşul olan NaOH ortamı ve 550 mm/dak-2500 dev/dak kombinasyonunda, F_{da} takviyesiz numunede 1,126 iken CNF takviyeli numunede 1,054'e düşmüş ve yaklaşık %6-7'lik mutlak bir iyileşme sağlanmıştır. Bu kazanım, bariyer/tortuozite etkileri ile çatlak saptırma/köprüleme mekanizmalarını yansıtmakta ve delaminasyonu daha stabil, delme parametrelerine daha az duyarlı bir rejime kaydırmaktadır. Çalışma, asit/baz korozyonunun delme/mikroyapı etkileşimini tek çatı altında ilişkilendirerek çevresel koşullara özgü proses pencereleri için pratik bir çerçeve sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Asit-baz korozyonu, Delaminasyon faktörü (F_d, F_{da}), Delme, Görüntü işleme, Karbon nanofiber (CNF), Mekanik özellikler

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF MACHINABILITY AND DELAMINATION DAMAGE OF CARBON NANOFIBER REINFORCED CARBON FIBER NANOCOMPOSITES EXPOSED TO CORROSIVE ENVIRONMENT WITH IMAGE PROCESSING TECHNIQUES

Ahmet Can GÜNGÖR

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

2025, 117 Pages

Jury

Prof.Dr. Hüseyin ARIKAN
Prof.Dr. Engin ÖZÇELİK
Asst.Prof.Dr. Mehmet KAYRICI

In this study, the tensile, three-point bending, and drilling behaviors of carbon/epoxy (CFRP) and CNF (carbon nanofiber)-reinforced carbon/epoxy composites were comparatively examined after exposure to HCl (acidic) and NaOH (basic) environments. Drilling operations were performed using a 5 mm TiN-coated carbide drill at spindle speeds of 2500, 3000, and 3500 rpm and feed rates of 110-550 mm/min. Exit-side damage was quantitatively evaluated using the delamination factor (F_d) and corrected delamination factor (F_{da}), obtained through microscopy and image processing. Corrosive environments significantly affected both mechanical performance and machinability. According to the tensile and three-point bending results, the highest forces depending on the strength were obtained in the non-corroded specimens, followed by those exposed to HCl and NaOH, respectively. Furthermore, CNF reinforcement led to increases in forces in all specimens under same conditions. During drilling, the lowest F_d/F_{da} values were observed at 3500 rpm-110 mm/min, while the highest values occurred at 2500 rpm-550 mm/min. Under the critical condition of NaOH exposure combined with 550 mm/min-2500 rpm, the F_{da} value decreased from 1.126 in the unreinforced specimen to 1.054 in the CNF-reinforced specimen, and an absolute improvement of approximately 6-7% was achieved. This improvement reflects barrier/tortuosity effects and crack deflection/bridging mechanisms, shifting delamination toward a more stable regime that is less sensitive to drilling parameters. The study presents a practical framework for environment-specific process windows by unifying the interaction between acid/base corrosion, microstructural behavior, and drilling response.

Keywords: Acid-base corrosion, Carbon nanofiber (CNF), Delamination factor (F_d, F_{da}), Drilling, Image processing, Mechanical properties

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında, verdiği destekten dolayı danışman hocam Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN'a teşekkür ederim.

Deneylerin yapılmasında, tezin hazırlanmasında verdiği büyük destek ve katkılardan dolayı ikinci danışman hocam Dr.Öğr. Üyesi İbrahim DEMİRCİ'ye, Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi'ne minnet ve şükranlarımı sunarım.

Hayatımın her alanında her zaman yanımda olan, mesleğimle alakalı bana pek çok şey öğreten sevgili babam Ömer Faruk GÜNGÖR'e, her zaman bana destek olan sevgili annem Şerife GÜNGÖR'e ve varlığıyla onur, gurur ve mutluluk duyduğum sevgili eşim Zeynep Çelik GÜNGÖR'e en derin sevgi, saygı ve teşekkürlerimi ifade etmekten kıvanç duyarım.

Ahmet Can GÜNGÖR
KONYA-2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
3. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER	8
3.1. Termoset Matrisler	10
3.1.1. Epoksi.....	12
3.2. Elyaf Takviyeler	15
3.2.1. Karbon elyafı.....	19
3.3. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	27
3.3.1. El yatırma yöntemi (Hand lay up).....	27
3.3.2. Otoklav yöntemi.....	28
3.3.3. Sprey yayma (Spray up) yöntemi	29
3.3.4. Reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi	30
3.3.5. Vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) yöntemi.....	30
3.3.6. Pultrüzyon yöntemi.....	31
3.3.7. Sıkıştırma kalıplama yöntemi.....	32
3.4. Nanomalzemeler ve Polimer Matrisli Nanokompozitler	33
3.4.1. Karbon nanofiber (CNF).....	39
4. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN İŞLENEBİLİRLİĞİ VE İŞLEME PROSESLERİ	46

4.1. Polimer Matrisli Kompozitlerde Delme İşlemi	54
4.2. Polimer Matrisli Kompozitlerde Delme İşlemi Sebebiyle Oluşabilecek Durumlar	59
4.2.1. Delaminasyon	59
4.2.2. Lif çekilmesi.....	62
4.2.3. Çapak oluşumu	62
4.2.4. Yüzey pürüzlülüğü.....	63
5. DİJİTAL GÖRÜNTÜ İŞLEME	64
5.1. Dijital Görüntü İşleme Teknikleri.....	64
5.1.1. Görüntü edinimi.....	64
5.1.2. Görüntü ön işleme.....	65
5.1.3. Görüntü iyileştirme ve restorasyonu.....	65
5.1.4. Görüntü segmentasyonu.....	67
5.1.5. Görüntü sıkıştırma	68
5.1.6. Görüntü filtreleme	69
5.1.7. Morfolojik işleme	71
5.2. Delaminasyon Analizinde Dijital Görüntü İşlemenin Kullanımı	71
6. MATERYAL VE YÖNTEM.....	73
6.1. Kompozit Numunelerin Hazırlanması.....	73
6.2. Numunelerin Korozyon Ortamlara Maruz Bırakılmaları	77
6.3. Deneylerin Yapılışı.....	78
6.4. Görüntü İşleme	81
7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	82
7.1. Çekme Testi Sonuçları.....	82
7.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları.....	85
7.3. Delme Deneyi Sonuçları	88
7.4. Delik İçi Mikroskop Analizi.....	99
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	105

8.1. Sonuçlar	105
8.2. neriler	106
KAYNAKLAR	108



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Takviye türlerine göre kompozit malzemeler.....	8
Şekil 3.2. Dienlerin monomerlerle birleştirilmesi yoluyla çapraz bağ oluşumu.....	11
Şekil 3.3. Basit bir epoksinin idealize edilmiş kimyasal yapısı (etilen oksit)	13
Şekil 3.4. Tipik bir epoksi reçinesinin idealize edilmiş kimyasal yapısı.....	13
Şekil 3.5. Epoksi reçinelerin şematik gösterimi.....	14
Şekil 3.6. Bazı dokuma yapıları.....	17
Şekil 3.7. Karbonizasyon sürecinde enine çapraz bağlamanın diyagramı.....	24
Şekil 3.8. Farklı grafitleştirme sıcaklıklarında PAN bazlı karbon elyafların elementel bileşimi	25
Şekil 3.9. El yatırma yöntemi.....	28
Şekil 3.10. Otoklav yönteminin genel şeması.....	29
Şekil 3.11. Sprey yayma yöntemi.....	29
Şekil 3.12. RTM yöntemi.....	30
Şekil 3.13. VARTM yöntemi.....	31
Şekil 3.14. Pultrüzyon yöntemi.....	31
Şekil 3.15. Sıkıştırma kalıplama yöntemi.....	32
Şekil 3.16. PMN'lerin tipik yapısı.....	36
Şekil 3.17. (a–c) Bardak şeklinde istiflenmiş CNF yapısının oluşumu (d) tabakalı CNF yapısı.....	40
Şekil 3.18. Bardak şeklinde istiflenmiş CNF'nin tipik kimyasal buhar biriktirme büyüme mekanizması.....	41
Şekil 3.19. Tabakalı CNF'nin tipik kimyasal buhar biriktirme büyüme mekanizması...41	
Şekil 3.20. Bardak şeklinde istiflenmiş ve tabakalı CNF'nin sırasıyla HRTEM görüntüsü.....	41
Şekil 3.21. Elektro eğirme düzeneğinin şematik gösterimi.....	42
Şekil 3.22. CNF'lerin farklı yapıları.....	43
Şekil 3.23. Farklı türdeki CNF'lerle ilgili temsili TPO analizi.....	44
Şekil 3.24. %15 CNF içeren bir nanokompozitin saf polimer matrisi ile karşılaştırmalı olarak azaltılmış termal genleşme katsayısını gösteren bir grafik.....	45
Şekil 4.1. Ortogonal kesmeye ait şematik diyagram.....	47
Şekil 4.2. Lif yönelimi $\theta = 0^\circ$ ve talaş açısı $\gamma = 0^\circ$ durumunda talaş oluşumu.....	49
Şekil 4.3. Lif yönelimi $\theta = 0^\circ$ ve talaş açısı $\gamma > 0^\circ$ durumunda talaş oluşumu.....	49
Şekil 4.4. Talaş açısı $\gamma < 0$ durumunda kuvvet şeması.....	50
Şekil 4.5. Lif yönelimi $0^\circ < \theta \leq 90^\circ$ olması durumunda talaş oluşumu.....	51
Şekil 4.6. 90° açığa yaklaşan lif yönü boyunca tek yönlü bir kompozit işlenirken gözlenen hasarın temel özellikleri.....	51
Şekil 4.7. Toplam itme kuvvetinin bileşenlerine ayrılması.....	56
Şekil 4.8. Soyulma ve çıkış delaminasyonunun şematik sunumu.....	60
Şekil 5.1. Dijital veri edinim sistemleri.....	65
Şekil 5.2. Görüntü iyileştirme.....	67
Şekil 5.3. Görüntü restorasyonu.....	67
Şekil 5.4. Beyin MRG segmentasyonu için çok seviyeli eşikleme kullanımı.....	68
Şekil 5.5. Kutu filtreleme.....	70
Şekil 5.6. (Soldaki resim) gürültülü görüntü ("tuz ve biber" gürültüsüyle bozulmuş) (sağdaki resim) 3×3 medyan filtre kullanılarak iyileştirilmiş görüntü.....	71
Şekil 5.7. Delaminasyonun değerlendirilmesi için görüntü işleme adımları.....	72
Şekil 6.1. Kesilmiş karbon elyaf kumaşlar.....	73
Şekil 6.2. Epoksi reçine ve sertleştirici.....	74

Şekil 6.3. Epoksi reçine ve sertleştiricinin karışımı.....	74
Şekil 6.4. CNF ve CNF ilave edilmiş reçine.....	75
Şekil 6.5. Ultrasonik karıştırıcı.....	75
Şekil 6.6. El yatırma yöntemi ile kompozit laminatların üretimi.....	76
Şekil 6.7. Gönye testeresi ile numunelerin kesilmesi.....	76
Şekil 6.8. Kesilmiş delme, üç nokta eğme ve çekme deney numuneleri.....	77
Şekil 6.9. HCl çözeltisi ve NaOH.....	77
Şekil 6.10. Numunelerin asit ve baz ortamlarına daldırılması.....	78
Şekil 6.11. Çekme testi sonucu numunenin kırılması ve deney numune boyutları.....	78
Şekil 6.12. Üç nokta eğme deneyinin yapılışı ve numune boyutları.....	79
Şekil 6.13. CNC dik işlem tezgâhı.....	80
Şekil 6.14. TiN kaplamalı helisel karbür matkap ve numunenin bu matkapla delinmesi.....	80
Şekil 6.15. Numune üzerine açılan delikler.....	81
Şekil 6.16. Görüntü işleme akış şeması.....	81
Şekil 7.1. KEEK numunelerin çekme testleri sonucu oluşan kuvvet-uzama grafiği.....	82
Şekil 7.2. KNFTKEEK numunelerin çekme testleri sonucu oluşan kuvvet-uzama grafiği.....	83
Şekil 7.3. KEEK numunelerin çekme deneyleri sonucu oluşan standart sapma-ortalama kuvvet grafiği.....	84
Şekil 7.4. KNFTKEEK numunelerin çekme deneyleri sonucu oluşan standart sapma-ortalama kuvvet grafiği.....	84
Şekil 7.5. KEEK numunelerin üç nokta eğme deneyleri sonucu oluşan kuvvet-sehim grafiği.....	86
Şekil 7.6. KNFTKEEK numunelerin üç nokta eğme deneyleri sonucu oluşan kuvvet-sehim grafiği.....	86
Şekil 7.7. KEEK numunelerin üç nokta eğme deneyleri sonucu oluşan standart sapma-ortalama kuvvet grafiği.....	87
Şekil 7.8. KNFTKEEK numunelerin üç nokta eğme deneyleri sonucu oluşan standart sapma-ortalama kuvvet grafiği.....	87
Şekil 7.9. Korozyonsuz KEEK numunenin 110 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri.....	89
Şekil 7.10. Korozyonsuz KEEK numunenin 550 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri.....	89
Şekil 7.11. HCl ortamına maruz kalmış KEEK numunenin 110 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri.....	90
Şekil 7.12. HCl ortamına maruz kalmış KEEK numunenin 550 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri.....	90
Şekil 7.13. NaOH ortamına maruz kalmış KEEK numunenin 110 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri.....	91
Şekil 7.14. NaOH ortamına maruz kalmış KEEK numunenin 550 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri.....	91
Şekil 7.15. Korozyonsuz KNFTKEEK numunenin 110 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri.....	92
Şekil 7.16. Korozyonsuz KNFTKEEK numunenin 550 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri.....	92
Şekil 7.17. HCl ortamına maruz kalmış KNFTKEEK numunenin 110 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri.....	93
Şekil 7.18. HCl ortamına maruz kalmış KNFTKEEK numunenin 550 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri.....	93

Şekil 7.19. NaOH ortamına maruz kalmış KNFTKEEK numunenin 110 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri.....	94
Şekil 7.20. NaOH ortamına maruz kalmış KNFTKEEK numunenin 550 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri.....	94
Şekil 7.21. Delaminasyon hasarının diyagramı.....	96
Şekil 7.22. KEEK numunelerin klasik delaminasyon faktörü değerleri.....	97
Şekil 7.23. KEEK numunelerin düzeltilmiş delaminasyon faktörü değerleri.....	97
Şekil 7.24. KNFTKEEK numunelerin klasik delaminasyon faktörü değerleri.....	98
Şekil 7.25. KNFTKEEK numunelerin düzeltilmiş delaminasyon faktörü değerleri.....	98
Şekil 7.26. a)KEEK b) KNFTKEEK numunelerin korozyonsuz ortamdaki delik içi mikroskop görüntüleri.....	100
Şekil 7.27. a)KEEK b) KNFTKEEK numunelerin HCl ortamındaki delik içi mikroskop görüntüleri	101
Şekil 7.28. a)KEEK b) KNFTKEEK numunelerin NaOH ortamındaki delik içi mikroskop görüntüleri	102

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Sentetik elyafların şeması.....	19
Tablo 6.1. Delme işlemlerinde kullanılan kesici takımın özellikleri.....	79



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

SİMGELER

HCl	Hidroklorik Asit
NaOH	Sodyum Hidroksit
NaSCN	Sodyum Tiyosiyanat
N	Azot
H	Hidrojen
O	Oksijen
C60	Fulleren
Au	Altın
Ag	Gümüş
TiO₂	Titanyum Dioksit
ZnO	Çinko Oksit
Nm	Nanometre
Tpa	Terapascal
Gpa	Gigapascal
Mpa	Megapascal
K	Kelvin
TiN	Titanyum Nitrür
ZrN	Zirkonyum Nitrür
F_d	Klasik Delaminasyon Faktörü
F_{da}	Düzeltilmiş Delaminasyon Faktörü
W/mk	Watt bölü metre-Kelvin
M²/g	Metrekare bölü gram
Cm²/V.s	Santimetrekare bölü volt saniye
Ω.cm	Ohm santimetre

KISALTMALAR

A/D	Analog/Dijital
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
AWJD	Aşındırıcı Su Jeti ile Delme
BMC	Dökme Kalıplama Bileşiği
CBN	Kübik Bor Nitrür
CFRP	Karbon Elyaf Takviyeli Plastik
CNC	Bilgisayarlı Sayısal Denetim
CNF	Karbon Nanofiber
CNT	Karbon Nanotüp
CTE	Isıl Genleşme Katsayısı
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
DLS	Dinamik Işık Saçılımı
DMAc	Dimetil Asetamid
DMF	Dimetil Formamid
DMSO	Dimetil Sülfoksit
DOG	Grafitleşme Derecesi
EDM	Elektro Erezyonla İşleme

ESD	Elektrostatik Boşalma
FRP	Elyaf Takviyeli Plastik
GFRP	Cam Elyaf Takviyeli Plastik
HAZ	Isıdan Etkilenmiş Bölge
HS	Harmanlı Saten
HS	Yüksek Dayanım
HRTEM	Yüksek Çözünürlüklü Geçirimli Elektron Mikroskobu
HSS-R	Rulo Edilmiş Yüksek Hızlı Çelik
HT	Yüksek Çekme Dayanımı
ILSS	Tabakalar Arası Kayma Dayanımı
KEEK	Karbon Elyaf Epoksi Kompozit
KNFTKEEK	Karbon Nanofiber Takviyeli Karbon Elyaf Epoksi Kompozit
LBM	Lazer Işını ile İşleme
MWCNT	Çok Katmanlı Karbon Nanotüp
NM	Nanomalzeme
NP	Nanoparçacık
PAN	Poliakrilonitril
PBI	Polibenzimidazol
PCD	Polikristalin Elmas
PI	Poliimid
PMK	Polimer Matrisli Kompozit
PMN	Polimer Matrisli Nanokompozit
PSNR	Tepe Sinyal-Gürültü Oranı
PVA	Polivinil Alkol
PVDF	Poliviniliden Florür
RTM	Reçine Transfer Kalıplama
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SSIM	Yapısal Benzerlik İndeksi
STM	Tünelleme Mikroskobu
SWCNT	Tek Katmanlı Karbon Nanotüp
TEM	Geçirimli Elektron Mikroskobu
TMC	Kalın Kalıplama Bileşiği
TPO	Karakteristik Oksidasyon Profili
TTT	Zaman-Sıcaklık-Gerilim
UV	Ultra Viyole
VARTM	Vakum Destekli Reçine Transfer Kalıplama
VGCF	Buharla Büyütülmüş Karbon Nanofiber
WC	Tungsten Karbür

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, farklı özelliklere sahip iki ya da daha fazla malzemenin makro seviyede birleştirilmesiyle elde edilirler. Buradaki amaç, daha optimum özelliklere sahip bir yapı elde etmektir. Örneğin, sünekliği iyi, dayanımı düşük olan bir polimer, başka bir malzeme ile kompozit yapı oluşturarak daha rijit ve daha dayanıklı bir duruma gelebilir.

Bu çalışmada, bir polimer matrisli elyaf takviyeli kompozit malzeme türü olan karbon elyaf takviyeli epoksi esaslı kompozit malzemeler üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemeler el yatırma yöntemi denilen düşük maliyetli bir teknikle üretilmiştir. Çalışmada, karbon elyaflar on tabaka olacak şekilde kompozit malzemelerin üretimi yapılmıştır.

Tez çalışmasında, nanofiber takviyeli ve takviyesiz olmak üzere iki çeşit kompozit malzeme üretilmiştir. Nanofiber katkılı üretim yapılmasının amacı, kompozit malzemenin özelliklerini iyileştirmektir. Kullanılacak nanofiber, yüksek elektriksel iletkenliğe ve geniş yüzey alanına sahip, istiflenmiş mısır şekliyle düzenlenmiş grafen katmanlarından oluşan (Gautam ve Verma, 2019) CNF (karbon nanofiber) olmuştur.

Kompozit malzemeler üretim aşamasından sonra belli boyutlarda kesilmiş, kesilmiş numunelerden bir kısmı asit (HCl) ve baz (NaOH) ortamlarında tutulmuştur. Standartlara göre kesilmiş numunelere çekme testleri ve üç nokta eğme testleri uygulanmış ve dayanıma bağlı kuvvet-uzama ve kuvvet-sehim değerleri belirlenmiştir. Delik delme için kesilen numunelere ise CNC dik işlem tezgahında delik delme işlemleri uygulanmıştır. Delik delme işlemlerinin ardından görüntü işleme teknikleri ile deliklerde oluşan hasarlar incelenmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar grafiklere ve tablolara aktararak karşılaştırmalar ve çeşitli analizler yapılmıştır.

Çalışmada, korozyon ortamına maruziyet, delme ve mikro yapı arasındaki etkileşim, eş zamanlı kuvvet ölçümü ve görüntü işleme tabanlı nicel delaminasyon (tabakalar arası ayrılma) haritaları aracılığıyla doğrudan ortaya konmuştur. Her bir ortam için F_d/F_{da} (F_d : Delaminasyon Faktörü, F_{da} : Düzeltilmiş Delaminasyon Faktörü) ilişkileri türetilerek pratik proses parametresi aralıkları önerilmiştir. CNF'lerin bariyer/tortuoosite ile çatlak saptırma/köprüleme mekanizmaları delme parametreleriyle birlikte değerlendirilmiştir. Bu bütüncül yaklaşım, asidik/bazik koşullar altındaki CFRP kompozitlerin tasarımı, proses parametrelerinin endüstriyelendirilmesi ve servis ömrü tahmini için özgün ve aktarılabilir bir metodoloji sunmaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Üstün mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olan kompozit malzemeler, anizotropik ve aşındırıcı yapıya sahip olmalarından dolayı geleneksel malzemelere kıyasla daha farklı işlenebilirlik mekanizmasına sahiptirler. Delik delme, havacılık sanayi gibi kritik uygulamalarda montaj işlemlerinin yapılabilmesi için gereken en önemli işleme proseslerinden biridir. Hasar oranı yüksek olan delikler montaj aşamasında parçanın bütünüyle reddedilmesine sebep olarak zaman ve maliyet açısından önemli kayıplara sebep olabilmektedirler. Bu bakımdan, delik delme hususunda dikkat edilmesi gereken durumlar pek çok araştırmada farklı şekillerde ele alınarak optimum koşullar belirlenmeye çalışılmıştır.

CFRP (karbon elyaf takviyeli plastik), son derece yüksek çekme dayanımı/ağırlık oranı, çekme modülü/ağırlık oranı, düşük termal genleşme katsayısı ve yüksek yorulma direnci gibi birçok avantajlı özelliğe sahiptir. Diğer kompozit malzemeler gibi CFRP'ler de işlenebilirlik açısından bazı zorluklar ortaya koymaktadırlar. CFRP'lerdeki karbon elyaflar aşındırıcı bir yapıya sahip olup, düşük ısı iletkenliği sergilerler (Özkan vd., 2020). Aşındırıcı yapıdan dolayı kesici takımlar daha zorlu koşullara maruz kalmakta ve ısı kaynaklı aşınma süreçlerine uğramaktadırlar. Kullanılan epoksi matrisin zayıf yapısı nedeniyle çok düşük kesme kuvvetlerinde bile kabul edilemez düzeyde delaminasyon (tabakalar arası ayrılma) ve matris çatlaması meydana gelebilmektedir. Ayrıca yüksek kesme hızlarıyla oluşan yüksek sıcaklıklar ve malzemenin düşük ısı iletkenliği reçine bozulmasına yol açmaktadır. CFRP'lerin işlenmesi sırasında, lif parçalanması, yanma ve tiftiklenme gibi başka hasar türleri de gözlemlenmiştir. Toz şeklinde talaş oluşumu ve işlenen yüzeylerde yetersiz yüzey pürüzlülüğü gibi sorunlar da rapor edilmiştir. Tüm bu nedenlerle CFRP'ler diğer kompozit malzemelerde olduğu gibi geleneksel malzemelere kıyasla farklı işleme süreçleri gerektirmektedirler. Elyaf türü, matris yapısı ve elyaf-matris oranı gibi CFRP malzemenin özelliklerini belirleyen faktörler işlenebilirliği belirlemekte ve buna bağlı olarak uygun işleme yöntemi ile kesici takım seçimini etkilemektedir (Che vd., 2014).

Üç farklı karbon/epoksi sistemi ile CFRP malzemeler hazırlayan Merino-Pérez vd. (2016) iki farklı reçine ve iki farklı karbon elyaf ile bu malzemeleri hazırlayarak, kaplamasız karbür matkapla bu malzemeler üzerinde delme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Matris türü, maksimum itme kuvveti ve tork üzerinde önemli bir etki gösterirken, karbon elyaf kumaş türü, maksimum itme kuvveti üzerinde ihmal

edilebilir bir düzeyde etkili olmuştur. Reçinenin katkısı, reçinenin ilerleme yönündeki termomekanik özelliklerinin baskın olmasından ileri gelmektedir. Benzer bir çalışmada Merino-Pérez vd. (2015) CFRP delme işlemindeki ısı dağılımını incelemişler ve matris türünün maksimum sıcaklıklar üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu, karbon elyaf türünün de ısı dağılımı üzerinde belirgin bir etki gösterdiğini tespit etmişlerdir. Hintze vd. (2018) elyaf kesme açısının delme işlemindeki bütün kuvvetler üzerinde önemli bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Onlara göre delik duvarı hasarı ve üst tabaka delaminasyonu da elyaf kesme açısından etkilenmektedir. Bi vd.nin (2025) çalışmalarında ise 0° ila 90° arasındaki elyaf kesme açılarında özellikle delme çıkışında çapakların kolayca meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Farklı şekilde kürlenmiş CFRP malzemeler kullanan Haeger vd. (2016) farklı şekilde kürlenme sayesinde farklı mikro yapıda CFRP laminatları inceleme olanağı bulmuşlardır. Gözenekli yapıdaki CFRP'ler, kompakt olanlara kıyasla daha fazla delaminasyon eğilimi göstermişlerdir. Ayrıca delme deneyleri sonucu oluşan delaminasyonun mekanik özellikler üzerindeki etkisini de inceleyen Haeger vd. çekme yükü altında dayanımda herhangi bir değişme olmadığını, eğilme yükü altında ise delaminasyonlu parçalarda ciddi şekilde dayanımın düştüğünü gözlemlemişlerdir. Eğilme dayanımındaki azalma, yüzeydeki boyuna yönlenmiş elyafların delaminasyonunda daha belirginken, en üstteki enine yönlenmiş katmanlar o kadar da kritik olmamıştır.

CFRP delme işlemlerinde iyi sonuçlar alabilmek için kesici takımların optimize edilmesine yönelik de pek çok çalışma bulunmaktadır. Shaik vd. (2022) CFRP'lerin delinmesinde farklı uç açılara sahip kaplamasız karbür brad uçlu, hançer (dagger) ve helisel matkaplar kullanmışlar ve en iyi sonuçları brad uçlu matkapla elde etmişlerdir. Brad uçlu matkapla daha az delaminasyon elde edilmiştir. Xu vd. (2018) de delme çalışmalarında brad spur matkaplar, helisel matkaplar ve hançer matkaplar kullanmışlardır. Delme kuvvetleri, delik kalitesi ve takım aşınma davranışları açısından en iyi performansı sırasıyla brad spur matkap ardından helisel matkap ve son olarak hançer matkap ile elde etmişlerdir. Al-Wandi vd. (2017) ise CFRP delme işlemleri için özel olarak tasarlanmış elmas kaplamalı çift uç açılı matkap ve PCD (polikristalin elmas) kaplamalı helisel matkap kullanmışlardır. Çift uç açılı matkabın daha iyi delik kalitesi sağladığını ve delaminasyonu azalttığını bildirmişlerdir. Ayrıca yüksek uç açısının (130°) daha büyük itme kuvveti oluşturduğu gözlemlenmiştir. Büyük giriş çapaklarının oluşumu da yüksek uç açısının neden olduğu başka bir sorundur (Pardo vd., 2021). Daha küçük uç açısı daha az delaminasyona yol açmaktadır. Ancak aşırı küçük bir uç açısı kesici takımın

boyutunu artırmakta ve takım yolunu uzatmaktadır. Bu da işlem süresini artırmakta ve kesme işlemini kararsız hale getirmektedir (Xu vd., 2023). Başka bir çalışmada Ameur vd. (2017) takım malzemelerinin delik çıkışındaki delaminasyon faktörü üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ve bunun da itme kuvvetini etkilediğini araştırmışlardır. En düşük itme kuvveti TiN (titanyum nitrür) kaplamalı karbür matkapla elde edilirken en yüksek itme kuvveti HSS (yüksek hızlı çelik) matkapla elde edilmiştir. TiN kaplamalı karbür matkabı ve kaplamasız karbür matkabı yüzey pürüzlülüğü açısından kıyaslayan Shahabaz vd. (2020) ise TiN kaplamalı karbür matkabın yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde azalttığını ortaya koymuşlardır. CFRP delme işleminde elmas kaplamalı ve kaplamasız helisel karbür matkaplar kullanan Iliescu vd. (2010) elmas kaplı matkapların kaplamasız matkaplara göre 10 ila 12 kat daha uzun takım ömrüne sahip olduklarını, ayrıca elmas kaplı matkaplarla üç kat daha fazla kesme hızında çalışılabildiğini bulmuşlardır. Yazarlar, CFRP delmede delaminasyon olmadan maksimum sayıda delik açabilmek için matkap ucunun elmas kaplama ile kaplanması yanı sıra yaklaşık 125° - 130° arası uç açısına, 35° - 40° helis açısına, 10° - 25° boşluk açısına sahip olmasını önermektedirler.

CFRP delme esnasında, en uygun işleme parametrelerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar da oldukça kayda değerdir. Çünkü bu çalışmalar da hasarları minimize etmeyi hedeflemektedirler. Sorrentino vd. (2018) çalışmalarında itme kuvvetinin ilerleme ve kesme hızının artmasıyla birlikte arttığını ifade etmişlerdir. Delaminasyon faktörü açısından bakıldığında, ilerleme oranının 0,1 mm/dev 'den daha düşük olduğu durumlarda bu faktör kesme hızından neredeyse bağımsız olmuş ve sadece ilerleme oranıyla belirgin şekilde artmıştır. Bununla birlikte, yüksek ilerleme oranlarında delaminasyon faktörü hem kesme hızı hem de ilerleme oranı ile birlikte artmıştır. Yazarlar, çıkış delaminasyon faktörünü her zaman soyulma delaminasyon faktöründen daha yüksek bulmuşlardır. Feito vd.nin (2018) çalışmalarında da hem kesme hızı hem de ilerleme hızının artması itme kuvvetini ve hasar faktörünü artırmıştır. Düşük ilerleme hızlarında daha düşük ilerleme kuvveti ve delaminasyon faktörü değerleri elde edilmiştir. Chen vd. (2021) CFRP delme üzerine yaptıkları çalışmalarda düşük mil devri ve yüksek ilerleme oranının kesme ısısının oluşumunu azaltabileceğini açıklamışlardır. Ancak bu koşullar altında kesme kuvvetinin artacağını ve bunun da delaminasyon olasılığını artırabileceğini belirtmişlerdir. K. ve Kavan'a (2017) göre ise kesme hızı ve ilerleme oranının yüzey pürüzlülüğü ile delaminasyon faktörünü azaltmadaki katkıları eşittir. Yüksek kesme hızı iyi dairesellikte ve yüksek kaliteli delikler üretmiştir. Gaitonde vd.nin

(2008) çalışmalarında yüksek kesme hızı sayesinde delaminasyon eğilimi azalmıştır. Yüksek kesme hızı, delik girişinde oluşan hasarı azaltmada önemli rol oynamıştır.

Bu çalışmada, CFRP kompozitlerin delinmesi sonucu oluşan delaminasyonların belirlenmesi için dijital görüntü işleme yöntemleri kullanılacaktır. Dijital görüntü işleme yöntemleri, delme kaynaklı hasarları ölçmek için kullanılan X-ışını ve ultrasonik teknikler gibi yöntemlerden biridir. Ultrasonik ve X-ışını yöntemleri delme kaynaklı hasarların ölçümünde iyi performans göstermelerine rağmen yüksek maliyetleri ve çevresel uygulamalardaki sınırlamaları nedeniyle CFRP kusurlarının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmamaktadırlar. Bunun yerine hızlı, doğru ve maliyet açısından daha uygun alternatifler sunan dijital görüntü işleme teknikleri birçok çalışmada tercih edilmiştir (Zhang vd., 2023). Geier vd. (2022) parçalanmış CFRP kompozitlerin delinmesi sonucu oluşan çapak oluşumunu tahmin etmeye yönelik bir yöntem geliştirmiş ve bu yöntemi mekanik delme deneyleri ile doğrulamışlardır. Bu yöntem, kompozitlerin farklı aydınlatma koşulları altında çekilen görüntülerinin üst üste bindirilmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yaklaşım, farklı yönlenmiş karbon elyafların farklı yansıma özellikleri ve ışığın toplam iç yansıması prensibi nedeniyle kontrastı artırarak farklı elyaf gruplarının ayrı ayrı tanımlanmasını sağlamaktadır. Maghami vd. (2021) CFRP malzemelerde delinmiş deliklerin otonom denetimi için görüş tabanlı bir sistem önermiş ve deliği dört farklı yönden aydınlatabilen, çoklu ışık kaynaklarıyla donatılmış robotik bir görüntü alma uç elemanı tasarlamışlardır. Görüntü işleme ve birleştirme işlemlerini öğrenebilen U-Net mimarisine sahip tam evrimsel bir sinir ağı geliştirmişlerdir. Bu model ile delaminasyon faktörünü hesaplamışlardır. Caggiano vd. (2017) CFRP kompozitlerde delaminasyonun karakteristik parametrelerini ölçmek için MATLAB tabanlı bir görüntü analiz modeli geliştirmişlerdir. Sonuç olarak, delaminasyonun takım aşınmasının ilerlemesiyle önemli ölçüde arttığını bulmuşlardır. Molina-Moya vd. (2023) de MATLAB programının fonksiyon ve filtrelerini kullanarak bir görüntü analiz yöntemi geliştirmişlerdir. Bu sayede delaminasyon ve delik boyutlarını otomatik ve önceden ayar yapmaksızın ölçme olanağı bulmuşlardır. Rubio vd. (2008) ise hasar alanının dijital görüntüsünü matkap giriş ve çıkışında hasarın yayılımını karakterize etmek için kullanmışlardır. Dijital görüntü alma sistemi delme sonrası hasar alanını belirlemede oldukça başarılı olmuştur. Bu teknikle, çift katlı kompozit levhalar delindiğinde giriş yüzeyinde daha fazla hasar oluştuğunu kanıtlamışlardır.

Bilindiği üzere, nanoparçacıklar kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmede etkili olan malzemelerdir. Ancak nanoparçacıklarla güçlendirilmiş kompozitlerde delme

işlemi sırasında itme kuvveti (Premnath, 2017) ve kesme kuvvetinde (Baraheni ve Amini, 2024) artış gözlemlenebilir, bu da delaminasyonun artmasına yol açabilir (Premnath, 2017). Buna rağmen Li vd.nin (2015) çalışmasında çok katmanlı karbon nanotüplerle güçlendirilmiş CFRP kompozitlerde modifiye edilmemiş kompozitlere kıyasla delaminasyonun azaldığı görülmüştür. Ayrıca nanoparçacık takviyesiyle delme sırasında oluşan sıcaklığın da azaldığı bildirilmiştir. Chandran vd.nin (2023) yaptığı çalışmada ise CFRP’de delaminasyon önce nanoparçacık içeriğinin artmasıyla azalmış ancak sonrasında tekrar artış göstermiştir. Bir başka çalışmada, CNT (karbon nanotüp) ilave edilmemiş epoksi karbon elyaf kompozitin CNT ilave edilmiş olan epoksi karbon elyaf kompozite göre daha iyi bir işlenebilirlik indeksine sahip olduğu bulunmuştur (Kaybal vd., 2019). Öte yandan Baraheni vd.nin (2025) yaptığı çalışmada, nano-grafen ilavesi kopma sınırlarını iyileştirerek itme kuvvetini artırmış ve bu sayede temiz, minimum çapaklı delikler elde edilebilmiştir.

Her ne kadar literatürde nanoparçacıkların kompozitlere ilave edilip işlenebilirliklerinin araştırılması ile alakalı çalışmalar olsa da tez çalışmasında kullanılacak olan karbon nanofiberlerin işlenebilirliğe etkisine dair kayda değer bir çalışma bulunmamaktadır. Bu amaçla bu çalışma, literatürdeki bu boşluğu doldurmaya katkı sunabilecek nitelikte olacaktır. CNF’ler de diğer nanopartiküller gibi kompozit malzemelerin özelliklerini iyileştiren nanomalzemelerdir. Oda sıcaklığı ve soğutulmuş kürleme koşullarında ağırlıkça %1’e kadar CNF içeriğine sahip epoksi nanokompozitler üreten Bal (2010), kompozitlerin mekanik ve elektriksel özelliklerini incelemeyi amaçlamıştır. Soğutulmuş numunelerde, kürleme koşulları esnasında nanofiberlerin birikmesi önlediği için daha yüksek eğilme modülü ve sertlik değerleri elde edilmiştir. CNF’lerin eklenmesiyle elektrik iletkenliği 3-6 derece artmış, özellikle oda sıcaklığındaki numunelerde daha yüksek iletkenlik elde edilmiştir. Farklı oranlarda VGCF (buharla büyütülmüş karbon nanofiber) içeren epoksi nano kompozitleri hazırlayan Choi vd. (2005) nanokompozitleri düşük ve yüksek viskoziteli epoksi reçinelere ilave ederek hazırlamışlardır. Depolama modülü ve camsı geçiş sıcaklığı VGCF’lerin ilave edilmesiyle artmıştır. Buldukları sonuçlara göre, düşük viskoziteli epoksi nanokompozitlerin mekanik, termal ve elektriksel özellikleri yüksek viskoziteli olanlara göre daha iyi sonuçlar vermiştir. SC-15 epoksi reçineye farklı yüzde oranlarda CNF ilave eden Zhou vd. (2008) ise elde ettikleri numunelere yorulma ve kırılma testleri uygulamışlar ve en iyi sonuçları %2 CNF oranında elde etmişlerdir. Daha sonra ağırlıkça %2 CNF içeren epoksi vakum destekli reçine transfer kalıplama yöntemi ile karbon elyaf

kompozit üretmek için kullanılmıştır. Bu kompozite çekme, eğilme ve yorulma testleri yapılmış, çekme ve eğilme mukavemetinin CNF içermeyen kompozitle kıyaslandığında sırasıyla %11 ve %22,3 oranında arttığı tespit edilmiştir. Yorulma mukavemeti de önemli ölçüde artış göstermiştir.

Bu çalışmada ele alınacak bir diğer önemli konu ise korozyon ortamlara maruz kalan CFRP kompozitlerin mekanik özelliklerindeki değişimlerin belirlenmesi ve bu korozyon ortamların delme işlemleri üzerindeki etkileridir. Kompozit malzemelerin üstün özelliklerine karşın asidik ve bazik gibi agresif ortamların bu malzemeler üzerindeki etkileri araştırılması önem arz eden bir husustur. Özellikle bu tür zorlu koşullara maruz kalmış kompozitlerin işlenebilirliğine yönelik çalışmalar da ciddi anlamda yetersizdir. Çünkü agresif ortamlara maruz kalan kompozitlerde tabakalar arası kayma dayanımı (ILSS) (Santos vd., 2023) ve çekme dayanımı (Uthaman vd., 2020) gibi mekanik özellikler olumsuz etkilenmektedirler. Ayrıca reçine yüzeyinde pürüzlenme, yüzeyde beyaz tortu oluşumu, elyaf ipliklerinin belirginleşmesi ve gözenek oluşumu (Kojnoková vd., 2022) gibi durumlar da meydana gelmektedir. Li vd.nin (2025) çalışmalarında, asidik ortam delaminasyona ve lif kırılmalarına sebep olurken bazik ortam yüzey pürüzlülüğünü ve gözenekliliği artırmıştır. Chen vd.nin (2024) çalışmalarında ise agresif ortamlar reçine performansının bozulmasına ve lif-matris ara yüzeyinde hasara sebep olarak kompozitin mekanik özelliklerini düşürmüştür. Kompozitlerin işlenebilirlik performanslarını bu olumsuz durumlar paralelinde değerlendirmek, işlenebilirlik stratejilerini geniş bir perspektifte yorumlama olanağı sunacaktır.

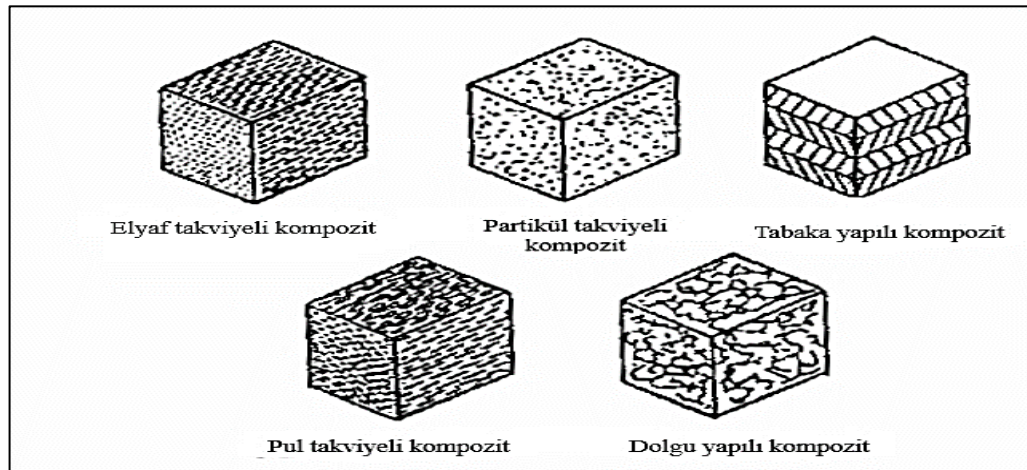
3. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Kompozit malzemeler, alaşımlardan farklı olarak kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerin korunduğu, iki ya da daha fazla malzemenin makro düzeyde birleşimi ile oluşan malzemelerdir. Kompozit malzemeler kendilerini oluşturan bölünmez bileşenlerinden daha iyi özellikler gösterirler. Kompozit malzemeler düşük yoğunlukla beraber yüksek mukavemet ve sertliğe sahip, dökme malzemelerle karşılaştırıldığında bitmiş parçada ağırlık azalmasına izin veren ürünlerdir (Campbell, 2010).

Kompozit malzemelerin iki temel bileşeni vardır. Bunlar matris ve takviye olarak isimlendirilirler. Matris, sürekli fazı oluşturarak takviye elemanını sarar ve destekler. Matris fazı dış yüklerin takviye fazına iletilmesini sağlarken, aynı zamanda bu fazı oksidasyon, korozyon ve ısıl bozulma gibi çevresel etkilere karşı koruyucu bir görev üstlenir. Takviye fazı ise kendi fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak kompozit malzemenin dayanıklılık, sertlik, aşınmaya karşı direnç ve ısı iletkenliği gibi özelliklerini büyük ölçüde iyileştirir. Takviye fazının düzenlenmesi ile kompozite yapısal bütünlük kazandırılır (Alovsat, 2024).

Matris ve takviye bileşenlerinin birleşimiyle oluşan kompozit malzemeler, elektriksel, fiziksel, kimyasal, mekanik ve ısıl pek çok olumlu özelliği bünyelerinde barındırırlar ve birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

Polimer matrisli kompozitlerde (PMK), matris olarak genellikle polimer reçineleri tercih edilir. Takviye malzemeleri ise plakalar, elyaflar, parçacıklar ve laminatlar gibi çeşitlilik gösterse de teknolojik açıdan en kritik takviye malzemeleri elyaflardır (Beşergil, t.y.).



Şekil 3.1. Takviye türlerine göre kompozit malzemeler (Almuramady, 2007)

Polimerler, tekrarlayan monomer birimlerinin kimyasal bağlarla birbirine bağlanarak oluşturulduğu uzun zincirli moleküllerdir. Bu moleküller içlerinde yüzbinlerce atom barındırabilirler ve bu nedenle makro moleküller olarak adlandırılabilirler (Babooram, 2020). Düşük moleküler ağırlığa sahip monomerlerin kovalent bağlarla bağlanarak yüksek moleküler ağırlığa sahip polimerleri meydana getirmesi işlemine polimerizasyon denir (Speight, 2011). Örneğin, etilen ve propilen monomerleri polimerizasyonla polietilen ve polipropilen makro moleküllerini oluştururlar.

Polimerler, oldukça zayıf ve neredeyse sıvı yapılı malzemelerden başlayarak hafif metallerin dayanımına yaklaşan sağlamlıktaki yapılara kadar geniş bir mukavemet aralığına sahiptirler. Kristal yapılı polimerler dışında çoğu polimer yük altında kalıcı deformasyon veya viskoz şekilde şekil değiştirme eğilimindedir. Pek çok polimer türü, çevresel etkiler, kimyasal saldırılar ve doğal bozunmalara karşı oldukça dirençlidir ve uzun ömürlüdür. Ancak özellikle doğal kökenli polimerler genellikle kırılğan ve hassas bir yapıya sahiptir. Polimerlerin büyük bir bölümü organik asitlerle temas ettiğinde duyarlılık gösterir. Bu da zincirlerin çözülmesine ve malzemenin parçalanmasına yol açabilir. Bazı polimerler ise alkol, aseton ya da kloroform gibi organik çözücülerde çözünebilmektedir. Elektriksel bakımdan değerlendirildiğinde polimerlerin büyük çoğunluğu iyi birer yalıtkandır. Bu nedenle elektrik ve elektronik uygulamalarda izolasyon malzemesi olarak yaygın şekilde kullanılmaktadırlar (McClements, 2023).

Polimerler, yapısal özellikleri, kaynakları, termal davranışları, monomer türleri, kullanım alanları, fiziksel nitelikleri, oluşum biçimleri ve taktisite durumlarına göre çeşitli sınıflara ayrılabilir. Örneğin, yapısal açıdan değerlendirildiğinde polimerler lineer, dallanmış zincirli veya ağ (çapraz bağlı) yapıda olabilir. Kaynaklarına göre sınıflandırıldıklarında ise doğal, yarı sentetik ya da tamamen sentetik polimerler olarak gruplandırılırlar. Termal tepkimelerine göre ise termoplastik ve termoset olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar (Devvanshi vd., 2024). Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan matris malzemeleri genellikle termoset ve termoplastik matrisler olmak üzere ikiye ayrılır.

Termoset polimerler ısıya maruz kaldıklarında sert ve erimeyen bir yapı sergilerler. Basınç altında ısıtıldıklarında dahi yumuşamazlar ve tekrar şekil verilemezler. Bu tür polimerler çapraz bağlarla birbirine bağlıdır ve bu nedenle geri dönüşümsüz bir yapıya sahiptirler. Buna karşılık termoplastik polimerler ısıtıldıklarında kolaylıkla şekil alabilir, soğutulduklarında ise sertleşerek istenilen formda kalabilirler. Genellikle

doğrusal ya da dallanmış zincir yapısına sahip olan termoplastikler ısıtıldıklarında esneklik kazanırken soğuduklarında katı hâle geçerler (Mustafa vd., 2016).

Polimer matrisli kompozitlerde en yaygın kullanılan takviye çeşidi olan elyaflar, uzunluk/çap oranı yüksek ince elyafların matris malzemesi içerisine yerleştirildiği malzemelerdir. Bu elyaflar matris içinde sürekli, kesikli, rastgele dağılmış ya da belirli bir düzende hizalanmış olabilirler. Genellikle polimer matrisli kompozitlerde takviye elyafı olarak cam, karbon ve kevlar gibi malzemeler tercih edilmektedir (Karcı, 2009).

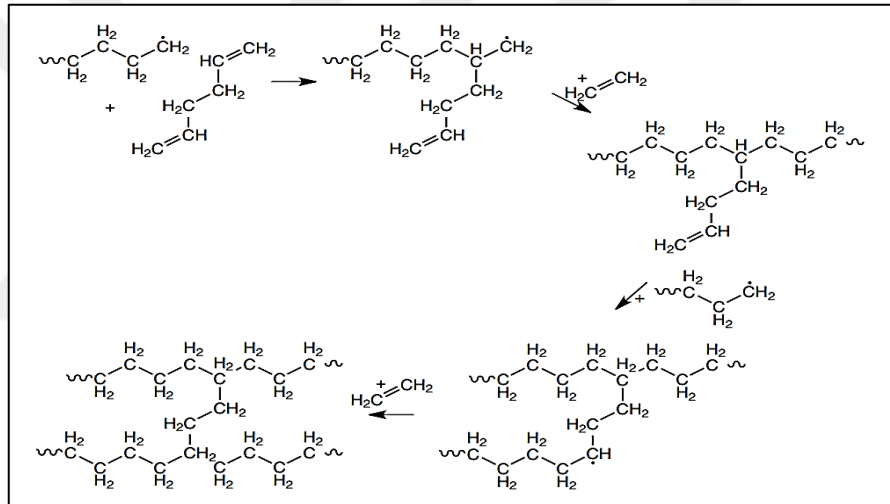
Polimer matrisli kompozitler birçok sanayi dalında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Otomotiv endüstrisinde araçların toplam ağırlığını azaltmak ve yakıt tüketimini düşürmek amacıyla gövde panelleri, tamponlar ve çeşitli yapısal parçaların üretiminde tercih edilmektedirler. Havacılık sektöründe ise uçak tasarımlarında vazgeçilmez bir rol oynamaktadırlar. Bazı gelişmiş askeri uçaklarda yapısal dayanımı artırmak ve ağırlığı minimize etmek için %70'e varan oranlarda PMK bileşeni kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, spor ekipmanlarında da performans ve uzun ömürlülük sağlamak adına PMK'ler sıkça yer bulurlar. Bu ekipmanlar arasında tenis raketleri, sırtla atlama çubukları, kayaklar, golf sopası milleri ve bisikletler sayılabilir (Khan, 2024).

3.1. Termoset Matrisler

Termosetler, sabit konumlara yerleşmiş ve birbirine bağlı zincirlerden oluşan polimer ağlarından meydana gelirler. Bu tür polimerler ısıtıldıklarında sıvı hale gelmezler. Yüksek sıcaklıklar altında bozulup karbonlaşırlar. Termosetlerdeki polimer zincirleri kimyasal çapraz bağlar aracılığıyla birbirine bağlanmıştır ve bu bağlar her zincirin diğer tüm zincirlere bağlandığı geniş bir ağ yapısı oluşturur. Sonuç olarak, tamamen çapraz bağlanmış bir termosetin moleküler ağırlığı gram cinsinden ağırlığına eşdeğerdir. Termosetler çapraz bağlar sayesinde sıvı hale gelmezler çünkü bu bağlar polimer zincirlerinin büyük ölçekli yeniden düzenlenmesini engellerler (Peacock ve Calhoun, 2006). Termosetler iki veya daha fazla bileşenin ısı, radyasyon ya da kimyasal reaksiyonlarla geri dönüşümsüz bir tepkimeye girmesi sonucu elde edilirler. Bu özellikleri nedeniyle termosetler genellikle sert malzemelerdir. Sertlik ve rijitlik, kullanılan reaktif bileşenlerin kimyasal yapıları ve çapraz bağ yoğunluğu ile kontrol edilebilir. Yüksek çapraz bağ yoğunluğu, çok sert ve katı bazen de kırılgan bir malzemenin oluşmasına yol açabilir (Sastri, 2014).

Katılma polimerizasyonu sırasında dienler vinil monomerlerle kopolimerize edilerek çapraz bağlar oluşturabilir. Dienin iki vinil fonksiyonunun ayrı zincirlere dahil olması durumunda çapraz bağlar meydana gelir. Düşük konsantrasyonda dien kullanıldığında uzun zincirli ve dallanmış bir polimer oluşurken, yüksek konsantrasyonda dien kullanımı sonucunda yoğun çapraz bağlı bir polimer ağı elde edilir.

Adım büyümesi polimerizasyonunda reaksiyon karışımına yeterli miktarda polifonksiyonel bir monomer eklenerek termoset polimerler elde edilebilir. Bu işlem, monomerlerin birbirine bağlanarak bir ağ yapısı oluşturmaya olanak tanır. Fonksiyonel grupların her biri monomerler, dimerler, trimerler, oligomerler ve polimerler gibi yapıdaki uyumlu kimyasal gruplarla etkileşime girerek üç boyutlu bir polimer zincir ağı meydana getirebilir (Peacock and Calhoun, 2006).



Şekil 3.2. Dienlerin monomerlerle birleştirilmesi yoluyla çapraz bağ oluşumu (Peacock and Calhoun, 2006)

Termosetler daha yüksek sıcaklıklara dayanıklı olup termoplastiklere kıyasla daha yüksek korozyon direnci sağlarlar. Ayrıca sünmeye karşı da yüksek direnç gösterirler. Fiziksel ve mekanik dayanımları sayesinde birçok uygulama için uygun bir tercih haline gelmişlerdir. Ancak darbelere karşı daha az dayanıklı ve kırılabilirliğe daha yatkındırlar. En yaygın kullanılan termoset türleri, alkitler, epoksi, melamin, fenolik, poliimidler, poliüretan, silikon ve termoset polyesterler (Melito, 2022).

Termosetler reaktif bir reçine ile sertleştiricinin karışımından oluşurlar. Bu reçineler oda sıcaklığı veya daha yüksek sıcaklıklarda düşük viskoziteli sıvılar olup elyaf yapısına rahatça nüfuz edebilirler. Reaktif reçine ve sertleştirici arasındaki kimyasal reaksiyon, sıvının sert bir katıya dönüşmesini sağlayarak kütleme sürecini başlatır. Bu

süreç esasen çapraz bağlanma işlemidir. Kimyasal reaksiyon genellikle yüksek sıcaklıklarda başlatılsa da bu süreç oda sıcaklığı koşullarında da uyarlanabilir (Stark, 2013).

Termoset reçineler için kürleşme süreci üç aşamadan oluşur: A, B ve C aşamaları. A aşamasında, baz reçine ve sertleştirici karıştırılır ancak kimyasal reaksiyon henüz başlamamıştır. Bu aşama reçinenin ıslak yerleştirme işleminde kullanıldığı aşamadır. B aşamasında, baz reçine ve sertleştirici karıştırıldıktan sonra kimyasal reaksiyon başlar. Son olarak C aşamasında, reçine tamamen kürleşmiş olur. Bazı reçineler oda sıcaklığında kürlenebilirken, bazıları yüksek sıcaklık kürleşme döngüsü gerektirir (Hasan, 2020).

3.1.1. Epoksi

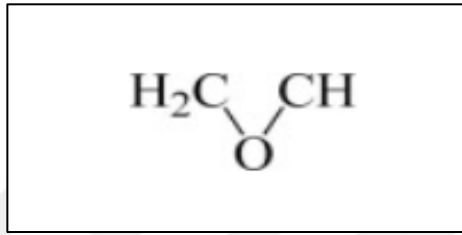
Epoksiler, termoset polimerler arasında en önemli sınıflardan biri olarak kabul edilmektedirler. Günümüzde pek çok endüstriyel uygulamada yüksek performans gösteren termoset reçineler olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Diğer termoset polimerler (örneğin polyester ve vinil ester) ile karşılaştırıldığında epoksiler daha pahalı olsalar da daha üstün mekanik özelliklerde olup nem emilimine, aşındırıcı sıvılar ve çevresel etkilere karşı daha yüksek dirence sahiptirler. Fiziksel özelliklerinin yanı sıra, kullanım sırasında sağladıkları dayanıklılık da onlara avantajlı bir maliyet-performans sunar.

Epoksi reçineler polyesterlere kıyasla daha yüksek ısı sapma ve cam geçiş sıcaklıkları sayesinde üstün elektriksel direnç gösterirler ve yüksek sıcaklıklarda daha iyi performans sergilerler. Ayrıca birçok yüzeyle ve kompozit malzemelerdeki elyaf takviyeleriyle mükemmel yapışma kabiliyetine sahiptirler. Epoksilerin kürlenme sürecinde büzülme oranı düşük olup (%5'ten az) stiren içermemeleri nedeniyle polyester ve vinil ester reçinelere kıyasla daha az toksik emisyon üretirler. Bu özellikleriyle epoksiler, el yatırma veya vakum torbalama gibi açık kalıp teknolojileriyle uyumlu imalat yöntemlerinde tercih edilebilirler. Ayrıca pek çok kompozit üretim yöntemiyle de uyumlu bir şekilde kullanılabilirler.

Epoksi reçineler büyük ölçüde esnek olup, reçine karışımında değişiklikler yapılarak veya sisteme yangın geciktirici ya da dayanım artırıcı katkı maddeler eklenerek çeşitli fiziksel, kimyasal ve işleme özellikleri kazanabilirler. Örneğin, yüksek elektriksel iletkenlik gerektiren bir uygulama için epoksi reçineye karbon nanotüpleri ya da metal tozları gibi dolgu malzemeleri ilave edilebilir.

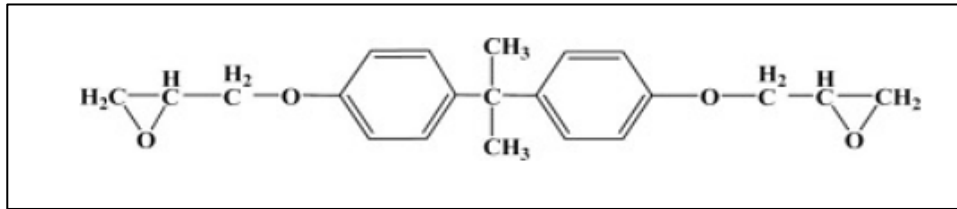
Ancak epoksi reçineler çatlakların ilerlemesine karşı düşük direnç, zayıf UV dayanımı ve kırılgenlik gibi bazı olumsuz özellikler de taşırlar. Genellikle nihai mekanik özelliklerin elde edilebilmesi için 120°C'ye kadar ısıtılarak 2-4 saatlik bir post-kürleme süreci uygulanması gerekir (Fiore ve Valenza, 2013).

Epoksi terimi, bir oksijen atomunun iki karbon atomuna bağlanarak oluşturduğu özel bir kimyasal grubu tanımlar. En basit haliyle alfa epoksi ya da 1,2-epoksi olarak bilinen üç üyeli halka yapısına sahiptir. İdealize edilmiş kimyasal yapı aşağıda gösterildiği şekilde sunulmuştur ve bu daha karmaşık bir epoksi molekülünün en belirgin tanımlayıcı özelliğidir.



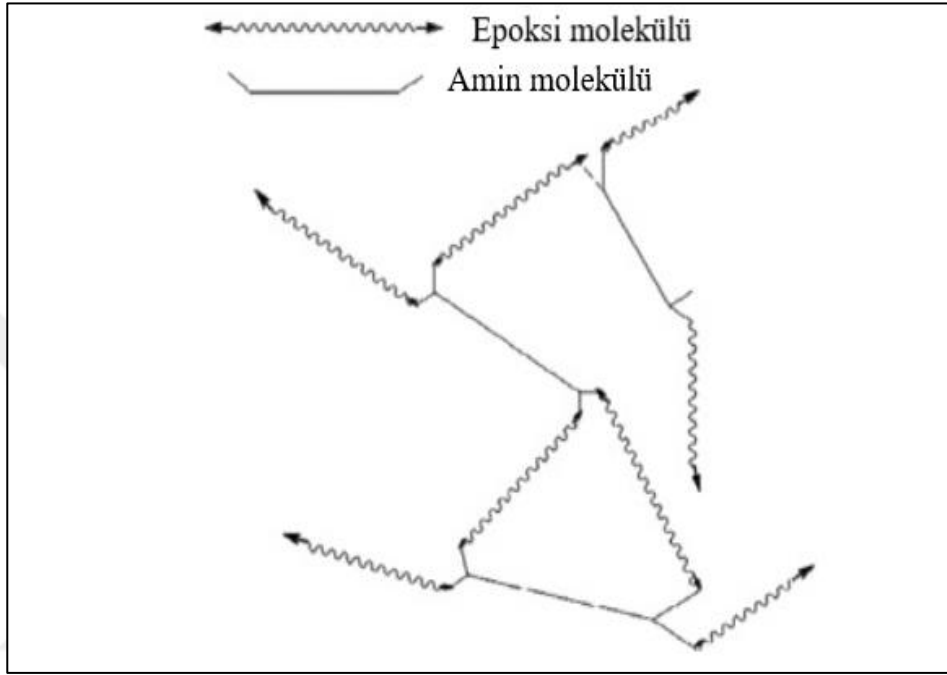
Şekil 3.3. Basit bir epoksinin idealize edilmiş kimyasal yapısı (etilen oksit) (Park ve Seo, 2011)

Epoksi reçineler, uçlarında reaktif gruplara sahip vinil esterler gibi uzun zincirli moleküler yapılara sahiptirler. Ancak epoksi reçinelerinde ester grupları yerine epoksi grupları bulunur. Bu farklılık ester gruplarının yokluğunda epoksi reçinelerinin suya karşı daha dayanıklı hale gelmesini sağlar. Epoksi molekülünün merkezinde yer alan iki halka yapısındaki gruplar termal gerilimleri doğrusal yapılara kıyasla daha verimli bir şekilde emebilir. Bu özellik, epoksi reçinenin mükemmel tokluk, sertlik ve ısıya karşı dayanıklılık kazanmasını sağlar. Tipik bir epoksi reçinesinin idealize edilmiş yapısı aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Tipik bir epoksi reçinesinin idealize edilmiş kimyasal yapısı (bisfenol-a'nın diglisidil eteri) (Park ve Seo, 2011)

Epoksi reçineleri polyester reçinelerden farklı olarak kürlenme sürecinde katalizör yerine sertleştirici kullanırlar. Sertleştirici genellikle bir amin bileşiğidir ve epoksi reçinenin kürlenmesi için epoksi ve amin arasındaki kimyasal reaksiyona katılır. Bu süreç, iki epoksi grubunun her birinin bir amin grubuyla bağlanmasını sağlar ve sonunda karmaşık, üç boyutlu bir moleküler yapı oluşur.



Şekil 3.5. Epoksi reçinelerin şematik gösterimi (Park ve Seo, 2011)

Amin moleküllerinin epoksi molekülleriyle belirli bir oranla reaksiyona girmesi nedeniyle reçine ve sertleştiricinin doğru oranda karıştırılması reaksiyonun tam olarak gerçekleşmesi için kritik öneme sahiptir. Eğer amin ve epoksi arasındaki oran doğru bir şekilde ayarlanmazsa, matris içinde reaksiyona girmemiş reçine veya sertleştirici kalabilir bu da kürleme sonrası kompozitin nihai özelliklerini olumsuz etkiler. Bu sebeple üreticiler genellikle reçine ve sertleştirici bileşenlerini doğru karışım oranını sağlamak amacıyla ağırlık veya hacim ölçümüne dayalı olarak kolayca elde edilebilecek şekilde formüle ederler (Park ve Seo, 2011).

Kompozit uygulamalarda matris malzemesi olarak epoksi reçine seçimi yapılırken iki temel ölçüt dikkate alınır: Cam geçiş sıcaklığı ve epoksi eşdeğer ağırlığı. Bu ölçütlerden en önemlisi cam geçiş sıcaklığıdır. Cam geçiş sıcaklığı bir epoksi reçinenin yapısal veya yapısal olmayan kullanım alanları için uygunluğunu belirler. Çünkü malzemenin modülü, cam geçiş sıcaklığının üzerinde bu sıcaklığın altındaki değerine

göre birkaç kat daha düşük seviyelere iner. Bir polimer matrisli kompozitin cam geçiş sıcaklığı, uygulanan kürleme sıcaklığına bağlı olarak değişir. Bu durum, kürleme işlemi sırasında oluşan yapı, kullanılan sertleştirici türü ve uygulanan sıcaklıkla ilişkilidir. Bir termoset polimerin kürlendiği sıcaklık, cam geçiş sıcaklığını büyük ölçüde etkiler ve bu sıcaklık değiştikçe cam geçiş sıcaklığı da farklılık gösterebilir. Ancak her termoset sistem, kullanılan reçine ve sertleştirici formülasyonuna bağlı olarak ulaşabileceği maksimum bir cam geçiş sıcaklığına sahiptir. Bu nedenle kürleme sıcaklığındaki artış, bu nihai cam geçiş sıcaklığını aşamaz.

Kompozit üretiminde epoksi reçine kullanımını tanımlamak için önemli bir diğer parametre de epoksi eşdeğer ağırlığıdır. Bu kavram, epoksi reçinenin moleküler kütesinin içerdiği epoksit grubu sayısına bölünmesiyle hesaplanır. Genellikle bu değer epoksi reçine üreticileri tarafından kullanıcıya sunulmaktadır (Bello vd., 2015).

3.2. Elyaf Takviyeler

Polimer matrisli kompozitler arasında elyafla güçlendirilmiş olanlar en sık tercih edilen türlerdir. Takviye elemanı olarak hem doğal hem de sentetik elyaflardan yararlanılabilir. Doğal elyaflar farklı bitki ve hayvan kaynaklarından elde edilmekte olup, özellikle çevreye duyarlı yapıları nedeniyle günümüzde daha fazla ilgi çekmektedirler. Sentetik elyaflar arasında ise cam, karbon ve aramid elyafı gibi malzemeler yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar.

Elyafar kendi özgün özelliklerini koruyarak matris fazı içerisinde yer alırlar ve matrisin karakteristikleriyle birleşerek kompozit malzemenin hedeflenen performansını oluştururlar. Elyafın geometrisi, boyutları, yüzey özellikleri, kimyasal yapısı ve matris içindeki yerleşim yönelimi gibi faktörler kompozitin mukavemet, tokluk, sertlik ve korozyon direnci gibi mekanik özelliklerinin şekillenmesinde kritik bir rol oynar (Asrafuzzaman vd., 2021).

Kompozit malzemelerde matris ile takviye fazı arasındaki fiziksel etkileşim alanına ara yüzey adı verilmektedir. Bu malzemelerde matris ve takviye fazlarının yoğunlukları birbirinden farklıdır. Matrisler belirli bir yönelime sahip olmaksızın rastgele bir yapıda bulunurken, takviye fazları ise belirli tercihler doğrultusunda yönlendirilmiş bir düzene sahiptir. Takviye fazı, kompozitin çekme ve kayma dayanımını artıracak şekilde özel olarak tasarlanır.

Ara yüzeyin kayma dayanımı, örneğin asit-baz etkileşimleri temelinde yapılan analizlerle geliştirilebilen bir özelliktir ve elyaf ile matris arasındaki yapışmanın etkinliğini gösterir. Bu durum, iki fazın özelliklerinin birbirleriyle uyumlu olmasının ne kadar kritik olduğunu ortaya koyar. Bu uyumu sağlamak amacıyla elyaf yüzey işlemleri veya ara yüzey modifikasyonları gibi yöntemler uygulanabilir. Böyle bir uyumun sağlanmasıyla birlikte ortaya çıkan bir diğer sonuç ise malzemenin izotropik özellik göstermemesi yani her yönde aynı davranışı sergilememesidir. Ancak belirli şartlar sağlandığında özellikle elyafların düz bir şekilde hizalanması, kusursuz silindirik şekil ve gözeneksiz yapı gibi koşullar altında malzeme her yönde sabit özellikler gösterebilir. Bu duruma ortotropi denir. Ortotropik özellikler kavramı, özellikle ilk dönem kompozit uygulamalarında dokuma yapısının bulunmadığı ve katmanların tek yönlü liflerden oluştuğu kabulüne dayanmaktadır.

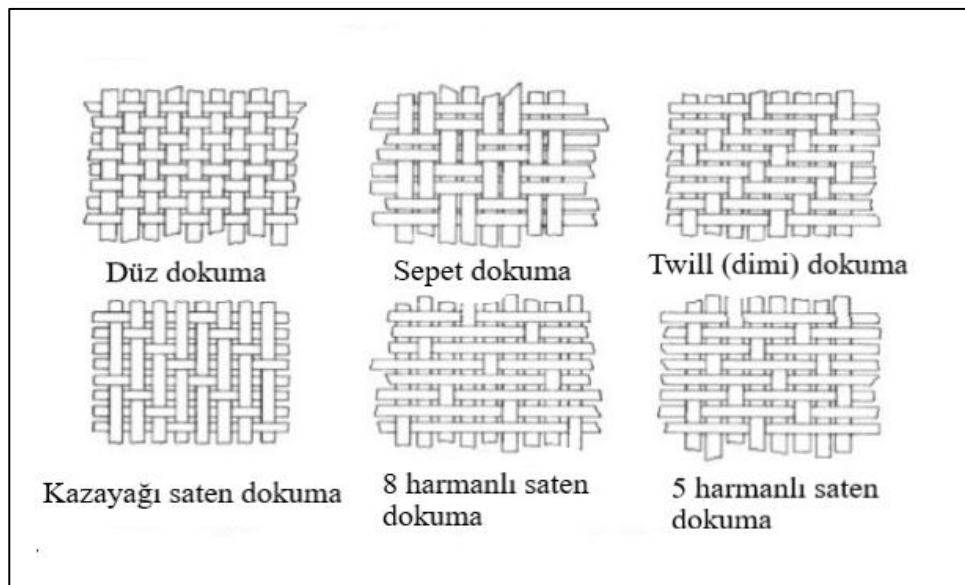
Ara yüzey mukavemeti, bir kompozitin yapısal olarak başarılı performans sergilemesi için kritik bir özelliktir. Bu mukavemeti etkileyen unsurlar çeşitlidir ve kullanılan elyafın türü, miktarı, uzunluğu ve çapı gibi geometrik faktörlerden bağımsız düşünülemez. Elyaflar kompozit yapıya sürekli ya da kesikli formlarda entegre edilebilir. Sürekli elyaf yapılar ise kendi içerisinde tekstil yapılar ve tekstil olmayan yapılar olarak iki gruba ayrılır. Tekstil yapılarında dokuma tezgâhları kullanılarak lifler belirli desenlerde yerleştirilirken, tekstil olmayan yapılar iğneleme gibi yöntemlerle mat formunda üretilirler. Bu matlar yalnızca reçine ile emprenye edilmekle kalmaz, aynı zamanda yapışkan reçinelerle de birbirlerine tutturulurlar. Tekstil esaslı yapılar, aynı katman içinde farklı yönlerde yerleştirilmiş lifler içerebilir ve bu yapılar basitten karmaşığa değişen formlarda olabilir. Buna karşın tekstil olmayan yapılarda her katmanda lifler tek yönlü olarak düzenlenmiştir.

Kompozit malzemelerden elde edilen kalite yalnızca üretim yöntemine değil, aynı zamanda kullanılan elyafların türüne, geometrik özelliklerine, takviye amacıyla nasıl yerleştirildiklerine ve bu yerleşimin düzenli olup olmamasına da bağlıdır. Elyaf uzunluğu ile çapı arasındaki oran uzunluk/çap oranı (aspect ratio) olarak adlandırılır ve bu oranın kompozitin elastik özellikleri üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu kabul edilmektedir. Eğer bu oran belirli bir kritik değerin altına düşerse elyaflar sürekli takviye malzemesi olarak değil kısa elyaflar şeklinde sınıflandırılırlar. Kısa elyaflar, polimer matrisli kompozitlerde genellikle rastgele yönlenmiş şekilde bulunurlar. Uzunluk/çap oranı değeri elyafların yüzey işleminden büyük ölçüde etkilenir ve bu durum hem doğal hem de

sentetik elyaflar için geçerlidir. Ancak yüzey işlemlerinin uzunluk/çap oranı üzerindeki etkisi çoğunlukla karbon elyafları özelinde araştırılmıştır.

Sentetik ve doğal elyaflar arasındaki temel fark, sentetik elyafların filament formunda kullanılmasıdır. Bu filamentlerin boyutları kompozitlerde kullanılan en küçük karbon elyaflarından en büyük cam elyaflarına kadar birkaç mikrondan birkaç on mikrona kadar değişiklik gösterebilir. Doğal elyaflar ise mikrofilamentlerin bir araya gelerek oluşturduğu filamentler ve fibrillerden meydana gelir ve bunlar teknikte kullanılan elyafları oluşturur. Sentetik elyaflar genellikle silindirik bir geometriye sahip olup dairesel kesitlere sahip olurken, doğal elyaflarda dairesel kesitler elde edilemez. Bazalt elyaflarında silindirik geometri üretim sırasında sağlanırken karbon ve cam elyaflarında bu işlem boyutlandırma adı verilen bir süreçle yapılır. Karbon elyaflarında kullanılan boyutlandırma ajanları matris spesifikdir ve özellikle termoplastik kompozitlerin hazırlanmasında önemli bir rol oynar. Cam elyaflarında ise birkaç silan bazlı boyutlandırma ajanı kullanılır ve araştırmalar genellikle amino, epoksi, metakriloksi veya vinil fonksiyonel grupları içeren dört farklı silan türü üzerine yoğunlaşmaktadır.

Farklı tekstil şekillerinde düzenlenebilen uzun elyaflar arasında keçe ve kumaş gibi yapılar yer almakta, ayrıca düz (plain), dimi (twill) ve saten (satin) örgü gibi dokuma türleri de bulunmaktadır. Genellikle bu yapılar 2D formda üretilir ve bu durum, kalınlık yönünde yeterli mekanik özelliklerin elde edilmesini bir dereceye kadar olumsuz etkileyebilir. Ancak dikme (stitching) gibi ek işlemlerle bu olumsuzluklar giderilebilir (Santulli, 2021).



Şekil 3.6. Bazı dokuma yapıları (Gürbüz, 2020)

Doğal elyaflar, yenilenebilir, düşük maliyetli, geri dönüştürülebilir ve biyobozunur özelliklere sahip malzemelerdir. Keten, pamuk, kenevir, jüt, kenaf, ananas, bambi ve muz gibi bitkiler lignoselülozik lif kaynakları olarak kullanılırlar ve kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak yer alırlar. Doğal elyaflar, bulunabilirlikleri, yenilenebilirlik kapasiteleri ve maliyet açısından avantajlı olmaları sayesinde kompozit üretiminde sentetik elyaflara çevresel bir alternatif sunmaktadırlar. Bu elyaflar, bitkisel, hayvansal ve mineral kaynaklardan elde edilebilirler. Bitkisel elyaflar çoğunlukla selülozdan oluşurlar ve pamuk, jüt, sisal, keten, kenevir ve rami gibi örnekleri bulunur. Bu elyaflar bitkilerin tohum, yaprak, kabuk, bast, meyve ve sap gibi farklı kısımlarından elde edilirler. Pamuk, keten ve kenevir en yaygın doğal elyaflar arasında yer alır. Özellikle kenevir elyafları esneklikleri ve çevre koşullarına karşı dayanıklılıkları sayesinde halat ve kanat profilleri gibi uygulamalarda kullanılır.

Hayvansal elyaflar, genellikle protein yapısına sahip maddelerden oluşurlar. Bu tür elyaflara örnek olarak ipek, yün, angora, moher ve alpaka gösterilebilir. Hammaddeleri ise hayvan kılları, kuş tüyü lifleri ve ipek lifleridir. Ayrıca mineral elyaflar da doğada doğal olarak bulunabilirler veya minerallerden küçük değişikliklerle elde edilebilirler. Asbest, seramik ve metal elyafları bu tür elyaflara örnek olarak verilebilir (Chandramohan ve Marimuthu, 2011).

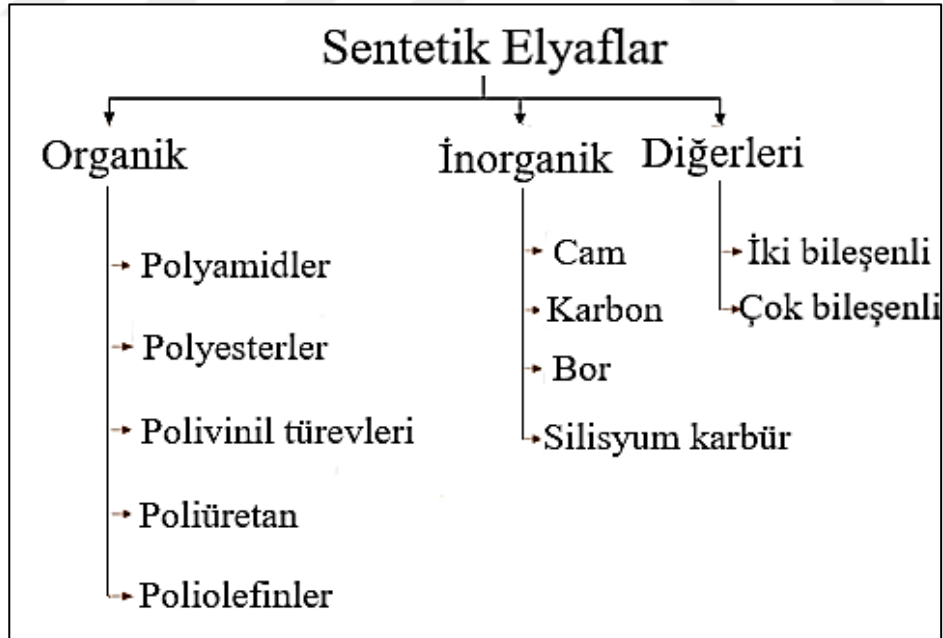
Sentetik elyaflar, hafiflikleri ve özel özellikleri sayesinde artan bir talep görmektedirler. Bu elyaflar yüksek mukavemet ve dayanıklılık sağladıkları için havacılık ve otomotiv endüstrilerinde gelişmiş kompozit malzemelerin üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Doğal elyaflar çevresel sürdürülebilirlik açısından alternatif olsa da sentetik elyaflar esneklik, elastikiyet, suya dayanıklılık, ısı ve kimyasal direnç gibi alanlarda daha üstün özelliklere sahiptirler. Elyaf takviyeli kompozitlerde ise sentetik elyaflar mükemmel çekme dayanımı, güç-ağırlık oranı, elektrik iletkenliği ve yorulmaya karşı direnç gibi özel avantajlar sunarlar.

Sentetik elyaf üretimi genellikle dört ana aşamadan oluşur: Kimyasal işlem, eğirme, sarma ve paketleme. Kimyasal işlem, polimerizasyon gibi yöntemlerle gerçekleştirilir ve elyafın bileşenlerinin hazırlanıp birleştirildiği bir süreçtir. Başlangıçta kullanılan bileşenler katı formdadır ve lif haline getirilebilmesi için sıvı hale getirilmelidir. Bu malzemeler kimyasal olarak işlenir, çözücü ile çözülür ya da ısıtılarak yoğun bir sıvı haline getirilir. Ardından eğirme işlemi sırasında bu yoğun sıvı spinneret adı verilen bir ağızdan geçirilerek elyaflar oluşturulur.

Spinneret, belirli çaplarda çok sayıda delik barındıran bir araçtır. Sıvı, spinneretteki deliklerden zorlanarak geçerken ipliksi formda lifler çıkar. Spinneretteki açıklık lifin çapını belirler ve bu çap kullanım amacına göre ayarlanabilir. Çıkan lifler sürekli formda olacak şekilde kurutulur. Sarma işlemi lifin ipliğe dönüşmesini sağlar. Lif, spinneretten yukarı doğru yükselirken büyük bir vakum cihazı tarafından yakalanır. Vakum gücü sayesinde basınç korunur ve elyaf bir bobine sarılarak paketlenir. Bununla birlikte, elyaf üretimi için kullanılan en yaygın yöntemlerden biri elektro-eğirmedir. Elektro-eğirme elektrostatik etkileşimler kullanılarak yönlendirilmiş bir üretim tekniğidir ve bu yöntemle elektro-eğirilmiş elyaflar elde edilir. Bu elyaflar arasındaki mesafe genellikle birkaç nanometre ile birkaç mikrometre arasında değişiklik gösterir. Elektro-eğirme işleminin en belirgin avantajlarından biri çeşitli işlevsel özelliklerde ve morfolojik yapılar da elyafların üretilmesidir.

Sentetik elyaflar, organik elyaflar, inorganik elyaflar ve diğerleri olmak üzere üçe ayrılırlar. Sentetik elyafların sınıflandırılması aşağıda gösterildiği şekildedir (Rajak vd., 2022).

Tablo 3.1. Sentetik elyafların şeması (Rajak vd., 2022)



3.2.1. Karbon elyafı

Karbon elyafı, çapı yaklaşık 5 ila 10 μm arasında değişen ve neredeyse tamamen saf karbondan oluşan son derece ince, uzun ve sürekli bir ipliklidir. Karbon atomları lifin

uzunluğu boyunca büyük ölçüde paralel bir düzenle grafit yapısında yerleşir. Bu da lifin yüksek dayanıklılığını sağlar. Bir araya gelen binlerce karbon filament, "roving" veya "tow" adı verilen bir elyaf demeti oluşturur.

Karbon elyaflarının temelini oluşturan ve üretiminde kullanılan ilk malzeme "öncül" (prekürsör) olarak bilinir. Thomas Edison'un erken dönem araştırmaları ve ampullerde selüloz bazlı karbon elyaflarının kullanılmasıyla başlayan süreçte karbon elyaflarının üretimi için pek çok farklı öncül malzeme denenmiştir. Günümüzde ise ticari olarak en yaygın kullanılan iki öncül malzeme poliakrilonitril (PAN) ve zift olarak öne çıkmaktadır.

PAN bazlı karbon elyaflar pazarın %90'ından fazlasını kapsar. Bunun nedeni, PAN öncül malzemesinin temin edilmesinin kolay olması ve üretim kalitesinin sürekli olarak korunabilmesidir. Karbon elyaf pazarının geri kalan kısmını ise zift bazlı karbon elyaflar oluşturur. Bunların dışında farklı kimyasal temellere dayanan ve yeni başlangıç bileşenlerinin elde edilmesine yönelik bazı yenilikçi yöntemler de mevcuttur.

Isıl işlem, günümüzde karbon elyaf üretiminde yaygın olarak kullanılan geleneksel bir yöntemdir. PAN bazlı karbon elyafların üretimi, kimyasal ve mekanik aşamaların birleşiminden oluşur. Bu süreçte uygulanan üç temel işlem aşaması şunlardır: Ön madde (prekürsör) üretimi, oksidatif stabilizasyon ve karbonizasyon/grafitleştirme. İlk karbonizasyon işleminden sonra standart elyaflar ya da yüksek mukavemetli elyaflar (HS ve HT tipleri) üretilir. Yüksek modüllü elyaflar için ise ek bir adım olan grafitleştirme işlemi gerçekleştirilir. Üretim sürecinin sonunda elde edilen karbon elyaf %95'ten fazla saf karbon içermektedir (Lengsfeld vd., 2021).

PAN üretimi için yaygın olarak kullanılan ticari yöntemler arasında çözelti ve süspansiyon polimerizasyonu bulunmakla birlikte emülsiyon polimerizasyonu da bir seçenek olarak uygulanabilir. Süspansiyon polimerizasyonunun bir alt türü olan sulu dispersiyon polimerizasyonu hızlı yayılma adımı nedeniyle tercih edilen bir yöntemdir. Süspansiyon polimerizasyonunda elyaf çekimi için polimerin hazırlanması birkaç işlem adımını gerektirir. Bu adımlar, yıkama, kurutma, öğütme ve polimer tozunun uygun bir çözücüde çözülmesidir. Çözelti polimerizasyonu yönteminde ise işlem sonrası ek adımlar bulunmaz ancak yüksek moleküler ağırlıklı polimer elde etmek zor olabilir. Her iki yöntemde de PAN, polar aprotik çözücüler olan dimetil formamid (DMF), dimetil asetamid (DMAc), dimetil sülfoksit (DMSO) ve propilen karbonat gibi maddelerle çözülür. Ayrıca NaSCN (sodyum tiyosiyanat) bazlı sulu çözücüler de kullanılabilir. PAN genellikle kopolimer olarak polimerize edilir. Akrilik lifler

ağırlıkça en az %85 akrilonitril içeren lifler olarak tanımlanırken modakrilik lifler %35 ile %85 arasında akrilonitril içerir. PAN öncül liflerinin üretiminde yaygın olarak kullanılan bazı kopolimerler arasında akrilik asit, metakrilik asit, itakonik asit, vinil asetat ve vinil bromür bulunur. PAN kopolimerleri PAN homopolimerlerine kıyasla farklı bir stabilizasyon mekanizması geçirdiğinden genellikle daha yüksek performanslı karbon elyaflarının elde edilmesini sağlarlar. Ayrıca PAN kopolimerleri daha iyi çözünme özellikleri göstererek moleküler kusurları azaltabilirler.

PAN lifi eriyik eğirme, yaş eğirme, kuru eğirme, kuru jet yaş eğirme ve jel eğirme gibi çeşitli yöntemlerle üretilmiştir. Eriyik eğirme çözücü kullanmadan lif üretme avantajı sunduğu için cazip bir seçenek olabilir. Ancak PAN, doğal yapısı gereği erimeden önce bozunma eğiliminde olduğu için eriyik eğirme oldukça özgün bir tekniktir. Örneğin, su veya uygun kopolimerler eklenerek homopolimer PAN'ın erime sıcaklığı düşürülebilir. Bu durum, eriyik eğirme işlemini daha verimli hale getirebilir. Ancak bu yöntemde karşılaşılan zorluklar nedeniyle eriyik eğirme ile üretilen PAN öncüllerinin ticari karbon lifi üretiminde kullanımı sınırlıdır.

Kuru eğirme işleminde, kullanılan çözücünün belirli özelliklere sahip olması gerekmektedir. Bu çözücü PAN ile çözücü kaynama noktasında stabil olmalı, eğirme kulesinde buharlaşabilecek kadar düşük bir buhar basıncına sahip olmalı ve PAN'ı etkili bir şekilde çözebilmelidir. Bu koşullar nedeniyle uygun çözücüler genellikle DMF veya DMAc gibi maddelerle sınırlıdır. Bir diğer eğirme yöntemi ise ekstrüde edilen polimerin sıvı bir ortamda pıhtılaştırılarak lif haline dönüştüğü çözelti eğirmedir. Bu yöntemler arasında yaş eğirme, kuru jet yaş eğirme ve jel eğirme yer almaktadır. Yaş eğirme tekniğinde, ekstrüde edilen polimer çözeltisi doğrudan pıhtılaşma banyosuna daldırılarak pıhtılaştırılır. Kuru jet yaş eğirme yönteminde ise meme, pıhtılaşma banyosunun 1-2 cm üzerinde yerleştirilir böylece ekstrüde edilen polimer çözeltisi pıhtılaşma banyosuna girmeden önce havayla temas eder. Jel eğirmede ise düşük konsantrasyonlarda (%2–15 ağırlıkça) çözünmüş yüksek moleküler ağırlıklı bir polimer hava boşluğu yöntemiyle eğrilir. Bu süreçte eğirme çözeltisi ekstrüze edilirken lif, faz ayrımı oluşmadan önce jel formuna gelir ve bu nedenle bu işleme "jel eğirme" adı verilir.

Lif eğirme işleminin ardından öncül lifin polimer zinciri hizalanmasını artırmak amacıyla genellikle birkaç aşamalı çekme işlemi gerçekleştirilir. Çekme sıcaklıkları ve oranları hem öncül PAN lifinin çekme performansını maksimize etmek hem de hedeflenen karbon lif özelliklerine (veya üretim hızına) ulaşmak için dikkatle optimize edilmelidir. Lif çekme işlemi, lif eğirme sırasında uygulanan bir çekme oranı ile başlar

ve bu aşamada lifler gerilim altında tutularak filamentler arası çap farklılıkları ve mekanik özellik varyasyonları azaltılmaya çalışılır. Çözeltiden eğirme yönteminde, lif pıhtılaşma banyosundan çıktıktan sonra polimer zincirlerinin daha fazla hizalanmasını ve lif çapının küçültülmesini sağlamak için ilave çekme işlemleri uygulanır. Genel eğilim olarak, toplam çekme oranı arttıkça öncül lifin çekme dayanımı ve modülü yükselir ancak aşırı çekme oranlarında dayanımda düşüş gözlemlenebilir. PAN öncül lifinin karbon elyaf üretimi için uygun hale getirilebilmesi amacıyla çekme aşamasında veya hemen sonrasında silikon bazlı bir sonlandırıcı yağ uygulanması gereklidir. Bu, sonlandırıcı liflerin stabilizasyon sırasında korunmasını sağlar ve filamentlerin birbirine yapışmasını önleyerek üretim sürecinde yaşanabilecek olası aksaklıkları engeller. PAN öncül liflerinin eğirme süreçleri genellikle ticari gizlilik kapsamında olduğundan detaylı bilgilere ulaşmak çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Yine de PAN bazlı öncül liflerin tipik olarak 0,5–1,0 GPA arasında çekme dayanımına ve 12–17 GPA arasında çekme modülüne sahip olduğu bilinmektedir. Yüksek performanslı karbon elyaflarının ise bu aralığın üst sınırına yakın değerlere sahip öncüllerden üretilmesi hedeflenmektedir (Newcomb, 2016).

Stabilizasyon, karbonizasyon sürecinin bir ön aşaması olup, kullanılan öncül malzemeye göre önemli ölçüde farklılık gösterebilir. Bu süreçteki ana hedef karbonizasyon sırasında öncül malzemenin deformasyonunu ya da erimesini engelleyecek şekilde termal olarak stabil bir merdiven polimeri oluşturmaktır. PAN, PAN/karbon nanotüp ve lignin gibi malzemeler karbonizasyon işlemine geçmeden önce atmosferik hava altında termo-oksidatif bir stabilizasyon aşamasından geçirilir. Stabilizasyon sürecinin üç temel parametresi vardır: Süre, kullanılan öncül lif miktarı ve gerilim ya da deformasyon kontrolü isteği.

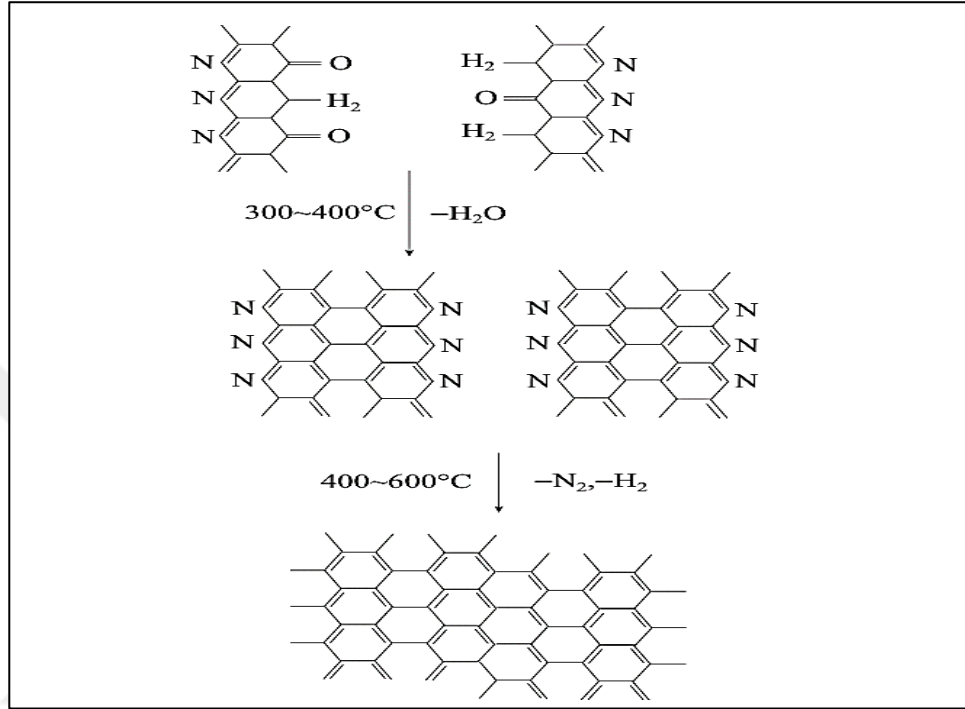
Stabilizasyon sürecinin en kritik aşaması, eğrilmiş lif yapısının korunarak moleküler ve fibriller hizalanmanın ısı işlem sırasında kaybolmasının engellenmesidir. Bu amaca ulaşabilmek için ya moleküller arasında bağ oluşumu sağlanmalı ya da PAN moleküllerinin doğal sertliği artırılmalıdır. Böylece karbonizasyon sürecinin son aşamasında zincir gevşemesi ve zincir kırılmalarının önüne geçilebilir veya minimum seviyeye indirilebilir. Ticari uygulamalarda PAN öncül lifi genellikle havaya maruz bırakılarak stabilize edilir. Birçok araştırmacı bu aşamada dehidrojenasyon ve halkalaşma reaksiyonlarının meydana geldiği konusunda hemfikirdir. Halkalaşma reaksiyonu oldukça ekzotermik bir süreçtir ancak PAN kopolimerleri kullanıldığında bu ekzotermiklik azalır. Yapılan çalışmalarda, kopolimerlerin stabilizasyon reaksiyonunda

başlatıcı bir rol üstlendiği vurgulanmaktadır. Farklı araştırmalar oksidatif stabilizasyon süresinin, sıcaklığın ve uygulanan gerilimin (TTT– Zaman-Sıcaklık-Gerilim) PAN öncül lifinin kopolimer bileşiminden etkilendiğini göstermiştir. Bunun yanı sıra, birçok bilim insanı bu süreç sırasında merdiven polimerlerinin oluştuğu konusunda da aynı görüştedir.

Oksidatif stabilizasyon süreci genellikle 180 °C ile 400 °C arasında bir sıcaklık aralığında gerçekleştirilir. Ancak çoğu durumda işlem sıcaklığı 300 °C'nin üzerine çıkmaz. Bununla birlikte bazı araştırmacılar, 300 °C'nin altındaki sıcaklıklarda karbon liflerinin termal olarak yeterince stabilize olmadıklarını ve sürecin tamamlanmadığı yönünde görüş belirtmişlerdir. Tam ve uygun bir stabilizasyonun sağlanabilmesi için sıcaklıkların en az 350 °C ve en fazla 400 °C arasında olması gerektiği ifade edilmektedir (Kumar, 2014).

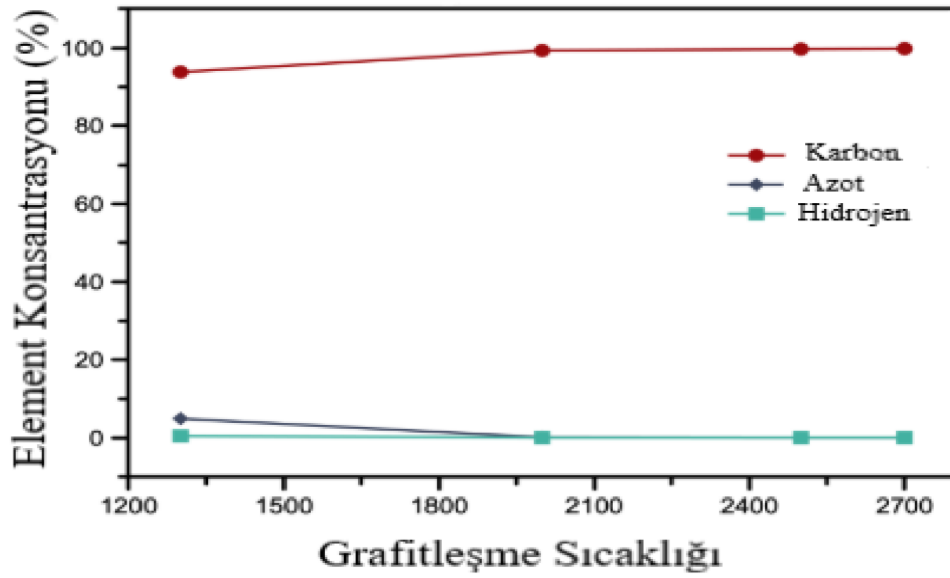
Karbonizasyon, önceden oksitlenmiş liflerin %99,99'dan yüksek saflıkta azot atmosferi altında, 300-1500 °C sıcaklık aralığında ve belirli bir gerilim uygulanarak ısıl bozunmaya uğratılması sürecidir. Bu aşamada, lif yapısındaki kararsız bölgeler ve karbon dışı atomlar (N, H, O gibi) ayrışarak uzaklaştırılır. Aynı zamanda moleküller arası yoğunlaşma (transvers çapraz bağlanma reaksiyonları) meydana gelir ve sonuç olarak karbon oranı %92'nin üzerine çıkan karbon lifleri elde edilir. Liflerin mikro yapısı bu süreçle birlikte grafit benzeri kristal yapılara dönüşüm göstermeye başlar. Şekil 3.7, yoğunlaşma ve piroliz süreçlerinin şematik bir gösterimini sunmaktadır. 300-400 °C sıcaklıkları arasında moleküller arası dehidrasyon ile çapraz bağlanma reaksiyonları oluşurken 400-600 °C aralığında denitrifikasyon ve dehidrojenasyon temelli çapraz bağlanmalar gerçekleşir. Bu tepkimeler 600-1300 °C sıcaklık seviyelerine kadar devam eder. Bu evrede, karbon lifleri birbirine paralel iki boyutlu altıgen grafit katmanları oluşturur ancak bu katmanlar arasındaki yapı hâlâ düzensizdir. Bu nedenle ortaya çıkan yapı "kaotik katmanlı grafit yapısı" olarak adlandırılır. Karbonizasyon işlemi yaklaşık 40 dakika sürmekte olup uygulanan gerilim her demet için yaklaşık 50 g düzeyindedir. Gerilim uygulaması grafit kristallerinin lif doğrultusunda hizalanmasını desteklerken, enine yönlü büzölmeleri sınırlar. İşlem sıcaklığı yükseldikçe karbon liflerinin elastiklik modülü artar ve mekanik dayanımı maksimum seviyeye ulaşır. Karbonizasyon sırasında hidrojen, azot ve oksijen gibi elementlerin uzaklaştırılması ile birlikte metan, karbondioksit, amonyak ve hidrojen siyanür gibi çeşitli gazlar da açığa çıkar. Bu gazların hızlı bir şekilde ortamdan uzaklaştırılması kritik öneme sahiptir. Aksi halde yoğunlaşarak lif yüzeyine yapışmaları durumunda hem kendi ayrışma ürünlerinin dışarı çıkışını engellerler hem de liflerin birbirine yapışmasına ve aşırı ısınmasına neden olurlar. Bu

istenmeyen durum, filamentlerin kopmasına, kırık lif oranının artmasına ve dolayısıyla mekanik özelliklerde belirgin bir düşüşe yol açar. Bu nedenle piroliz ürünlerinin etkin bir şekilde uzaklaştırılması için azot gazının demet yönünün tersine düzenli bir akışla sağlanması gerekir (Wang vd., 2011).



Şekil 3.7. Karbonizasyon sürecinde enine çapraz bağlamanın diyagramı (Wang vd., 2011)

Grafitleme, karbonizasyon işleminde kullanılan sıcaklıklardan daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Bu işlem sırasında karbon bazlı malzemeler genellikle 1000 °C'nin üzerinde ve kontrollü ortam koşullarında ısıtma işlemi tabi tutulurlar. Bu denli yüksek sıcaklıklarda yapılan ısıtma işlemi karbon elyafın kimyasal bileşimini de önemli ölçüde değiştirir. Karbonizasyon sürecine benzer şekilde grafitleme de karbon bakımından zengin malzemelerin oluşumunu sağlar ancak yalnızca karbonize edilmiş malzemelere kıyasla daha yüksek bir karbon konsantrasyonu elde edilir. Şekil 3.8'de görüldüğü gibi, PAN kökenli karbon elyafların karbon oranı grafitleme sıcaklığının 1300 °C'den 2700 °C'ye çıkarılmasıyla %93,85'ten %99,87'ye yükselmiştir. Ayrıca grafitleme işlemi sırasında karbon bazlı malzemeler dehidrojenasyon ve denitrojenasyon süreçlerine de maruz kalırlar.



Şekil 3.8. Farklı grafitleştirme sıcaklıklarında PAN bazlı karbon elyafların elementel bileşimi (Acedera, 2023)

Grafitleme sürecinde karbon atomları altıgen halkalar oluşturur ve ardından bu halkalar paralel düzlemler halinde bir araya gelerek grafit benzer bir yapı meydana getirir. Başka bir ifadeyle, grafitleme işlemi karbon elyafların atomik yapısının daha kristalimsi bir forma evrilmesini sağlar ve ortaya çıkan yapı grafit özellikleri gösterir. Ancak bu süreç, karbon ağ yapısının tamamının grafit dönüşümünü garanti etmez. Bu nedenle karbon yapısında altıgen örgülü katmanların oluşma düzeyini nicel olarak ifade edebilmek için grafitleşme derecesi (Degree of Graphitization, DOG) tanımlanmıştır. Daha teknik bir açıklamayla DOG, karbon bazlı malzemelerde sp^3 hibritleşmesinden sp^2 hibritleşmesine olan dönüşümün bir göstergesi olarak kabul edilir. Genel olarak yüksek DOG değerleri malzeme içerisinde daha fazla grafit benzeri yapının mevcut olduğunu ve buna bağlı olarak malzemenin daha yüksek kristallik ve yapısal düzen sergileyebileceğini ifade eder.

Genel anlamda grafitlenme sıcaklığının artması, malzemenin grafit benzeri yapısının daha yüksek seviyelere ulaşmasını sağlar. Bir başka ifadeyle, karbon esaslı materyaller grafitlenme sıcaklığı yükseldikçe grafitte daha çok yaklaşan bir yapı kazanırlar. Bu yüzden yüksek sıcaklıklarda grafitlenen malzemelerin daha gelişmiş grafit benzeri özellikler göstermesi beklenir. Yani grafitlenme sıcaklığındaki artışa bağlı olarak daha yüksek Young modülü (daha düşük sıkıştırılabilirlik), daha yüksek elektriksel ve

termal iletkenlik değerleri ile daha üstün kimyasal stabilite özellikleri gözlenmelidir (Acedera, 2023).

Karbon elyafı çoğunlukla dokuma kumaş formunda üretilir, bu da onunla çalışmayı oldukça pratik hale getirir. Karbon elyaf kumaşlarında çeşitli dokuma teknikleri kullanılmaktadır. Bunlar arasında en sık tercih edilenler ise düz dokuma, dimi dokuma ve saten dokuma türleridir.

Düz dokuma karbon elyaf kumaşlar, simetrik yapıları ve küçük dama tahtasına benzeyen desenleri ile tanımlanırlar. Bu dokuma tipinde iplik demetleri (tow) birbirleri üzerinden ve altından geçerek düzenli bir şekilde örülürler. İlmekler arasındaki kısa mesafe bu kumaşların yüksek seviyede dokuma stabilitesine sahip olmasını sağlar. Kumaş stabilitesi, üretim ve kullanım süreçleri boyunca dokuma açısının ve elyaf yöneliminin korunabilme kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Düz dokuma yapılar yüksek stabiliteleri sayesinde formunu korurken şekil verilebilirlik açısından sınırlamalara sahiptir. Bu da onları karmaşık geometrilik kalıplar için daha az uygun hale getirir. Bu nedenle düz dokuma karbon elyaf kumaşlar, düz paneller, silindirik tüpler veya iki boyutlu eğrilere sahip uygulamalar için daha elverişli bir tercih oluşturur. Ancak bu dokuma türünün bir dezavantajı da iplik demetleri arasındaki bağlantı mesafesinin kısa olmasıdır. Bu durum kumaşta keskin kıvrımların oluşmasına yol açar. Keskin kıvrımlar ise zamanla parça üzerinde gerilme yoğunlukları oluşturarak mekanik zayıflamalara neden olabilir.

Dimi dokuma iyi düzeyde esneklik sunar ve karmaşık yüzey formlarına kolayca uyum sağlayabilir. Kumaş stabilitesi bakımından saten dokumaya göre daha avantajlı olsa da düz dokuma kadar yüksek bir stabiliteye sahip değildir. Dimi dokumada bir iplik demetinin izlenmesi halinde, belirli sayıda iplik demetinin üzerinden geçip ardından aynı sayıda iplik demetinin altından geçtiği görülür. Bu düzenli üst-alt geçiş hareketi, kumaş yüzeyinde çapraz yönlü ve “dimi çizgisi” olarak adlandırılan ok başı şeklinde desenler oluşturur. Dimi dokumalarda ipliklerin bağlandığı noktalar arasındaki mesafe daha uzun olduğu için düz dokumaya kıyasla daha az kıvrım meydana gelir, bu da malzemedeki potansiyel gerilme yoğunluklarının düşmesine katkı sağlar. Endüstride en yaygın bilinen karbon elyaf dokuma türlerinden biri 2X2 dimidir. Bu yapı orta seviyede şekillendirilebilirlik ve stabilite sunar. İsminden anlaşılabileceği gibi her iplik demeti iki iplik demetinin üzerinden geçtikten sonra iki iplik demetinin altından geçerek dokuma tamamlanır.

Benzer şekilde, 4X4 dimi dokuma türünde ise iplik demetleri dört iplik demetinin üzerinden geçip ardından dört iplik demetinin altından geçer. 4X4 dimi, 2X2 dimi dokumaya göre daha gevşek bir yapıya sahiptir. Bu durum şekillendirilebilirliği artırırken, stabilitenin bir miktar azalmasına neden olur.

Saten dokuma, binlerce yıl önce pürüzsüz yüzeye ve kesintisiz bir görünüme sahip ipek kumaşlar üretmek için geliştirilmiştir. Bu kumaşların en belirgin özelliği mükemmel dökümlülük (drapaj) sağlamasıdır. Kompozit malzemelerde ise bu dökümlülük özelliği kumaşın karmaşık yüzey formlarına rahatça uyum sağlayarak yüzeyi sarabilmesi anlamına gelir. Ancak bu kadar kolay şekil alabilen bir kumaşın düşük stabiliteye sahip olması kaçınılmazdır.

Saten dokuma türleri arasında en çok tercih edilenler 4 harmanlı saten (4HS), 5 harmanlı saten (5HS) ve 8 harmanlı saten (8HS) çeşitleridir. Harman sayısı arttıkça kumaşın şekillendirilebilirliği artarken, buna paralel olarak stabilitesi de azalmaktadır. Harmanlı saten dokuma adlarındaki sayı, bir iplik demetinin toplam kaç iplik demetinin üzerinden ve ardından kaç iplik demetinin altından geçtiğini belirtir. Örneğin, 4HS dokumada her iplik demeti üç iplik demetinin üzerinden geçip birinin altından geçerek ilerler. 5HS dokumada dört iplik demetinin üzerinden ve bir iplik demetinin altından geçilerek dokuma yapılır. Benzer şekilde, 8HS dokumada ise iplik demeti yedi iplik demetinin üzerinden ve bir iplik demetinin altından geçerek yapıyı oluşturur (Olliges, 2019).

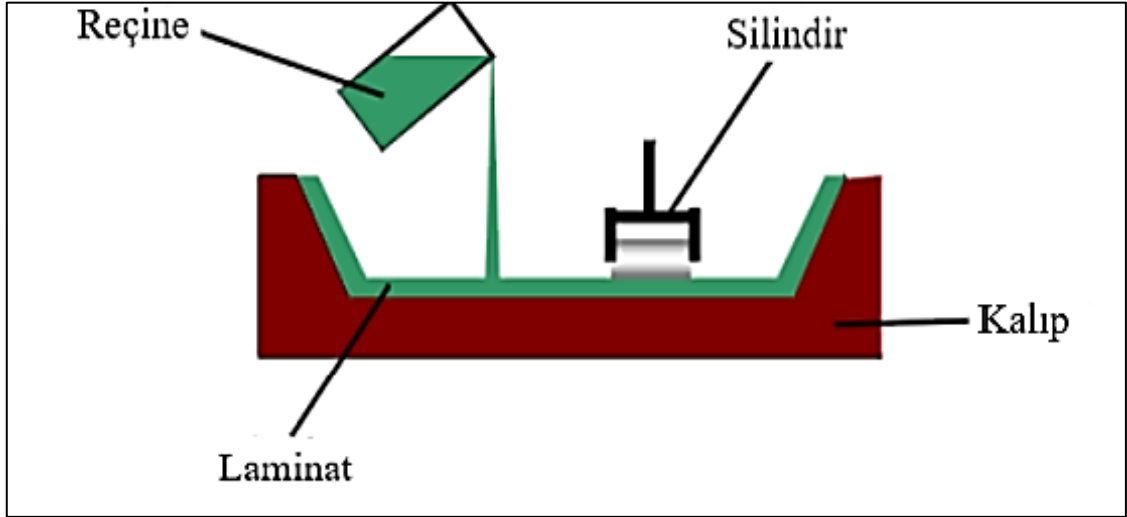
3.3. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Polimer matrisli kompozitlerin üretimi için çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları şunlardır:

3.3.1. El yatırma yöntemi (Hand lay up)

Bu işlem, kalıbın bir yüzünün açık bırakılarak istenilen şeklin elde edilmesi amacıyla hazırlanır. İlk olarak takviye elyafları kalıp yüzeyine serilir ve ardından jel formunda olan matris malzemesi elyafların üzerine fırçalanarak uygulanır. Bu süreç istenilen kalınlık elde edilene kadar devam eder. En az ekipman gereksinimi nedeniyle bu yöntem en ekonomik üretim yöntemlerinden biridir. Aynı zamanda işlemin elle yapılması sayesinde elyafların matris içerisindeki yönelimi üzerinde daha hassas bir

kontrol sağlanabilir. Kalıplar, ahşap, sac metal, alçı veya FRP (elyaf takviyeli plastik) gibi materyallerden üretilebilir. Daha iyi yüzey kalitesi sağlamak için kalıpların üzerine jel kaplama yapılır. Bu yöntem en eski ve yaygın olarak kullanılan üretim tekniklerinden biridir. Havacılık ve uzay sanayisinde birçok kompozit parça el yatırma yöntemiyle üretilmektedir. Ayrıca tekne gövdeleri, tanklar ve basınçlı kaplar gibi polyester ve epoksi reçineli parçaların üretiminde de bu yöntem tercih edilmektedir.

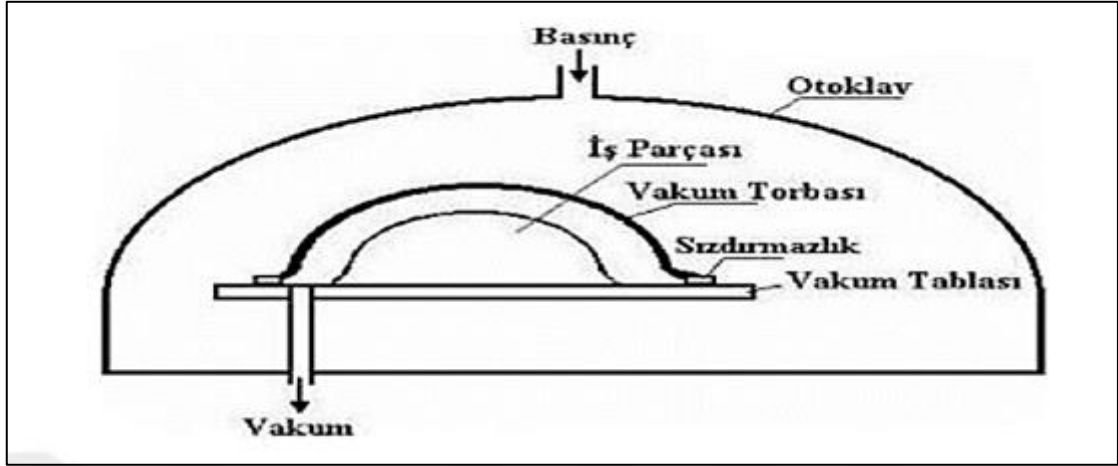


Şekil 3.9. El yatırma yöntemi (Reddy ve Ganta, 2019)

3.3.2. Otoklav yöntemi

Otoklav yöntemi, parçanın şekillendirilmesinin açık kalıplama tekniklerinden biriyle yapıldığı ve ardından vakum, ısı ve inert gaz basıncı altında kürlendiği bir işlemdir. İlk olarak şekillendirilen parça plastik bir torbaya yerleştirilir ve içerideki hava vakum pompası ile dışarıya çekilir. Bu işlem parçadaki hava inklüzyonlarını ve uçucu maddeleri uzaklaştırarak daha homojen bir yapı elde edilmesini sağlar. Ardından otoklavda ısı ve inert gaz basıncı ile malzemeler kürlenir ve yoğunlaşır. Bu yöntem tutarlı ve homojen malzemelerin üretimine olanak tanır ancak nispeten pahalıdır ve genellikle yüksek kaliteli havacılık ürünlerinin üretiminde tercih edilir. Otoklav, yüksek sıcaklık ve basınç altında çalışan kapalı bir sistemdir. Bu süreç, malzemedeki boşlukların basınç altında azalmasına yardımcı olur ve parçanın kalitesini artırır. Parça otoklavda ısıtılırken aynı anda basınç uygulanır. Vakum torbaları bu süreçte kullanılabilir. Termoset kompozitler çapraz bağlanırken, termoplastikler erir. Basınç, kompozit katmanlarını birleştirerek matris

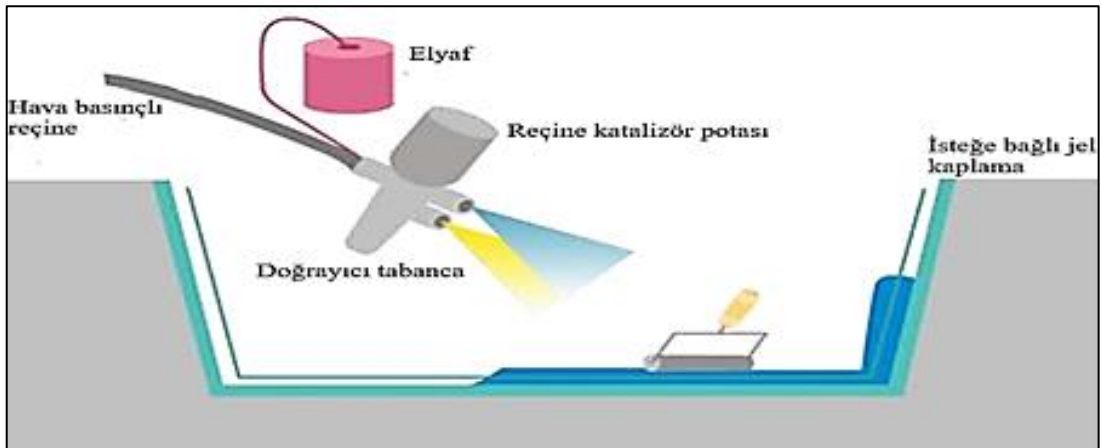
içindeki boşlukları giderir. Çok büyük parçaların üretimi mümkündür ancak bu yöntem son derece pahalıdır (Reddy ve Ganta, 2019).



Şekil 3.10. Otoklav yönteminin genel şeması (Arabacılar, 2021)

3.3.3. Sprey yayma (Spray up) yöntemi

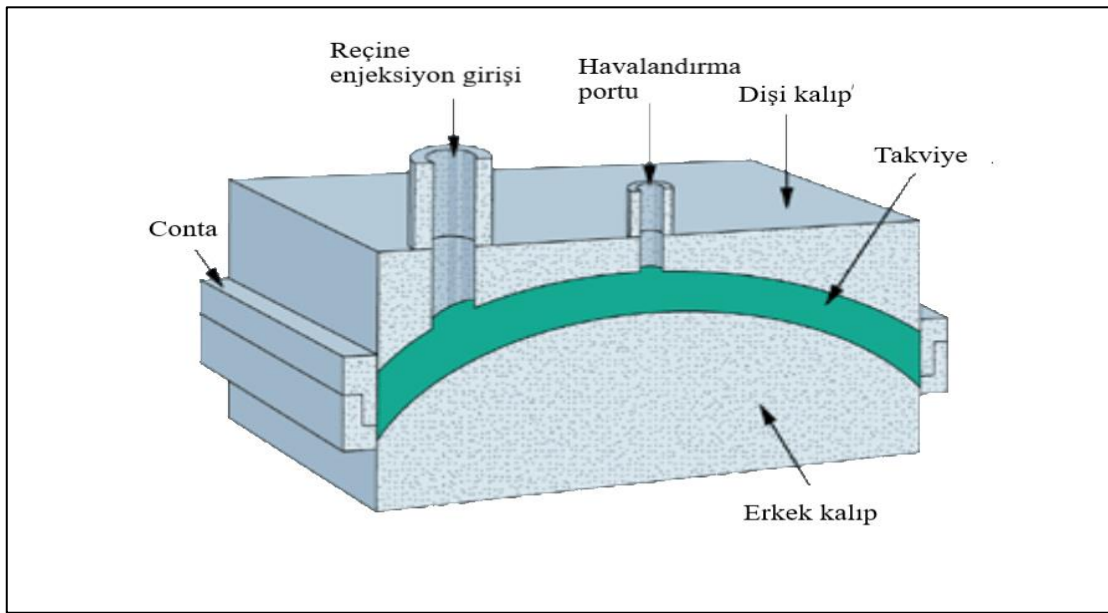
Sprey-yayma yöntemi, el yatırma tekniğinin geliştirilmiş bir versiyonudur. Bu yöntemde reçine ve takviye malzemeleri bir doğrayıcı tabanca kullanılarak kalıp üzerine püskürtülür. Aynı anda bir merdane püskürtülen malzemeyi sıkıştırarak matris malzemesinin elyafı uyumlu hale gelmesini sağlar. Şekil 3.11 spre-yayma sürecini göstermektedir. Bu işlem açık kalıp kullanılarak yapılır ve doğranmış elyafların kalıba daha iyi uyum sağlaması nedeniyle el yatırma yöntemine kıyasla daha hızlı bir üretim sağlar.



Şekil 3.11. Sprey yayma yöntemi (Ghori ve Tirth, 2021)

3.3.4. Reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi

RTM, kapalı kalıp kullanılarak gerçekleştirilen bir üretim yöntemidir. RTM kalıbı, nihai ürünün şeklini belirleyen iç yüzeylere sahip iki ayrı kalıp parçasından oluşur. Elyaf kalıp yarıları arasına yerleştirilir ve istenilen yönelim ve kalınlıkta düzenlenir. Kalıp yarıları kapatılıp sabitlendikten sonra reçine belirli bir miktarda pompa yardımıyla kalıp içerisine enjekte edilir. Ardından kalıp ısıtılarak polimer matrisin kürlenmesi sağlanır ve sonunda katı kompozit malzeme elde edilir. Bu yöntemle kalıp yüzeyine uygun, yüksek kaliteli yüzeyler ve üstün mekanik özelliklere sahip parçalar üretilir.

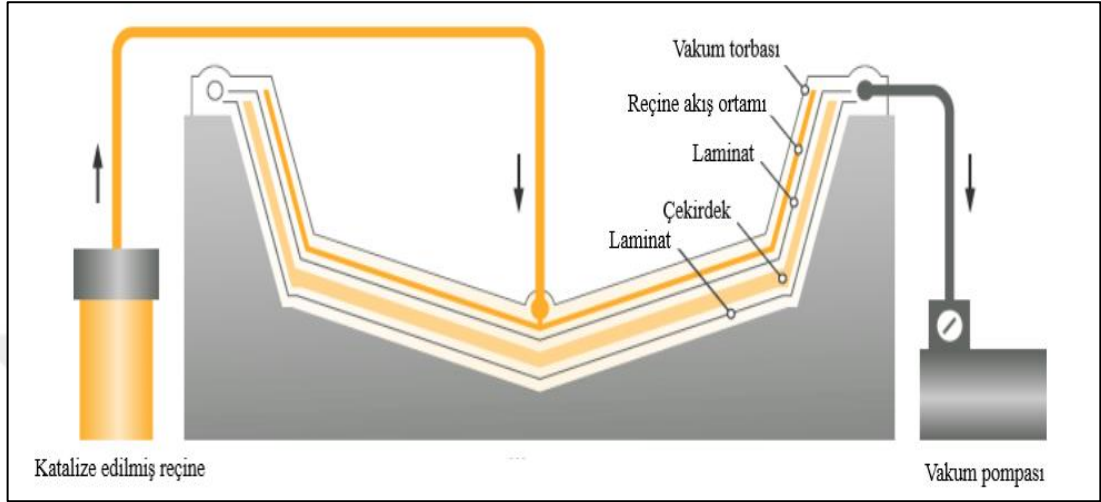


Şekil 3.12. RTM yöntemi (Ghori ve Tirth, 2021)

3.3.5. Vakum destekli reçine transfer kalıplama (VARTM) yöntemi

VARTM, reçine transfer kalıplama yönteminin geliştirilmiş bir versiyonudur. RTM'nin ana problemi kalıp kapatıldığında kalan havadır. Bu hava kompozit malzeme içinde hapsolarak kürleme sürecinin ardından boşlukların oluşmasına yol açar. Ayrıca yüksek basınçla reçine transferi sırasında elyaf dokusunun yapısı bozulabilir. Bu sorunları aşmak için vakum destekli RTM yöntemi uygulanır. VARTM'de, kalıptaki havayı uzaklaştırmak ve reçinenin elyaf tabakalarına düzgün bir şekilde akmasını sağlamak için bir vakum pompası kullanılır. Kürleme işlemi vakum altında yapılır. Atmosfer basıncı, elyaf tabakası ile dış ortam arasına yerleştirilen filmi malzeme üzerinde bastırarak

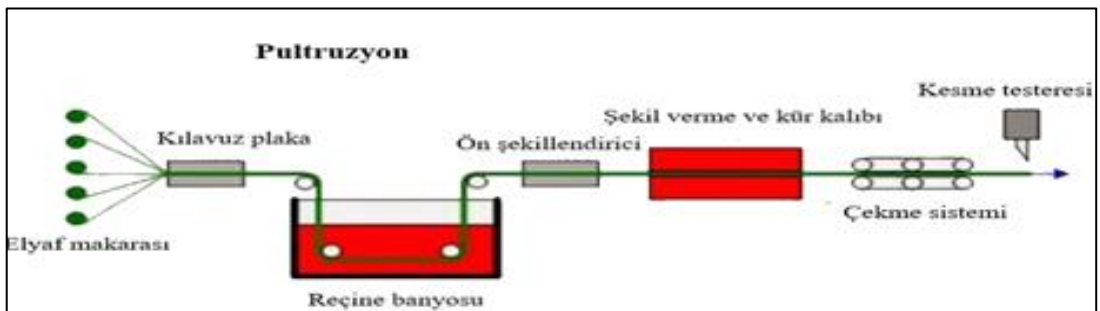
sızdırmazlığı sağlar. İmpregnasyon (emdirme) tamamlandıktan sonra parça oda sıcaklığında kürlenir. Bu yöntemde yüksek akışkanlığa sahip reçineler tercih edilir. VARTM düzeni, şekil 3.13'te gösterildiği gibi tasarlanmıştır. Havanın tamamen uzaklaştırılması son ürünün gözeneksiz olmasını sağlar.



Şekil 3.13. VARTM yöntemi (Ghori ve Tirth, 2021)

3.3.6. Pultrüzyon yöntemi

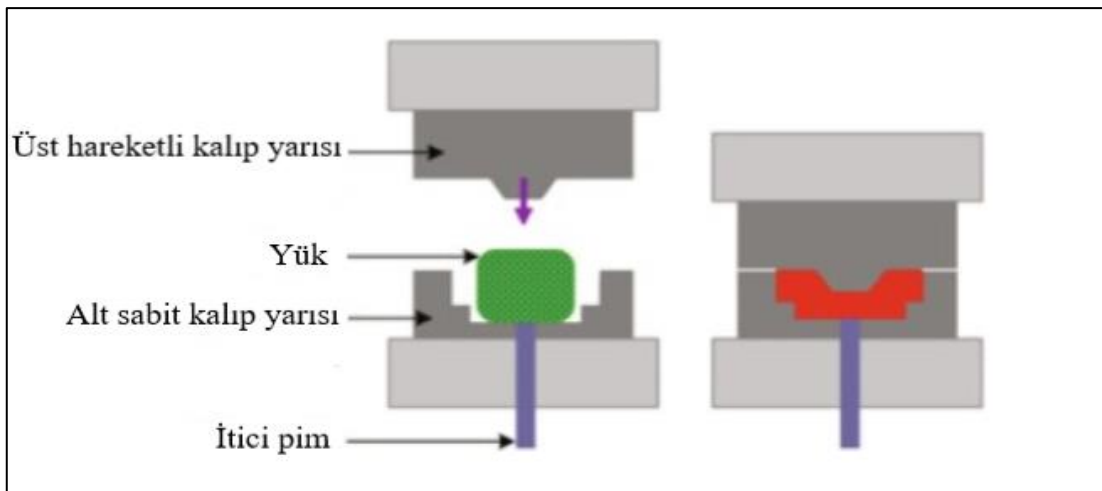
Bu işlem, yalnızca sabit kesitli profillerin üretimiyle sınırlıdır. Örneğin, borular, kanallar ve çubuklar gibi. Pultrüzyon yöntemi, sürekli bir elyaf demetinin sıvı reçineye batırılması ve ardından ürüne uygun şekilde tasarlanmış, ısıtılmış bir kalıptan çekilmesiyle gerçekleşir. Pultrüzyon sisteminin temel bileşenleri takviye elyafı için bir besleme platformu, reçine matrisi için bir kap, şekillendirme ve kürleme kalıpları, çekme mekanizması ve kesme bıçağından oluşur. Bu yöntem, aynı kesitteki yüksek üretim hacimlerini düşük maliyetle elde etmek için oldukça uygundur. (Ghori ve Tirth, 2021).



Şekil 3.14. Pultrüzyon yöntemi (Ghori ve Tirth, 2021)

3.3.7. Sıkıştırma kalıplama yöntemi

Sıkıştırma kalıplama (compression molding), karmaşık yapıli kompozit parçaların istenilen boyut ve özelliklerde üretilmesini sağlayan yaygın bir üretim tekniğidir. Bu yöntem, otomotiv, havacılık ve tüketici ürünleri gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılmakta olup, örneğin otomobil fren balataları, uçakların iç panel kaplamaları ve mutfak tezgâhları gibi ürünlerin imalatında tercih edilmektedir. Yöntemin en önemli avantajlarından biri, üretim süreci boyunca reçine oranı, elyafların yönü ve benzeri önemli parametrelerin hassas bir şekilde kontrol edilebilmesidir. Bu sayede yüksek mekanik dayanım ve ürünler arası tutarlılık sağlanmaktadır. Sıkıştırma kalıplama özellikle cam elyafla takviye edilmiş karmaşık polimer yapıların üretimi için idealdir çünkü yüksek basınç, büyük hacimli üretim kapasitesi ve kısa çevrim süreleriyle çalışır. Bu teknikte genellikle 120°C ile 200°C (yaklaşık 250°F- 400°F) arasında sıcaklıklara sahip metal kalıplar ve güçlü hidrolik veya mekanik pres sistemleri kullanılır. Kompozit parça üretimi sırasında belirli miktarda reçine malzeme sabit ve hareketli parçalardan oluşan kalıp içerisine yerleştirilir. Ardından hareketli kalıp kısmı ısı ve basınç uygulayarak malzemeyi nihai formuna dönüştürür. Kullanılan malzeme tipine göre çeşitli sıkıştırma kalıplama türleri bulunmaktadır. Bunlar arasında, sac kalıplama bileşiği (Sheet Molding Compound-SMC), yığın kalıplama bileşiği (Bulk Molding Compound-BMC), kalın kalıplama bileşiği (Thick Molding Compound-TMC) ve yaş serme-sıkıştırma kalıplama (Wet Lay-Up Compression Molding) gibi farklı teknikler yer alır (Shuvo vd., 2024).



Şekil 3.15. Sıkıştırma kalıplama yöntemi (Shuvo vd., 2024)

3.4. Nanomalzemeler ve Polimer Matrisli Nanokompozitler

Uluslararası Birim Sistemi'nde "nano" öneki, bir ölçü biriminin son derece küçük bir kesrini ifade etmek için kullanılır. Örneğin, bir nanometre bir metrenin milyarda biri, bir milimetrenin ise milyonda biri kadardır. Benzer şekilde, bir nanolitre, bir litrenin milyarda biri ya da bir mililitrenin milyonda biri büyüklüğündedir. Nano kavramı günümüzde çok çeşitli bilim dallarında yaygın olarak kullanılmakta ve modern bilim dünyasında önemli bir yer edinmektedir. Bu nedenle bilimsel çalışmalarda ve akademik literatürde karşılaşma sıklığı giderek artmaktadır.

Nanoölçek, yani 1 ila 100 nanometre arasındaki boyut aralığı nanoparçacıkları tanımlayan temel ölçüttür. En az bir boyutu bu aralıkta olan maddeler nanomalzeme (NM) olarak adlandırılır. Bazı tanımlamalarda ise nanomalzemelerin üç boyutundan en az birinin 1–100 nm arasında olması ve yüzey alanı/hacim oranının santimetreküp başına en az 60 metrekaire olması gerektiği belirtilmektedir.

Nanoskobik ölçekteki parçacıklar, makroskobik boyuttaki benzerlerine kıyasla özgün fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikler sergilerler. Bu tür yapılar, katı, sıvı, gaz ya da plazma gibi bilinen hallerin dışında kendilerine özgü bir madde hali olarak da değerlendirilmektedir. Nanoboyutta sahip oldukları özgün elektriksel, manyetik ve optik özellikler sayesinde farklı davranışlar gösterirler.

Nanoteknoloji adı verilen bilim alanı bu tür nanomalzemelerin üretimini, mühendisliğini ve farklı alanlardaki uygulamalarını kapsar. Nanomalzemelerin sunduğu yenilikçi çözümler, bu teknolojinin başta sanayi olmak üzere birçok alanda yoğun ilgi görmesine neden olmuştur. Tarımdan biyomedikale, enerjiden elektronik ve telekomünikasyona, kozmetikten gıda mühendisliğine kadar pek çok sektörde nanoteknoloji uygulamaları hızla yayılmaktadır.

Bir malzemenin elastikiyet, süneklik, çekme direnci ve esneklik gibi mekanik özellikleri kullanım alanlarını doğrudan etkiler. Nanomalzemelerde ise bu özelliklere ek olarak sertlik, akma dayanımı, elastiklik modülü ve tokluk gibi mekanik nitelikler geleneksel büyük ölçekli malzemelere kıyasla daha yüksek seviyelerde olabilir. Bu artış, tane boyutunun küçülmesi ve tane sınırı deformasyonunun artmasıyla ilişkilidir.

Nanomalzemelerin yanıcılık, aşındırıcılık, aşınmaya karşı direnç, oksidasyon ve indirgeme kapasitesi gibi kimyasal özellikleri hangi alanlarda kullanılabileceklerini belirlemede kilit rol oynar. Bu materyaller, bulk (büyük ölçekli) eşdeğerlerine göre çok daha yüksek reaktivite, seçicilik ve katalitik yetenekler gösterebilirler.

Ayrıca bulk malzemelerin erime sıcaklığı sabit kalırken, nanomalzemelerde boyut küçüldükçe yüzeydeki serbest atomlar nedeniyle erime noktası düşebilir. Nanoskobik ölçeklerde toplam hacim değişmeden kalırken, yüzey alanı önemli ölçüde artar. Bu durum yüzey/hacim oranının büyümesine neden olur ve yüzeydeki atomların yüksek yüzey enerjisi dolayısıyla aglomerasyon (bir araya toplanma) eğilimi göstermesine yol açar (Mekuye ve Abera, 2023).

Karbon esaslı nanomalzemeler, nanomalzeme çeşitlerinden biridir ve yapısal olarak küresel, elipsoidal ya da içi boş tüp formunda bulunabilirler. Bu grupta yer alan başlıca yapılar arasında fullerenler (C60), karbon nanotüpler, karbon nanofiberler, karbon siyahı, grafen ve karbon soğanları bulunmaktadır. Bu tür karbon bazlı nanomalzemelerin sentezinde yaygın olarak kullanılan üretim teknikleri arasında lazer ablasyonu, ark deşarj yöntemi ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) öne çıkar.

İnorganik bazlı nanomalzemeler, metal ve metal oksit nanoparçacıklarını (NP) içeren bir diğer önemli nanomalzeme grubudur. Altın (Au) ve gümüş (Ag) gibi metal nanoparçacıklarının yanı sıra titanyum dioksit (TiO₂) ve çinko oksit (ZnO) gibi metal oksit nanoparçacıkları ile birlikte silikon gibi yarı iletkenler ve çeşitli seramik yapılar da bu grupta yer alır. Bu tür nanomalzemeler genellikle sentetik yöntemlerle üretilir. Öte yandan, bileşiminde büyük oranda organik yapılar bulunan nanomalzemeler organik bazlı nanomalzemeler olarak adlandırılır ve karbon esaslı ya da inorganik içerikli nanomalzemelerden farklılık gösterir. Organik NM'lerin oluşumu moleküller arasında meydana gelen zayıf (kovalent olmayan) etkileşimler sayesinde gerçekleşen kendiliğinden düzenlenme süreçlerine dayanır. Bu sayede dendrimer, misel, lipozom ve polimer nanoparçacık gibi farklı yapıların tasarlanması ve elde edilmesi mümkün olur (Singh vd., 2023).

Nanomalzemelerin üretimden önce ve sonra maruz kaldıkları fiziksel ya da kimyasal değişimleri anlayabilmek için detaylı bir şekilde karakterize edilmeleri gereklidir. Bu malzemelerin özellikleri, parçacık boyutu, şekli, yüzeyde yapılan modifikasyonlar, kimyasal bileşim, saflık düzeyi ve yapısal kararlılık gibi çeşitli etkenlerden etkilenmektedir. Nanomalzemelerin analizi ve tanımlanması için başvuru alan başlıca teknikler arasında, optik spektroskopik yöntemleri, elektron mikroskobu teknikleri, ışık saçılımına dayalı ölçümler, dairesel dikroizm analizi, kütle spektrometrisi, manyetik rezonans teknikleri, X-ışını saçılım yöntemleri, termal analiz cihazları ve zeta potansiyel ölçüm sistemleri bulunmaktadır.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM), nanomalzemelerin morfolojik özelliklerini incelemek amacıyla yaygın olarak kullanılan temel karakterizasyon araçlarıdır. SEM, numune yüzeyine odaklanan ince bir elektron demetinin yüzeyle etkileşerek oluşturduğu sinyaller aracılığıyla topografik yapı ve elementel bileşim hakkında bilgi sunar. Bu teknik sayesinde nanomalzemelerin yüzey yapısı, boyutsal özellikleri ve geometrisi ayrıntılı biçimde analiz edilebilir. Ancak SEM analizleri sırasında numunelerin kurutulması veya kontrastlanması gerekebilir. Bu işlemler, bazı durumlarda örneklerde büzülmelere neden olarak orijinal yapıların bozulmasına yol açabilir.

TEM ise çok daha yüksek çözünürlük sunarak nanometrenin altındaki (1 nm'den küçük) ayrıntıların ve kimyasal yapıların gözlemlenmesini mümkün kılar. Elektronlar son derece ince hazırlanmış numune kesitlerinden geçerken elastik ya da inelastik saçılmaya uğrayabilir ya da saçılmadan ilerleyerek görüntü oluşumuna katkıda bulunur. TEM yöntemi nanoparçacıkların büyüklüğü, dağılımı, aglomerasyon (kümeleşme) durumu, kristal yapı ve sulu ortamlarda gerçekleşen dinamik hareketler gibi birçok özelliğin belirlenmesinde etkin bir araçtır.

Dinamik Işık Saçılımı (DLS) nanomalzemelerin hidrodinamik çapını, şekil özelliklerini, dağılım genişliğini ve agregasyon eğilimlerini analiz etmek için kullanılan optik temelli bir tekniktir. Monokromatik bir ışık demeti süspansiyon durumundaki parçacıklara yönlendirilir ve saçılan ışığın analizinden parçacıkların boyut dağılımı elde edilir. Bu yöntemin temelinde, parçacıkların rastgele Brownian hareketleri nedeniyle ışığın zamana bağlı saçılımındaki dalgalanmaları gözlemlemek yatar. Bu saçılma genellikle gelen ışığın dalga boyundan çok daha küçük yapılar tarafından oluşturulan Rayleigh saçılımıdır. DLS'nin öne çıkan avantajları arasında hızlı veri üretimi, örneğe zarar vermemesi ve analiz sırasında herhangi bir fiziksel müdahale gerektirmemesi sayılabilir.

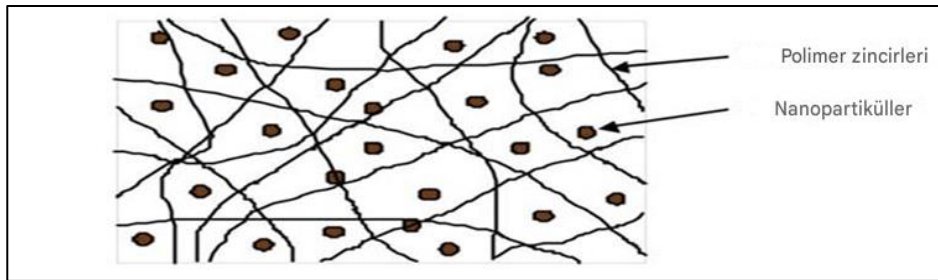
Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ve Tünelleme Mikroskobu (STM), tünelleme akımından yararlanarak malzemelerin üç boyutlu elektron yoğunluğu ve yüzey topografyasına dair görüntüler elde edilmesini sağlar. Bu tekniklerde sabit bir akıma sahip olan ince bir uç numune yüzeyine çok yaklaştırılır ve bu uçtan geçen akım ölçülerek yüzeyin görüntüsü oluşturulur. AFM de benzer bir prensiple çalışır ancak burada uç genellikle silikon ya da silikon nitrür malzemesinden yapılmış, mikro fabrikasyonla üretilmiş bir mikrokantile donatılmıştır. Bu uç, numune ile arasındaki Van der Waals kuvvetleri, elektrostatik çekim ve itme gibi atomik düzeydeki etkileşimlerden

kaynaklanan saptamaları algılayarak yüzeyin haritasını çıkarır. Her iki yöntem de nanomalzemelerin boyut, morfoloji, yapısal düzeni, yüzey dağılımı ve agregasyon gibi özelliklerini incelemek amacıyla kullanılır. AFM ayrıca nanomalzemelerin sulu ortamlar gibi biyolojik koşullarda incelenmesine de olanak tanımasıyla öne çıkar.

Zeta potansiyel ölçümleri ise süspansiyon halindeki nanoparçacıkların yüzeylerindeki elektrik yükünü belirlemeye yönelik bir yöntemdir. Nanoparçacıkların yüzeyinde oluşan bu elektriksel potansiyel zeta potansiyeli olarak adlandırılır. Bu değer, çözeltide bulunan yüklü parçacıkların uygulanan dış elektrik alan altında elektrotlara doğru hareket hızlarının ölçülmesiyle hesaplanır (Gundloori vd., 2019).

Nanokompozitler, bileşen fazlardan en az birinin nano ölçekte katkılar içerdiği malzemelerdir. Nano boyutlu bileşenler sayesinde geleneksel kompozitlerden farklı özelliklerin ortaya çıkması ön görülmektedir. Nanomalzemelerin günümüzde ticari olarak daha kolay temin edilebilmesiyle birlikte polimer matrisli nanokompozitlerin (PMN) kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu tür kompozitlerde elastiklik modülü ve dayanım gibi mekanik özelliklerin yanı sıra, su, gaz ve hidrokarbon geçirgenliği, boyutsal ve ısı kararlılık, kimyasal direnç, alev geciktiricilik, optik özellikler ile dielektrik, manyetik ve elektriksel özelliklerde önemli iyileşmeler sağlanmaktadır. PMN’lerde polimerler, yüksek en-boy oranına sahip nano boyutlu malzemelerle, genellikle ağırlıkça %5’ten daha düşük oranlarda takviye edilirler (Al-Mutairi vd., 2022).

Polimer matrisli nanokompozitler, şekil 3.16’da gösterildiği üzere sürekli fazı polimerlerden ve kesikli fazı nano dolgu malzemelerinden oluşan çok fazlı yapılardır. PMN üretiminde termoplastik, termoset, elastomer ve çeşitli biyobozunur yapılar dahil olmak üzere pek çok farklı polimer türü kullanılabilir. Bu kompozitlerde kullanılan takviye edici nano malzemeler ise kristal yapıda olabilirler. Örneğin demir ve çeşitli metal oksitler gibi. Bunun yanında fullerenler, CNT’ler ve karbon nanofiberler gibi karbon temelli nanoyapılar da sıklıkla tercih edilen dolgu malzemelerindendir.



Şekil 3.16. PMN’lerin tipik yapısı (Parhi, 2018)

Polimer matrisli nanokompozitler, yapılarındaki takviye malzemelerinin düzenine göre üç temel sınıfa ayrılırlar: Süreksiz takviyeli, tabakalı olmayan nanokompozitler, sürekli takviyeli, tabakalı nanokompozitler ve karbon temelli nanokompozitler. Tabakalı olmayan nanokompozitler, üretimlerinde kullanılan takviye malzemelerinin boyutsal yapılarına göre üç alt gruba ayrılmaktadırlar. Bu tür yapılarda dikkat edilmesi gereken en önemli nokta takviye malzemesinin sürekli bir faz oluşturmamasıdır. Bir boyutlu (1D) takviye sistemlerinde malzemeler genellikle birkaç nanometre kalınlığında ve yüzlerce ila binlerce nanometre uzunluğunda tabaka formundadır. Bu tür nanoyapılar genellikle polimer-tabakalı nanokompozitler olarak sınıflandırılırlar. Bu gruba dâhil olabilecek malzemeler arasında elementel grafit, metal kalkojenidler $[(\text{PbS})_{1.18}, (\text{TiS}_2)_2, \text{MoS}_2]$, çeşitli kil mineralleri ve montmorillonit, hektorit, saponit, floromika, florohektorit, vermikülit, magadiit ve kaolinit gibi tabakalı silikatlar yer alır. Ayrıca metal fosfatlar ile çift katmanlı hidroksit yapılar da bu sınıfa örnek gösterilebilir. Bu malzeme grubunda özellikle kil ve tabakalı silikatlar başlangıç hammaddelerinin kolayca temin edilebilmesi ve ara katman yapılarının iyi anlaşılmış olması nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedirler. İki boyutlu (2D) takviye yapıları ise daha belirgin uzunluklara sahip olup genellikle nanotüpler, nanofiberler ve kristal yapılı whiskerleri içerir. Eğer kullanılan takviye malzemesi üç boyutlu (3D) bir yapıya sahipse bu durumda yapı izodimensiyonel (eş boyutlu) nanoparçacık olarak tanımlanır. Bu tür yapılar arasında küresel silika tanecikleri ve metal partikülleri öne çıkar.

Sürekli takviyeli tabakalı nanokompozitler tabakalı olmayan takviye sistemlerinden ayrılırlar. Çünkü içlerinde sürekli bir takviye malzemesi katmanı bulunur ve bu da yapının eksfoliye yani tamamen ayrılmış katmanlardan oluşmasına neden olur. Polimer esaslı tabakalı silikat nanokompozitlerde en sık karşılaşılan silikat türleri montmorillonit, hektorit ve saponittir. Eksfoliye yapının tam anlamıyla oluşabilmesi için silikatların iki temel özelliğe sahip olması gerekir. Bunlardan ilki, silikat taneciklerinin tekil katmanlara ayrılarak homojen şekilde dağılabilmesidir. Diğeri ise bu silikatların hem organik hem de inorganik katyonlarla iyon değişimi gerçekleştirebilme kapasitesidir.

Karbon temelli nanokompozitlerde ise karbon bazlı nanomalzemeler arasında yer alan grafen, fullerenerler, karbon nanotüpler, karbon nanofiberler ve karbon nanoparçacıkları, epoksi, poliimid ve fenolik gibi termoset, polipropilen, polistiren, polimetilmetakrilat, Naylon 12 ve polieter eter keton gibi termoplastik polimer matrislerde takviye elemanı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Grafen, sp^2 hibritleşmiş karbon atomlarının oluşturduğu bal peteği şeklindeki örgü yapısıyla kalın bir

tabaka formundadır ve diğer pek çok karbon temelli yapının temelini oluşturur. Üstün mekanik ve fiziksel özellikleri sayesinde dikkat çeken grafen, 130 GPa çekme dayanımı ve 1 TPa Young modülü gibi yüksek değerlere sahiptir. Ayrıca 2630 m²/g yüzey alanı, 10.000 cm²/V·s elektron hareketliliği ve 4000 W/mK ısı iletkenliği gibi parametrelerle öne çıkmaktadır. Fullerenler yalnızca karbondan oluşan moleküllerdir ve küresel, elipsoidal ya da tüpsel formlarda olabilirler. Küresel yapıya sahip olanlara “buckyball”, silindirik olanlara ise “buckytube” ya da karbon nanotüp adı verilir. Grafit, birbiri üzerine yığılmış altıgen halkalardan oluşan grafen tabakalarından meydana gelir. Bu yapı zaman zaman beşgen veya yedigen halkalar içeren gözenekli özellikler de gösterebilir. CNT’ler yapılarına göre ikiye ayrılır: Tek katmanlı (SWCNT) olanlar yalnızca bir adet grafen silindirinden oluşurken, çok katmanlı (MWCNT) türlerinde birden fazla grafen tabakası eş merkezli olarak bir boşluk çevresine sarılmıştır. Karbon nanofiberler ise çapları 50 ila 200 nm arasında değişen, yapısal olarak düzensiz “bambu benzeri” görünümünden düzenli “bardak yığılı” grafit yapısına kadar çeşitlilik gösterebilen malzemelerdir. CNT ve karbon nanofiberler arasındaki temel fark, grafen düzlemi ile lif ekseninin hizalanma durumuna bağlıdır. Bu düzlemler paralel değilse yapı karbon nanofiber olarak sınıflandırılır, paralellik durumunda ise CNT olarak kabul edilir.

PMN’lerin üretiminde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. En yaygın başvuru teknikler şunlardır: Polimer veya ön-polimerin bir çözelti ortamında nanoparçacıklarla interkalasyonu, yerinde (in situ) interkalatif polimerizasyon, ergitme yoluyla interkalasyon, polimer ile dolgu maddelerinin doğrudan karıştırılması, yerinde polimerizasyon tekniği, sol-jel yöntemi.

İnterkalatif yöntem, polimer zincirlerinin kil tabakaları arasına yerleşmesini temel alır. Bu yöntemde hedeflenen, kil plakacıklarının tamamen ayrıştırılarak polimer matris içerisinde tek tek dağılmasını sağlamaktır. Polimer zincirlerinin silikat tabakaları arasına ne derece nüfuz ettiğine bağlı olarak üç farklı morfolojik yapı ortaya çıkabilir: Mikrokompozit yapı yani polimer ve kilin karışmadığı klasik yapı, interkalasyon yapısı yani polimer zincirlerinin kısmen kil katmanlarına girdiği yapı, eksfoliye yapı yani polimer zincirlerinin kil katmanlarını tamamen ayırarak homojen dağıldığı yapıdır.

Yerinde interkalasyon tekniğinde, mineral ya da bitkisel kaynaklı lifler kullanılarak polimerin silikat katmanlarının graft yüzeyine bağlanması için bağlayıcı gruplar (kopling ajanları) yardımıyla bir bağlantı sağlanır. Bu yöntem ara yüzeydeki bağları iyileştirir.

Ergitme interkalasyonu, hem kil/organokil hem de polimerin erimesini sağlar. Bu işlem sonucunda polimer zinciri silikat katmanlarının arasına yerleşir ve silikat katmanlarının alifatik zincirleriyle moleküller arası bir etkileşim meydana gelir.

Polimer ve nanoparçacıkların doğrudan karıştırılması tekniğinde, polimer, çözücü ve nano-dolgular ultrasonikasyon ile homojen bir şekilde karıştırılır daha sonra çözücünün buharlaşmasına olanak tanınarak nanokompozit genellikle ince bir film olarak kalır.

Yerinde polimerizasyon yönteminde, monomer ile nanodolgu maddesi karıştırılır ve monomerin silikat katmanları arasına yerleşmesi sağlanır. Sonrasında bu interkalasyon yapmış monomer, silikat yüzeyindeki modifikasyonlar veya reaksiyonu hızlandıran fonksiyonel gruplar aracılığıyla polimerize olur.

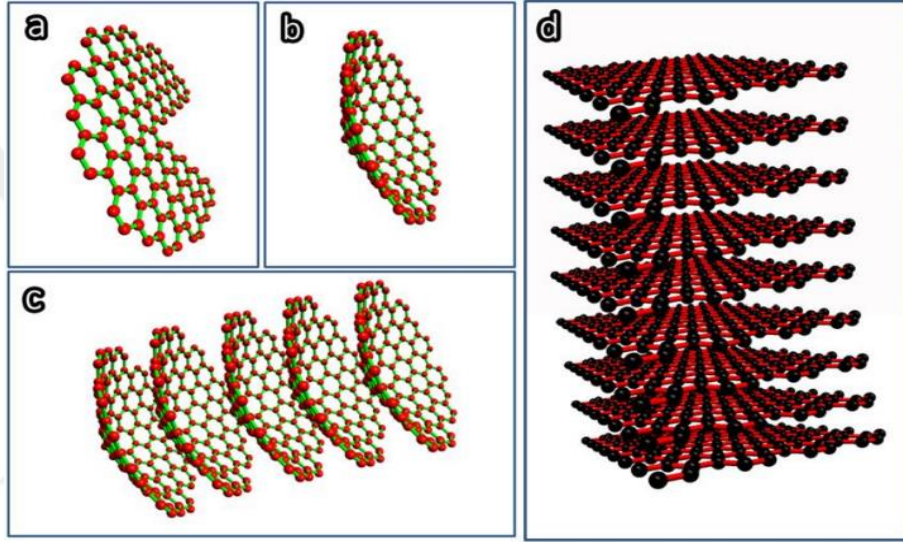
Son olarak sol-jel metodunda, basit bir ıslak kimyasal reaksiyonla başlanır ve bu reaksiyon sonucunda yaşlanma aşamasıyla birleşen bir ağ yapısı oluşur. Süreç, hidroliz ve yoğunlaşma gibi kimyasal reaksiyonlara giren inorganik öncülleri içerir ve sonunda üç boyutlu bir moleküler ağ yapısının meydana gelmesini sağlar. Sol-jel yöntemi, birden fazla bileşenin bulunduğu nanoyapıların sentezinde oldukça çekicidir çünkü reaksiyon kinetiği yavaş olduğundan nihai ürünün yapısal mühendisliği iyi bir şekilde yapılabilir. Ayrıca bu reaksiyonlar düşük sıcaklıklar veya oda sıcaklığında gerçekleştirilebilir bu da yöntemin avantajlarından biridir (Parhi, 2018).

3.4.1. Karbon nanofiber (CNF)

Karbon nanofiberler, kalınlıkları 1 mikrometreden (μm) daha küçük olan ve yapısal olarak düz, spiral veya helezon şeklinde bulunabilen karbon bazlı liflerdir.

CNF'ler üstün mekanik ve elektriksel özellikleri nedeniyle yeni nesil yüksek performanslı mühendislik malzemeleri arasında yer almaktadırlar. Bu nanofiberler, çapları onlarca nanometreden 200 nanometreye kadar değişen tek katmanlı karbon yapılarından oluşur. Yaklaşık 12000 MPa gibi oldukça yüksek bir çekme mukavemetine ve 600 GPa düzeyinde bir Young modülüne sahiptirler. CNF'ler sadece mekanik dayanıklılık açısından değil aynı zamanda yüksek elektrik iletkenliği gibi elektriksel özellikleriyle de dikkat çekerler. Söz konusu bu üstün özellikler, karbon nanofiberlerin birçok ara ürün ve nihai tüketici malzemesinde fonksiyonel katkı sağlayacak biçimde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. (Lee ve Kim, 2018).

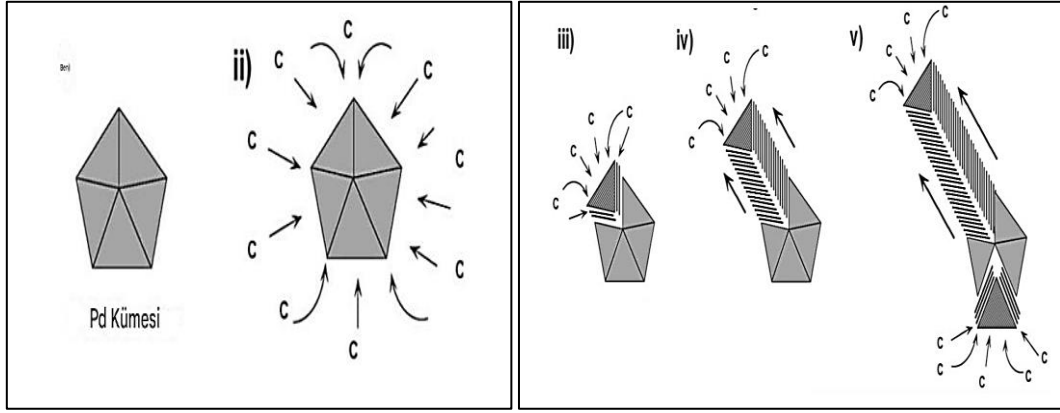
Günümüzde CNF üretimi ağırlıklı olarak iki temel yöntemle gerçekleştirilmektedir. Bunlardan ilki, CVD (kimyasal buhar biriktirme) yöntemiyle büyüme sürecidir. Diğer yaygın yöntem ise elektro eğirme tekniğinin ardından uygulanan ısıtım işlem basamaklarını içermektedir. CVD yöntemi kullanılarak iki farklı tip CNF sentezlenebilir: Bardak şeklinde istiflenmiş (cup-stacked) ve tabakalı (platelet) yapılar. Bardak şeklinde istiflenmiş yani konik yapıları CNF ilk kez 1994 yılında tanımlanmıştır. Bu yapının oluşum süreci ve tabakalı CNF yapısına ilişkin şematik bir temsil de Şekil 3.17’de sunulmaktadır.



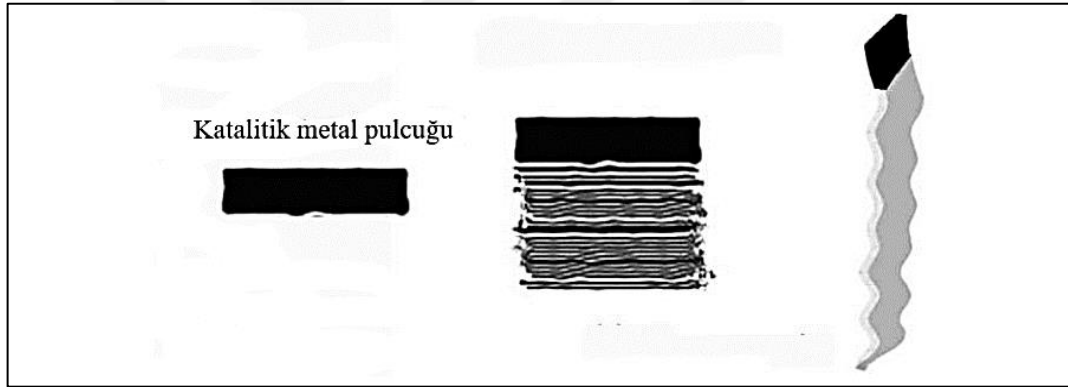
Şekil 3.17. (a–c) Bardak şeklinde istiflenmiş CNF yapısının oluşumu (d) tabakalı CNF yapısı (Feng vd., 2014)

Karbon nanofiberlerin katalitik buhar biriktirme yöntemiyle sentezinde, karbonu çözerek metal karbür oluşturabilme yeteneğine sahip çeşitli metaller ve alaşımlar katalizör olarak tercih edilmektedir. Bu metaller arasında demir, kobalt, nikel, krom ve vanadyum yer almaktadır. Molibden, metan, karbon monoksit, sentez gazı (H_2/CO), etin ve eten ise genellikle 700–1200 K sıcaklık aralığında karbon kaynağı olarak kullanılmaktadır. Elde edilen CNF'lerin yapısal özellikleri büyük ölçüde kullanılan nano-boyutlu metal katalizör parçacıklarının morfolojisi tarafından belirlenmektedir. Büyüme mekanizması hidrokarbonların metal parçacık içerisinde çözünüp ardından metal yüzeyinde grafitik karbon olarak çökmesi şeklinde işlemektedir ve bu süreç literatürde kanıtlanmıştır. Şekil 3.18 ve 3.19, sırasıyla bardak şeklinde istiflenmiş ve tabakalı CNF'lerin karakteristik büyüme mekanizmalarını şematik olarak göstermektedir. Buna

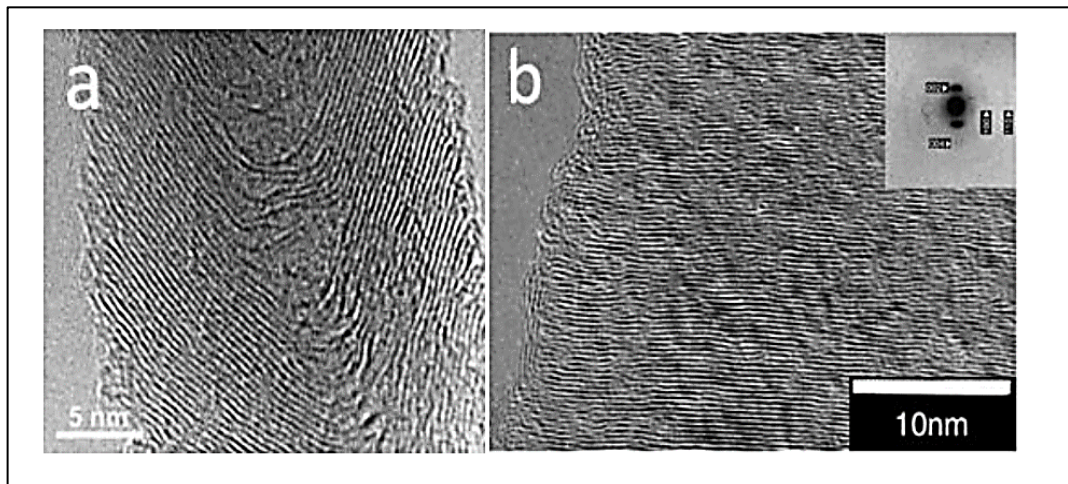
ek olarak şekil 3.20, her iki CNF türüne ait yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskobu (HRTEM) görüntülerine yer vermektedir.



Şekil 3.18. Bardak şeklinde istiflenmiş CNF'nin tipik kimyasal buhar biriktirme büyüme mekanizması (Feng vd., 2014)

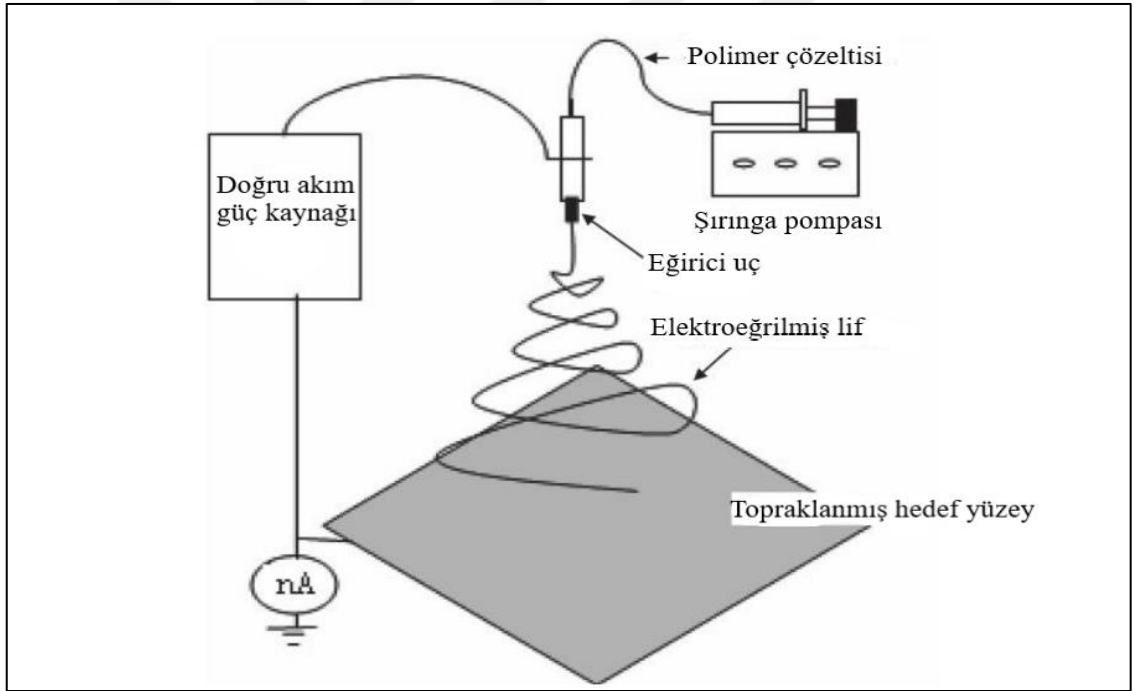


Şekil 3.19. Tabakalı CNF'nin tipik kimyasal buhar biriktirme büyüme mekanizması (Feng vd., 2014)



Şekil 3.20. Bardak şeklinde istiflenmiş ve tabakalı CNF'nin sırasıyla HRTEM görüntüsü (Feng vd., 2014)

Elektro eğirme (elektrospinning), CNF üretimi için yaygın olarak tercih edilen bir diğer yöntemdir. Elektro eğirme yöntemiyle CNF üretimi için öncelikle polimer nanofiberlerinin CNF'lerin temel yapı taşları olarak hazırlanması gerekmektedir. Elde edilen CNF'lerin özellikleri kullanılan polimer çözeltisinin türüne ve işleme koşullarına bağlı olarak şekillenir. En yaygın olarak tercih edilen polimerler PAN ve zifttir. Bunun yanı sıra polivinil alkol (PVA), poliimidler (PIs), polibenzimidazol (PBI), poliviniliden florür (PVDF), fenolik reçine ve lignin de yaygın olarak kullanılmaktadır. Polimer nanofiberleri başarıyla üretildikten sonra bu nanofiberlerin karbonize edilmesi amacıyla ısıtılma işlemi uygulanarak CNF'ler elde edilir. CNF'lerin morfolojik yapısı, saflığı, kristallografi özellikleri, çapları ve porozitesi ısıtılma işlem parametreleriyle özellikle de ortam koşulları ve sıcaklık ile belirlenir. Şekil 3.21, CNF üretimi için kullanılan elektro eğirme cihazının şematik gösterimini sunmaktadır.

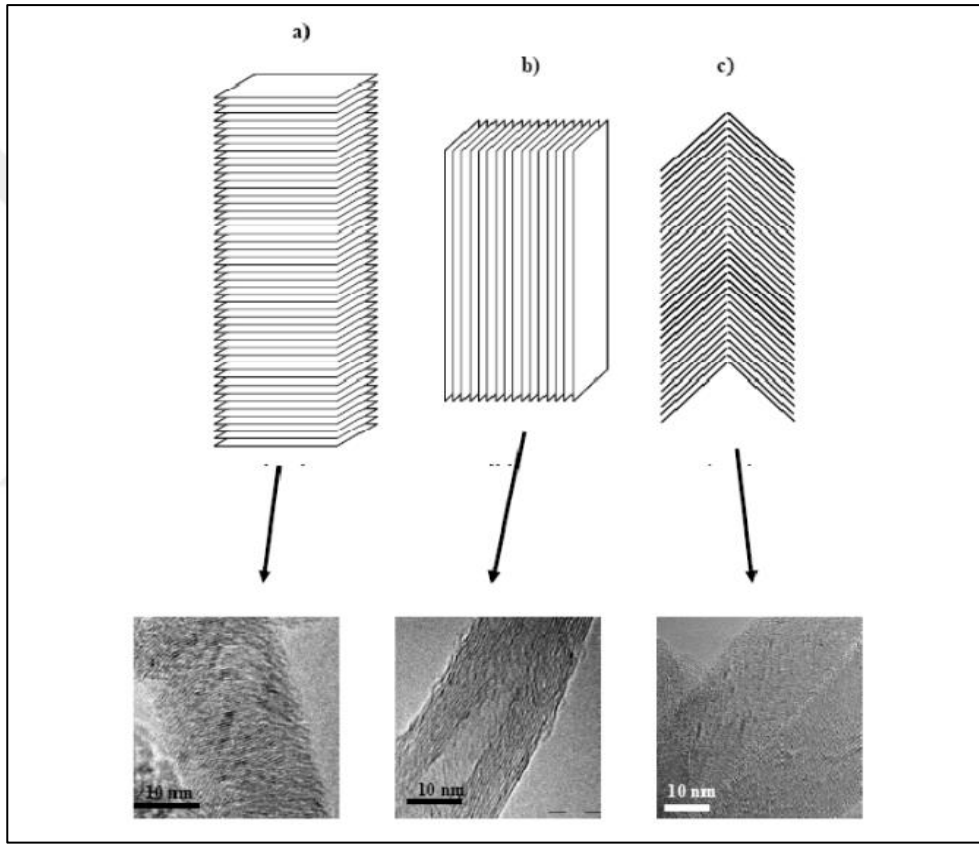


Şekil 3.21. Elektro eğirme düzeneğinin şematik gösterimi (Feng vd., 2014)

Polimer nanofiberleri başarıyla üretildikten sonra karbonizasyon işlemi, polimer nanofiberlerin belirli bir ortamda 1000 °C'ye kadar ısıtılması ile gerçekleştirilir. Karbonizasyon süreci sırasında genellikle hacim ve ağırlık değişiklikleri meydana gelir, bu da CNF'lerin çaplarının küçülmesine yol açar. Çoğu durumda elektro eğirme yöntemiyle üretilen CNF'ler ağ veya mat şeklinde yapı oluşturma eğilimindedir. Bu tip

yapılar bataryalar ya da süperkapasitörler gibi enerji depolama cihazları için elektrot malzemesi olarak oldukça uygundur. Bataryaların performansları büyük ölçüde elektrolitteki iyonların taşıma kapasitesine bağlı olduğundan gözenek yapısının kontrolü bataryaların performansını artırmada kilit bir rol oynamaktadır (Feng vd., 2014).

Şekil 3.22, temel CNF yapılarını sunmaktadır. Düşük sıcaklıklarda yapısal olarak daha az düzenli olan tabakalı CNF'ler oluşurken, yüksek sıcaklıklarda grafitik düzeyi en yüksek olan şerit (ribbon) CNF'ler elde edilir. Orta seviyedeki sıcaklıklarda ise karakteristik olarak balık kılçığı (herringbone) biçimindeki CNF'ler meydana gelir.

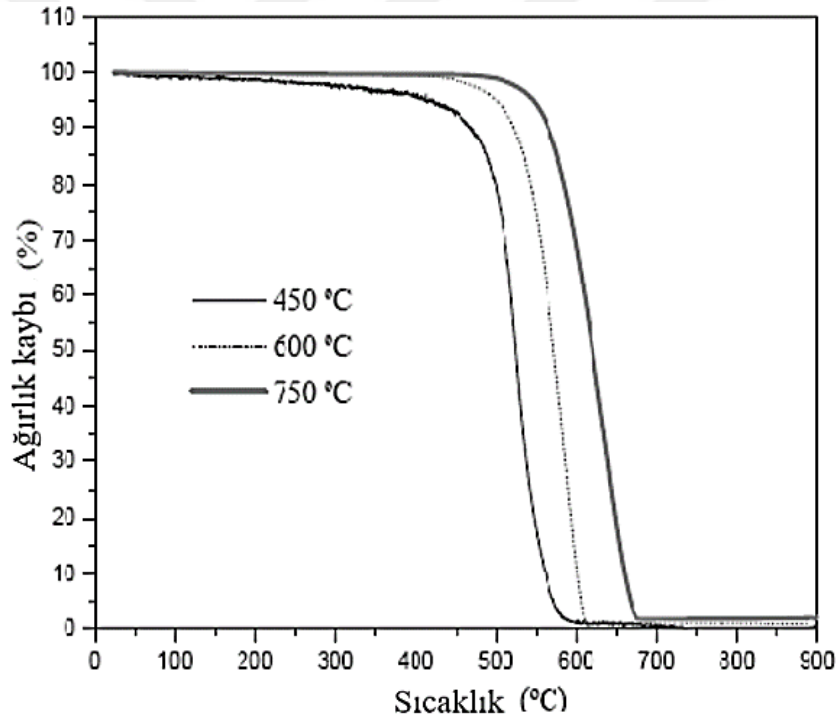


Şekil 3.22. CNF'lerin farklı yapıları (sırasıyla; tabakalı, şerit, balık kılçığı) (Jiménez vd., 2012)

Tabakalı CNF yapılarında, grafit tabakaları tabana paralel biçimde yerleşmiş olup lifin eksenine dik bir yönde sıralanır. Şerit CNF'lerde ise karbon atomları metal parçacığın yan yüzeylerinde çökelerek grafit tabakalarının lif eksenine doğrultusunda uzanmasına neden olur. Bu yöntemle üretilen karbon nanofiberlerin ortası çoğunlukla boş olup bu tür yapılar genellikle nanotüp olarak adlandırılır. Öte yandan, şekil 3.22'de gösterilen soldan üçüncü yapı önceki iki tipin arasında bir tabakalanma düzenine sahiptir.

Bu tür CNF’lerde metal parçacıklar rombik bir şekil alır ve nanofiberler zıt yüzeylerden büyüyerek grafit katmanlarının lif eksenine belirli bir açı yapacak şekilde dizildiği bir yapı oluşturur. Bu yapı da balık kılçığı olarak adlandırılır.

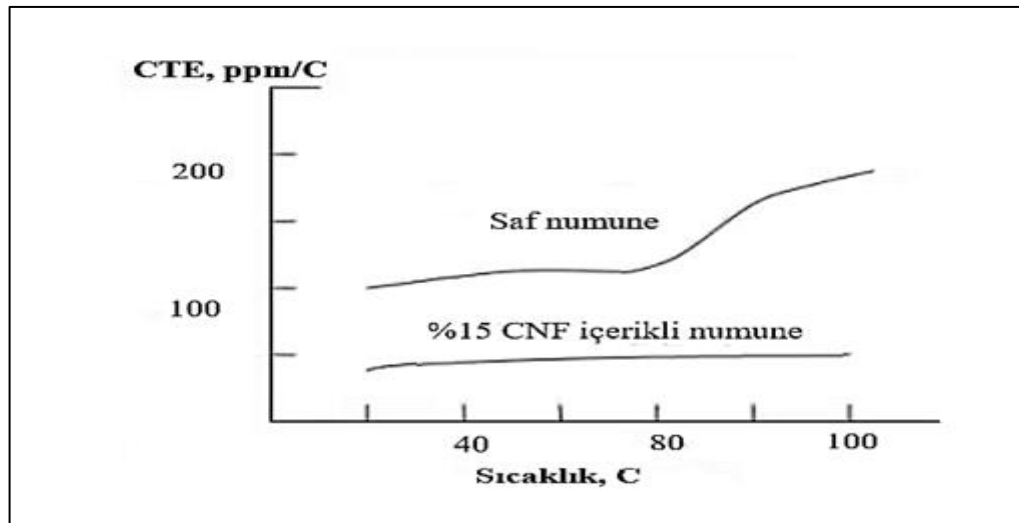
Şekil 3.23’te, farklı sıcaklıklarda sentezlenmiş ve bu nedenle farklı yapısal özelliklere sahip CNF’lerin karakteristik oksidasyon profilleri (TPO) sunulmaktadır. Bu yöntem CNF’lerin grafitik yapıya sahip olma derecesini belirlemede kullanılır. Görüldüğü üzere, reaksiyon sıcaklığı arttıkça kristallik oranı daha yüksek olan yapılar (örneğin tübüler CNF’ler) oluşmaktadır. Buna karşılık düşük sıcaklıklarda sentezlenen CNF’ler kristallik derecesi en düşük olan tabakalı yapılarda meydana gelir. Dolayısıyla bu düşük sıcaklıklarda oluşan CNF’ler daha geniş bir yüzey alanına, daha fazla yapısal bozukluğa, açık kenar yüzeylerine ve C-H ile O-H gruplarına sahip olurlar. Bu özellikler de onların oksidasyona karşı daha duyarlı olmasına neden olur (Jiménez vd., 2012).



Şekil 3.23. Farklı türdeki CNF’lerle ilgili temsili TPO analizi (Jiménez vd., 2012)

CNF’lerin polimer matrisli kompozitlere eklenmesi, matrisin mekanik ve dinamik özelliklerinde önemli gelişmelere neden olabilir. Bu katkı sayesinde çekme ve basma dayanımı, Young modülü, ara katman kayma dayanımı, kırılma tokluğu ve titreşim sönümlleme kapasitesi artırılabilir. Ancak bu iyileştirmelerin boyutu, kullanılan polimerin özelliklerine, nanofiberlerin kompozit içindeki homojen dağılımına ve uygulanan işlem

adımlarına bağılı olarak değişiklik gösterebilir. CNF/polimer kompozitlerde elektrik iletkenliği büyük ölçüde karbon nanofiberlerin oluşturduğu iletken ağlar aracılığıyla sağlandığından, liflerin homojen bir şekilde dağılması ve uzunluklarının korunması düşük dolgu oranlarında bile yüksek iletkenliğin elde edilmesine olanak tanır. CNF, yüksek elektriksel iletkenliği ve yüksek boy/en oranı sayesinde geleneksel iletken katkı malzemelerine kıyasla daha düşük miktarlarda kullanıldığında bile kompozitlere benzer iletkenlik düzeyleri kazandırabilir. Bununla birlikte, dolgu miktarının ayarlanması yoluyla istenen elektriksel direnç değerlerine sahip farklı kompozitler üretmek mümkündür. Bu özellik, elektrostatik boşalma (ESD) $\{10^6 - 10^8 \Omega \cdot \text{cm}\}$, elektrostatik boya uygulamaları $\{10^4 - 10^6 \Omega \cdot \text{cm}\}$, elektromanyetik girişim koruması $\{10^3 - 10^1 \Omega \cdot \text{cm}\}$ ve yıldırım darbesi koruması $\{<10 \Omega \cdot \text{cm}\}$ gibi farklı uygulama alanları için gerekli direnç aralıklarının karşılanmasında kritik bir rol oynar. Karbon nanofiber takviyesi içeren kompozitler aleve maruz kaldıklarında ısı salınımının geciktiği ve maksimum ısı salınım oranlarının daha düşük seviyelerde gerçekteştiği belirlenmiştir. Ayrıca bu kompozitlerde duman oluşumunun azaldığı ve eriyen polimerin akma ya da birikme gibi olumsuz davranışlar sergilemediği raporlanmıştır. Grafitin termal genleşme katsayısının düşük olması nedeniyle karbon nanofiber katkılı polimer kompozitlerin saf matris malzemeye kıyasla daha düşük genleşme özellikleri göstermesi beklenmiştir ve bu durum deneysel verilerle de doğrulanmıştır. Yapılan çalışmalar, bu tür kompozitlerin termal genleşme katsayısında belirgin bir azalma sağlandığını ortaya koymuştur (Burton vd., t.y.).



şekil 3.24. %15 CNF içeren bir nanokompozitin saf polimer matrisi ile karşılaştırılmal olarak azaltılmış termal genleşme katsayısını gösteren bir grafik (Burton vd. t.y.)

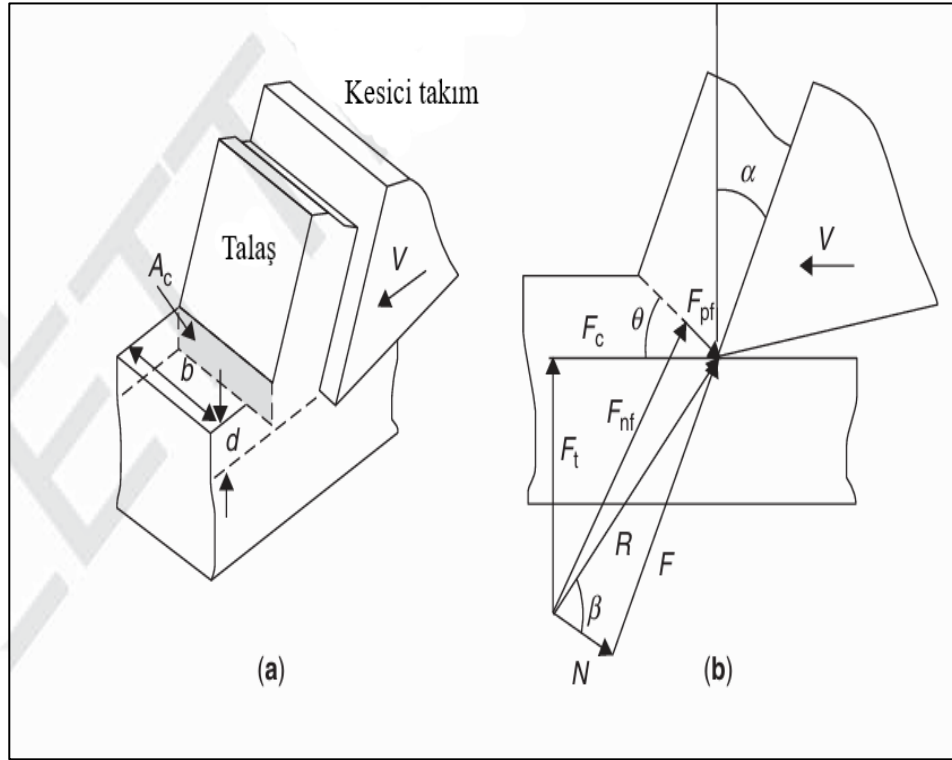
4. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN İŞLENEBİLİRLİĞİ VE İŞLEME PROSESLERİ

Kompozit malzemelerin işlenmesi, parçaların belirli ölçü hassasiyetlerine ulaştırılması ve sonraki montaj adımları için uygun hale getirilmesi açısından önem taşır. Tornalama, frezeleme, delik delme, aşındırıcı kesme ve taşlama gibi klasik talaşlı imalat yöntemleri, malzemenin küçük parçalar (talaş) halinde uzaklaştırılmasıyla karmaşık şekillerin oluşturulmasını sağlar. Ancak metallerle karşılaştırıldığında elyaf takviyeli polimer kompozitler, yapısal olarak heterojen olmaları ve kırılkan karakterleri nedeniyle farklı davranış sergilerler. Bu yüzden metal işleme süreçlerinde yaygın olan sürekli talaş çıkarma mekanizması FRP malzemelerin işlenmesinde çoğunlukla gözlenmez. İşleme sırasında yüzey kalitesi ve kesme kuvvetleri gibi özellikler takviye oranı, takviye şekli ve yönelimi gibi etmenlerden büyük ölçüde etkilenir. FRP'lerin işlenmesinde elyafların verimli bir şekilde kesilmesi için kesici takımın keskin olması, malzeme kaldırma hızının düşük olması ve metal işleme işlemlerinde karşılaşılan sıcaklıklardan daha düşük sıcaklıkların sağlanması gerekir. Kompozit malzemelerin işlenmesi genellikle hacimsel malzeme kaldırma işlemi olmaktan çok bir son işleme işlemi olarak kabul edilir. Bu yüzden malzeme kaldırma oranları, kesilmemiş talaş kalınlığı ve kesme kuvvetleri metal işleme süreçleriyle karşılaştırıldığında çok daha düşük seviyelerdedir.

Talaş kaldırma üzerine yapılan çalışmalara başlamadan önce bu sürecin nasıl gerçekleştiği ve hangi etmenlerden etkilendiği konusunda bilgi sahibi olmak büyük önem taşır. Özellikle ortogonal kesme gibi basitleştirilmiş koşullarda yapılan talaş oluşumu analizlerinden elde edilen temel bilgiler talaşlı imalat alanındaki araştırmalarda önemli katkılar sağlamaktadır. Bu temel prensipler, takım geometrisi, kesme hızı ve talaş derinliği gibi işlem parametreleri ile kesme kuvvetleri, sıcaklık artışı ve enerji tüketimi gibi işlem çıktıları arasındaki ilişkileri kavramada yardımcı olur.

Ortogonal kesme, talaşlı imalat süreçlerini daha anlaşılır hale getirmek amacıyla araştırmalarda sıkça başvurulmuş bir yöntemdir. Bu teknik, incelenen değişkenlerin sayısını azaltarak kesme işlemi sadeleştirir. Ortogonal kesme sırasında ana kesici kenar yeni oluşturulan yüzeyin üzerinde yer alır ve kesme hızı vektörüne (V) dik bir doğrultudadır. Bu durum, malzeme deformasyonunun ve akışının kesici kenara dik olan bir düzlemde gerçekleşmesini sağlar ve böylece işlem iki boyutlu olarak modellenebilir. Bu tür kesmede kesici kenarın kusursuz şekilde keskin, düz ve iş parçasının genişliğinden büyük olduğu kabul edilir. Kesici kenar iş parçası üzerinde sabit bir hızda ve sabit bir

talaş derinliğiyle ilerlediğinde düz bir yüzey meydana getirir. Bu süreçte kaldırılan malzeme miktarı kesilmemiş talaş alanı olarak tanımlanır ve bu alan talaş kalınlığı (d) ile kesme genişliğinin (b) çarpımına eşittir. Ortogonal kesme pratikte düz kenarlı frezelerle yapılan kenar düzeltme işlemlerinde, sıfır art açılı tornalama işlemlerinde ve standart ya da spade tipi matkaplarla gerçekleştirilen delme uygulamalarında gözlemlenebilir.



Şekil 4.1. Ortogonal kesmeye ait şematik diyagram

F_c : kesme (asal) kuvveti, **F_t :** itme (normal) kuvveti, **F_{nf} :** liflere dik kuvvet

F_{pf} : liflere paralel kuvvet, **F :** talaş yüzeyindeki sürtünme kuvveti, **N :** talaş yüzeyine etkiyen normal kuvvet, **β :** sürtünme açısı

(a) Kesme derinliği d , kesme genişliği b ve kesilmemiş talaş alanı A_c gösterilmektedir.

(b) Yandan görünümde ise lif yönelimi θ , bileşke kuvvet R ve onun bileşenleri yer almaktadır. (Sheikh-Ahmad ve Davim, 2012)

Elyaf takviyeli kompozitlerin işlenmesi sırasında plastik deformasyon neredeyse hiç gerçekleşmez. Bu malzemelerde talaş oluşumu lif yönlerine dik ve paralel olarak gelişen çeşitli kırılma mekanizmalarına dayanır. Elde edilen talaşlar genellikle süreksiz yapıdadır ve lif parçacıkları polimer matris tarafından gevşek bir şekilde bir arada tutulur. Tek yönlü kompozitlerin pozitif lif yönelimi altında işlenmesi durumunda kırılma genellikle lif doğrultusunda gerçekleşir ve bu da yarı-sürekli talaş oluşumuna neden olur. Şekil 4.1’de (b) gösterilen θ açısı aynı zamanda lif yönelimini belirtir. Özellikle 15° ile

75° arasındaki lif yönelim açılarında yarı-sürekli talaşların meydana geldiği gözlemlenmektedir.

Kesme kenarındaki toplam kuvvet R , çeşitli şekillerde bileşenlere ayrılır ve bu durum Şekil 4.1’de (b) gösterilmektedir. Kesme yönüyle paralel ve ona dik olan iki ana bileşen sırasıyla kesme veya ana kuvveti (F_c) ve itme veya normal kuvveti (F_t) olarak adlandırılır. Bu bileşenler genellikle ortogonal kesme deneylerinde bir kuvvet dinamometresi ile ölçülür. F_c , talaşın uzaklaştırılması için gereken iş miktarını belirler. F_t ise takım ile iş parçası arasındaki göreceli hareketin dik yönüne uygulanır ve iş yapmaz.

Oluşan toplam kuvvet, takımın eğim yüzeyine paralel olan (F) bileşeni ve eğim yüzeyine dik olan (N) bileşeni olarak ayrılır. F kuvveti, talaşın takımın eğim yüzeyinde kayarken karşılaştığı sürtünme kuvvetini ifade eder. F ve N arasındaki oran ise ortalama sürtünme katsayısı (μ) olarak adlandırılır.

$$F = F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha = R \cos(90 - \beta), N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha = R \sin(90 - \beta) \quad (4.1)$$

Burada α açısı takımın eğim (rake) açısını, β ise kesme sırasında oluşan sürtünme açısını ifade eder. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin işlenmesi sırasında sürtünme açısı elyafların yönüne bağlı olarak genellikle 30° ile 60° arasında değişkenlik gösterir. Bu açı talaş oluşum mekanizmasıyla doğrudan bağlantılıdır.

Benzer şekilde, bileşke kuvvetin lif yönüne paralel ve dik bileşenlerine ayrılmasıyla sırasıyla F_{pf} ve F_{nf} kuvvetleri elde edilir.

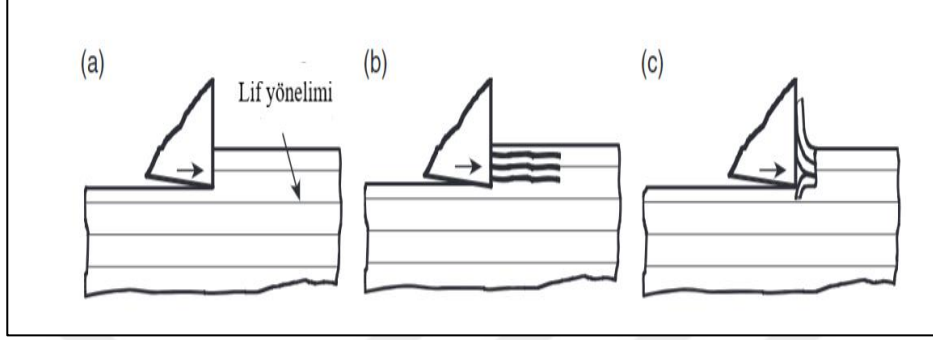
$$F_{pf} = F_c \cos \theta - F_t \sin \theta = R \cos(\theta + \beta - \alpha), F_{nf} = F_c \sin \theta + F_t \cos \theta = R \sin(\theta + \beta - \alpha) \quad (4.2)$$

Bu kuvvetler, talaş oluşum şekli ve elde edilen yüzey pürüzlülüğü üzerinde doğrudan etkilidirler. Çünkü kesme işlemi sırasında liflerin hangi şekilde kesileceğini belirlerler (Sheikh-Ahmad ve Davim, 2012).

Kompozit malzemelerin kırılğan yapıya sahip olmaları ve çok az plastik deformasyon sergilemeleri sebebiyle işlenmeleri sırasında süreksiz talaşlar oluşur ve bu talaşların kalınlığı genellikle belirlenen kesme derinliği ile büyük oranda örtüşür. Talaş oluşum süreci esas olarak lif yönelimine bağlıdır ve $\theta = 0^\circ$ durumu dışında elyaf ve matris türü, takım geometrisi, kesme derinliği ve kesme hızı gibi diğer işlem parametrelerinin etkisi oldukça sınırlıdır.

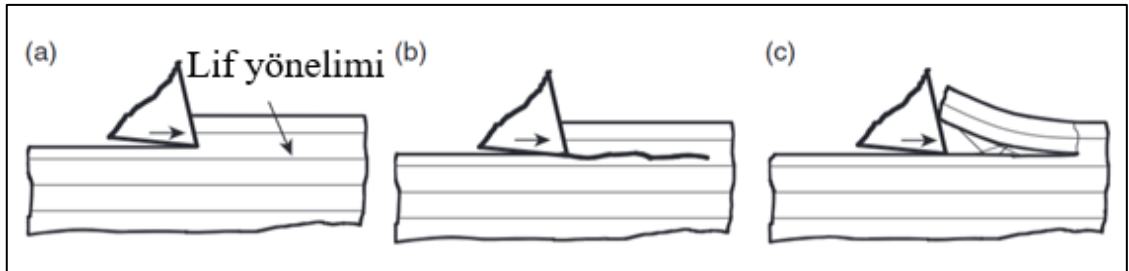
$\theta = 0^\circ$ durumu söz konusu olduğunda, talaş oluşumu, talaş açısı (γ) tarafından belirgin şekilde etkilenmektedir. $\gamma = 0^\circ$ durumunda, takımın talaş yüzeyi ile işlenen malzeme arasında yüksek düzeyde basma gerilmeleri meydana gelir (Şekil 4.2-a). Bu durum, süpürme (brooming) olarak bilinen bir hasar türüne neden olur. Talaşın kalınlığı ve iş parçasının genişliği boyunca lif yönüne paralel olarak rastgele aralıklarla çok sayıda

çatlak oluşur ve yayılır (Şekil 4.2-b). Ortaya çıkan filamentler ilerleyen kesici tarafından bükülür, talaş yüzeyi boyunca sürtünerek hareket eder ve zaman zaman düzlem dışına saparak ilerledikten sonra kırılır (Şekil 4.2-c). Bu mekanizma sürekli tekrarlandığı için ortaya çıkan talaş genellikle düzensiz şekilli ve yapısal olarak tutarsız olur.



Şekil 4.2. Lif yönelimi $\theta = 0^\circ$ ve talaş açısı $\gamma = 0^\circ$ durumunda talaş oluşumu (Caprino ve Langella, 2012)

Pozitif talaş açıları söz konusu olduğunda, önceki mekanizmadan tamamen farklı bir talaş oluşum süreci gözlemlenmiştir (Şekil 4.3-a). Bu durumda, kesme düzlemi boyunca liflerin ayrılmasını teşvik eden bir Mod I tipi yükleme oluşur. Uygun büyüklükteki kesme kuvvetleri etkisiyle kesici kenardan bir miktar uzakta boyuna bir çatlak meydana gelir ve ilerlemeye başlar (Şekil 4.3-b). Oluşan talaş konsol kiriş biçimine benzer bir yapı olarak takımın talaş yüzeyi üzerinde kayar. Bu sırada belirgin lif köprülemeleri oluşur ve talaş eğilme etkisiyle kırılır (Şekil 4.3-c). Takım ilerledikçe yeni bir malzeme bölgesiyle karşılaşır ve aynı talaş oluşum döngüsü tekrar eder.

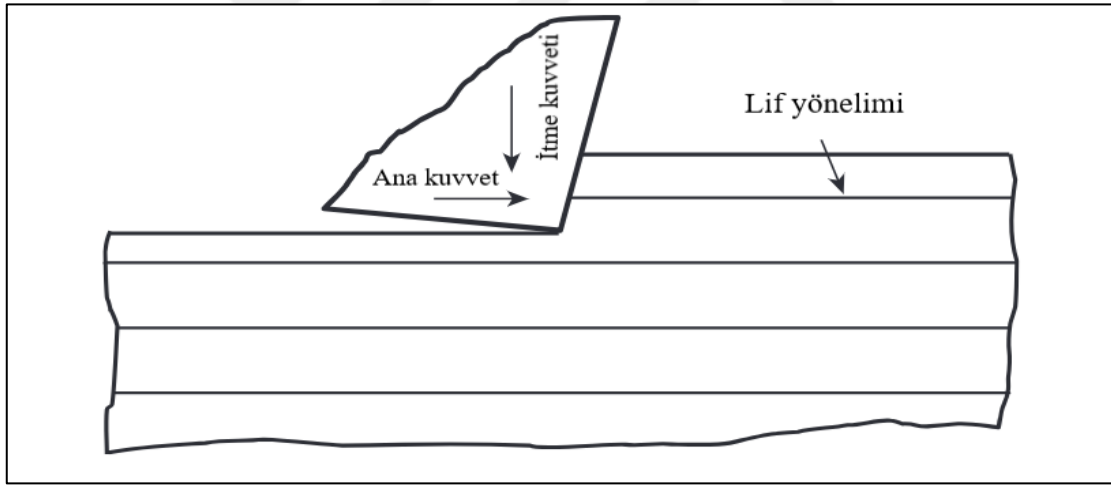


Şekil 4.3. Lif yönelimi $\theta = 0^\circ$ ve talaş açısı $\gamma > 0^\circ$ durumunda talaş oluşumu (Caprino ve Langella, 2012)

Şekil 4.3'te açıklanan mekanizmaya göre oluşan talaşın genişliği doğrudan iş parçasının genişliğiyle aynıdır, kalınlığı ise yaklaşık olarak kesme düzlemi boyunca

ilerleyen ilk boyuna yarıлма doğrultusunda şekillenir (Şekil 4.3-b). Talaşın uzunluğu ise malzemenin art arda yaşadığı iki eğilme kırılması arasındaki mesafeye bağlı olarak belirlenir. Bu uzunluk, kesme derinliği arttıkça genel olarak daha da uzamaktadır.

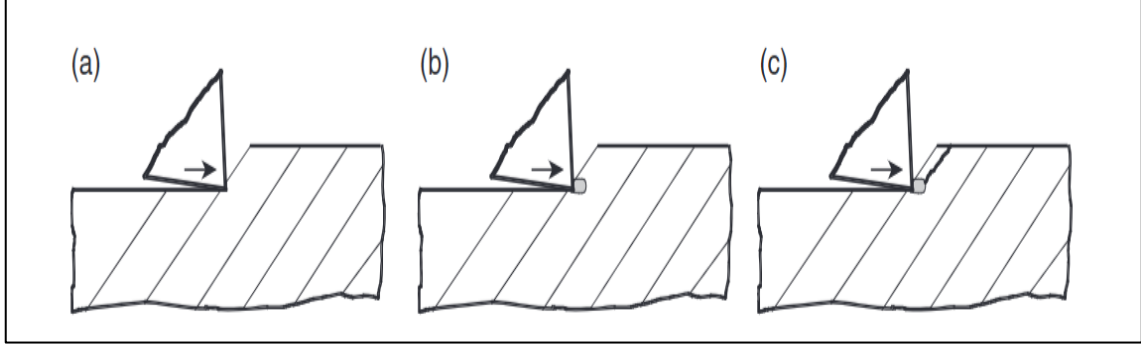
Eğer $\gamma < 0^\circ$ ise Şekil 4.4'te gösterilen ve takımın talaş yüzeyinde etkili olan ana kuvvet ile itme kuvveti arasında bir yükleme durumu ortaya çıkar. Bu durumda $\gamma > 0^\circ$ iken Şekil 4.3'te görülen yarıłmanın başlatılması ve ilerlemesinden sorumlu olan mod I bileşeni baskılanmış olur. Buna karşılık, boyuna çatlağın yayılmasına katkıda bulunabilecek bir mod II bileşeni hâlâ mevcuttur. Ayrıca takımın talaş yüzeyi ile malzeme arasındaki temas noktasında yerel basma gerilmeleri de oluşur. Bu koşullar altında iki farklı hasar türü yani yarıłmanın sürmesi veya liflerin düzensiz ayrılması meydana gelebilir. Her iki senaryoda da itme kuvvetinin yönü talaşın talaş yüzeyi boyunca rahatça kaymasını engeller. Dolayısıyla talaşın nihai olarak kopması, muhtemelen süpürme sonucu oluşan liflerin ya da tüm talaşın burkulup ardından eğilme ile kırılmasıyla gerçekleşir.



Şekil 4.4. Talaş açısı $\gamma < 0$ durumunda kuvvet şeması (Caprino ve Langella, 2012)

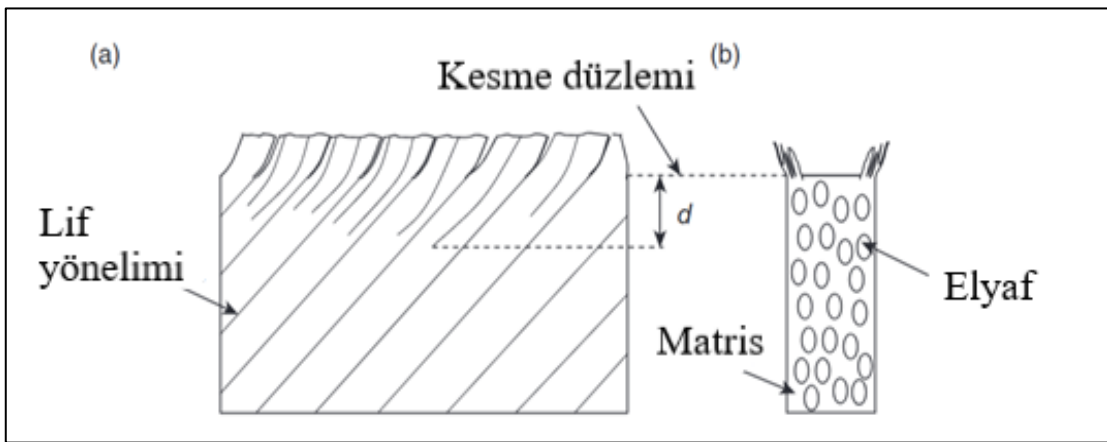
Liflerin yönelimi $0^\circ < \theta \leq 90^\circ$ olursa, talaş oluşumu lifin ve matrisin türü ya da kullanılan işleme parametreleri ne olursa olsun Şekil 4.5'te sunulan mekanizmaya uygun şekilde gerçekleşir. Kesici takımın ucu yeni malzemeye temas ettiğinde (Şekil 4.5-a) bölgede yüksek düzeyde yerel basma gerilmeleri oluşur. Bunun sonucunda, liflerin ezilmesi ve matris içerisinde mikro çatlakların gelişmesiyle bir işlem bölgesi ortaya çıkar (Şekil 4.5-b, gri alan). Bu bölgeden itibaren basma gerilmeleri kaynaklı bir kayma çatlağı oluşur (Şekil 4.5-c) ve lif yönünde hızla ilerleyerek parçalı (bloklı) talaşların oluşmasına

yol açar. Elde edilen talaşlar genellikle birkaç mikron ile 1 mm arasında değişen uzunluklara sahiptir. Kesme kuvveti açısından en yüksek değer ise bu kayma çatlağının oluşmaya başladığı anda gözlemlenir.



Şekil 4.5. Lif yönelimi $0^\circ < \theta \leq 90^\circ$ olması durumunda talaş oluşumu (Caprino ve Langella, 2012)

θ açısının artmasıyla birlikte kesme düzleminin altındaki iş parçasında yeni bir davranış gözlemlenir. Lif yönünde iş parçasının içine birkaç milimetre derinliğe kadar uzanabilen çatlaklar meydana gelir (Şekil 4.6-a). Aynı zamanda iş parçasının desteklenmeyen kenarlarında kesici takımın altından geçerek kesilmeden kalan, belirgin şekilde düzlem dışına bükülen ve takımın yan yüzeyi boyunca sürtünerek ilerleyen iki ince katman oluşur (Şekil 4.6-b). Bu durum, kesme işleminin kalitesini düşürürken, aynı zamanda iş parçasında kabul edilemeyecek seviyede yüzey altı hasarına da neden olur. Bu iki ince katman arasında kalan malzeme ise kesme mekanizmaları doğrultusunda ayrılır ve bu sırada kayma etkisiyle oluşan blok şeklindeki talaşlar meydana gelir.



Şekil 4.6. 90° açığa yaklaşan lif yönü boyunca tek yönlü bir kompozit işlenirken gözlenen hasarın temel özellikleri: (a) yan görünüm; (b) çapraz görünüm (Caprino ve Langella, 2012)

Takımın takviye liflerine ters yönde hareket ettiği $\theta = 90^\circ$ üzerindeki talaş oluşum süreçlerinin belirlenmesi oldukça güçtür. Talaş küçük toz parçacıklarından oluştuğu için sadece kırılma aşamalarını tespit etmek değil, aynı zamanda makro talaş ve hızlı durdurma gibi gelişmiş analiz teknikleri kullanılsa dahi talaş boyutunun ölçülmesi de zorluk teşkil etmektedir. Desteksiz numune kenarlarında meydana gelen kesilmemiş tabakalar ise ayrı bir problem oluşturur. Bu tabakalar çalışma düzleminde dışarıya doğru ciddi oranda yer değiştirir ve bu durum iş parçasının derinliklerine kadar ilerleyen yüzey altı hasarlarının oluşmasına sebep olur (Caprino ve Langella, 2012).

Tornalama işlemi, delme, frezeleme ve budama ile birlikte elyaf takviyeli kompozit malzemelerin işlenmesinde en sık tercih edilen talaşlı imalat yöntemlerinden biridir. Bu işlem, özellikle tüpler, dişliler ve miller gibi dönme eksenine sahip parçaların işlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Elyaf takviyeli kompozit malzemelere tornalama işleminin etkili bir şekilde uygulanabilmesi için uygun kesme koşullarının belirlenmesi amacıyla çok sayıda çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmalarda, kesme parametrelerinin yanı sıra kesici takımın geometrisi ve malzeme özelliklerinin işleme performansı üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir.

Elyaf takviyeli kompozitlerin tornalama işlemi üzerine yapılan çalışmalar, GFRP (cam elyaf takviyeli plastik) kompozitlerde sermet gibi sert takım malzemelerinin hem GFRP hem de CFRP kompozitlerde ise PCD gibi süper sert takım malzemelerinin kullanılmasının önemini ortaya koymuştur. Bu takım malzemeleri, yüksek dayanıklılık, tokluk, sertlik ve termal şoka karşı direnç gibi özelliklere sahiptirler. Kesme parametreleri konusunda ise farklı araştırmaların ortak noktası şudur: Yüzey pürüzlülüğü kalite kriteri olarak ele alındığında, tornalama sürecinde düşük ilerleme hızlarının tercih edilmesi gerekmektedir.

FRP kompozit parçaların frezeleme işlemleri, metal parçalara göre toplam parça hacme oranla daha az malzeme kaldırılan ve genellikle son düzeltme amaçlı yapılan işlemlerdir. Doğru takım ve işleme parametrelerinin seçimi, elyaf tipi, takviye düzeni ve matrisin hacim oranı gibi birçok etkene bağlıdır. Yüksek sertlik ve iyi termal iletkenlik özellikleri nedeniyle sinterlenmiş karbürler, CBN (kübik bor nitrür) ve PCD kesici takımlar FRP frezeleme uygulamalarında en çok tercih edilen takım malzemeleri arasında yer almaktadırlar.

FRP kompozitlerde delme işlemi, kaynak veya yapıştırma bağlantıları yerine perçin gibi mekanik bağlantıların yaygın olarak kullanılmasından dolayı en çok tercih edilen talaşlı imalat yöntemlerinden biridir ve bu nedenle pek çok araştırmacı tarafından

incelenmiştir. FRP malzemelerin delinmesinde en büyük zorluklar, takımın hızlı aşınması ve malzemenin yapısal bütünlüğü ile yüzey kalitesinde meydana gelen hasarlardır.

Yapılan araştırmalar, delme işlemi sırasında ortaya çıkan en kritik hasarlardan olan soyulma ve çıkış delaminasyonunun yüksek itme kuvvetlerinin bir sonucu olduğunu ortaya koymuştur. Bu tür hasarları en aza indirmek amacıyla doğru işlem parametrelerinin belirlenmesiyle birlikte takım geometrisi ve malzeme seçimi üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Araştırmacılar, özellikle ilerleme hızının, itme kuvveti, delik çapı ve çıkış delaminasyonu üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu vurgulamaktadırlar. Bununla birlikte, bazı çalışmalar bu tür kusurların tespit edilmesi ve delik kalitesinin doğru biçimde değerlendirilmesi için uygun ölçüm tekniklerine odaklanmıştır. Yüksek devirli delme işlemleri üzerine yapılan çalışmalar delaminasyonun azaltılmasında olumlu sonuçlar vermiştir. Son yıllarda ise FRP kompozitlerin delinmesinde delaminasyon ve ısı hasarların önüne geçmek adına yörüngesel delme (orbital drilling) yönteminin ön plana çıktığı görülmektedir. Ancak bu yöntemin dezavantajı işlem süresinin daha uzun olmasıdır.

Kompozit malzemelerin işlenmesi sırasında ortaya çıkan yüksek takım aşınması ve mekanik kuvvetlere bağlı malzeme hasarı gibi yaygın sorunlar son yıllarda araştırmacıları lazer ışını işlemleri, elektro erozyonla işleme (EDM) ve aşındırıcı su jetiyle işleme gibi geleneksel olmayan imalat yöntemlerinin uygulanabilirliğini incelemeye yöneltmiştir. Lazer ışını ile işleme (LBM), CFRP kesiminde geleneksel yöntemlere kıyasla umut vadeden bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem, iş parçasına zarar verebilecek mekanik etkileşimi ve aşındırıcı elyaflar nedeniyle oluşan hızlı takım aşınmasını ortadan kaldırmaktadır. Ancak LBM'nin temelini oluşturan ısı etkileşim hem matris hem de elyaflarda termal hasarlara yol açabilir. Bu durum, lazer kaynağına ve işlem parametrelerine bağlı olarak değişen bir ısıdan etkilenmiş bölge (HAZ) oluşturur ve bu bölgede matris geri çekilmesi, elyaf deformasyonu ve delaminasyon gibi sorunlar meydana gelebilir. Yapılan tüm çalışmalar, elyaf takviyeli plastik kompozitlerin lazer ışını yöntemiyle işlenmesinde en büyük problemin HAZ oluşumu olduğunu göstermektedir. Lazer gücü, darbe enerjisi ve örtüşme faktörü gibi işlem parametrelerinin dikkatli seçimi HAZ'ın büyüklüğünü azaltmaya yardımcı olabilir. Bunun yanı sıra kriyojenik işlem parametrelerinin kullanımı da gelecekteki süreç geliştirmeleri için umut vadeden bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir.

EDM işlemi, geleneksel FRP işleme yöntemlerinde karşılaşılan tipik sorunların önüne geçilmesine katkıda bulunabilir. EDM işlemi mekanik enerji kullanmadığından iş

parçasının sertliği, dayanımı, tokluğu veya aşındırıcı özellikleri işleme sürecini etkilemez. Bu nedenle EDM'nin mekanik kuvvet uygulamadan elektrik iletkeni malzemelerden malzeme kaldırabilme yeteneği, CFRP kompozitlerin delinmesi gibi geleneksel işlemlerde görülen birçok zorluğun üstesinden gelebilir. EDM, kalıp ve takım endüstrisinde yaygın olarak kullanılmasına rağmen CFRP işleme alanındaki kullanımı oldukça sınırlıdır. Bazı çalışmalar EDM ile CFRP'nin işlenebilirliğini ele almış olsa da malzeme kaldırma mekanizmaları ve buna bağlı işleme kaynaklı hasarlar tam olarak anlaşılamamıştır. EDM ile CFRP işlenebilirliğini inceleyen çalışmalar sürecin uygulanabilirliğini doğrulamış, işlenebilirliği sağlamak için önemli olan işlem parametrelerini belirlemiş ve uygulamadan kaynaklanabilecek olası sorunlara dikkat çekmiştir. FRP kompozitlerin EDM ile işlenmesine ilişkin uygun işlem parametreleri üzerine yapılan araştırmalar, iş parçasının işlenebileceği çok spesifik bir parametre aralığı olduğunu ortaya koymuştur. Genellikle bu malzemelerde matris malzemesi iletken değildir ancak CFRP'de olduğu gibi elyaf malzemesi iletken ise karbon elyaflar EDM ile malzeme kaldırmak için gereken kıvılcımların oluşmasını sağlarlar.

FRP kompozitlerin geleneksel işleme yöntemlerinde karşılaşılan sorunları hafifletmek için literatürde aşındırıcı su jeti işleme ve titreşim destekli kesme gibi aşındırıcı talaş kaldırma tekniklerinin yanı sıra, döner ultrasonik işleme gibi hibrit yöntemler de dahil olmak üzere çeşitli yenilikçi prosesler incelenmiştir (Caggiano, 2018).

4.1. Polimer Matrisli Kompozitlerde Delme İşlemi

Delme işlemi en zor talaş kaldırma yöntemlerinden biri olarak kabul edilir. Bu işlemde bir matkap ucu kullanılarak katı malzemede silindirik delikler açılır. Kullanılan takım ve teknikler malzemenin türüne, delik çapına, delik sayısına ve işlemin tamamlanma süresine göre değişiklik gösterir.

Kompozit malzemelerde net şekle yakın üretim mümkün olsa da karmaşık yapılar için tüm parçanın tek kalıplama ile üretilmesi pratik olmadığından birleştirme süreçleri zorunludur. En yaygın iki birleştirme yöntemi mekanik bağlantılar ve yapıştırıcı esaslı bağlantılardır. Yapıştırma bağlantıları yükü daha geniş bir yüzeye yayarken, yüzey hazırlığının dikkatlice yapılmasını gerektirir ve sökülmesi zor olduğu için bakım ve kontrol işlemlerinde zorluk çıkarır. Havacılık sanayisinde, perçinleme ve yapıların montajı için delik açma işlemi en çok uygulanan talaş kaldırma yöntemi olarak öne çıkar.

Delme işlemi sırasında, matkap ile iş parçası arasında delik eksenini boyunca bir hareket gerçekleşir ve bu sayede fazla malzeme uzaklaştırılır. Bu hareketin oluşması ve sürekliliğinin sağlanması için matkabın üzerine belirli bir itme kuvveti ve tork uygulanması gerekir. Delme işleminin beş aşaması vardır: Ekstrüzyon, ekstrüzyon ve delme, delme, delme ve genişletme, genişletme. Ekstrüzyon aşamasında, keskişel kenar ilk teması yapar ve iş parçasına “delici” bir şekilde girer. İtme kuvveti keskişel kenarın ekstrüzyon etkisi nedeniyle hızla artar. İtme torku ise keskişel kenar ile iş parçası arasındaki artan sürtünme ile artar ancak matkap ucunun küçük çapı sebebiyle bu artış hızlı olmaz. Ekstrüzyon ve delme aşamasında, malzeme kaldırma işlemi kesici ağızlar iş parçasına temas ettiğinde başlar. İtme kuvveti kesici ağızlar iş parçasına ilerledikçe yavaş bir hızla artar. İtme torku da kesici ağızların kesme kuvveti nedeniyle benzer bir hızla artar. Keskişel kenar iş parçasının alt yüzeyine ulaştığında delme aşaması gerçekleşir. Bu aşamada, itme kuvveti keskişel kenar iş parçasından çıktığında aniden düşer, kesici ağızlar iş parçasından çıktıkça azalır. İtme torku ise keskişel kenarın iş parçasından çıkması nedeniyle az miktarda düşer. Delme ve genişletme aşamasına bakıldığında, bu aşamada matkabın genişletme olukları iş parçasına girer. İtme kuvveti kesici ağızların alt kısımları iş parçasına temas ettiğinde küçük bir değişimle korunur. İtme torku kesici ağızların alt kısımlarındaki yarıçapın artması nedeniyle hafif bir şekilde artar. Son aşama genişletme aşamasında, kesici ağızlar iş parçasının dışına çıkar, itme kuvveti kesici ağızlardan gelen kuvvetin azalması ile birlikte azalır, itme torku da aynı şekilde azalır (Bi vd., 2009).

Delme esnasında meydana gelen toplam itme kuvveti (F_z) iki ana bileşene ayrılır: F_{z1} , kesici ağızların kompozit yüzeyle temas etmesiyle oluşur, F_{z2} ise keskişel kenarın malzemeye temasından kaynaklanır. Bu kuvvetler şu şekilde birleşerek tanımlanır:

$$F_z = 2F_{z1} + F_{z2} \quad (4.3)$$

Bu değer, pilot delik kullanılmadan yapılan delme testleriyle ölçülmüştür. Kesici ağızların neden olduğu kuvvet bileşeni $2F_{z1}$ olarak ifade edilmiştir. Şekil 4.7’de bu kuvvetlerin nasıl ayrıştığı görsel olarak sunulmuştur. Her delme işleminde, "kritik itme kuvveti" olarak adlandırılan belirli bir eşik değeri belirlenebilir ve bu değerin altında kalındığında delaminasyon denilen hasar ya da yapısal hasar meydana gelme olasılığı büyük ölçüde azalır. Kritik itme kuvvetinin aşılp aşılmaması, kesici takımın malzemesi, geometrisi, kompozit malzemenin özellikleri, kullanılan soğutma tekniği ve uygulanan kesme parametreleri gibi etkenlere bağlıdır.

Delme esnasında matkap çevresinde biriken ısı, matris yapısının kararlılığını bozarak pürüzlü ve lifli kesimlerle termal hasarların oluşmasına yol açmaktadır. Ayrıca yüksek kesme sıcaklığı matrisin yumuşamasına sebep olurken, kesme kuvvetlerinde azalmaya da neden olmuştur. Epoksi reçine kullanılmış karbon elyaf kompozitlerde ideal delme sıcaklığı, reçinenin gevrek deformasyon sıcaklığı (T_b) seviyesinin üzerinde, elyafın cam geçiş sıcaklığı (T_g) seviyesinin altında olmalıdır (Jagadeesh vd., 2023). Öte yandan, bir başka görüşe göre bu kompozitlerde ideal delme bölgesi sıcaklık aralığı, CFRP kompozitin cam geçiş bölgesi sıcaklığının alt sınırı (T_o) seviyesinden düşük, reçinenin gevrek deformasyon sınırı (T_b) seviyesinden ise yüksek olmalıdır. Çünkü delme sıcaklığı T_o değerinin üzerinde olduğunda, karbon/epoksi kompozitin şekil değiştirmeye karşı direnci ve ara yüzey kayma dayanımı zayıflar. Bu durum, delik çıkışında belirgin delaminasyonlara ve yüzey kalitesinde bozulmalara neden olur. Buna karşılık sıcaklık T_b seviyesinin altına düştüğünde, kompozit daha kırılgan bir davranış sergiler bu da delme sırasında itme kuvvetlerinin artmasına ve çıkış bölgesinde delaminasyon riskinin yükselmesine yol açar (Wang vd., 2018). Karbon/epoksi kompozitlerde delme esnasında sıcaklığın yükselmesi, matris modülündeki azalma ile birlikte malzemenin sertliğinde düşüşe yol açar. Bu sertlik kaybı, kompozit malzemede delaminasyonlar, çatlaklar ve çeşitli zararların oluşmasına sebep olur. Yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen delme işlemlerinde delik çıkışında daha fazla sayıda enine çatlak oluştuğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık artışı, matris ve lifler arasındaki sürtünmenin artması, matrisin kimyasal yapısındaki bozulma ve ara yüzey bağlarının termal stabilitesinin azalması gibi üç farklı türde hasara sebep olmaktadır. Ayrıca sıcaklığın yükselmesiyle, hasar türünün matris kaynaklı hasardan, ara yüzey bağı kaynaklı hasara dönüşebileceği de ifade edilmiştir. Malzemeler genellikle düşük sıcaklıklarda deformasyona karşı daha fazla direnç gösterirler. Bu yüzden CFRP kompozitin kriyojenik şartlar altında delinmesi kuru delmeye göre daha yüksek itme kuvvetleri gerektirir. Kriyojenik soğutma, kesme bölgesindeki sıcaklık artışını engelleyerek CFRP kompozitte daha kaliteli delikler ve zarar görmemiş yüzeyler oluşturmayı sağlar. Özetle, kesme alanındaki ısının azaltılmasıyla, kriyojenik koşullarda yapılan CFRP delme işlemi işlenebilirliği artırmaktadır.

GFRP kompozitlerde ise kompozitin sıcaklık değişim grafiklerinde sıcaklığın başlıca iş mili hızındaki artıştan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Kesme sıcaklığını etkileyen diğer önemli bir unsur ise kullanılan matkap ucunun çeşididir. GFRP kompozitlerin delinmesinde HSS-R (rulo edilmiş yüksek hızlı çelik) matkap uçları en

yüksek sıcaklıkları oluştururken, TiN kaplamalı HSS matkap uçları HSS-R'ye kıyasla daha düşük sıcaklıklar sağlamaktadırlar. TiN kaplamanın uygulanması, kaplamasız matkap uçlarına göre delme sıcaklığında %60 oranında bir azalma sağlarken, ZrN (zirkonyum nitür) kaplama bu düşüşü %45 seviyesinde tutmaktadır. Matkap ucunun daha iyi ısı iletme kapasitesine sahip olması, çalışma sırasında oluşan sıcaklığı azaltarak ara yüzeydeki termal hasarların önüne geçmektedir.

Lignoselülozik lif takviyeli polimer kompozitlerin delinmesiyle ilgili araştırmalarda, delme sıcaklığı cam geçiş sıcaklığını aştığında kompozitlerin mekanik dayanımında düşüş yaşandığı belirlenmiştir. Kesme sıcaklığındaki bu değişiklikler hem takımın kullanım ömrünü hem de delinen deliğin kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Keten lif takviyeli epoksi kompozitlere bakıldığında ise doğal keten liflerinin ısı iletkenlik değerinin düşük olması sebebiyle delinmiş delik yüzeylerinin kalitesi azalmaktadır. Bu da delik yüzeyinde biriken ısının matris yapısını yumuşatmasına neden olmaktadır.

Elyaf takviyeli polimer kompozitlerde hasarsız deliklerin elde edilmesi için ilerleme hızı ve kesme hızı gibi işleme parametrelerinin de optimum seviyelerde ayarlanması gerekmektedir. Bu parametrelerin belirlenmesinde kullanılan malzemenin tipi, çalışma sıcaklığı ve matkap türü önemli rol oynar. Ayrıca delaminasyon oranı da ilerleme ve kesme hızlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. CFRP kompozitlerde delaminasyonun ilerleme hızındaki değişimlere karşı daha duyarlı olduğu ve kesme hızında ise doğrusal olmayan tepkiler verdiği gözlenmiştir. Bu nedenle ilerleme hızının yükselmesi delaminasyon miktarını artırmaktadır. Elde edilen kontur grafikler, yüksek kesme hızlarının düşük ilerleme hızlarıyla birleştiğinde delaminasyonun azaldığını ortaya koymuştur. Bu durum, CFRP malzemelerde yüksek hızlı delmenin önemini ortaya koymaktadır.

Elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin delinmesinde, işleme kalitesini iyileştirmek, tabakalanma, soyulma ve çıkış delaminasyonu gibi istenmeyen hasarları önlemek amacıyla geleneksel olmayan delme yöntemleri tercih edilmektedir. Aşındırıcı su jeti delme (AWJD), lazerle delme, elektro-kimyasal delme, elektro erozyonla delme ve ultrasonik delme gibi ileri üretim teknikleri bu tür kompozit malzemelerin delinmesinde yaygın olarak uygulanmaktadır. Yüksek boyutsal doğruluk, hızlı işlem süresi ve daha fazla üretkenlik gibi beklentiler imalat sektörünü bu yenilikçi delme yöntemlerine yönlendirmektedir. Bu yöntemlerin iyi boyutsal hassasiyet, delik yüzey kalitesi ve hassas delikler elde etme gibi olumlu taraflarının yanında, taşıma dayanımında

azalmaya neden olma, ısı hasarına uğramış bölgeler oluşturma gibi olumsuz tarafları da vardır (Jagadeesh vd., 2023).

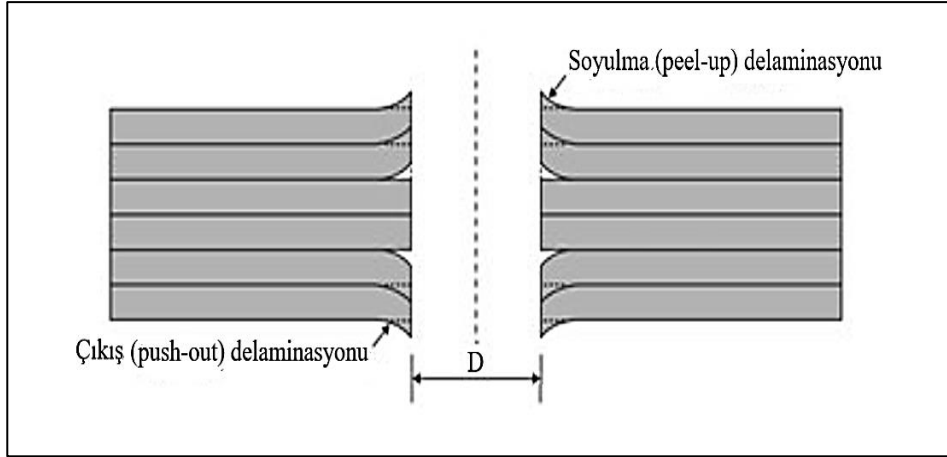
4.2. Polimer Matrisli Kompozitlerde Delme İşlemi Sebebiyle Oluşabilecek Durumlar

4.2.1. Delaminasyon

Delaminasyon, kompozit malzemelerin işlenmesi sırasında karşılaşılan en önemli kusurlardan biridir ve bu durum parçanın genel performansını ciddi şekilde düşürebilir. Delaminasyon, kompozit yapıyı oluşturan katmanların birbirinden ayrılması şeklinde tanımlanır. Bu ayrılma, matkap ucunun iş parçasına ilk temas ettiği anda ortaya çıkabilir. Kesme kuvveti, üstteki katmanları alttaki katmanlardan ayırmaya zorlayarak deliğin girişinde bir ayrılma oluşturur. Bu olguya “soyulma tipi delaminasyon (peel-up delaminasyonu)” adı verilir. Öte yandan, matkap ucu deliğin çıkışına yaklaştığında son kalan birkaç katmana uygulanan baskı bu katmanların ayrılmasına ve şekil değiştirmesine yol açar. Bu da “çıkış tipi delaminasyon (push-out delaminasyonu)” olarak tanımlanır.

Soyulma delaminasyonu, delik açma işleminin başlangıcında yani deliğin giriş yüzeyinde meydana gelir. Matkabın kesici kenarı, malzemenin üstteki katmanlarını aşındırarak bu katmanların yukarı yönlü hareket etmesine neden olur ve bu aşınan katmanları matkabın olukları boyunca yukarı çekmeye çalışır. Matkap aşağı doğru ilerledikçe bu malzeme yukarıya doğru spiral şekilde taşınır. Bu etki sonucunda yukarı doğru yönlenen bir kuvvet ortaya çıkar ve bu kuvvet delme sırasında matkabın uyguladığı itme kuvvetiyle aşağıya doğru bastırılan kesilmemiş alt katmanlardan üst katmanların ayrılmasına yol açar.

Çıkış tipi delaminasyon, delik delmenin çıkış noktasında ortaya çıkar. Delme sırasında iş parçası matkabın uyguladığı basma kuvvetine maruz kalır. Matkabın hemen altındaki laminat katmanlar deliğin çevresindeki katmanlar arası bağdan uzaklaşmaya başlar. İşlem sona yaklaştığında ve matkap son birkaç katmanı kesmeye başladığında, kalan kesilmemiş katman oldukça ince olduğundan, bu bölgedeki zayıf bağ dayanımı nedeniyle matkabın uyguladığı deformasyon kuvveti katmanların ayrılmasına yol açar ve delaminasyon meydana gelir. Genellikle çıkış tipi delaminasyonun şiddeti soyulma tipi delaminasyondan daha fazladır (Babu vd., 2015).



Şekil 4.8. Çıkış ve soyulma delaminasyonunun şematik sunumu (Babu vd., 2015)

Delme işlemi sırasında oluşan delaminasyonun artan itme kuvvetiyle doğrudan bağlantılı olduğu birçok araştırmada kanıtlanmıştır. Bu nedenle itme kuvvetini etkileyen kesme parametrelerinin doğru şekilde ayarlanması ve bu kuvvetin minimuma indirilmesi sayesinde delaminasyon oluşmadan temiz ve düzgün delikler elde edilebilmektedir.

Pek çok araştırmacının yürüttüğü çalışmalarda, mil devri (spindle speed) ya da kesme hızındaki kademeli artışın itme kuvveti ve tork değerlerinde azalmaya neden olduğu açıkça ortaya konmuştur. Bununla birlikte, bazı matkap ucu geometrilerinde mil devrinin tork üzerindeki etkisinin oldukça sınırlı olduğu görülmüştür. Mil devrinin yükselmesiyle birlikte sıcaklığın artması matris malzemenin yumuşamasına ve liflerin düşük ısı iletkenlik özelliklerine bağlı olarak itme kuvveti ile torkta düşüşe neden olmaktadır. Aşınmış matkap uçlarıyla yapılan işlemlerde mil devrindeki artış itme kuvvetinin yükselmesine neden olurken, yeni matkap uçlarıyla tam tersi bir eğilim gözlemlenmiştir.

İlerleme hızının (feed rate) etkisi oldukça dikkat çekicidir. Geleneksel delme işlemlerinde ilerleme hızı arttıkça itme kuvveti de artar. Titreşim destekli delme işlemlerinde ise yüksek mil devri ile birlikte ilerleme hızı arttıkça itme kuvveti azalır. Geleneksel delmede, daha yüksek mil devirleriyle birlikte düşük ilerleme hızları mekanik mukavemet kaybını en aza indirerek laminat malzemelerin delinmesi açısından avantaj sağlar. Ancak düşük ilerleme hızları aynı zamanda matrisin termal bozunmasına da yol açabilir. Yüksek ilerleme hızlarında pozitif eğimli kesme yüzeyleri negatif hale geldiğinden, lifler kesilmek yerine itilerek yer değiştirir. Bu durum delaminasyon oluşumunu azaltsa da yüksek yoğunluklu bölgelerde ara katman çatlaklarının (inter-laminar cracks) görülme olasılığı artmaktadır.

İşleme sürecinde oluşan ısı yükler, mekanik yüklerden daha etkili bir şekilde malzeme davranışını etkilemektedir. Bu nedenle liflerin düşük termal iletkenliği sebebiyle meydana gelebilecek sıcaklık kaynaklı hasarları engellemek amacıyla sisleme (mist) ya da taşıma (flooding) tipi soğutma yöntemlerinin kullanılması kaçınılmazdır. Matkap ile delik yüzeyi arasındaki sürtünme sıcaklık artışına yol açarak termal zararlara neden olabilir. Kriyojenik sıvıların uygulanması, özellikle kesilememiş, çıkıntılı ve tüylü liflerin ortadan kaldırılmasında daha etkili bir çözüm sunmaktadır. Isıl etkiler yeterince kontrol altına alınmazsa matkap çapının ısıl genişmesi nedeniyle delik çapında istenmeyen radyal genişlemeler gözlenebilir. Soğutucuların kullanımı, kesme işlemi sırasında ortaya çıkan takım aşınmasını, sıcaklığı ve termal hasarı azaltma konusunda yararlı olsa da soğutucu ortamda malzemenin elastiklik modülündeki artışa bağlı olarak itme kuvveti ve torkta yükselme meydana gelebilir.

Delme işlemleri sırasında takım aşınması ciddi ekonomik sonuçlar doğurabilir. Çünkü aşınan takımlar artan itme kuvvetine neden olarak delaminasyon oluşumuna ve delik çapında hassasiyet kaybına yol açarlar. Ayrıca takımın aşınması sık takım değişimini gerektirir, bu da üretim sürelerini ve maliyetleri artırır. Matkap uçlarında görülen başlıca aşınma türleri şunlardır: yapışma kaynaklı aşınma, mikro kırılma (micro-chipping) ve aşındırıcı takım aşınmasıdır. Bu aşınmaların temel sebepleri arasında liflerin aşındırıcı yapısı, düşük ısı iletkenlik, sürtünmeden oluşan ısı, matris liflenmesi ve takımın tıkanması yer almaktadır. Takım aşınmasını oluşturan mekanizmaların ve işlem parametrelerinin bu aşınma üzerindeki etkilerinin iyi anlaşılması hem takımın kullanım ömrünü uzatmak hem de delinen deliklerin yüzey kalitesini artırmak açısından önemlidir. Aşınma türleri içinde en yaygın olanı aşındırıcı aşınmadır. Takımlarda genellikle iki tür aşınma görülür: Yan yüzey (flank) aşınması ve kesici yüzey (rake) aşınması. Çoğu durumda kesici yüzeydeki aşınma çok sınırlıdır ve takımın genel aşınma durumu genellikle yan yüzeydeki aşınma miktarına göre belirlenir. İşlem parametreleri olan ilerleme hızı, mil devri ve uç açısının artışı takımın daha hızlı aşınmasına yol açar. Çok sayıda delik delinirken ilk aşamada aşınma hızı yüksektir fakat zamanla bu süreç daha sabit bir aşınma eğrisine dönüşür. Delinen delik sayısı arttıkça aşınma seviyesi yükselir ve buna paralel olarak itme kuvvetinde de artış meydana gelir.

Matkap ucu geometrisi de delme işlemi sırasında oluşan itme kuvveti üzerinde etkilidir. Araştırmalar, daha düşük nokta açısına sahip matkap uçlarının itme kuvvetini azaltmada etkili olduğunu ortaya koymuştur. Çok kesici kenara sahip çok yüzeyli (multi-facet) matkap uçları takım aşınmasının daha yavaş gerçekleşmesini sağlarlar. Keskişel

kenarın mümkün olduğunca kısa tutulması ve takımın düşük bir talaş açısına sahip olması önerilir. Matkap çapı büyüdükçe kesilen alan artar, bu da doğal olarak hem itme kuvvetini hem de torku artırır. Daha küçük uç çapına ve orta uzunlukta gövdeye sahip matkaplar 4–8 mm kalınlığındaki malzemeleri işlerken oluşabilecek titreşimleri azaltmak açısından avantaj sağlarlar. Kesme kenarının yarıçapı hem delaminasyon hem de yüzey kalitesi üzerinde etkili olurken, takımın uç köşelerinde meydana gelen aşınmalar çapak oluşumuna neden olabilir. Bu nedenle matkap geometrisinin gerek delme sırasında ortaya çıkan kuvvetler gerekse delaminasyonun önlenmesi açısından dikkatli bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Keskişel kenarın oluşturduğu baskıyı azaltacak uygun takım seçimleri delaminasyonu minimum seviyeye indirmenin anahtarıdır. Matkap ucu yapımında kullanılan malzemeler arasında WC (tungsten karbür), PCD, kobalt ve HSS öne çıkmaktadır. WC ve kobalt esaslı takımlar, az sayıda delik açılması gereken işlemlerde daha az aşınma ve daha seyrek takım değişimi gerektirdikleri için tercih edilmektedir. HSS ve WC takımlar arasında geometri açısından geniş bir çeşitlilik mevcuttur. HSS matkaplar daha düşük sürtünme katsayısına sahiptirler. WC uçları PCD uçlara kıyasla daha düşük itme kuvveti üretirken, PCD takımlar çok daha yüksek mil devirlerinde çalıştırılabilmektedir (Pramod vd., 2015).

4.2.2. Lif çekilmesi

Kompozit malzemelerin delinmesi esnasında sıkça karşılaşılan önemli problemlerden biri de lif çekilmesi (fiber pull-out) olarak bilinir. Bu durum, delme işlemi sırasında oluşan mekanik kuvvetlerin etkisiyle matris ve lif tabakası arasındaki bağın zayıflaması sonucu liflerin kompozit yapıdan dışarı doğru çekilmesiyle ortaya çıkar. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerde lif çekilmesi, genellikle malzeme yönelimi ile kesme yönü arasındaki açının yaklaşık 135° olduğu durumlarda daha yaygındır. Bu tür bir hasar zamanla yorulma çatlaklarının oluşmasına yol açarak kompozit malzemenin yapısal bütünlüğünü tehlikeye atabilir (Rampal vd., 2022).

4.2.3. Çapak oluşumu

Çapaklar (burrs), çoğu durumda kompozit malzemelerin nihai mekanik dayanımını doğrudan etkilemezler. Ancak bu tür yüzey kusurları ve mikro çatlaklar, zamanla daha büyük çatlakların gelişmesine ve delaminasyona neden olabilecek tehlikeli

başlangıç noktaları oluşturabilirler. Büyük boyutlu çapaklar parçaların montaj aşamasında uyumsuzluklara ve problemlere yol açabilirler. Oluşan bu çapakların giderilmesi, genellikle ek zaman ve maliyet gerektiren çapak alma (deburring) gibi son işlem süreçlerini zorunlu kılar. Çapak alma işlemi çoğu durumda gerekli olsa da doğrudan bir katma değer sağlamadığı için bu aşamanın mümkün olduğunca ortadan kaldırılması tercih edilir. Bu nedenle uygun işleme parametrelerinin ve ekipmanlarının kullanımıyla çapak oluşumu minimize edilmeli ya da etkin biçimde kontrol edilmelidir (Poór vd., 2021).

4.2.4. Yüzey pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü, özellikle yapısal parçaların performansı açısından kritik olan yüzey kalitesini değerlendirmede kullanılan temel bir göstergedir. İşleme sürecinin planlanması sırasında uygun makine donanımının ve doğru kesme parametrelerinin belirlenmesinde önemli rol oynar. Yapılan birçok çalışma, yüzey pürüzlülüğünün kesme hızıyla ters, ilerleme hızıyla ise doğru orantılı olarak değiştiğini göstermiştir. Yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme hızı kullanıldığında daha az agresif kırılmalar meydana gelmekte ve düşük gerinim hızı sayesinde işleme süreci daha kontrollü yürütülebilmektedir. Bu nedenle daha kaliteli yüzey elde etmek için düşük ilerleme hızı tercih edilmelidir. Bunun dışında, matkap geometrisi ve matkap tipi (Jagadeesh vd., 2023) elyaf-kesme açısı, talaş derinliği ve eğim açısı (Geier vd., 2019) gibi faktörler de yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkiye sahiptir. Üreticiler üretkenliği artırmak amacıyla yüksek yüzey kalitesine sahip delikler elde etmeyi hedeflerler. Böylece delik genişletme (reaming) gibi ek işlemlere gerek kalmadan delme sürecini daha ekonomik ve verimli bir şekilde tamamlayabilirler (Pramod vd., 2015).

Bunların dışında, elyaf takviyeli polimer kompozitlerin delinmesi esnasında matris, elyaflar ve elyaf-matris birleşim bölgelerinde çeşitli yapısal bozulmalar meydana gelebilir. Matris kısmında mikro çatlak oluşumu, reçinenin kaybı, yüzeyde oyuklar ve yuvarlaklık hataları gibi kusurlar gözlemlenebilir. Elyafalarda ise kopma, çekilme, burkulma ve ısı kaynaklı zararlar oluşabilir. Elyaf ile matrisin birleşim noktasında ise ayrılma (debonding) gibi bir hasar ortaya çıkabilir. Elyaf ile matris arasında güçlü bir bağ oluşması elyaf ayrılmasının önüne geçilmesinde oldukça etkili bir faktördür (Rampal vd., 2022).

5. DİJİTAL GÖRÜNTÜ İŞLEME

Dijital görüntüler, günümüz yaşamında oldukça önemli bir yer tutmaktadırlar. Her dakika internete milyonlarca dijital görüntü yüklenmektedir. Bu görüntüler, çoğunlukla ikili (binary) formatta temsil edilen, iki boyutlu görsellerin sayısal karşılıklarıdır. Dijital görüntüler, tıbbi görüntüleme, video gözetimi, adli analizler ve uzaktan algılama gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

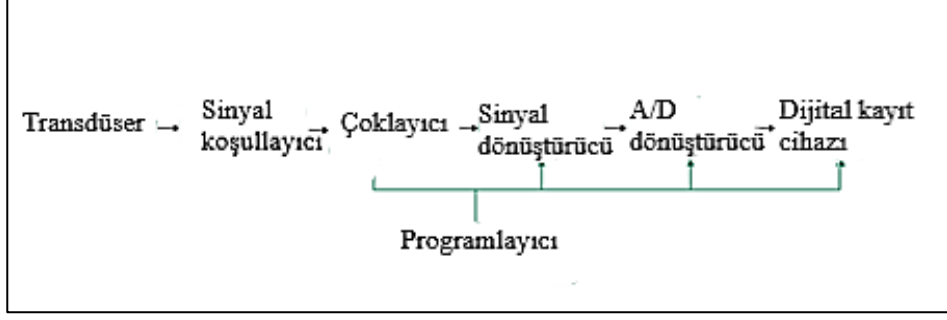
Görüntü işleme, dijital hale getirilmiş görsellerin analiz edilmesi ve çeşitli işlemlerle iyileştirilmesini sağlayan bir tekniktir. Bu yöntemin temel hedefi, görüntülerin kalitesini artırmaktır. Dijital görüntü işleme tekniklerinin en önemli avantajları arasında uyarlanabilirlik, tekrar edilebilirlik ve orijinal bilginin yüksek hassasiyetle korunabilmesi yer almaktadır.

5.1. Dijital Görüntü İşleme Teknikleri

Bazı görüntü işleme yöntemlerinde hem giriş hem de çıkış birer görüntüdür. Diğer bazı yöntemler ise görüntüyü giriş olarak alır ancak çıktı olarak görüntünün belirli özelliklerini ya da parametrelerini üretir. Bu tekniklerin hepsinin aynı anda kullanılması gerekmez. Hangi yöntemin tercih edileceği tamamen kullanım amacına ve uygulama alanına bağlıdır. Aşağıda farklı görüntü işleme tekniklerine dair detaylı bilgiler sunulmuştur.

5.1.1. Görüntü edinimi

Bir görüntü, $f(u, v)$ biçiminde tanımlanan iki boyutlu bir fonksiyon olarak düşünülebilir. Burada u ve v düzlemin koordinatlarını belirtirken, bu noktalardaki fonksiyon değeri yani genlik (amplitude) o konumdaki görüntü yoğunluğu (intensity) veya gri ton değeri (gray level) olarak adlandırılır. Eğer u , v ve f 'nin genlik değerleri sonlu ve ayrık (discrete) ise bu tür bir görüntü dijital görüntü olarak tanımlanır. Görüntünün elde edilmesi (image acquisition), görüntü işleme sürecinin temel adımlarından biridir. Çünkü eğer görüntü doğru şekilde alınmazsa, gelişmiş görüntü iyileştirme yöntemleri bulunsan bile sonraki işleme adımlarının başarısı sınırlı olabilir.



Şekil 5.1. Dijital veri edinim sistemleri (Anonymous, 2024)

5.1.2. Görüntü ön işleme

Görüntü işleme ve bilgisayarla görme alanlarında önemli bir aşama olan görüntü ön işleme, görüntü verisini iyileştirmek amacıyla bazı istenmeyen bozulmaları azaltırken, belirli özellikleri de güçlendirmeyi hedefler. Bu özelliklerin geliştirilmesi, uygulamanın gereksinimlerine bağlı olarak değişiklik gösterir. Uydu sensörleri tarafından elde edilen görüntüler, piksel geometrisi ve parlaklık değerlerinde çeşitli hatalar içerebilirler. Ön işleme sırasında bu tür hatalar kesin veya istatistiksel matematik modeller kullanılarak düzeltilir. Ayrıca görüntü ön işleme, temel olarak gürültüyü azaltma, kontrastı artırma, görüntüyü yumuşatma ve keskinleştirme gibi işlemleri, bunun yanında daha ileri işlemlerden olan görüntü segmentasyonunu da içerir. Yeni bir pikselin parlaklık değerinin belirlenmesinde dikkate alınan piksel komşuluğunun büyüklüğüne bağlı olarak görüntü ön işleme yöntemleri şu şekilde sınıflandırılabilir: Piksel parlaklık dönüşümleri, geometrik dönüşümler, işlenen pikselin yerel komşuluğunu kullanan ön işleme teknikleri ve tüm görüntü hakkında bilgi gerektiren görüntü iyileştirme teknikleri (Joseph, 2018).

5.1.3. Görüntü iyileştirme ve restorasyonu

Görüntü iyileştirme ve restorasyon işlemleri, dijital görüntü işlemenin en önemli alanlarından biridir. Bu işlemlerin temel amacı, görüntü kalitesini artırarak elde edilen görselleri belirli uygulamalar için daha uygun hale getirmektir. Görüntü iyileştirme kapsamında yaygın olarak kullanılan yöntemler arasında, histogram eşitleme, gama düzeltme ve kontrast germe gibi teknikler bulunur.

Histogram eşitleme, görüntü gri seviye dağılımını yeniden düzenleyerek kontrastı artırır ve gri tonların daha eşit dağılmasını sağlar. Gama düzeltme, görüntünün gri

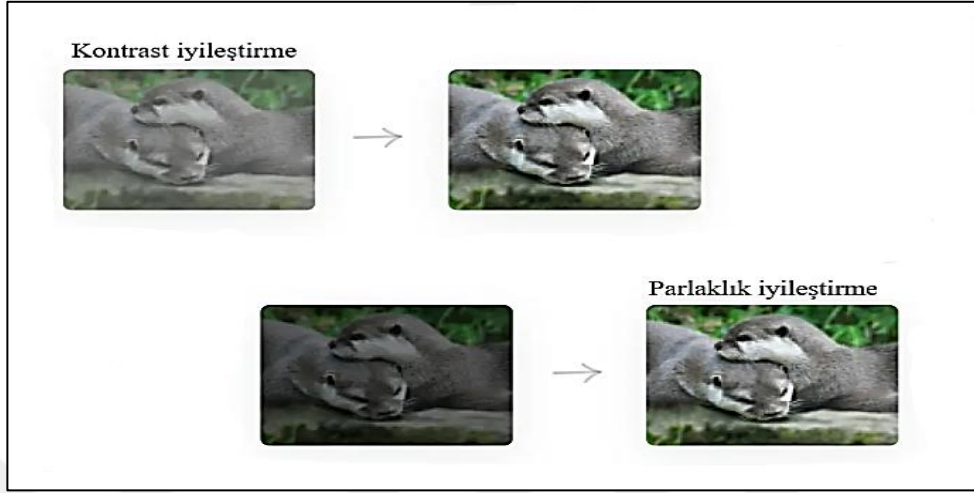
seviyesini doğrusal olmayan bir dönüşümle ayarlayarak görüntüleme cihazının doğrusal olmayan yanıtını düzeltmek ve görüntünün parlaklığını ve kontrastını artırmak için kullanılır. Kontrast germe ise gri seviye aralığını doğrusal bir dönüşümle genişleterek görüntünün kontrastını artırmak için kullanılan bir yöntemdir.

Görüntü restorasyon teknikleri, çeşitli nedenlerle kalitesi düşmüş görüntülerin aslına yakın bir şekilde yeniden elde edilmesini amaçlar. Bulanıklık, gürültü ve hareket kaynaklı bozulmalar bu tekniklerle sıkça giderilmeye çalışılan sorunlardandır. Wiener filtresi, bu alandaki en eski ve yaygın yöntemlerden biridir. Bu filtre, ortalama karesel hatayı en aza indirgeyerek ideal filtreyi oluşturmayı hedefler. Frekans uzayında uygulanan ters filtreleme işlemi sırasında gürültü güç spektrumunun etkisi de hesaba katılır. Lucy-Richardson algoritması, maksimum olasılık tahmini ilkesine dayanır ve iteratif bir süreçle çalışır. Her yinelemede, gerçek görüntü ile bozulma fonksiyonunun çarpımının gözlenen görüntüye oranı tahmin edilir. Bu işlem, elde edilen sonuç belirli bir doğruluk düzeyine ulaşana kadar devam eder. Kör dekonvolüsyon (blind deconvolution) yöntemi ise özellikle hareket bulanıklığı gibi bozulma fonksiyonunun bilinmediği durumlarda görüntülerin onarılmasında kullanılır. Bu tür senaryolarda, maksimum olasılık tahmini ve beklenti eniyileme gibi algoritmalar sıkça tercih edilir.

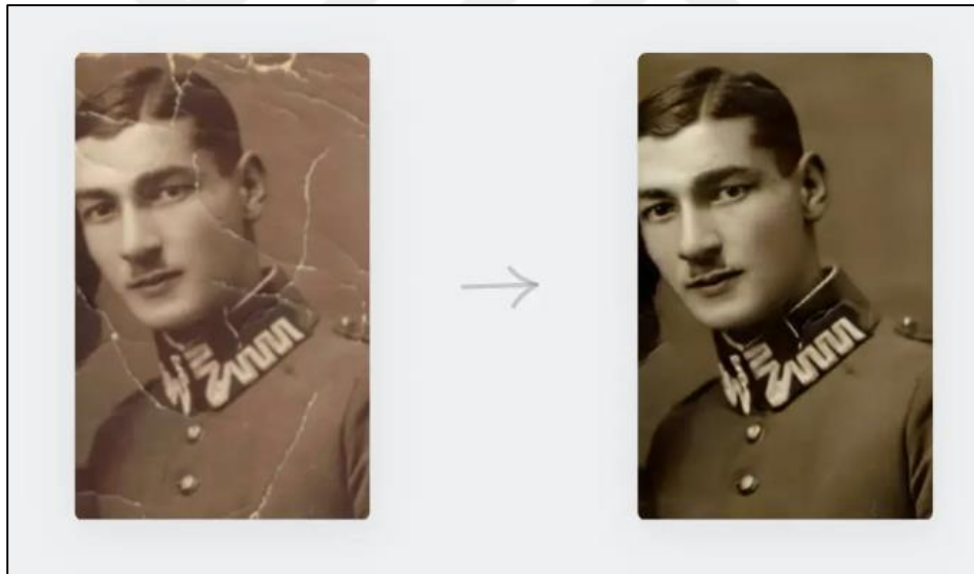
Görüntü iyileştirme ve restorasyonunda, temel faktörler arasında görüntünün değerlendirme kriterleri, ön bilgi kullanımı ve algoritmanın hesaplama verimliliği yer alır. Yaygın olarak kullanılan nesnel değerlendirme metrikleri arasında, tepe sinyal-gürültü oranı (PSNR) ve yapısal benzerlik indeksi (SSIM) gibi ölçütler bulunur. Ancak öznel görsel kalite değerlendirmesi çoğunlukla daha önemlidir. Bozulma modelleri ve gürültünün istatistiksel özellikleri gibi ön bilgiler, algoritma tasarımına yön vermek ve çözüm uzayını sınırlamak için kullanılabilir. Bununla beraber, görüntü onarma algoritmaları genellikle yoğun hesaplama gerektirir ve iyileştirme kalitesi ile hesaplama verimliliği arasında bir denge kurulması gerekir.

Son yıllarda ortaya çıkan seyrek gösterim (sparse representation) ve düşük-rank ayrıştırma (low-rank decomposition) gibi yeni teoriler, görüntü iyileştirme ve restorasyonu için yeni yaklaşımlar sunmuştur. Seyrek gösterime dayalı sözlük öğrenme yöntemi, görüntülerin seyrek gösterim sözlüğünü adaptif olarak öğrenerek gürültü giderme ve süper çözünürlük yeniden yapılandırma işlemlerinde kullanılabilir. Düşük-rank ayrıştırma ise görüntüyü düşük-rank ve seyrek bileşenlere ayırır. Burada düşük-rank bileşen görüntüdeki yapısal bilgiyi temsil ederken, seyrek bileşen gürültü ve doku

detaylarını temsil eder. Bu bileşenlerin ayrı ayrı işlenmesiyle görüntü iyileştirme sağlanabilir (Liu, 2024).



Şekil 5.2. Görüntü iyileştirme (Kundu, 2022)

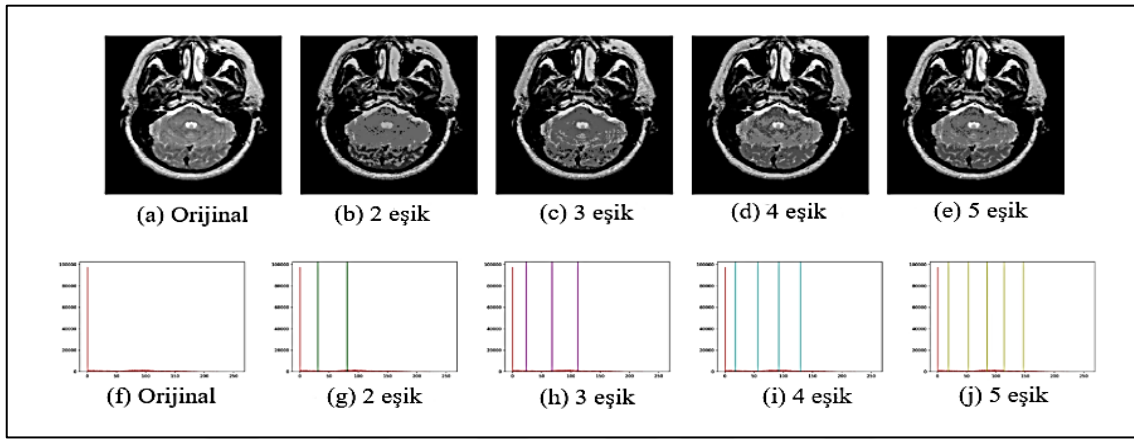


Şekil 5.3. Görüntü restorasyonu (Kundu, 2022)

5.1.4. Görüntü segmentasyonu

Görüntü segmentasyonu, bir görüntünün çeşitli bölgelere ya da parçalara ayrılması sürecidir. Bu bölgeler görüntüdeki farklı nesneleri temsil eder ve bu işlem çoğunlukla nesne tanıma öncesinde bir hazırlık adımı olarak gerçekleştirilir. Bu amaçla kullanılabilecek pek çok algoritma mevcuttur. Bunlardan en yaygın olanlardan biri

eşikleme (thresholding) tekniğidir. Örneğin, ikili eşikleme yöntemi görüntüyü yalnızca siyah ve beyaz piksellerden oluşan bir biçime dönüştürmeyi içerir. Belirlenen eşik değerine göre parlaklık seviyesi bu değerin altında kalan pikseller siyah, üzerinde kalanlar ise beyaz olarak gösterilir. Böylece görüntüdeki nesneler birbirinden net biçimde ayrılmış hale gelir ve segmentasyon tamamlanmış olur. Çok seviyeli eşikleme (multi-level thresholding) ise isminden de anlaşılacağı gibi bir görüntünün çeşitli bölgelerinin farklı gri tonlarında temsil edilmesini sağlayan bir tekniktir (Kundu, 2022).



Şekil 5.4. Beyin MRG segmentasyonu için çok seviyeli eşikleme kullanımı (Kundu, 2022)

5.1.5. Görüntü sıkıştırma

Görüntü sıkıştırmanın temel amacı, görüntü verilerindeki gereksiz ve yinelenen bilgileri ortadan kaldırarak verilerin daha etkin bir şekilde depolanmasını ya da iletilmesini mümkün kılmaktır. Bu süreç, bir görüntünün temsil edilmesi için ihtiyaç duyulan bit sayısını azaltmayı hedefler. Görüntü sıkıştırma yöntemleri, kayıpsız (lossless) veya kayıplı (lossy) olarak ikiye ayrılır. Kayıpsız sıkıştırma, genellikle uzun süreli arşivleme, tıbbi görüntüler, teknik tasarımlar, çizgi romanlar ya da vektörel grafikler gibi alanlarda tercih edilir. Kayıplı sıkıştırma yöntemleri ise özellikle düşük bit oranlarında kullanıldığında bazı görsel bozulmalar (compression artifacts) oluşturabilir. Buna rağmen, küçük ve çoğunlukla fark edilemeyen kalite kayıplarının kabul edilebilir olduğu durumlarda, örneğin fotoğraf gibi doğal görüntülerin işlendiği uygulamalarda kayıplı yöntemler uygundur. Görsel olarak fark edilemeyecek düzeyde kalite kaybı oluşturan bu tür kayıplı sıkıştırma teknikleri, görsel olarak kayıpsız (visually lossless) olarak tanımlanabilir (Lu ve Guo, 2017).

5.1.6. Görüntü filtreleme

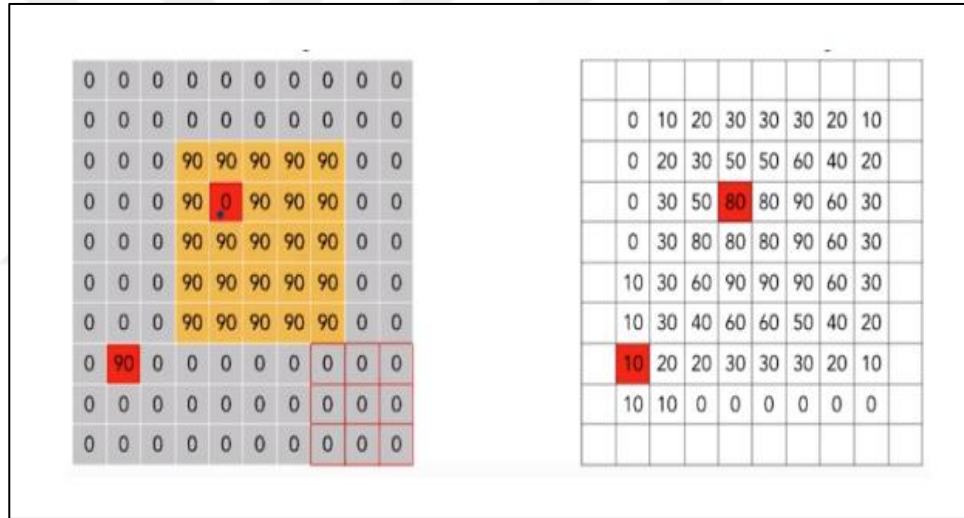
Görüntü filtreleme, temel olarak bir görüntünün kalitesini iyileştirmek için uygulanır. Örneğin, görüntüyü yumuşatma (smoothing) işlemi sayesinde gürültü azaltılabilir ayrıca bulanık alanlar netleştirilebilir. Bu işlemler için kullanılan algoritmalar genel olarak iki ana kategoriye ayrılır: Doğrusal (linear) ve doğrusal olmayan (non-linear) filtreleme yöntemleri. Doğrusal filtreler, konvolüsyon (katlama) işlemi veya Fourier dönüşümüyle çarpım gibi matematiksel yöntemlerle uygulanabilir. Ancak doğrusal olmayan filtrelerde bu tür işlemler geçerli değildir. Çünkü bu tür filtrelerin çıktısı girdiye doğrudan orantılı değildir. Dolayısıyla doğrusal olmayan filtreleme sezgisel olarak öngörülemeyen sonuçlar üretebilir.

Kenar algılama ve görüntü segmentasyonu gibi ileri düzey görüntü işleme adımlarının sağlıklı yürütülebilmesi için görüntüdeki gürültünün ortadan kaldırılması gerekir. Medyan (ortanca) filtresi, özellikle tuz ve biber tipi (salt and pepper) gürültüyü algılayıp ortadan kaldırmada en etkili doğrusal olmayan filtreleme yöntemlerinden biridir. Bu filtre, gürültüyü azaltırken, görüntüdeki kenarları koruma yeteneği sayesinde yaygın olarak tercih edilir. Medyan filtre, %5 ila %60 arasındaki gürültü yoğunluklarında etkili çalışarak hem gürültüyü baskılar hem de görüntüdeki ince detayları bozulmadan korur. Filtreleme işleminde, önce bozulmuş pikseller tespit edilerek "gürültülü" olarak işaretlenir. Ardından yalnızca gürültüsüz olan piksellere anahtarlamalı (switching-based) medyan filtre uygulanarak daha doğru ve net bir sonuç elde edilir.

Bilateral filtre, doğrusal olmayan filtreleme yöntemlerinden biridir ve özellikle görüntüdeki gürültüyü azaltırken kenarların korunmasını sağlar. Bu filtre, her pikselin çevresindeki komşu piksellerin ağırlıklı ortalamasını alır ve o pikselin yoğunluk değerini bu ağırlıklı ortalama ile değiştirir.

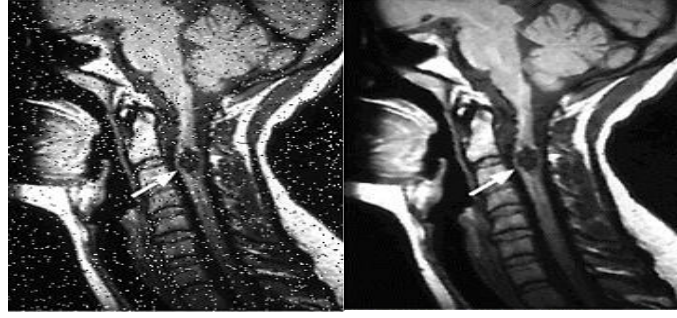
Eğer görüntüdeki gürültü oranı düşük fakat gürültü değerleri çok yüksekse doğrusal olmayan filtreler tercih edilir. Öte yandan, eğer görüntüde geniş alanlara yayılmış ama şiddeti düşük düzeyde bir gürültü mevcutsa, doğrusal bir düşük geçiren filtre (low-pass filter) genellikle yeterli olacaktır. Doğrusal filtreler hem uygulama kolaylığı hem de işlem hızı açısından yaygın olarak kullanılır. Bu tür filtrelerde, algoritma giriş pikselinin çevresindeki komşuluk alanına uygulanır ve komşu pikseller giriş pikseline olan konumsal uzaklığa bağlı olarak belirlenir. Doğrusal filtrelemede yaygın olarak kullanılan bazı algoritmalar şunlardır: Kutu filtreleme (box blur), Gauss bulanıklığı (gaussian blur), hann penceresi (hann window).

Kutu filtreleme yönteminde, 9x9 piksel boyutunda bir görüntünün 3x3 komşuluk değerlerine sahip olduğu varsayılır. Yumuşatma işlemi, bu komşu piksellerin ortalamasının alınarak ilgili çıkış pikseline atanmasıyla gerçekleştirilir. Bu şekilde yüksek yoğunluklu (parlak) pikseller daha düşük değerlere, düşük yoğunluklu pikseller ise daha yüksek değerlere dönüştürülerek görüntüdeki tonlar dengelenmiş olur. Gauss filtresi (gaussian filter) ise Gauss fonksiyonuna dayalıdır ve bu fonksiyona göre bir çekirdek (kernel) oluşturulabilir. Kernel, görüntü filtreleme işlemlerinde kullanılan küçük boyutlu bir matristir ve rölyef (embossing), yumuşatma, keskinleştirme (sharpening), bulanıklaştırma (blurring) gibi çeşitli işlemlerde konvolüsyon için kullanılır. Gauss bulanıklığı hem yumuşatma hem de filtreleme işlemleri için uygulanabilir. Bu yöntemle elde edilen filtrelenmiş görüntü, basit ortalama (average blur) filtrelerine göre daha fazla detay içerir ve genellikle kutu filtreleme yönteminden daha iyi sonuçlar verir.



Şekil 5.5. Kutu filtreleme (Desai vd., 2020)

Yukarıdaki görüntüde, etrafı 90 değerleriyle çevrili olan sıfır (0) değeri çıkış görüntüsünde çok daha yüksek bir değere dönüşerek yumuşatma etkisi oluşturmuştur. Benzer şekilde, etrafı sıfırlarla çevrili olan 90 değeri ise çıkış görüntüsünde 10 değerine düşürülmüş ve böylece daha yumuşak geçişlere sahip bir görüntü elde edilmiştir (Desai vd., 2020).



Şekil 5.6. (Soldaki resim) gürültülü görüntü (“tuz ve biber” gürültüsüyle bozulmuş) (sağdaki resim) 3×3 medyan filtre kullanılarak iyileştirilmiş görüntü (Tan, 2008)

5.1.7. Morfolojik işleme

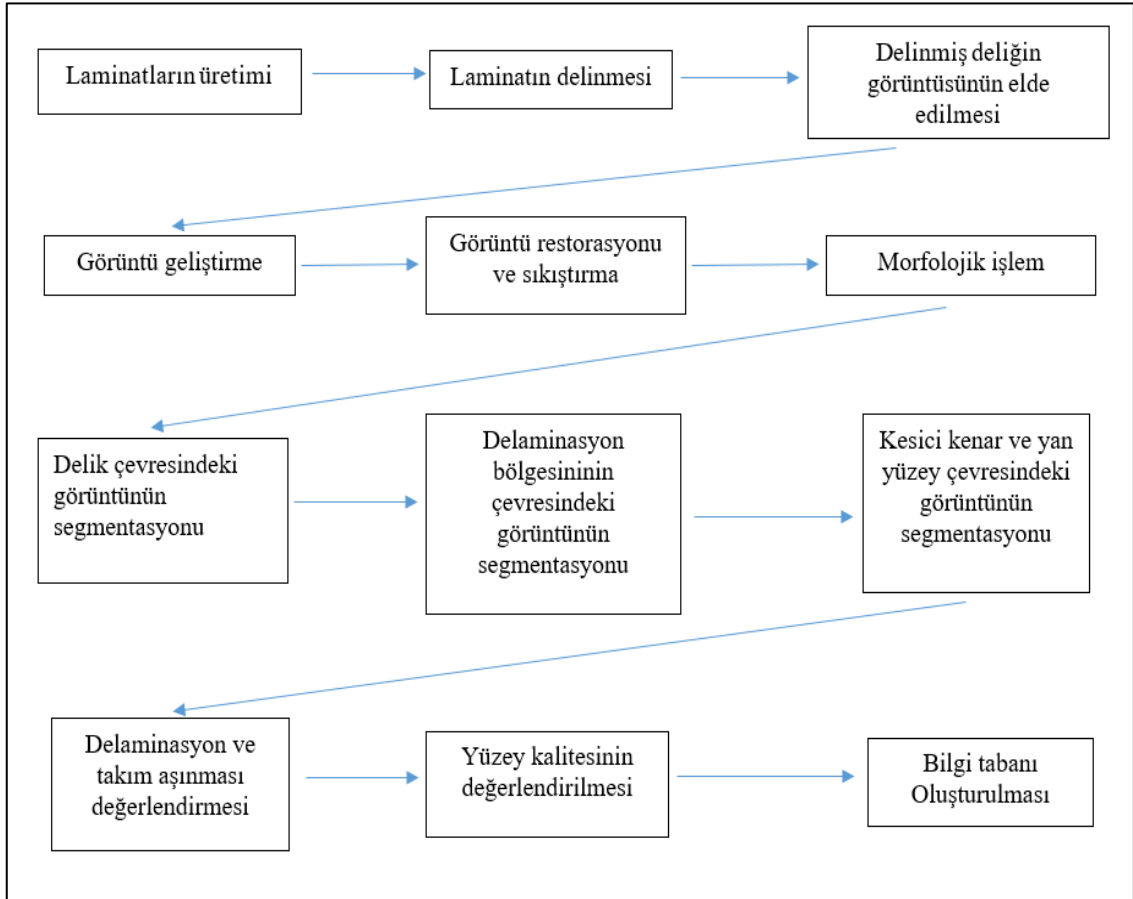
Morfolojik işleme, bir görüntüdeki şekillerin tanımlanması ve temsil edilmesi açısından önemli olan bileşenleri ortaya çıkarmak amacıyla kullanılan bir dizi doğrusal matematiksel bir tekniktir. Bu işlemlerde kullanılan yapılandırma elemanı, görüntüyü analiz etmek için uygulanan küçük bir kümedir. Bu eleman, görüntü üzerinde kaydırılarak her konumda çevresindeki piksel grubu ile karşılaştırılır. Bazı morfolojik işlemler bu elemanın ilgili komşuluk içerisinde tam olarak yerleşip yerleşmediğini değerlendirirken, bazıları yalnızca kesişim veya temas olup olmadığını inceler. Morfolojide temel işlemler arasında, genişletme (dilation), aşındırma (erosion) ve bu iki işlemin birleşimlerinden oluşan işlemler yer alır. Aşındırma, yapılandırma elemanının tanımladığı ölçü ve şekildeki bazı nesne parçalarının görüntüden uzaklaştırılmasını sağlarken, genişletme yine aynı elemanın belirlediği biçimdeki boşlukları doldurmak için kullanılır (Joseph, 2018).

5.2. Delaminasyon Analizinde Dijital Görüntü İşlemenin Kullanımı

Delme işlemi sırasında meydana gelen delaminasyonun analizinde ve değerlendirilmesinde kullanılan yöntemlerden biri görüntü işleme teknikleridir. Bu teknikler, talaşlı imalat süreçlerinde oluşan hasarın boyutunu sayısal verilerle ifade etmeye olanak tanıyarak değerlendirme sürecine katkı sağlarlar.

Delaminasyona uğramış bölgelerin görüntüleri elde edildikten sonra oluşan hasarın analiz edilebilmesi için uygun bir değerlendirme yöntemi seçilmelidir. Alınan görüntüler üzerinde yapılan morfolojik işlemlerle, delaminasyonun analizinde gerekli olan delik geometrileri ve görüntü öğeleri tespit edilir. Ardından delinen yüzeyin

çevresindeki çizgiler, eğriler ve alanlar görüntü segmentasyonu yoluyla ayrıştırılır. Segmentasyon aşamasını takiben, delaminasyonun daha hassas biçimde değerlendirilebilmesi için yapay sinir ağları, bulanık mantık gibi çeşitli yumuşak hesaplama yöntemleri görüntü işleme süreciyle entegre bir şekilde kullanılmaktadır (Pramod vd., 2015).



Şekil 5.7. Delaminasyonun değerlendirilmesi için görüntü işleme adımları (Pramod vd., 2015)

6. MATERYAL VE YÖNTEM

6.1. Kompozit Numunelerin Hazırlanması

Takviyesiz kompozit üretimi için karbon elyaf twill kumaşlar 400×500 mm boyutlarında kesilmiştir. Matris olarak Sicomin SR 5550 epoksi reçine kullanılmış, sertleştirici olarak Sicomin SD 5503 tercih edilmiştir. Reçine ve sertleştiricinin ağırlıkları hassas terazide tartılarak belirlenmiştir. Sertleştirici, epoksi reçineye ağırlıkça %20 oranında eklenmiş ve mekanik karışım yapılmıştır. Karışımın ağırlığı yaklaşık 423 gram olmuştur. Daha sonra reçine+sertleştirici karışımı, el yatırma tekniği ile karbon elyafların üzerine uygulanmış ve on katmandan oluşan karbon elyaf epoksi kompozit (KEEK) malzeme hazırlanmıştır.



Şekil 6.1. Kesilmiş karbon elyaf kumaşlar



Şekil 6.2. Epoksi reçine ve sertleştirici



Şekil 6.3. Epoksi reçine ve sertleştiricinin karışımı

CNF takviyeli kompozit üretimi için epoksi ve sertleştirici aynı oran ve miktarlarda hassas terazide tartılıp hazırlandıktan sonra, karışıma ağırlıkça %0,75 oranında CNF ilave edilmiştir. Karışım ilk olarak belirli bir süre mekanik olarak karıştırılmıştır. Daha sonra CNF'lerin reçine içerisinde homojen şekilde dağılmasını sağlamak amacıyla karışım, ultrasonik karıştırıcı ile 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Bu işlemin ardından, karışım 2 saat boyunca soğumaya bırakılmış ve soğuma işlemi tamamlandıktan sonra, yukarıdaki ile aynı boyutlarda kesilmiş karbon elyafların üzerine

aynı şekilde el yatırma yöntemiyle uygulanarak on katmandan oluşan karbon nanofiber takviyeli karbon elyaf epoksi kompozit (KNFTKEEK) malzeme hazırlanmıştır. Üretilen her iki malzemenin de kalınlığı kumpas ile ölçülmüş ve $3,5 \pm 0,3$ mm olarak belirlenmiştir. Daha sonra her iki malzemeden, çekme, üç nokta eğme ve delme testleri için gönye testeresi kullanılarak belirli boyutlarda numuneler kesilmiştir.



Şekil 6.4. CNF ve CNF ilave edilmiş reçine



Şekil 6.5. Ultrasonik karıştırıcı



Şekil 6.6. El yatırma yöntemi ile kompozit laminatların üretimi



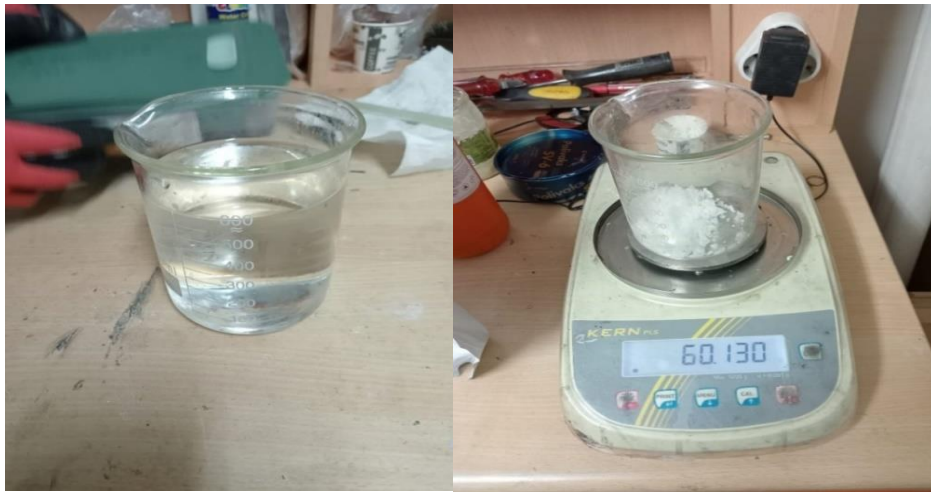
Şekil 6.7. Gönye testeresi ile numunelerin kesilmesi



Şekil 6.8. Kesilmiş delme, üç nokta eğme ve çekme deney numuneleri

6.2. Numunelerin Korozi Ortamlara Maruz Bırakılmaları

Üç nokta eğme, çekme ve delme testlerine ait bazı numuneleri korozi ortamlara maruz bırakmak için %10 derişimli hidroklorik asit (HCl) ve %15 derişimli sodyum hidroksit (NaOH) çözeltileri hazırlanmıştır. Asit çözeltisi, %32 saflıktaki HCl'nin saf su ile %10 derişikliğe seyreltilmesi ile 600 ml olarak hazırlanmıştır. Baz çözeltisi için ise katı haldeki NaOH hassas terazide tartılmış ve ardından saf suda çözdürülerek, %15 derişiklikte baz çözeltisi 600 ml olarak hazırlanmıştır. Numuneler daha sonra bir hafta süreyle, plastik kapalı kaplar içinde HCl ve NaOH ortamlarına maruz bırakılmıştır.



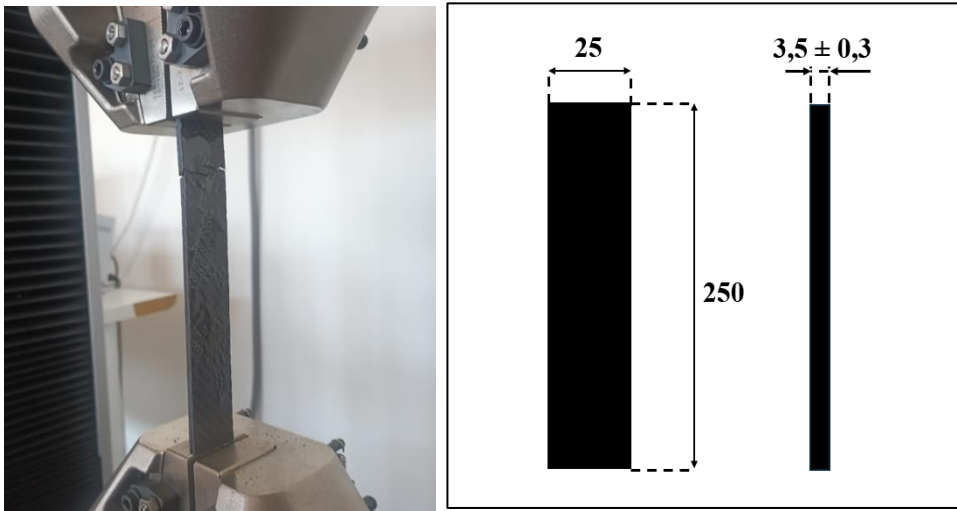
Şekil 6.9. HCl çözeltisi ve NaOH



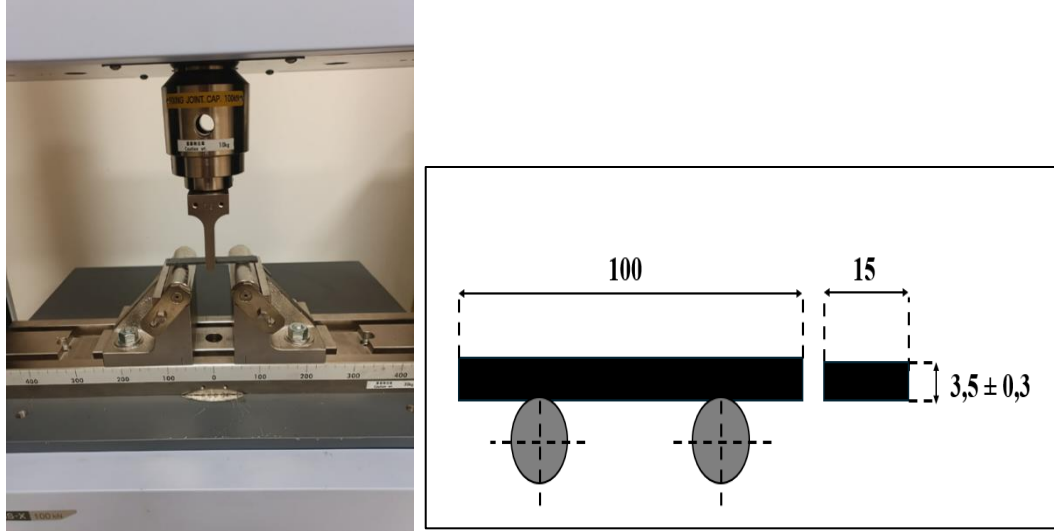
Şekil 6.10. Numunelerin asit ve baz ortamlarına daldırılmaları

6.3. Deneylerin Yapılışı

Çekme ve üç nokta eğme deneyleri, Shimadzu AGS-X 100 kN cihazı kullanılarak yapılmıştır. Yükleme hızı 5 mm/dak olarak ayarlanmıştır. Numunelere uygulanan kuvvetler ve oluşan yer değiştirmeler testler sırasında kaydedilmiştir. Asit ortamına maruz bırakılmış, baz ortamına maruz bırakılmış ve bu ortamlara maruz bırakılmamış CNF katkılı ve katkısız numunelerden 2’şer adet, toplamda 24 adet numuneye çekme ve üç nokta eğme deneyleri tatbik edilmiştir.



Şekil 6.11. Çekme testi sonucu numunenin kırılması ve deney numune boyutları



Şekil 6.12. Üç nokta eğme deneyinin yapılışı ve numune boyutları

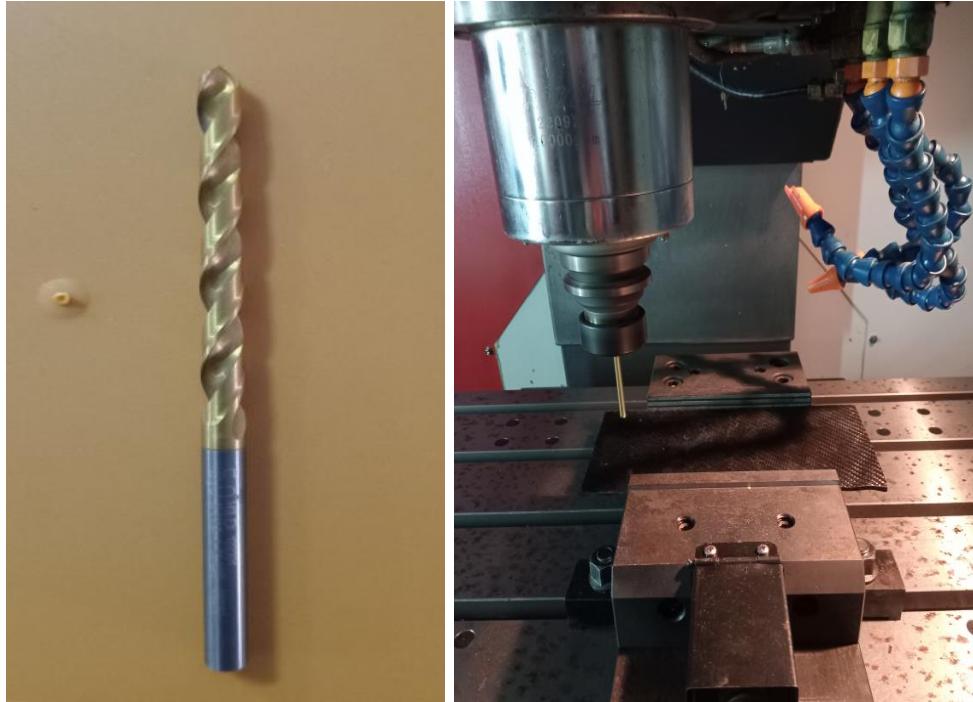
Delme deneyleri için Yuntex CNC dik işlem tezgâhı tercih edilmiştir. İş mili devri için 2500, 3000 ve 3500 dev/dak değerleri, ilerleme hızı için 110 mm/dak ve 550 mm/dak değerleri seçilmiştir. Kesici takım olarak 5 mm çapında, TiN kaplamalı helisel karbür matkap kullanılmıştır. Her bir mil devri baz alınarak, seçilen iki ilerleme değerinde numunelere ayrı ayrı delikler delinmiştir. Böylece her bir numunede 12 adet delik oluşturulmuştur. Korozyon ortamlara maruz bırakılmış ve bırakılmamış CNF katkılı ve katkısız numunelere eşit sayıda delikler yukarıda anlatıldığı gibi delinerek deneyler tamamlanmıştır. 9 adet delme numunesine toplamda 108 adet delik delinmiştir.

Tablo 6.1. Delme işlemlerinde kullanılan kesici takımın özellikleri (Anonymous, t.y.)

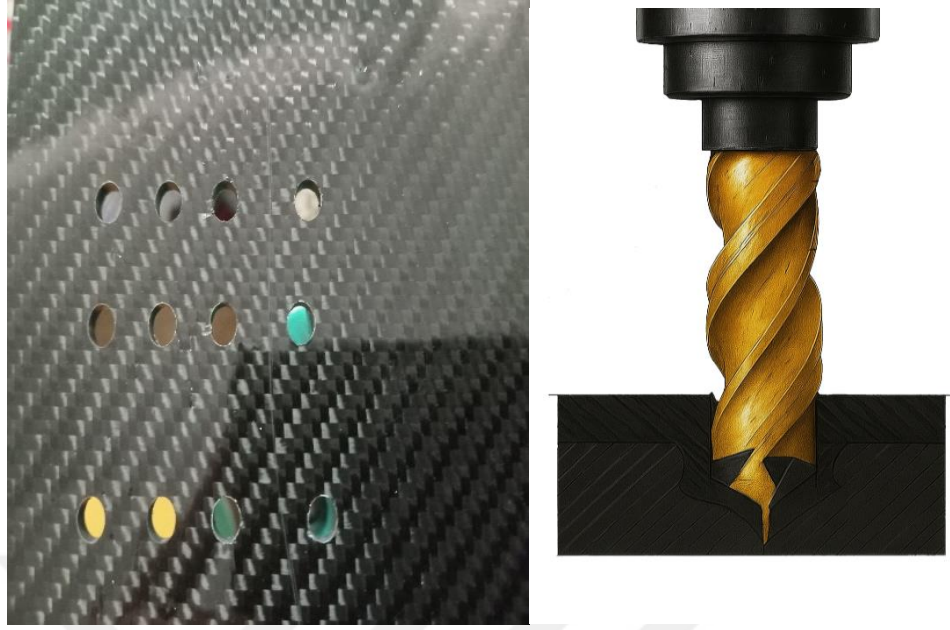
Uç açısı	118°
Helis açısı	30 °
Toplam boy, L	86 mm
Spiral kanal uzunluğu, L_c	52 mm
Nominal çap	5 mm
Kaplama	TiN
Nominal Tolerans	h7
Standart	DIN 338
Malzeme	Katı karbür
Önerilen maksimum delme derinliği, L_2	44,5 mm
Kesici kenar sayısı, Z	2



Şekil 6.13. CNC dik işlem tezgâhı



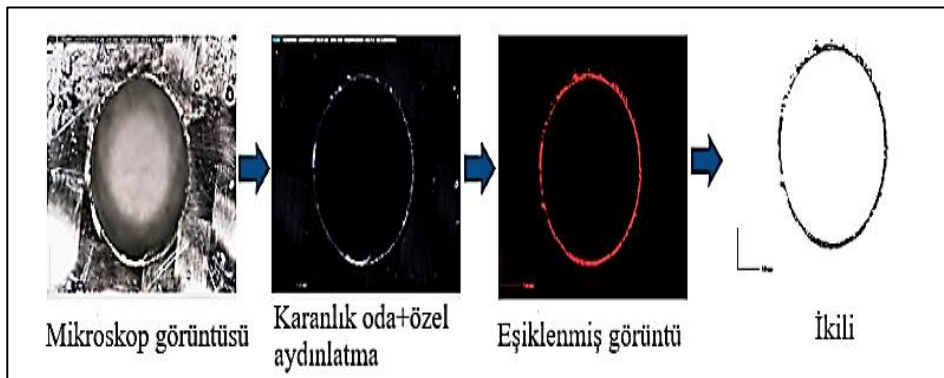
Şekil 6.14. TiN kaplamalı helisel karbür matkap ve numunenin bu matkapla delinmesi



Şekil 6.15. Numune üzerine açılan delikler

6.4. Görüntü İşleme

Delaminasyon faktörü (F_d) ve düzeltilmiş delaminasyon faktörü (F_{da})'nın belirlenmesi için delaminasyonun nicel değerleri elde edilmiştir. Delaminasyon alanını belirlemek amacıyla görüntü işleme yapılmıştır. İşlemler şu şekilde gerçekleştirilmiştir: Öncelikle mikroskop görüntüleri alınmış ve delik çevresindeki yansımaların/parlamaların delaminasyon tespitini etkilemesini önlemek için karanlık bir odada seçici aydınlatma ile kenar topografyası vurgulanmıştır. Daha sonra görüntülere eşikleme uygulanmış ve ikili bir görüntü oluşturulmuştur. Son aşamada, delaminasyon sınırı bu bölgelerden çıkarılmış ve hasar alanı nicel olarak hesaplanmıştır.

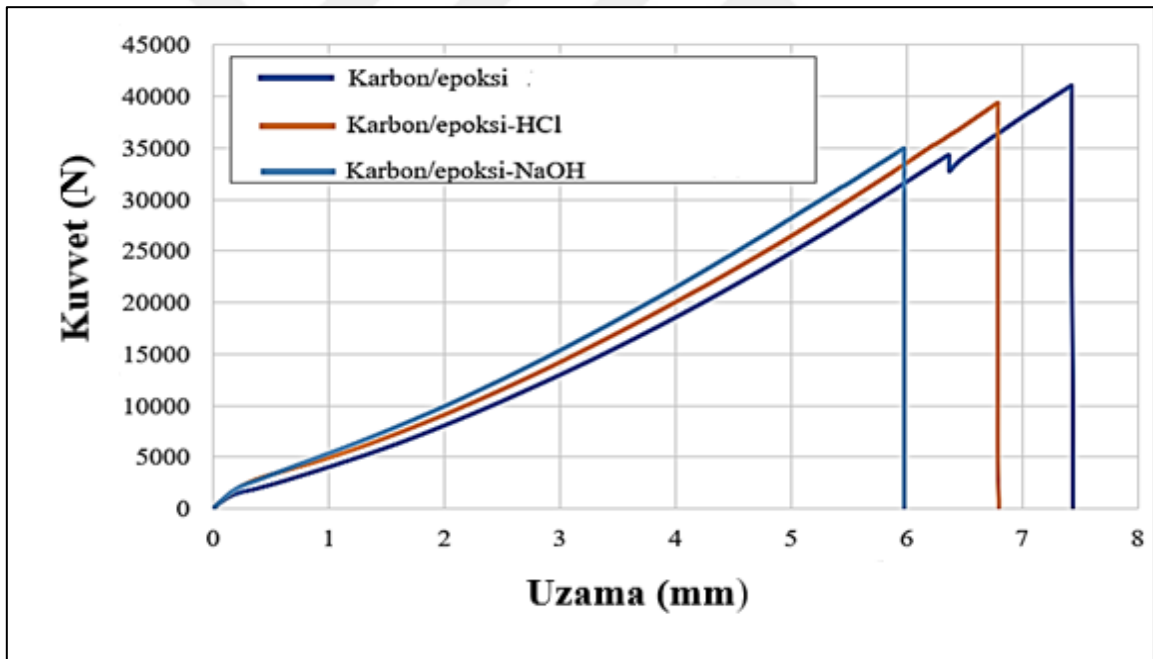


Şekil 6.16. Görüntü işleme akış şeması

7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

7.1. Çekme Testi Sonuçları

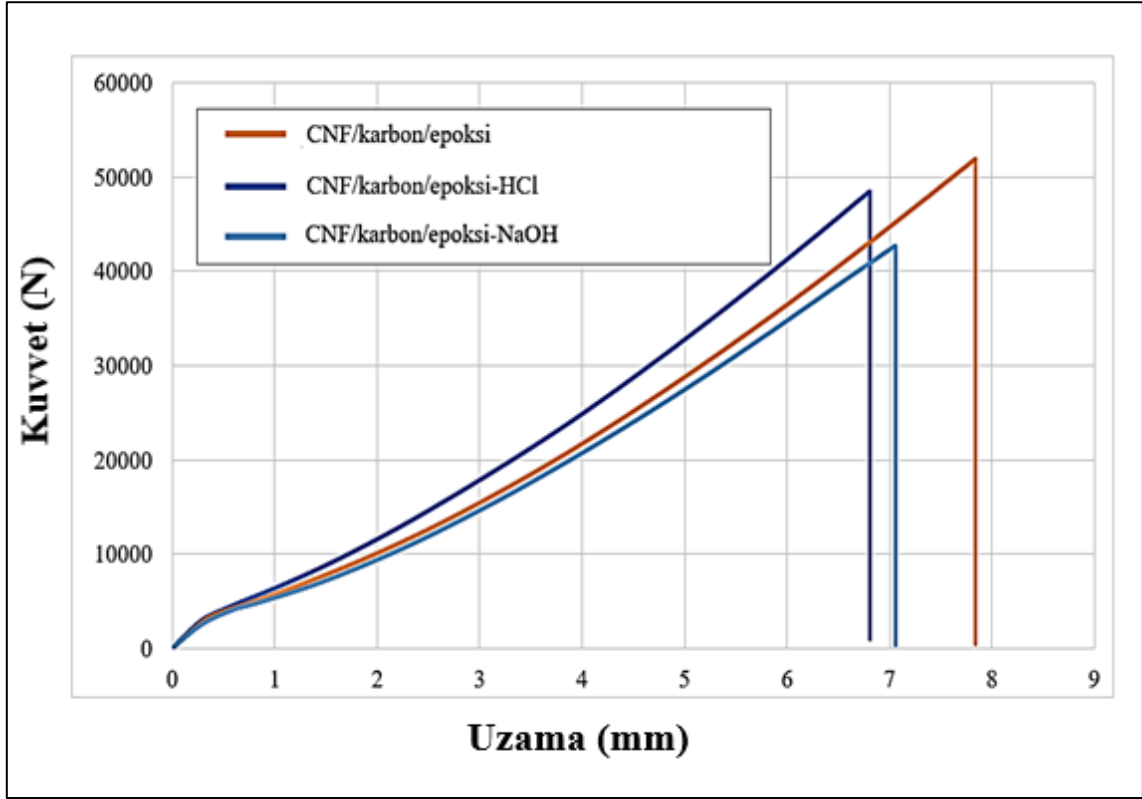
KEEK malzemelerin çekme deneyleri sonrasında elde edilen kuvvet-uzama grafiği aşağıda gösterildiği şekildedir. Korozyona maruz kalmamış numunede en yüksek kuvvet değeri elde edilmiştir. Aynı zamanda korozyonsuz numune en yüksek uzama değerine sahip olmuştur. HCl ortamına maruz kalmış numunede, NaOH ortamına maruz kalmış numuneye göre daha yüksek kuvvet ve uzama değerleri elde edilmiştir. Bazik ortam, asidik ortama göre maksimum kuvveti azaltmada daha etkili olmuştur. Grafiğe göre elde edilen maksimum kuvvet değerleri sırasıyla korozyonsuz numunede 41089,03 N, asit ortamına maruz kalmış numunede 39401,63 N, bazik ortama maruz kalmış numunede 34987,42 N'dur.



Şekil 7.1. KEEK numunelerin çekme testleri sonucu oluşan kuvvet-uzama grafiği

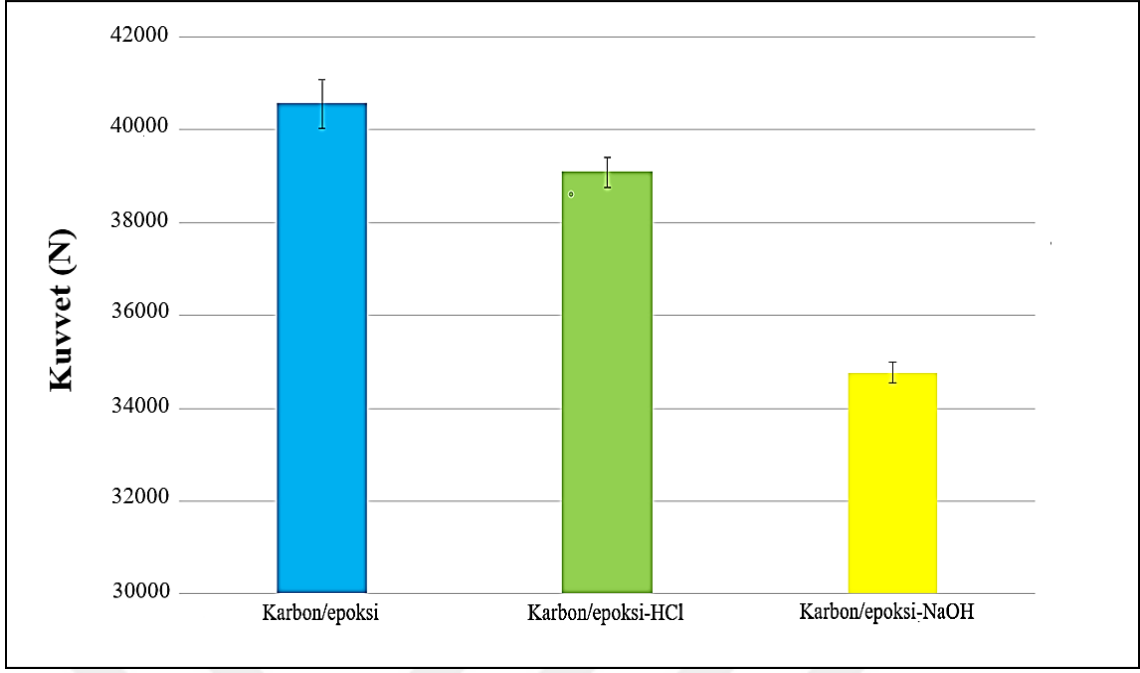
KNFTKEEK numunelerin kuvvet-uzama grafiğine bakıldığında ise CNF ilave edilmemiş KEEK numunelerine göre maksimum kuvvet değerlerinde belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Artış, aynı ortam koşullarına maruz kalmış CNF'li ve CNF'siz numuneler kıyaslandığında açık bir şekilde görülmektedir. Korozyonsuz numunede en yüksek kuvvet elde edilmiş, onu sırasıyla HCl ortamına maruz kalmış numune ve NaOH

ortamına maruz kalmış numune takip etmiştir. Elde edilen maksimum kuvvet değerleri sırasıyla şöyledir: 51931,83 N, 48490,65 N ve 42697,19 N. NaOH ortamı, aynı şekilde maksimum kuvveti azaltmada daha etkili olmuştur. Yine aynı şekilde korozyonsuz numunede en yüksek uzama değeri elde edilmiştir.

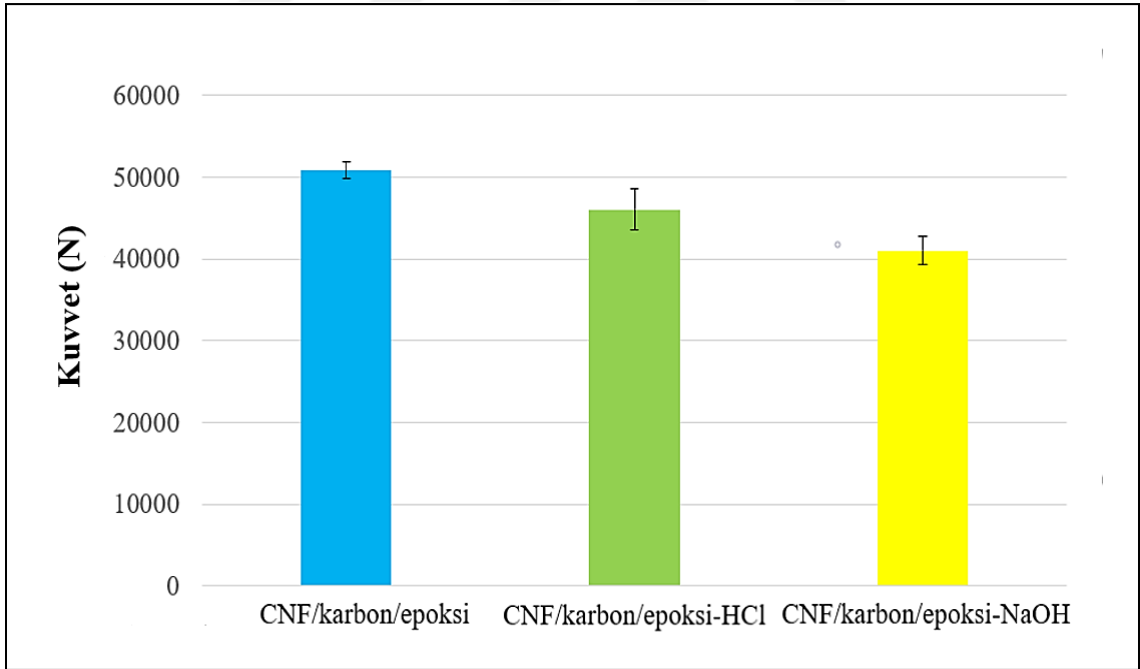


Şekil 7.2. KNFTKEEK numunelerin çekme testleri sonucu oluşan kuvvet-uzama grafiği

Çekme testlerinden elde edilen maksimum kuvvet değerleri, standart sapmaları ve ortalama değerleri gösteren grafiklere aktarıldığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre, CNF ilave edilmemiş KEEK numunelerin çekme deneylerinden elde edilen ortalama kuvvet değerleri korozyonsuz numune için 40562,15 N, aside maruz kalmış numune için 39080,53 N, baza maruz kalmış numune için 34764,41 N'dur. CNF ilave edilmiş numuneler için ise sonuçlar şu şekildedir: Korozyonsuz numune için 50885,96 N, aside maruz kalmış numune için 45977,67 N, baza maruz kalmış numune için 41012,06 N.



Şekil 7.3. KEEK numunelerin çekme deneyleri sonucu oluşan standart sapma-ortalama kuvvet grafiği



Şekil 7.4. KNFTKEEK numunelerin çekme deneyleri sonucu oluşan standart sapma-ortalama kuvvet grafiği

Bu sonuçlara göre, kompozit numunelerin çekme dayanımları üzerinde korozif ortamların olumsuz etkileri özellikle bazik ortamlarda daha belirgin olmuştur. HCl ortamında dayanım ve sünekliğin düşme nedeni, matrisin ağ yapısının zayıflaması, asidik

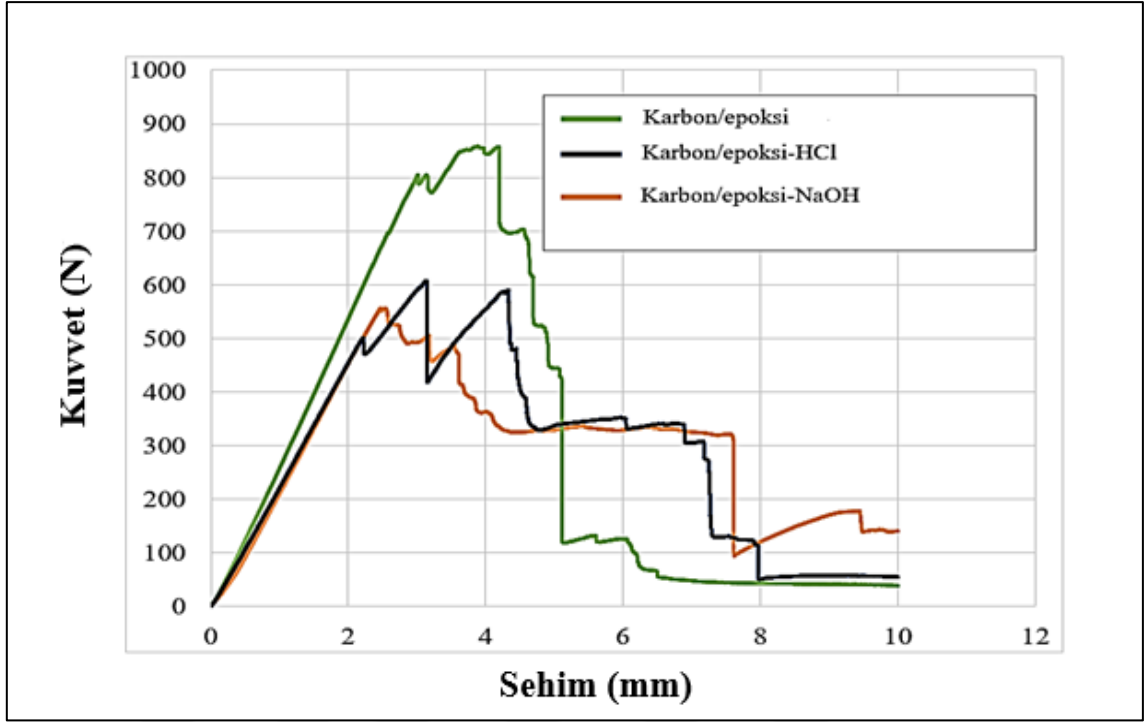
ortamın elyaf-matris bağıni kademeli olarak zayıflatması ve elyaf-matris bağlarının çözülmesi, bunlara bağlı olarak mikro çatlakların ve delaminasyonun meydana gelmesiyle açıklanabilir. Sonuçta yük transferi bozularak çekme dayanımı düşer ve malzeme daha gevrek kırılır. NaOH ortamının ise matrisin ağ yapısını çözerek mikro boşlukların oluşmasına ve akabinde gerilme altında çatlakların daha hızlı yayılmasına sebep olmasından dolayı bu ortamda daha fazla dayanım düşüşleri olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu ortamda da HCl ortamı gibi süneklik düşmüştür.

KEEK ve KNFTKEEK malzemelerin çekme testlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, CNF takviyesi ile birlikte kompozitlerin mekanik performansının önemli ölçüde arttığı görülmüştür. CNF ilavesi, özellikle elyaf/matris ara yüzünde yük transferini iyileştirerek çekme dayanımının ve rijitliğin artmasını sağlamıştır. CNF takviyesi ile birlikte asidik ve bazik ortamlara maruz kalma sonrası oluşan dayanım kaybı da belirli ölçüde azalmıştır. Bunun temel nedeni, matris yapısında CNF'lerin oluşturduğu nano yapısal ağın çatlak ilerlemesini engellemesi ve elyaf-matris ara yüzünün kimyasal bozunmaya karşı direncini artırmasıdır. Genel olarak CNF takviyesi, karbon epoksi kompozitlerin hem çekme dayanımını hem de korozyon direncini artırarak malzemenin çevresel etkilere karşı stabilitesini yükseltmiştir.

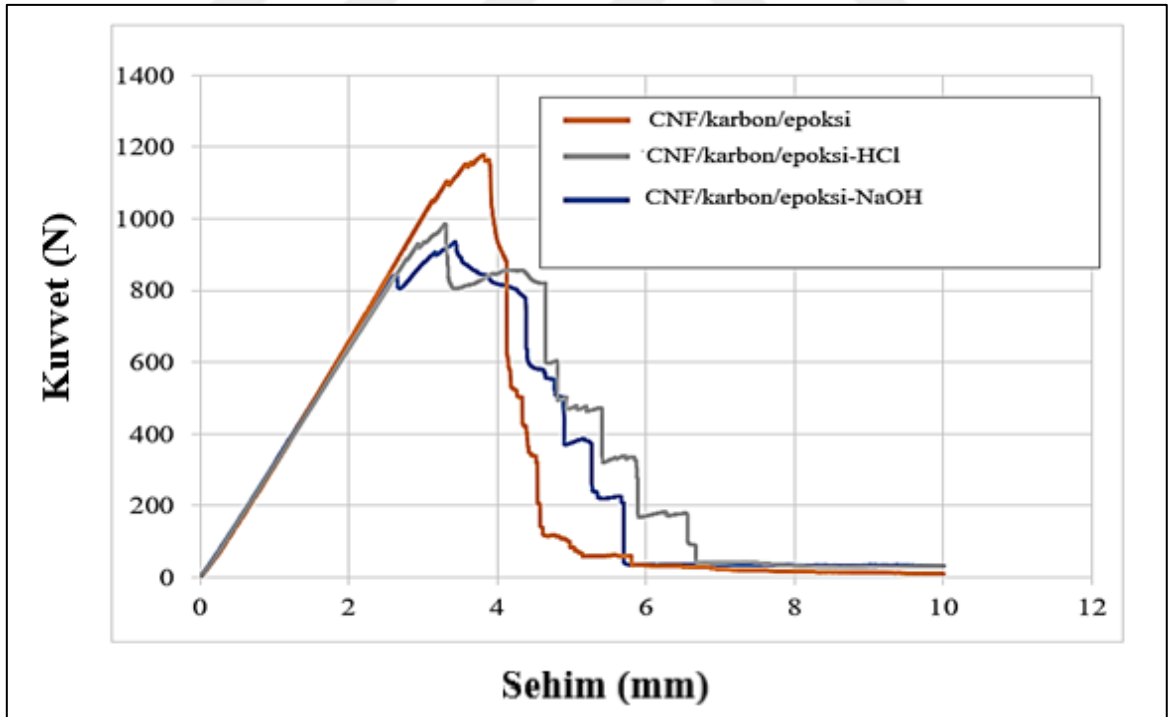
7.2. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

KEEK numunelerin üç nokta eğme deneyleri sonucu oluşan kuvvet-sehim grafiğine göre, en yüksek kuvvet korozyonsuz numunede elde edilmiştir. Grafiğe göre, HCl ortamına maruz kalmış numune, NaOH ortamına maruz kalmış numuneden daha yüksek kuvvet değerine sahip olmuştur. Elde edilen maksimum kuvvet değerleri korozyonsuz numune için 858,19 N, asidik ortama maruz kalmış numune için 607,74 N, bazik ortama maruz kalmış numune için 556,81 N'dur.

CNF ilave edilmiş KNFTKEEK numunelerin üç nokta eğme deneyleri sonucu oluşan grafiğe bakıldığında ise CNF ilavesi ile birlikte çekme deneyinde olduğu gibi aynı ortam koşullarına maruz kalmış takviyeli ve takviyesiz numuneler kıyaslandığında belirgin kuvvet artışları gözlemlenmiştir. En yüksek kuvvet, bütün grafiklerde olduğu gibi korozyonsuz numunede elde edilmiştir. Onu sırasıyla HCl ortamına maruz kalmış numune ve NaOH ortamına maruz kalmış numune takip etmiştir. Elde edilen kuvvetler sırasıyla, 1177,51 N, 986,06 N ve 935,84 N'dur.



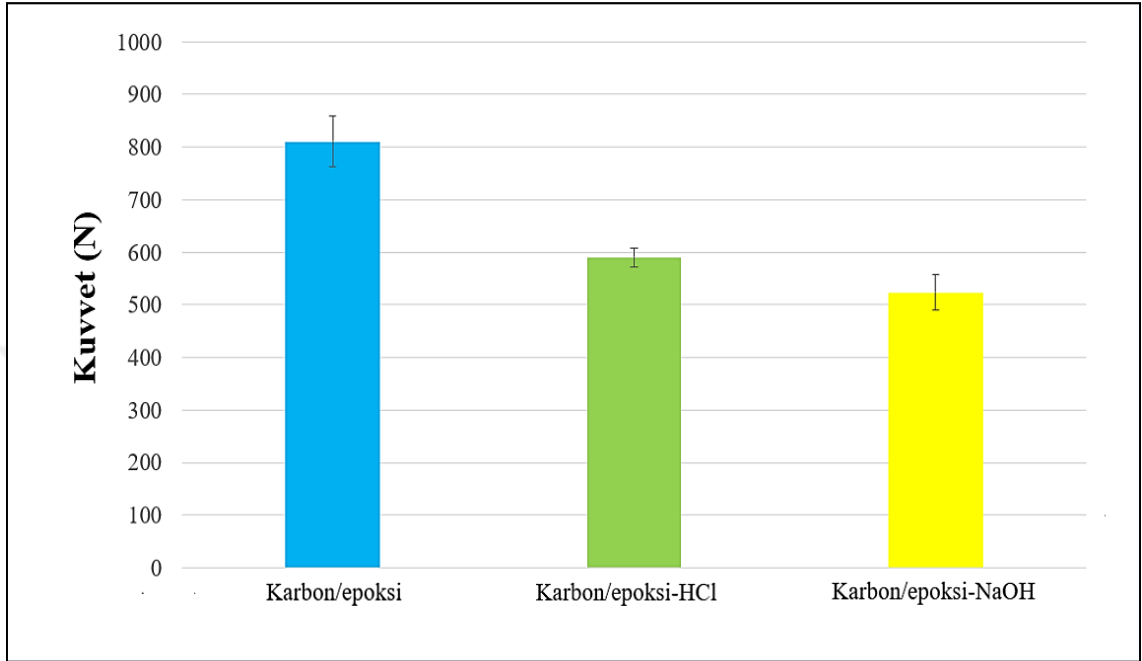
Şekil 7.5. KEEK numunelerin üç nokta eğme deneyleri sonucu oluşan kuvvet-sehim grafiği



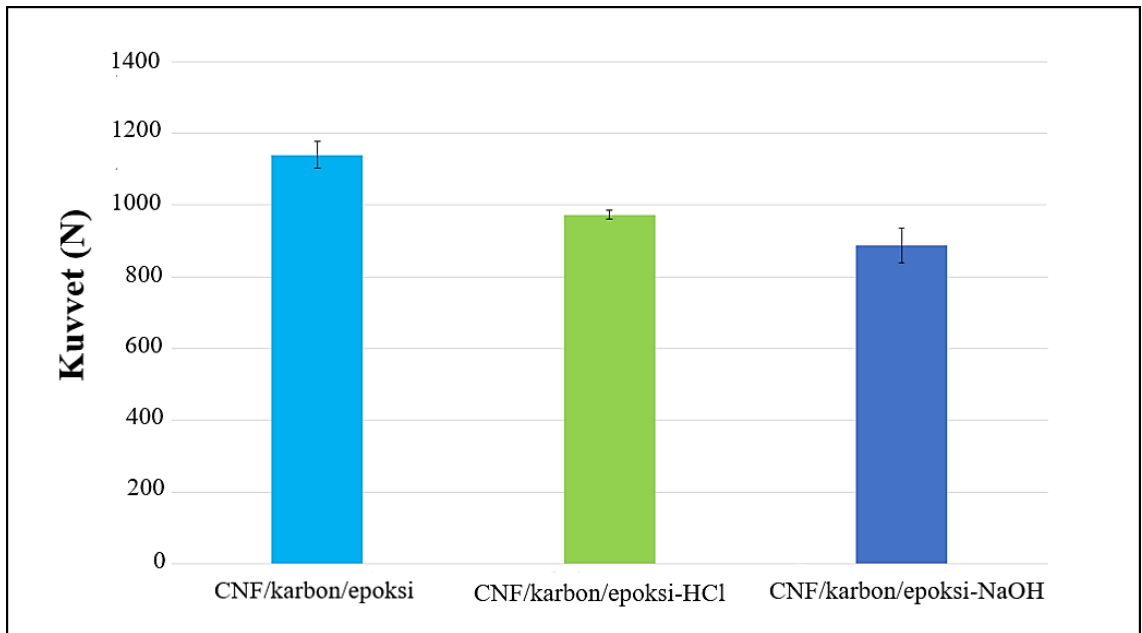
Şekil 7.6. KNFTKEEK numunelerin üç nokta eğme deneyleri sonucu oluşan kuvvet-sehim grafiği

Üç nokta eğme testlerinden elde edilen standart sapma-ortalama kuvvet değerlerini gösteren grafiklere göre, CNF ilave edilmemiş numuneler için korozyonsuz,

asidik ve bazik ortamlara göre ortalama kuvvet değerleri sıra ile şu şekildedir: 810,02 N, 589,93 N ve 523,69 N. CNF ilave edilmiş numuneler için ise korozyonsuz numunede 1139,72 N, aside maruz kalmış numunede 973,03 N ve baza maruz kalmış numunede 887,22 N ortalama kuvvet değerleri elde edilmiştir.



Şekil 7.7. KEEK numunelerin üç nokta eğme deneyleri sonucu oluşan standart sapma-ortalama kuvvet grafiği



Şekil 7.8. KNFTKEEK numunelerin üç nokta eğme deneyleri sonucu oluşan standart sapma-ortalama kuvvet grafiği

Üç nokta eğme deneylerinden elde edilen sonuçlar hem HCl hem de NaOH ortamlarının kompozitlerin eğme dayanımını önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. Bazik ortamın, asidik ortama kıyasla daha şiddetli kimyasal bozunma etkisine sahip olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, OH^- iyonlarının epoksi ağındaki eter bağlarını kırarak kimyasal çözünmeye neden olması ve böylece ara yüz bağlarını zayıflatmasıyla açıklanabilir. Buna karşılık, HCl ortamı daha yavaş etki ederek matris yapısında kademeli bir zayıflamaya yol açmıştır. Her iki ortamda da katmanların birbirinden ayrılması ile birlikte eğme yüklemesi altında çatlaklar hızlı ilerler ve eğme dayanımı değerlerinde düşüşler gözlenir.

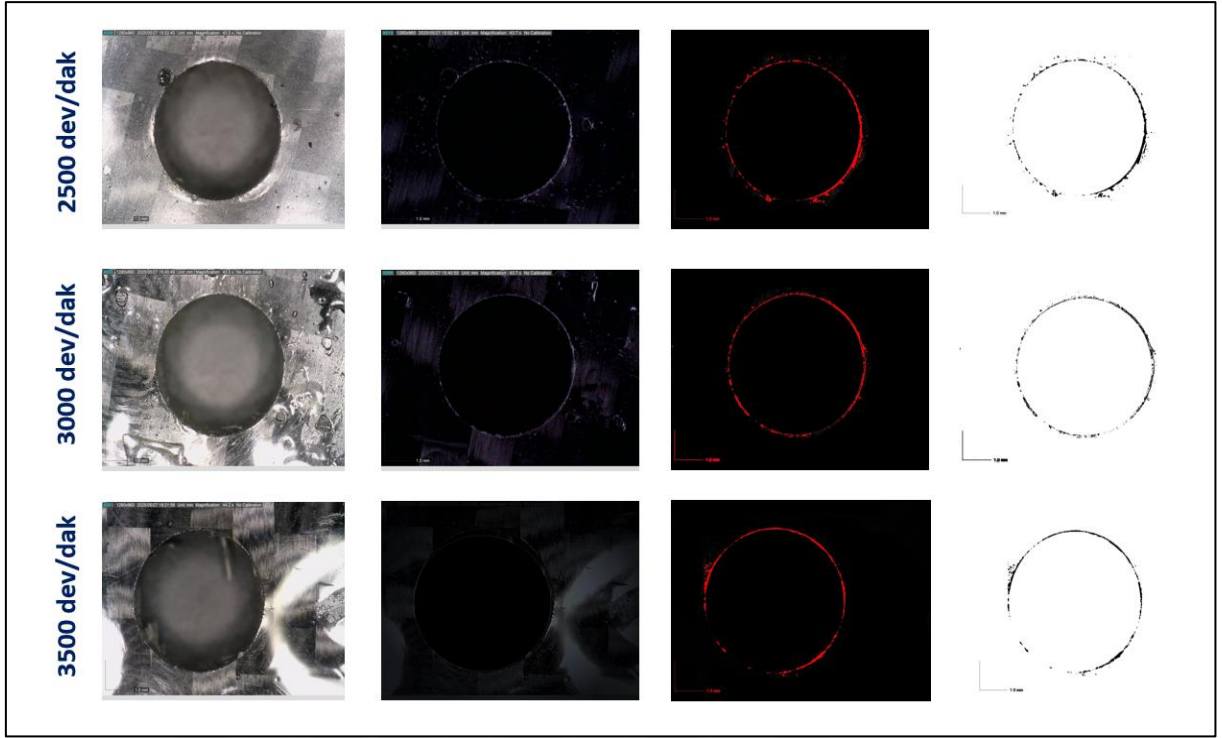
Kuvvet-sehim grafiklerinde, maksimum yüke kadar olan bölgeler global eğilme bölgeleri olarak tanımlanabilir ve bu bölgelerde kompozitler elastik deformasyon sergilerler. HCl ve NaOH ortamlarına maruz bırakılan numunelerde bu bölgelerde rijitlikte belirgin bir azalma gözlenmiş ve aynı sehim değerlerinde daha düşük yük taşıma kapasiteleri tespit edilmiştir.

Maksimum yük noktalarından sonra tüm numunelerde ani yük düşüşleri meydana gelmiştir. Bu ani yük kayıplarının, öncelikli olarak tabakalar arası delaminasyon hasarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Delaminasyon, kompozit tabakaları arasındaki bağın zayıflaması sonucu oluşur ve yükün ani şekilde azalmasına neden olur. Eğrilere görülen ani yükseliş ve düşüşler ise yükün üst tabakalardan alt tabakalara aktarılması sırasında meydana gelen lif kırılmaları ve delaminasyonla ilişkilidir. Bu hasar mekanizmaları, kompozitlerin eğme dayanımını ve enerji yutma kapasitesini önemli ölçüde azaltmaktadır.

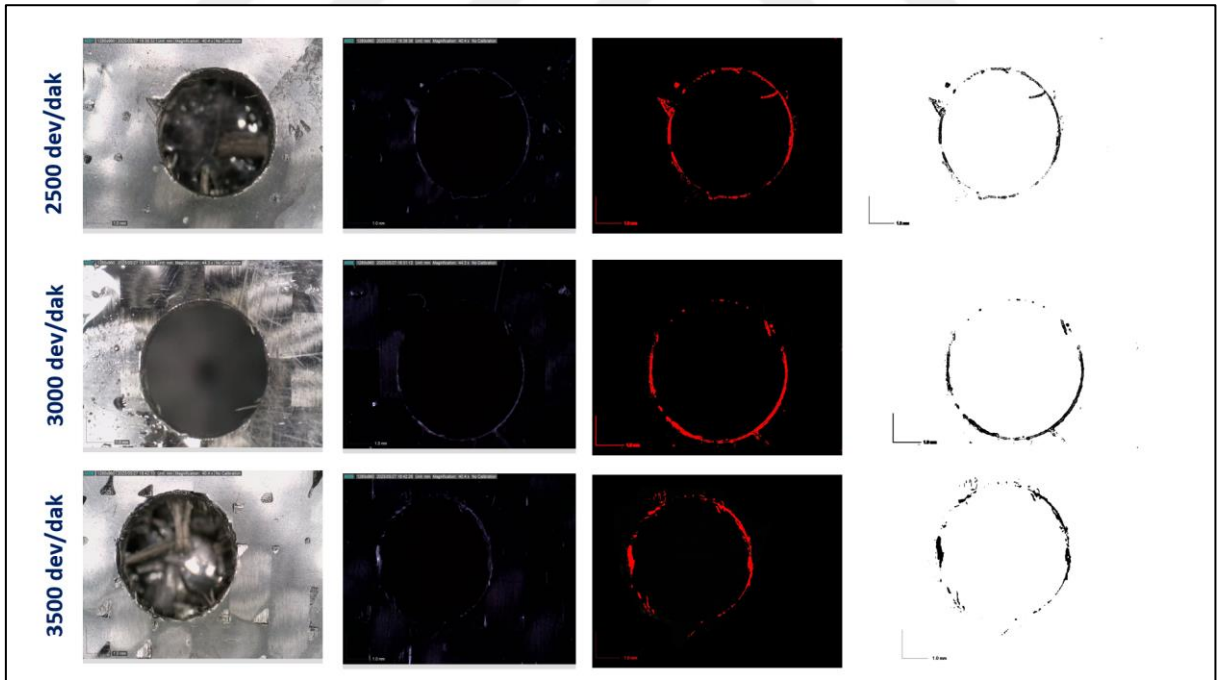
CNF ilavesi, karbon epoksi kompozitlerin eğme dayanımını önemli ölçüde artırmıştır. Epoksi matris içerisinde CNF nanoparçacıklarının homojen dağılması, elyaf-matris ara yüzünü güçlendirmiş, yük transferini iyileştirmiş ve mikro çatlakların ilerlemesini sınırlandırarak kompozitlerin eğilme rijitliğini artırmıştır.

7.3. Delme Deneyi Sonuçları

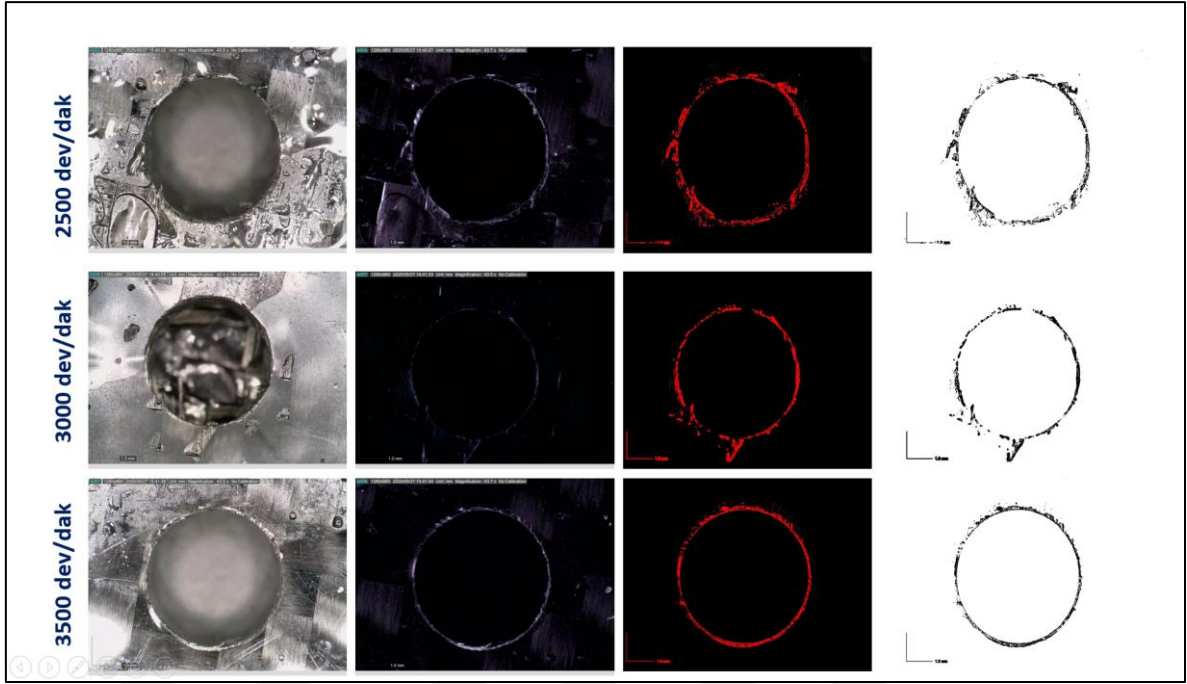
Asidik ve bazik ortamlara maruz bırakılmış ve bu ortamlara maruz bırakılmamış KEEK ve KNFTKEEK numunelerde delme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Delme işlemleri, 110 ve 550 mm/dak ilerleme hızlarında ve 2500, 3000 ve 3500 dev/dak iş mili devirlerinde yapılmıştır. Deliklere ait mikroskop ve eşikleme görüntüleri aşağıda sunulmuştur.



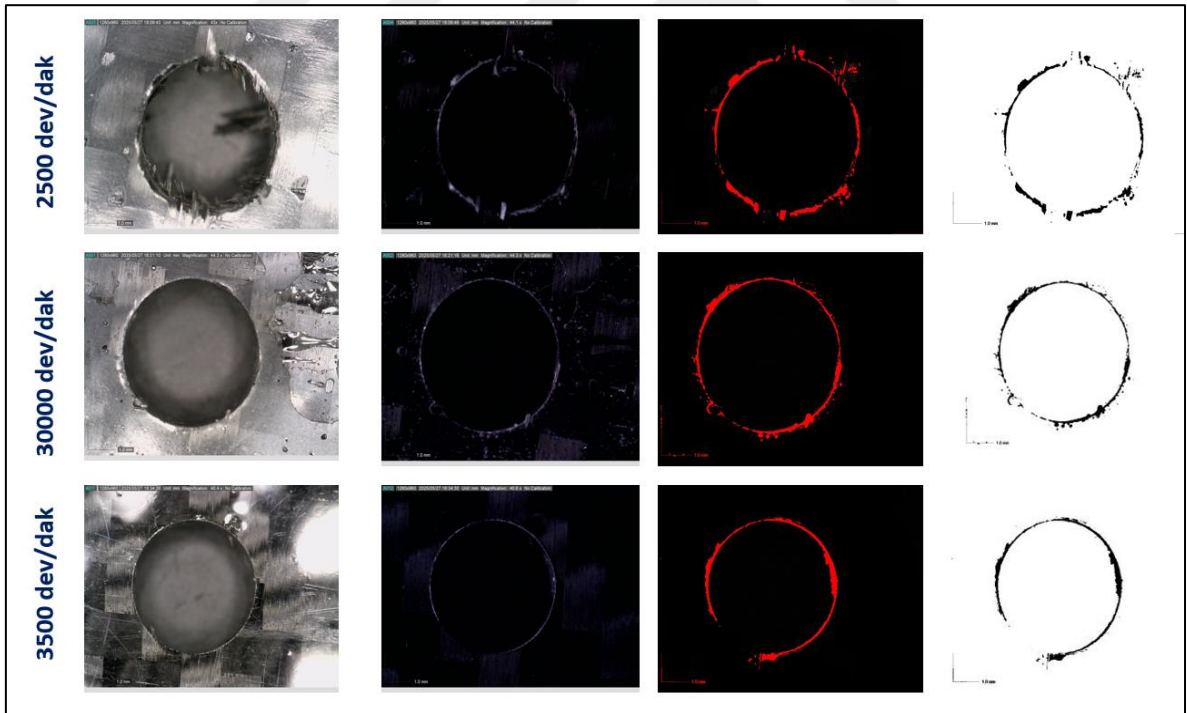
Şekil 7.9. Korozyonsuz KEEK numunenin 110 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri



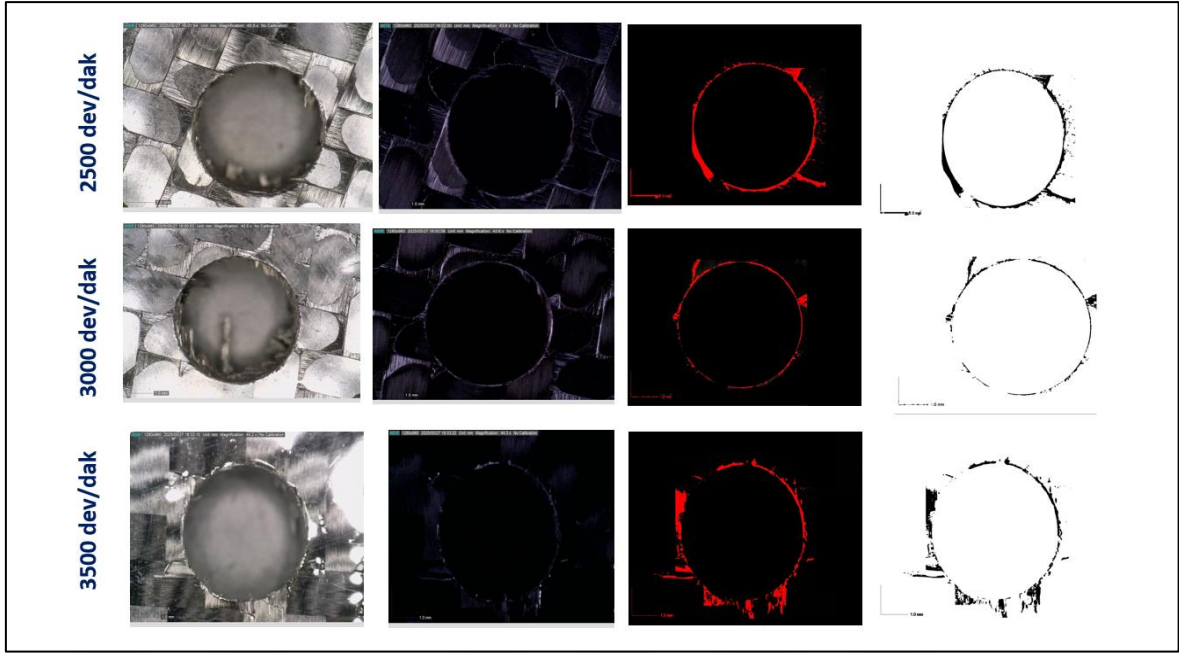
Şekil 7.10. Korozyonsuz KEEK numunenin 550 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri



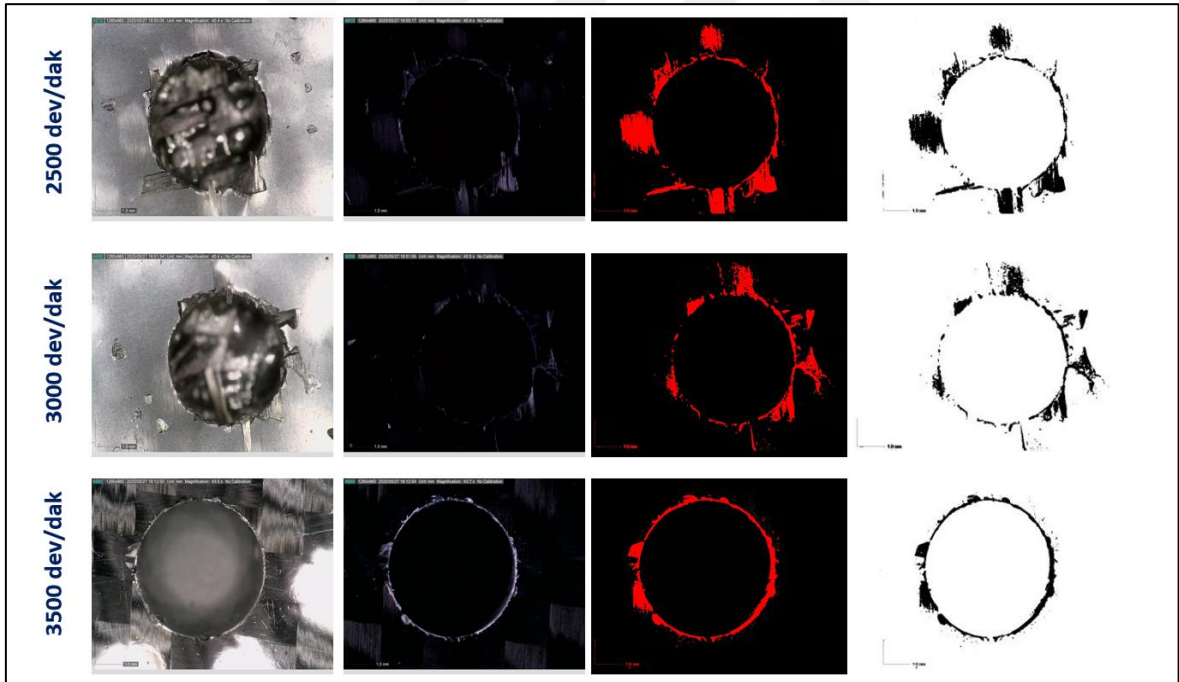
Şekil 7.11. HCl ortamına maruz kalmış KEEK numunenin 110 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri



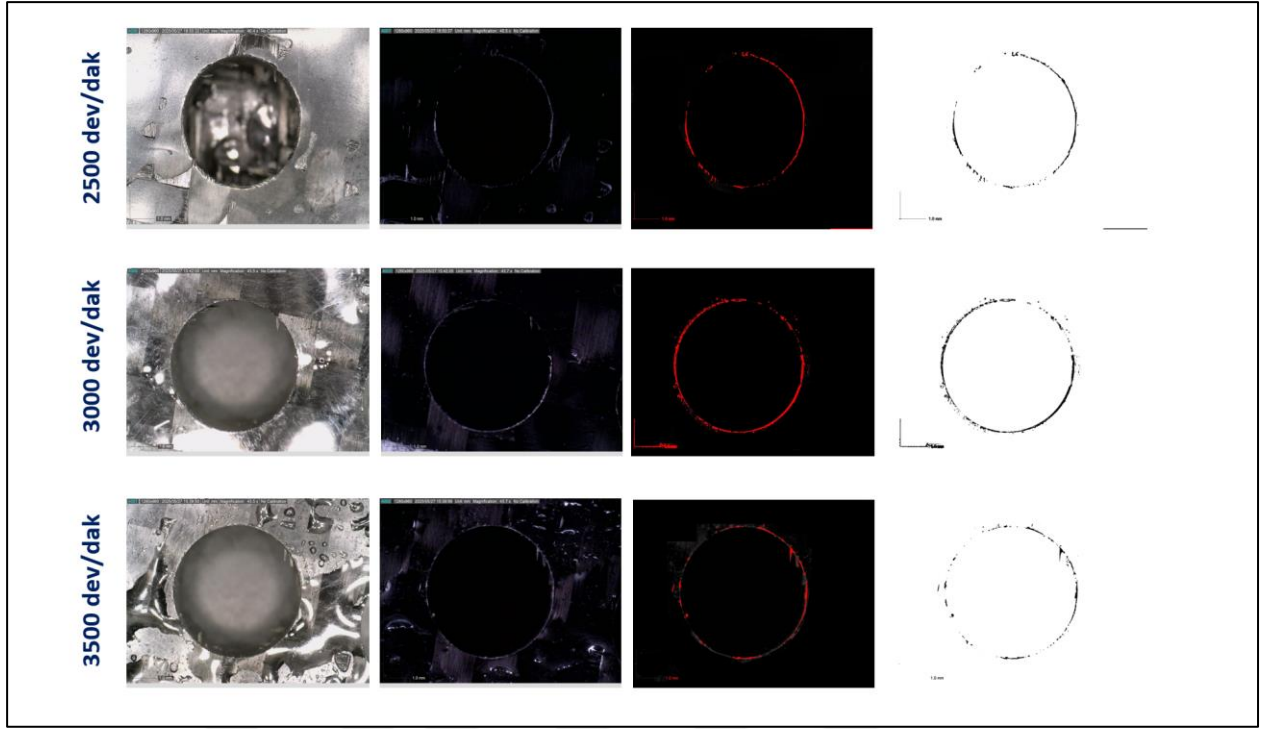
Şekil 7.12. HCl ortamına maruz kalmış KEEK numunenin 550 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri



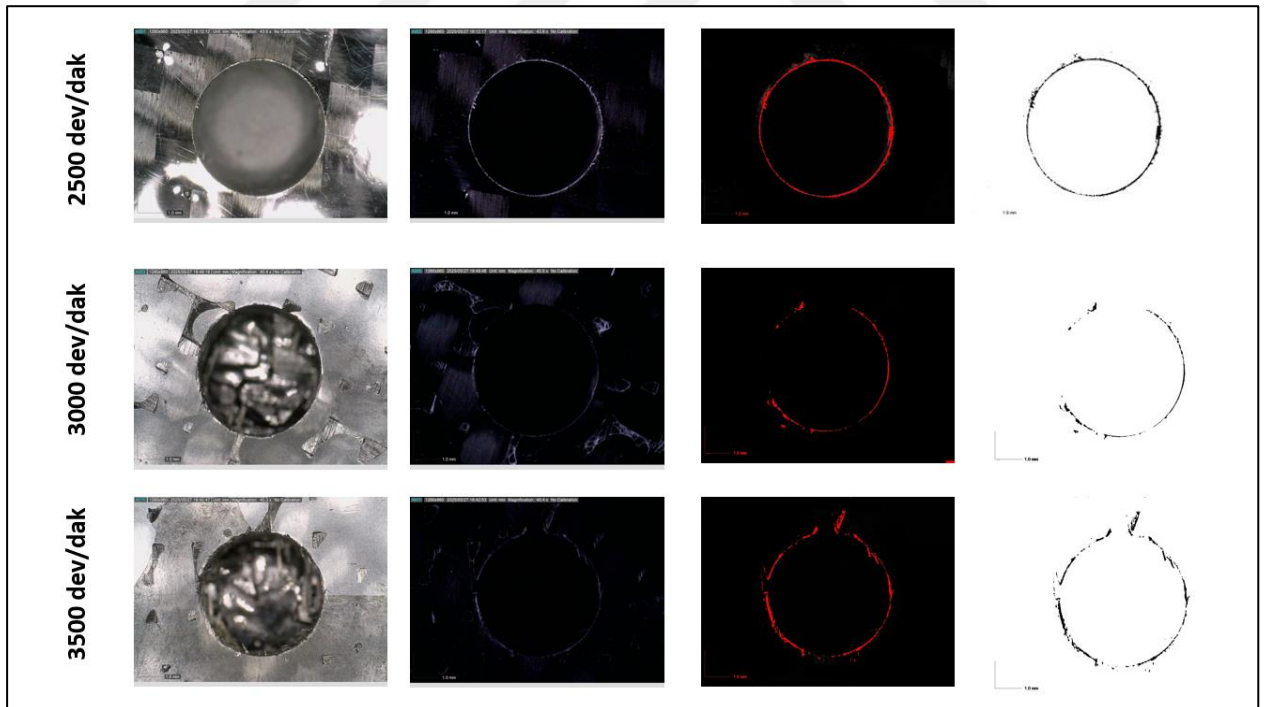
Şekil 7.13. NaOH ortamına maruz kalmış KEEK numunenin 110 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri



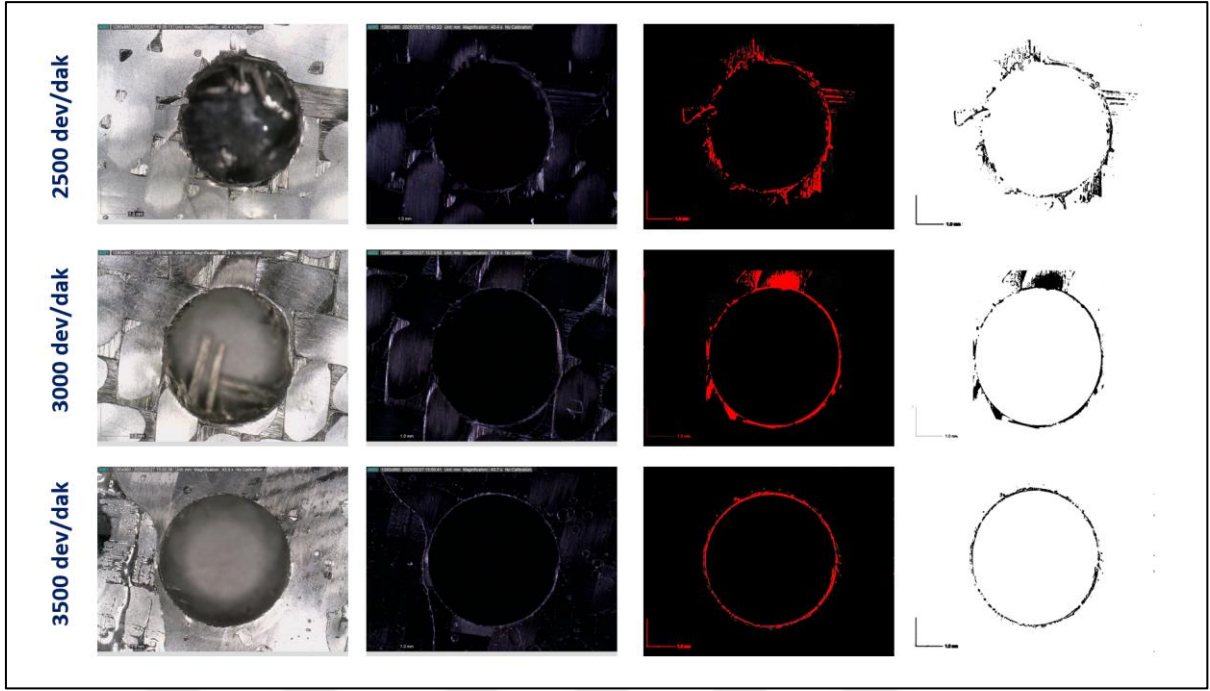
Şekil 7.14. NaOH ortamına maruz kalmış KEEK numunenin 550 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri



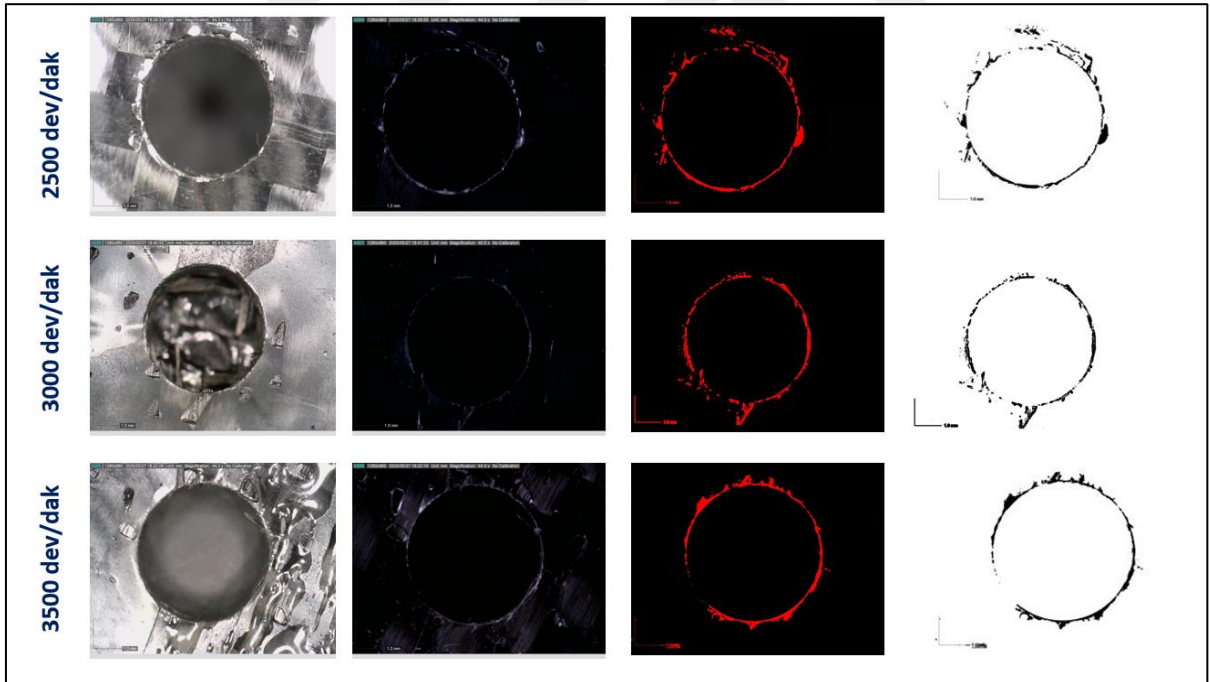
Şekil 7.15. Korozyonsuz KNTKEEK numunenin 110 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri



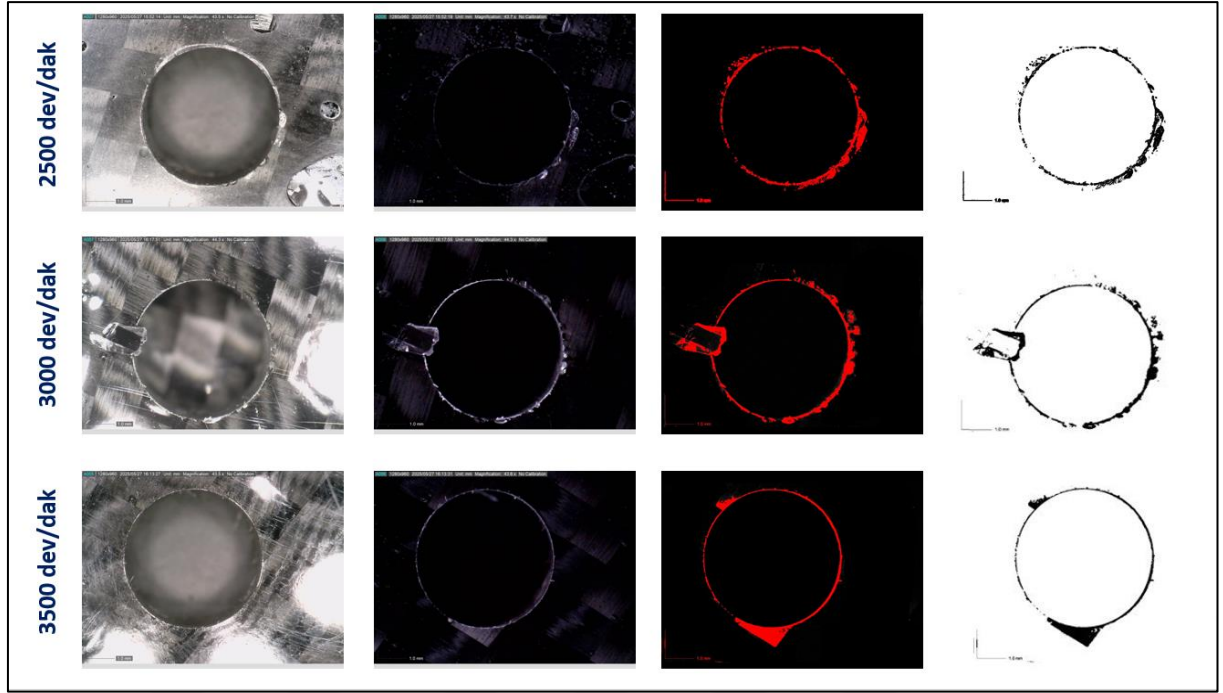
Şekil 7.16. Korozyonsuz KNTKEEK numunenin 550 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri



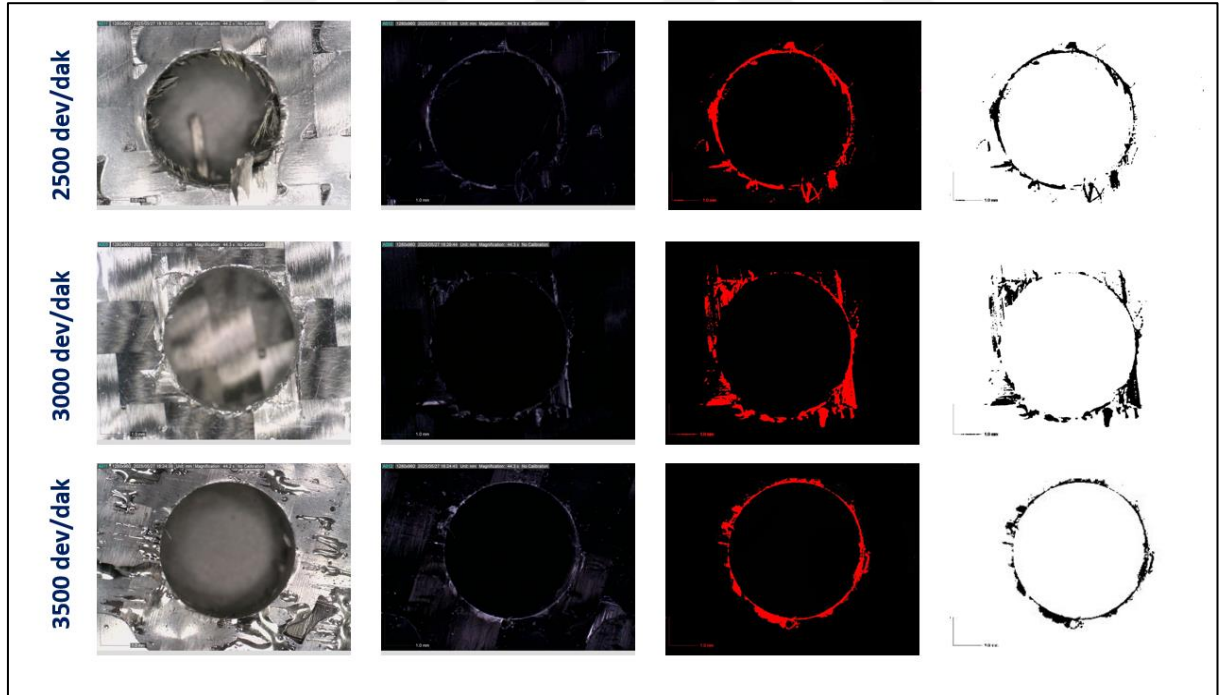
Şekil 7.17. HCl ortamına maruz kalmış KNFTKEEK numunenin 110 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri



Şekil 7.18. HCl ortamına maruz kalmış KNFTKEEK numunenin 550 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri



Şekil 7.19. NaOH ortamına maruz kalmış KNFTKEEK numunenin 110 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri



Şekil 7.20. NaOH ortamına maruz kalmış KNFTKEEK numunenin 550 mm/dak ilerleme hızında farklı devirlerde delinmesi sonucu elde edilen deliklerin görüntüleri

Delme işlemlerinde en yüksek itme kuvveti ve buna eşlik eden ani yük boşalması deliğin tamamen delindiği (delik çıkışı) anında meydana gelir. Bu durum, çıkış

yüzeyindeki çıkış yönlü delaminasyonu önemli ölçüde artırır. Çıkış tarafındaki delaminasyon, delik toleransını, bağlantı elemanının (cıvata/perçin) yük taşıma kapasitesini ve yorulma ömrünü doğrudan etkilediği için literatürde delaminasyon faktörleri çoğunlukla çıkış yüzeyinden hesaplanmaktadır (Cui vd., 2022).

Mikroskopi ve görüntü işleme sonuçları, korozyon ortamının ve kesme parametrelerinin delaminasyon hasarını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Görüntü işleme çıktılarında, kırmızıyla vurgulanan bölgeler delaminasyon alanlarını temsil etmektedir. Korozyona uğramamış numunelerde delaminasyon halkası daha düzgün ve kararlı bir geometridir. Ancak HCl'ye ve özellikle NaOH'a maruz bırakıldığında halka daha geniş, daha kesintili ve daha dağınık bir yapıya dönüşmüştür. Bu durum, asidik ortamlarda lif-matris bağının kademeli şekilde zayıflamasıyla açıklanabilir. Buna karşılık, bazik ortamlarda OH⁻ iyonları epoksi ağındaki eter bağlarını çözer ve ara yüz yapışması ile matris sürekliliğini daha agresif biçimde bozarak tabakaların itme kuvvetine karşı direncini düşürür. Sonuç olarak, çıkış delaminasyonunun arttığı gözlemlenmiştir.

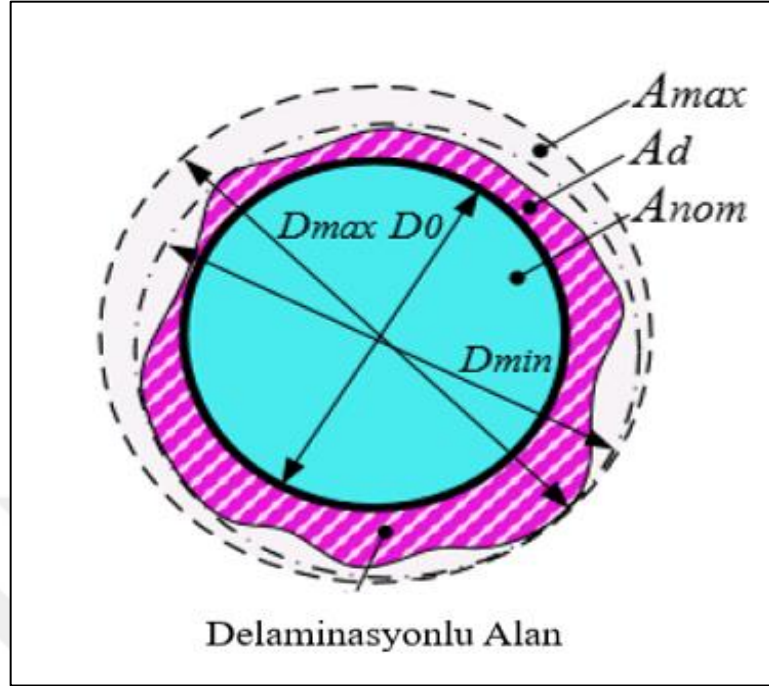
CNF ilaveli kompozitlerdeki delaminasyon alanları, eşdeğer koşullar altında takviyesiz numunelerdeki delaminasyon alanlarından daha küçük bulunmuştur. Bu iyileşme, matris içinde CNF'lerin çatlak saptırma/köprüleme etkilerine ve lif-matris ara yüzünün artan dayanımına bağlanmaktadır. Bu etki, koroziv olmayan ve HCl ortamlarında belirgin şekilde görülmekle birlikte, kimyasal çözünmenin şiddeti nedeniyle NaOH ortamlarında kısmen sınırlanmaktadır. CNF içeren numuneler daha sürekli ve kararlı delaminasyon alanları sergilerlerken, CNF içermeyen numunelerde yerel yoğunlaşmalar ve düzensiz kopmalar gözlemlenmiştir.

Eşikleme görüntülerinde iş mili devri ve ilerleme hızının etkileri açıkça görülmektedir. Delaminasyon 2500 dev/dak ve 550 mm/dak koşullarında belirgin şekilde artarken, devirin 3000 ve 3500 dev/dak değerlerine çıkarılması ve ilerleme hızının 110 mm/dak'a düşürülmesi kırmızı alanları önemli ölçüde azaltmıştır. Yüksek devir-düşük ilerleme hızı kombinasyonu itme kuvvetini azaltarak delaminasyonu sınırlamış, buna karşılık düşük devir-yüksek ilerleme hızı ani yük boşalmasını ve çıkış yüzeyindeki delaminasyonu artırmıştır. Delaminasyonun büyüklüğü, çıkış yüzeyinden alınan mikrografların görüntü işleme ile segmentasyonu sonrasında elde edilmiştir. Nominal delik alanı:

$$A_{nom} = \pi \left(\frac{D_0}{2} \right)^2 \quad (7.1)$$

Toplam alan:

$$A_{\max} = A_{\text{nom}} + A_d \quad (7.2)$$

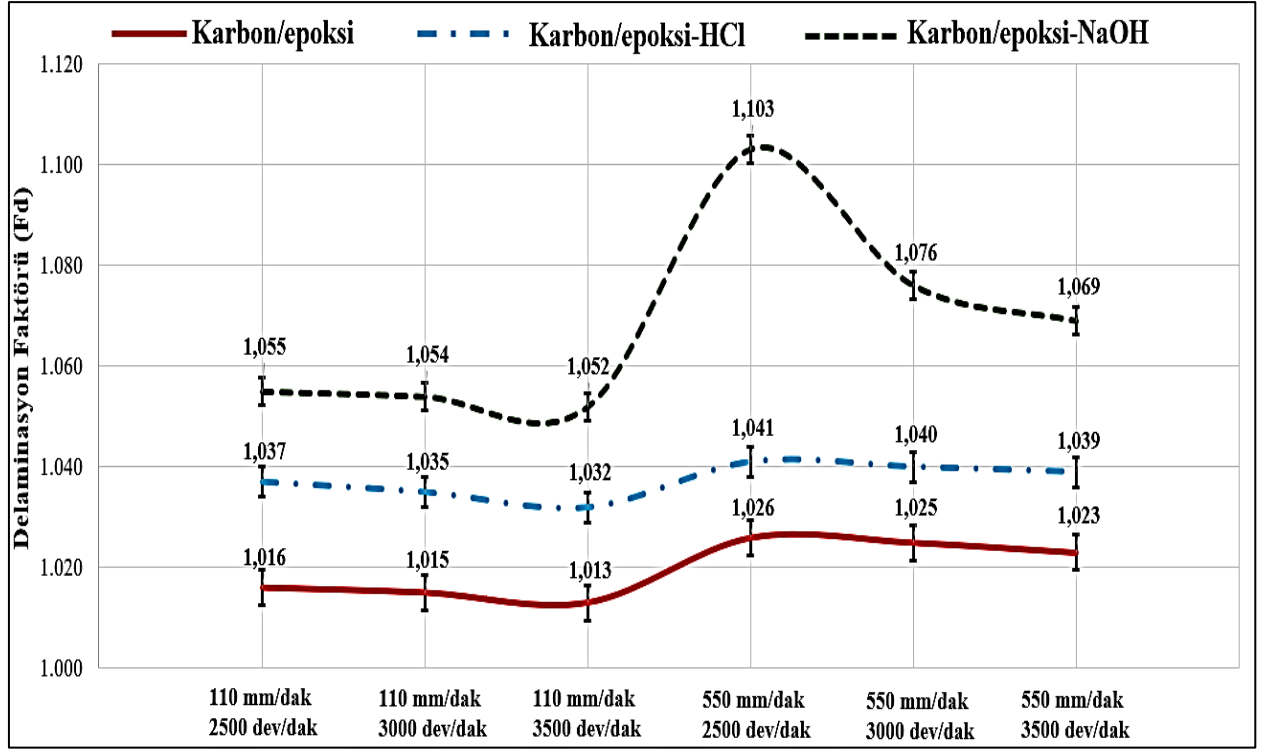


Şekil 7.21. Delaminasyon hasarının diyagramı (Geng vd., 2019)

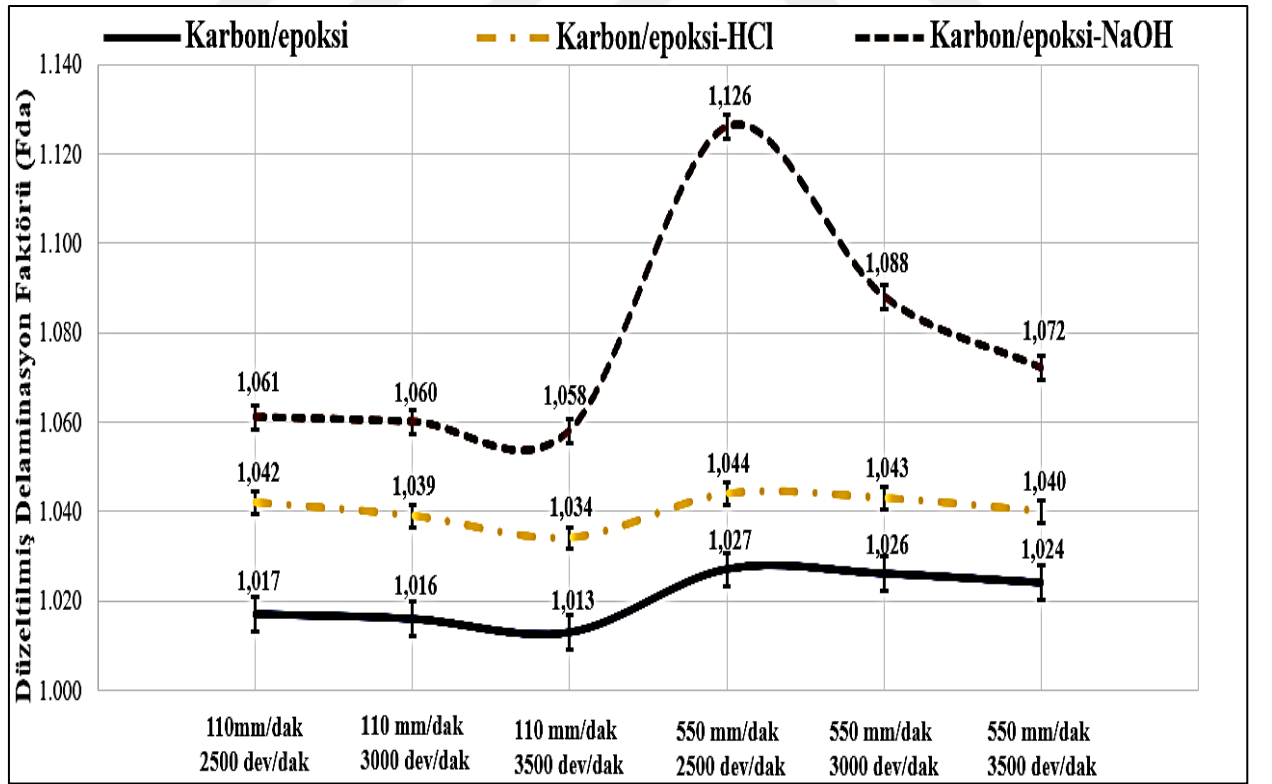
Delaminasyonun değerlendirilmesi için klasik delaminasyon faktörü ve düzeltilmiş delaminasyon faktörü aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$F_d = \sqrt{\frac{A_{\max}}{A_{\text{nom}}}}, F_{da} = F_d + \left(\frac{A_{\max} - A_{\text{nom}}}{A_{\text{nom}}} \right) \left(\frac{D_{\max} - D_0}{D_0} \right) \quad (7.3)$$

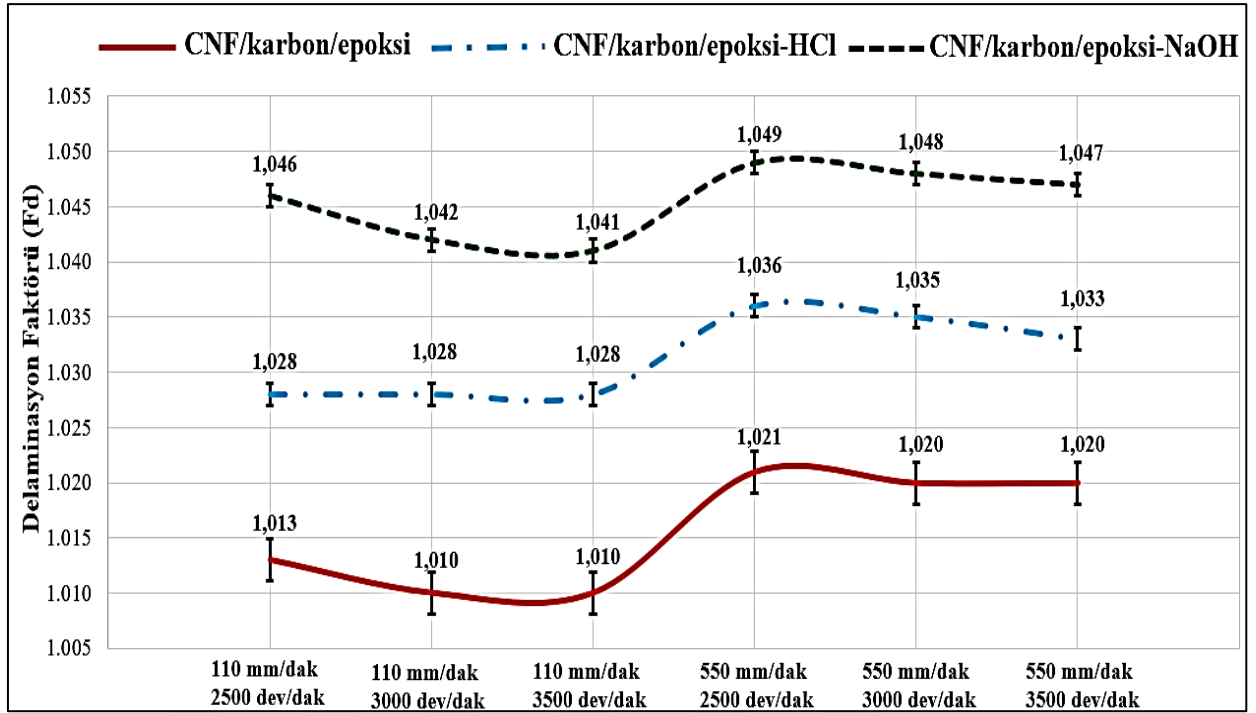
Ana kırmızı delaminasyon halkasına bağlı olmayan küçük parçalar, bileşen birleştirme (bond-component) ve morfolojik işlemler kullanılarak görüntüden çıkarılmıştır. Böylece metriklerin aşırı tahmin edilmesi önlenmiştir. KEEK ve KNFTKEEK numuneler için (F_d) ve (F_{da}) grafikleri Şekil 7.22, 7.23, 7.24 ve 7.25'te gösterilmektedir.



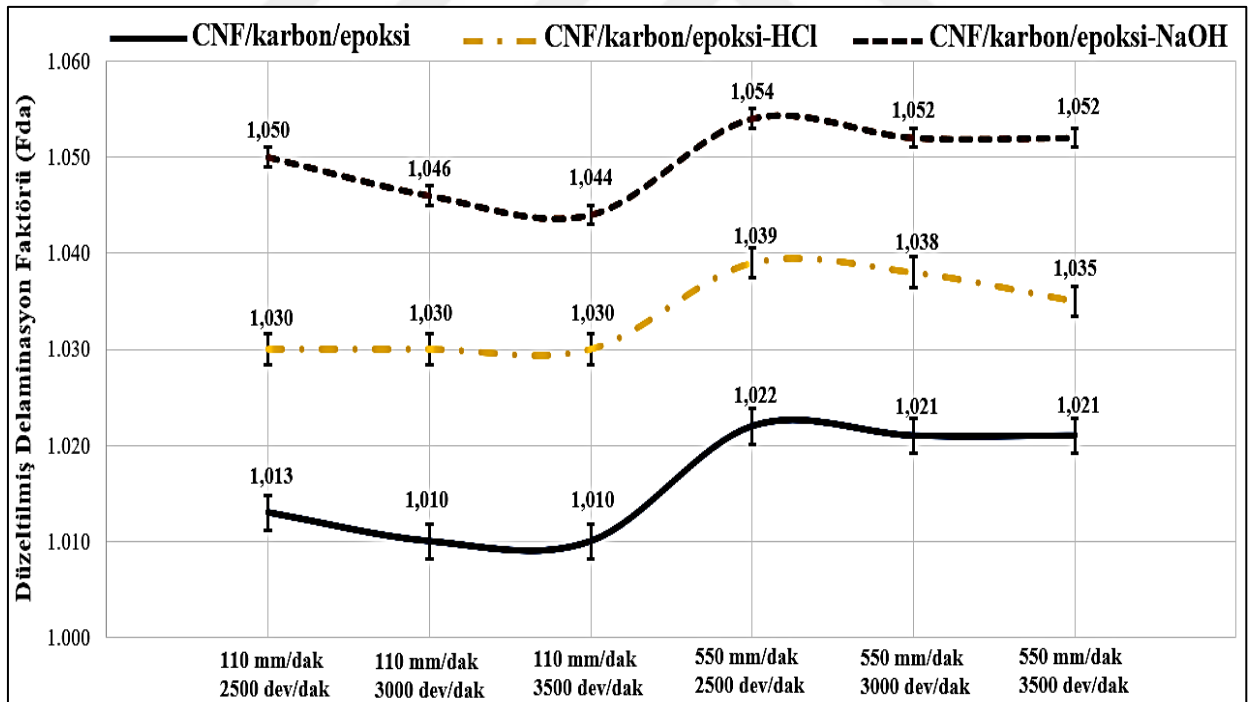
Şekil 7.22. KEEK numunelerin klasik delaminasyon faktörü değerleri



Şekil 7.23. KEEK numunelerin düzeltilmiş delaminasyon faktörü değerleri



Şekil 7.24. KNFTKEEK numunelerin klasik delaminasyon faktörü değerleri



Şekil 7.25. KNFTKEEK numunelerin düzeltilmiş delaminasyon faktörü değerleri

F_d ve F_{da} değerlerini gösteren eğriler incelendiğinde, korozif ortamların ve delme parametrelerinin F_d ve F_{da} değerlerini etkilediği görülmektedir. Ortam koşullarına göre değerlendirildiğinde, en düşük F_d ve F_{da} değerleri korozif olmayan ortamda, en yüksek

değerler ise NaOH korozyonuna maruz kalan ortamda görülmüştür. İlerleme hızı 110 mm/dak'dan 550 mm/dak'ya artırıldığında delaminasyon faktörleri yükselmiştir. Ancak devir sayısının artırılmasıyla delaminasyon faktörleri azalmıştır.

İlerleme hızı ve devir sayısı delaminasyonun temel belirleyicileridir. İlerleme hızı arttıkça devir başına ilerleme yükselir, buna bağlı olarak itme kuvveti artar ve çıkış tarafında oluşan delaminasyon büyür. Devir sayısı arttığında ise kesme hızı yükselir, itme kuvveti düşer ve delaminasyon azalır. Sonuç olarak, en olumsuz durumlar 2500 dev/dak-550 mm/dak'da, en uygun durumlar ise 3500 dev/dak-110 mm/dak'da gözlemlenmiştir. Bu eğilim, koroziyon olmayan, HCl ve NaOH ortamlarının tamamında tutarlıdır. CNF takviyesi, katmanlar arası dayanımı artırarak tüm ilerleme hızı-devir kombinasyonlarında F_d ve F_{da} değerlerini sistematik olarak düşürmekte ve parametre duyarlılığını azaltmaktadır.

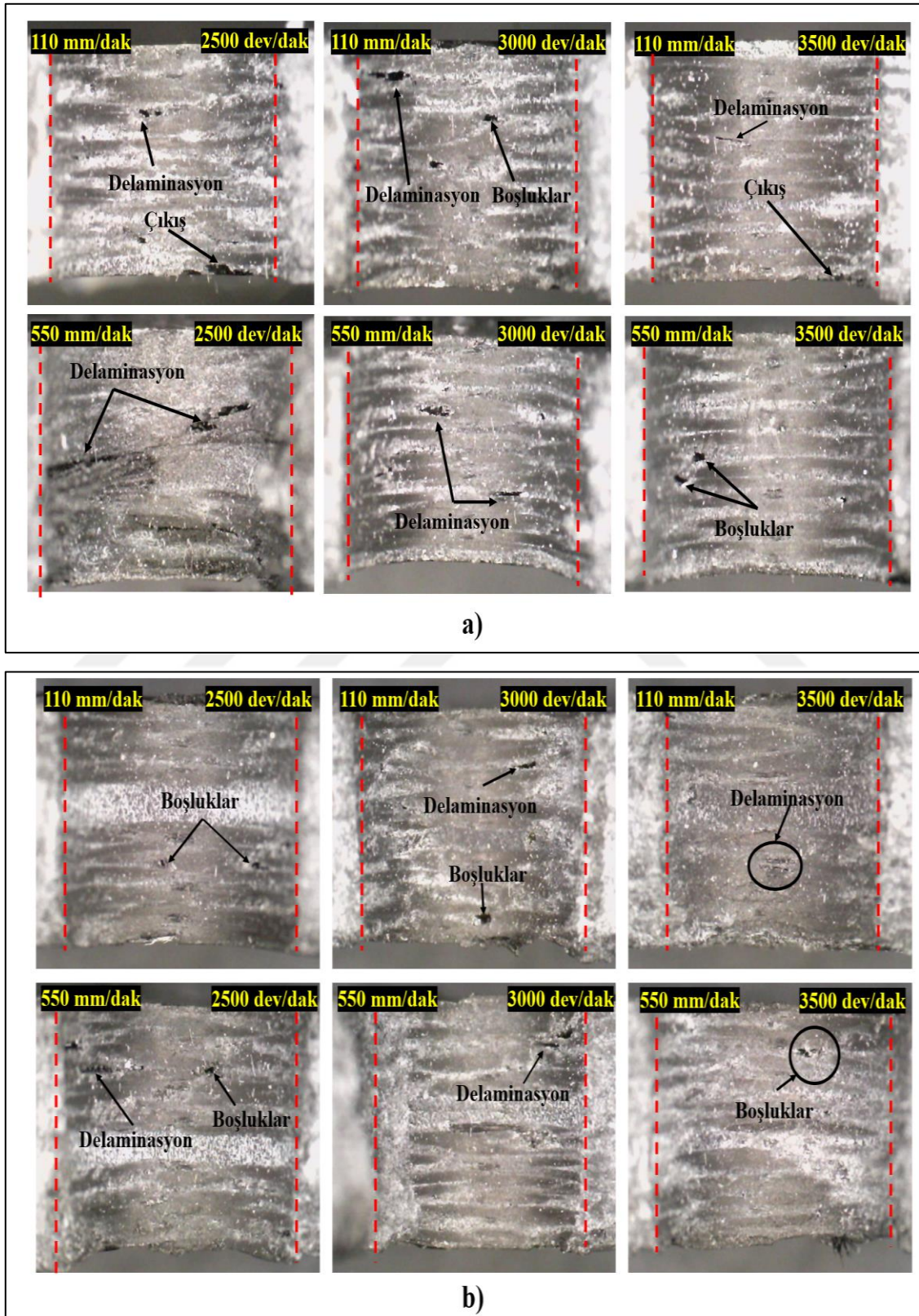
En yüksek F_d , yaklaşık 1,103 ve F_{da} yaklaşık 1,126 olarak NaOH ortamında, 550 mm/dak-2500 dev/dak koşulunda delinmiş KEEK numunesinde elde edilmiştir. Bu da düşük devir-yüksek ilerlemenin kırılma anındaki itme kuvvetini artırdığını ve çıkış tarafı delaminasyonunu büyüttüğünü açıkça göstermektedir. En düşük F_d ve F_{da} değerleri ise korozyona uğramamış KNFTKEEK numunesinde, 110 mm/dak-3000/3500 dev/dak koşulunda, yaklaşık 1,010 olarak belirlenmiştir.

KNFTKEEK numuneler, tüm ortamlarda, aynı koşullar altında KEEK numunelere kıyasla daha düşük F_d ve F_{da} değerleri üretmişlerdir. Bu durum, özellikle NaOH ortamına maruz kalmış, 550 mm/dak-2500 dev/dak'da delinmiş numunelerde daha belirgindir. 550 mm/dak-2500 dev/dak'da delinmiş KEEK numune için F_{da} yaklaşık 1,126 iken, aynı koşulda delinmiş KNFTKEEK numune için bu değer yaklaşık 1,054'e düşmüştür. Bu da 0,072'lik mutlak bir azalma ile %6-7'lik bir fark anlamına gelmektedir. HCl ortamına maruz kalmış numunelerde de CNF ilavesiyle birlikte F_d ve F_{da} değerlerinde düşüşler görülmektedir. Koroziyon ortama maruz bırakılmamış numunelerde F_d ve F_{da} değerleri genel olarak en düşük seviyededir.

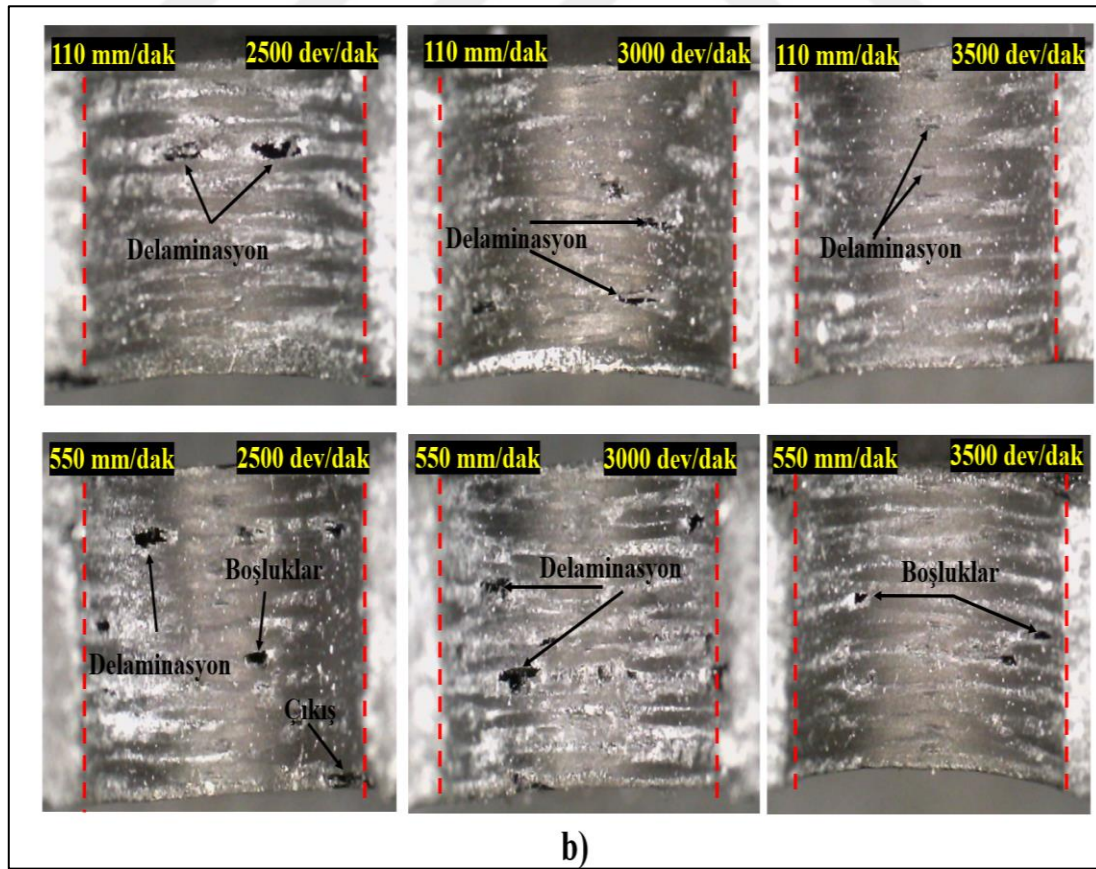
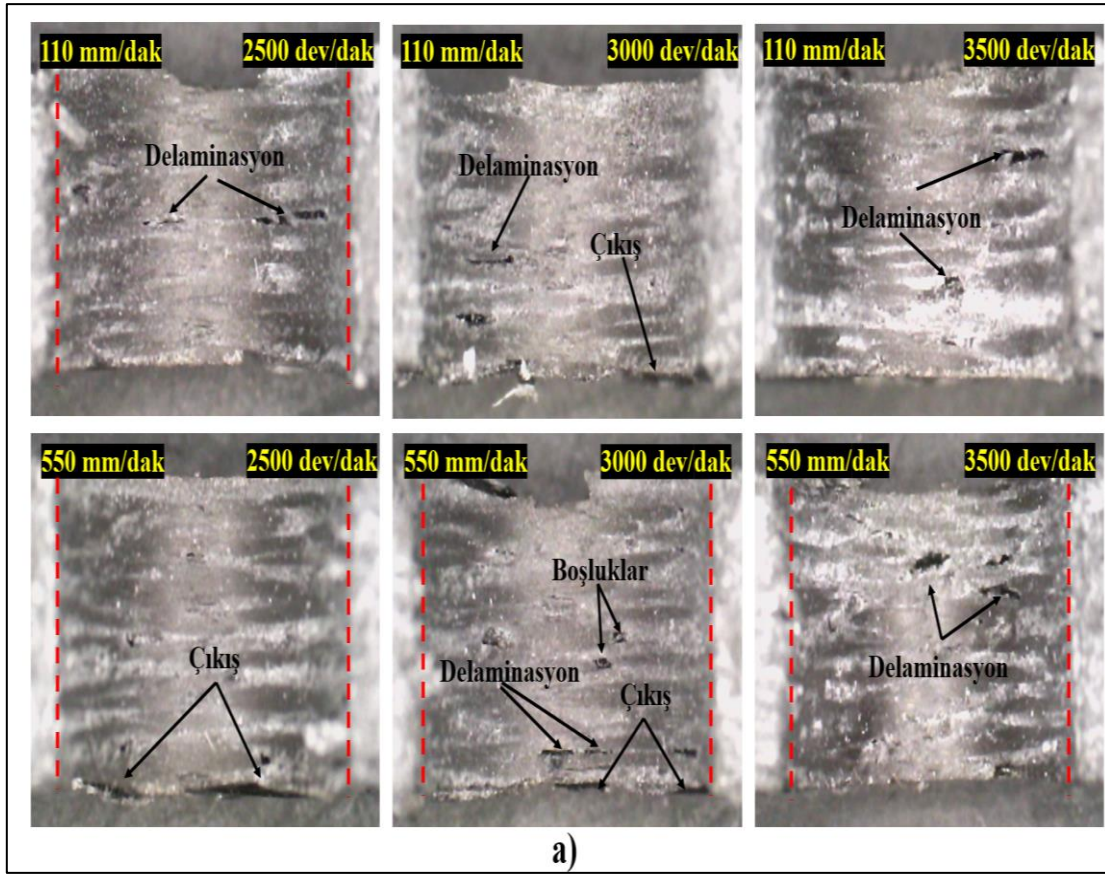
F_{da} değerlerinin sistematik olarak F_d 'den biraz daha yüksek olması, geometriye duyarlı düzeltilmiş metriğin çevresel bozulmayı ve düzensiz kenar morfolojisini yakalayabildiğini doğrulamaktadır.

7.4. Delik İçi Mikroskop Analizi

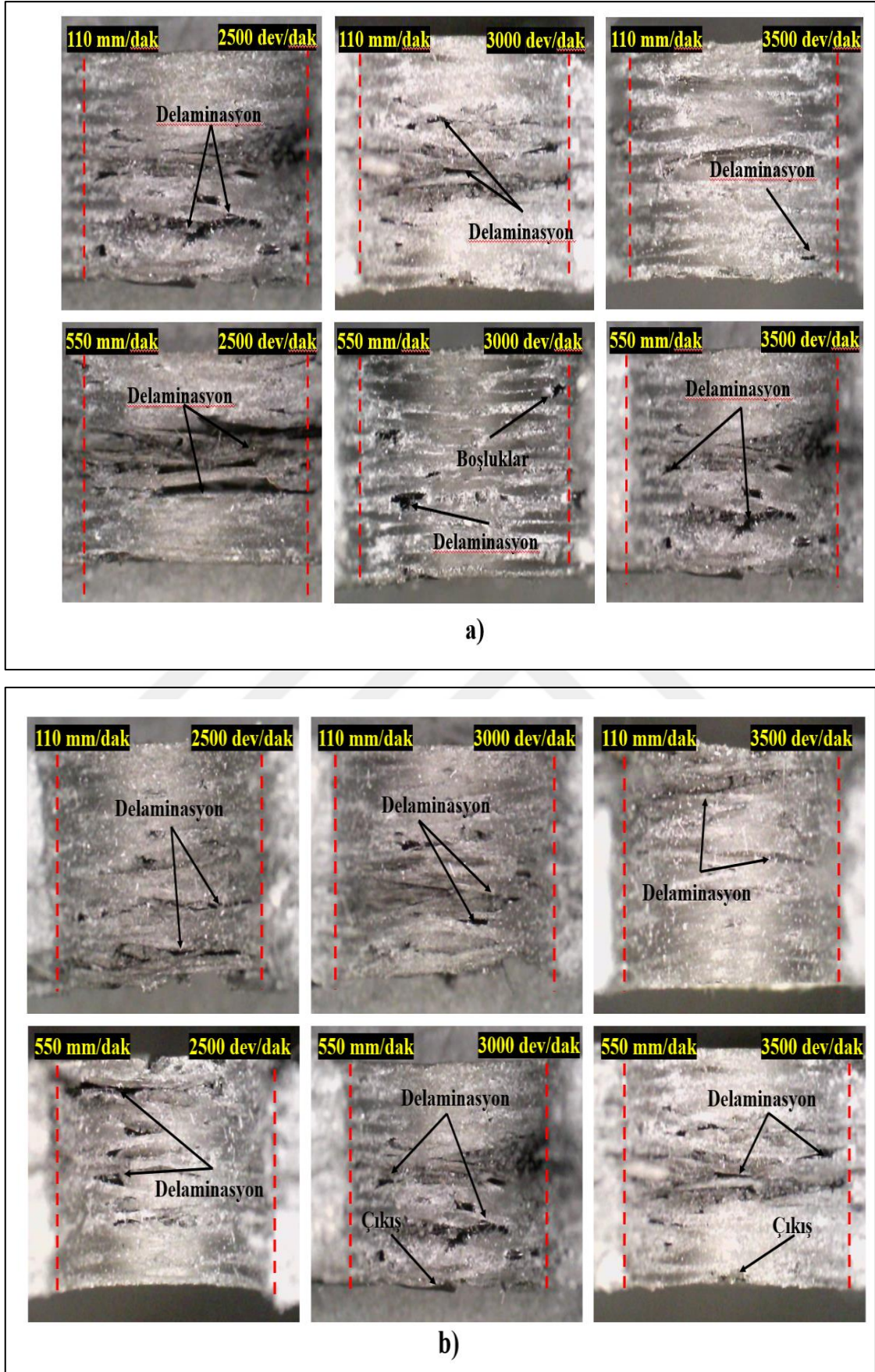
KEEK ve KNFTKEEK numunelere ait delinmiş deliklerin delik içi mikroskop görüntüleri aşağıda sunulmuştur.



Şekil 7.26. a)KEEK b) KNFTKEEK numunelerin korozyonsuz ortamdaki delik içi mikroskop görüntüleri



Şekil 7.27. a)KEEK b) KNFTKEEK numunelerin HCl ortamındaki delik içi mikroskop görüntüleri



Şekil 7.28. a)KEEK b) KNFTKEEK numunelerin NaOH ortamındaki delik içi mikroskop görüntüleri

Delik içi mikroskop görüntüleri, çevresel koşulların (HCl ve NaOH), ilerleme hızının ve iş mili devrinin hasar mekanizmalarını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuştur. Korozyonsuz ortamda, düşük ilerleme hızında (110 mm/dak) ve yüksek iş mili devrinde (3500 dev/dak) delaminasyon bantları kısalmış ve çıkış bölgesindeki çıkış kaynaklı hasar zayıflamıştır. Buna karşılık, ilerleme hızının 550 mm/dak seviyesine yükseltilmesi ve devirin 2500 dev/dak'da kalması, itme kuvvetini artırmış ve tabakalar arası ayrışmayı ve çıkış hasarını şiddetlendirmiştir. Aynı kesme parametreleri altında, ilerleme hızının artırılması ve devirin 2500 dev/dak olması ile birlikte CNF ilaveli kompozitlerde de hasar artırmıştır. Ancak CNF içermeyen kompozitlere kıyasla delaminasyon daha dar ve daha kısa bantlar hâlinde gerçekleşmiş ve belirli koşullarda sınırlı boşluklar gözlenmiştir. Bu durum, CNF içeren numunelerde hasar gelişiminin daha kararlı olduğunu göstermektedir.

Asidik ortama maruz kalma, her iki numunede de delaminasyon bantlarını uzatmış ve özellikle yüksek ilerleme hızlarında çıkış yönlü itme etkisiyle boşluk oluşumunu artırmıştır. HCl ortamında epoksinin kısmi ayrışması ve lif-matris ara yüzünün zayıflaması, tabakalar arası kayma dayanımını düşürerek itme kuvvetlerine karşı duyarlılığı artırmıştır. Ancak KNFTKEEK numunelerde, KEEK numunelere kıyasla hasar alanlarının belirli bölgelerde yoğunlaştığı, yani dağınık hasar gelişiminin sınırlı olduğu görülmüştür. 110 mm/dak-3000 dev/dak koşulunda, delaminasyonun kontrollü bir şekilde geliştiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, CNF takviyesinin HCl soğurulmasını azalttığını ve mikro çatlak ilerlemesini geciktirdiğini dolayısıyla delaminasyon şiddetini sınırlandırdığını göstermektedir.

Bazik NaOH ortamının, KEEK ve KNFTKEEK numuneler için en olumsuz koşul olduğu belirlenmiştir. Delaminasyon hasarı, KEEK numunelerde belirgin şekilde daha yüksek seviyede ortaya çıkmıştır. 550 mm/dak ilerleme hızında hem delaminasyonun hem de çıkış yönlü hasarın şiddeti ve oluşum sayısı artmıştır. Bu durum, bazik ortamın epoksi üzerindeki şişme ve çözündürme etkisinin tabakalar arası bağı daha da zayıflatmasına bağlanabilir.

KNFTKEEK numunelerde, delaminasyon hasarı şerit uzunlukları daha kısa olmuş ve 110 mm/dak-3000/3500 dev/dak durumlarında yüzey görünümü daha homojen bulunmuştur. Yüksek ilerleme hızı ve orta-yüksek devirlerde gözlenen çıkış hasarı dahi CNF takviyesi sayesinde daha küçük açı ve boyutlarda gerçekleşmiştir.

Korozyon hasarı, genellikle kompozitlerin yüzeylerinde başlamaktadır. Kompozitler korozyif sıvıları absorbsiyon yoluyla bünyelerine alırlar (Böer vd., 2013). Çatlak ilerlemesi çeşitli faktörlere ve yükleme koşullarına bağlıdır. Kompozitlerde düşük yük seviyelerinde oluşan hasar kimyasal reaksiyonlardan etkilenir. Daha yüksek yük durumlarında, hasarın ilerleme mekanizmasının, büyük ölçüde korozyif maddenin malzeme içine yayılma (difüzyon) süreci tarafından yönlendirildiği anlaşılmaktadır. Yük seviyeleri daha da arttığında ise çatlak büyümesi, gerilmenin etkisiyle hızlanan korozyon süreçleri tarafından kontrol edilen baskın bir karakter kazanır (Weitsman, 1995).

Kompozitlerde kimyasal ortam kaynaklı korozyon, öncelikle matriste ve lif-matris ara yüzeyinde hidroliz kaynaklı şişme ve zincir kopmaları yoluyla ilerler. Korozyif sıvının difüzyonu arttıkça ara yüzey zayıflar ve delaminasyon eşiği düşer (Sethi ve Ray, 2015). Asidik HCl epoksinin hidrolizini hızlandırarak mekanik özelliklerin azalmasına neden olurken, bazik NaOH genellikle matriste daha ciddi bozunmaya yol açar ve ara yüzey kayma dayanımını daha da azaltır. Ara yüzey dayanımının düşük olması, delinme sırasında itme kuvvetine karşı hassasiyeti artırır ve delaminasyon hasarının oluşması ve ilerlemesi için uygun bir ortam oluşturur.

CNF katkısı, korozyif ortamların etkilerini iki şekilde iyileştirir. Birincisi, kompozit içinde bir bariyer/çökelti etkisi oluşturarak korozyif sıvıların geçişini engeller veya CNF'ler sıvıların yayılması için uzun ve engelli bir yol oluşturur. İkincisi, CNF'ler çatlak saptırma ve köprüleme mekanizmaları sağlayarak malzemenin tokluğunu artırır. Çatlak saptırma, ilerleyen bir mikro çatlağın ara yüz boyunca yön değiştirmesi veya CNF nanoparçacığının etrafından dolanmasıyla gerçekleşir. Bu durumda çatlak yolu uzar, yeni bir yüzey alanı oluşur ve çatlak ilerleme enerjisi azalır (Belluci, 2022; Demirci ve Avcı, 2022; Demirci vd., 2021).

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Bu çalışma, HCl ve NaOH ortamlarına maruz bırakılan KEEK ve KNFTKEEK kompozit numunelerin çekme, üç nokta eğme ve delme davranışlarını karşılaştırmalı olarak ortaya koymuştur. Her iki ortam da mekanik performansı düşürmüş olsa da NaOH'nin etkisi HCl'ye kıyasla daha şiddetli olmuştur.

KEEK numunelerin çekme deneyleri sonucunda, çekme dayanımına bağlı olarak elde edilen maksimum kuvvet değerleri sırasıyla korozyonsuz numunede 41089,03 N, asit ortamına maruz kalmış numunede 39401,63 N, bazik ortama maruz kalmış numunede 34987,42 N olarak bulunmuştur.

KNFTKEEK numunelerin çekme deneyleri sonucunda, çekme dayanımına bağlı olarak elde edilen maksimum kuvvet değerleri ise sırasıyla korozyonsuz numunede 51931,83 N, asit ortamına maruz kalmış numunede 48490,65 N, baz ortamına maruz kalmış numunede 42697,19 N olarak elde edilmiştir. CNF ilavesi, aynı şartlarda yapılan deneyler kıyaslandığında, sırası ile korozyonsuz numunede %26,3, asit ortamına maruz kalmış numunede %23, baz ortamına maruz kalmış numunede %22 kuvvet artışı sağlamıştır.

KEEK numunelerin üç nokta eğme deneyleri sonucu oluşan kuvvet-sehim grafiğine göre, korozyonsuz numune için 858,19 N, asidik ortama maruz kalmış numune için 607,74 N, bazik ortama maruz kalmış numune için 556,81 N maksimum kuvvet değerleri elde edilmiştir. KNFTKEEK numunelerin üç nokta eğme deneyleri sonucu oluşan kuvvet-sehim grafiğine bakıldığında ise elde edilen kuvvetler sırasıyla korozyonsuz numune için 1177,51 N, HCl ortamına maruz kalmış numune için 986,06 N ve NaOH ortamına maruz kalmış numune için 935,84 N'dur. CNF ilavesi sayesinde, aynı ortam koşullarında yapılan deneyler kıyaslandığında, korozyonsuz numunede %37,2, HCl ortamına maruz kalmış numunede %62,2, NaOH ortamına maruz kalmış numunede %68 kuvvet artışı gerçekleşmiştir. Tüm korozyonlu ortamlarda rijitlik azalmış ve ani yük kayıpları ara katman delaminasyon hasarı ile açıklanmıştır. Korozyonlu ortamlarda eğri profillerinde belirgin yük düşüşleri ve enerji emme kapasitesinde azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma KEEK numunelerinde daha belirgin, KNFTKEEK numunelerinde ise daha sınırlı olmuştur.

Çekme ve üç nokta eğme deneyleri sonucunda, aynı ortam koşullarına maruz kalmış CNF takviyeli ve takviyesiz numunelerin kuvvet değerleri kıyaslandığında, takviyeli numunelerin tamamında takviyesizlere göre belirgin kuvvet artışları görülmüştür.

Delme parametreleri olarak 2500, 3000 ve 3500 dev/dak iş mili devirleri, 110 ve 550 mm/dak ilerleme hızları seçilmiştir. Delaminasyon metrikleri değerlendirildiğinde, en iyi performans 110 mm/dak-3500 dev/dak kombinasyonunda gözlenmiştir. En zayıf performans ise 550 mm/dak-2500 dev/dak kombinasyonunda görülmüştür.

Görüntü işleme ile elde edilen F_d ve F_{da} değerleri korozyonsuz ortamda en düşük, NaOH ortamında ise en yüksek değerlerde bulunmuştur. NaOH ortamına maruz kalmış KEEK numunesinde, 550 mm/dak-2500 dev/dak koşulunda maksimum delaminasyon faktörleri elde edilmiştir (F_d yaklaşık 1,103, F_{da} yaklaşık 1,126). KNFTKEEK numunelerde, tüm koşullar altında daha düşük F_d ve F_{da} değerleri bulunmuştur. Bu bulgular, CNF ilavesinin delme parametrelerine duyarlılığı azalttığını göstermektedir.

Korozyonlu ortamlarda, HCl ve NaOH delik çıkışındaki çıkış delaminasyonunu genişletmiş ve delaminasyon halkasının şekli HCl'de ve özellikle NaOH'da daha düzensiz ve dağınık hale gelmiştir. Bu durum, matris içindeki kimyasal reaksiyonlar nedeniyle ara yüzeyin zayıflaması ve bozulmasından kaynaklanmaktadır.

Delik içi mikroskop görüntülerine göre, korozif ortamların, ilerleme hızının ve iş mili devrinin hasar mekanizmalarını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Korozyonsuz ortamda, düşük ilerleme hızında (110 mm/dak) ve yüksek iş mili devrinde (3500 dev/dak) delaminasyon bantları kısalmış ve çıkış bölgesindeki çıkış kaynaklı hasar zayıflamıştır. Ayrıca KNFTKEEK numunelerde, KEEK numunelere kıyasla delaminasyon daha dar ve daha kısa bantlar hâlinde gerçekleşmiş ve belirli koşullarda sınırlı boşluklar gözlemlenmiştir. Bu durum, CNF içeren numunelerde hasar gelişiminin daha kararlı olduğunu göstermektedir.

8.2. Öneriler

Bu çalışma, CNF ilavesinin ve korozif ortamların karbon elyaf epoksi kompozitler üzerindeki etkilerini araştırması bakımından literatürde önemli bir yer teşkil edecek ve bu alandaki eksikliklerin tamamlanmasına katkı sunacaktır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, yine CNF kullanılarak, farklı korozif ortamların (deniz suyu gibi) CNF katkılı kompozitler üzerine etkileri araştırılabilir.

Ayrıca korozif ortamlara maruziyet süreleri artırıp azaltılarak, bu ortamların etkilerinin zamana bağlı nasıl değişeceği belirlenebilir. CNF katkısının, delik delme dışındaki diğer talaşlı işleme proseslerine etkisinin araştırılması da kayda değer bir çalışma olacaktır.

Kompozitlerde, korozif ortamlara maruziyetin işlenebilirlik üzerine etkileri üzerine yapılmış çalışmaların yetersizliği nedeniyle, delme işlemi ile birlikte farklı işleme yöntemlerine korozif ortamların etkileri üzerine yapılacak çalışmalar, özellikle havacılık gibi önemli sektörler için rehber niteliğinde olacaktır.



KAYNAKLAR

- Acedera, R.A. (2025, Nisan 7). How does graphitization affect the structure and properties of carbon fiber papers? <https://blog.capling.com/how-does-graphitization-affect-the-structure-and-properties-of-carbon-fiber-papers> 4869/
- Almuramady, N.S.T. (2007). *Mechanical properties of composites using natural rubber with epoxy resin* [MSc dissertation]. Al-Nahrain University.
- Alovsat, T.Y. (2024). Classification and properties of composites based on matrix material. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 24(02), 2278–2282. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.24.2.3608>
- Al-Mutairi, N.H., Mehdi, A.H., ve Kadhim, B.J. (2022). Nanocomposites materials definitions, types and some of their applications: A review. *European Journal of Research Development and Sustainability*, 3(2), 102-108.
- Al-wandi, S., Ding, S., ve Mo, J. (2017). An approach to evaluate delamination factor when drilling carbon fiber-reinforced plastics using different drill geometries: experiment and finite element study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93, 4043–4061. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0880-2>
- Ameur, M.F., Habak, M., Kenane M., Aouici H., ve Cheikh M. (2017). Machinability analysis of dry drilling of carbon/epoxy composites: Cases of exit delamination and cylindricity error. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88, 2557-2571. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8967-8>
- Anonymous. (2025, Mayıs 23). Solid carbide jobber drill, TiN, ø DC h7: 5mm. <https://www.hoffmann-group.com/GB/en/houk/p/122301-5?wayIntoCart=VLP&triggerSelectItemEvent=1#description>
- Anonymous. (2025, Haziran 2). Data acquisition system. <https://www.geeksforgeeks.org/electronics-engineering/data-acquisition-system/>
- Arabacılar, Z. (2021). *Kuş tüyü materyalinden biyokompozit yapıların geliştirilmesi*, [Yüksek Lisans Tezi]. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Asrafuzzaman, K.F.A., ve Hoque M.E. (2021). Introduction to fiber reinforced polymers. C.I. Pruncu, S. Gürgen, ve M.E. Hoque (Ed.), *Fiber-reinforced polymers: Processes and applications* (s. 1-43). Nova Science Publishers.
- Babooram, K. (2020). Brief overview of polymer science. R. Narain (Ed.), *Polymer science and nanotechnology* (s. 3-12). Elsevier.
- Babu, J., Philip, J., Zacharia, T., ve Davim, J.P. (2015). Delamination in composite materials: Measurement, assessment and prediction. J.P. Davim (Ed.), *Machinability of fibre-reinforced plastics* (s. 139-162). De Gruyter.

- Bal, S. (2010). Experimental study of mechanical and electrical properties of carbon nanofiber/epoxy composites. *Materials and Design*, 31(5), 2406-2413. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.11.058>
- Baraheni, M., ve Amini, S. (2024). Influence of machining condition and nano-graphene incorporation on drilling load and hole quality in both conventional drilling and ultrasonic-assisted drilling of CFRP. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49, 14593-14606. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-08758-4>
- Baraheni, M., Soudmand, B.H., Amini, S., Bayat, M., ve Ebrahimi, A. (2025). Burr constitution analysis in ultrasonic-assisted drilling of CFRP/ nano-graphene via experimental and data-driven methodologies. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 44(11-12), 602–619. <https://doi.org/10.1177/07316844231225593>
- Bello, S.A., Agunsoye, J.O., Hassan, S.B., Kana, M.G.Z., ve Raheem, I.A. (2015). Epoxy resin based composites, mechanical and tribological properties: A review. *Tribology in Industry*, 37.
- Bellucci, S. (2022). Study of graphene epoxy/nanoplatelets thin films subjected to aging in corrosive environments. *Journal of Composites Science*, 6(2), (39). <https://doi.org/10.3390/jcs6020039>
- Beşergil, B. (2024, Kasım 12). Polimer matris kompozitler, PMC (polymer matrix composites, PMC). https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/4_7.html
- Bi, G., Wang, X., Shi, Y., Zhang, C., ve Zhao, X. (2025). Numerical investigation of the impact of processing conditions on burr formation in carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) drilling with multiscale modeling. *Materials*, 18(6), 1244. <https://doi.org/10.3390/ma18061244>
- Bi, Z.M., Hinds, B., Jin, Y., Gibson, R., ve McToal, P. (2009). Studies on composites drilling-The state of the art. J.P. Davim (Ed.), *Drilling of composite materials* (s. 137-172). Nova Science Publishers.
- Böer, P., Holliday, L., ve Kang, T.H.K. (2013). Independent environmental effects on durability of fiber-reinforced polymer wraps in civil applications: A review. *Construction and Building Materials*, 48, 360-370. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.077>
- Burton, D., Lake, P., ve Palmer, A. (2025, Mayıs 9). Carbon nanofiber applications & properties. https://www.sigmaaldrich.com/TR/en/technical-documents/technical-article/materials-science-and-engineering/batteries-supercapacitors-and-fuel-cells/carbon-nanofibers?srsId=AfmBOOpAt95tSYJ5uIv4R5ITNJt_F7QJTDg3hPhRGkzYBlii3wF0ytA3
- Caggiano, A., Angelone, R., ve Teti, R. (2017). Image analysis for CFRP drilled hole quality assessment. Elsevier, 62, 440-445. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.045>

- Caggiano, A. (2018). Machining of fibre reinforced plastic composite materials. *Materials*, 11(3), 442. <https://doi.org/10.3390/ma11030442>
- Campbell, F.C. (2010). *Structural composite materials*. ASM International.
- Caprino, G., ve Langella, A. (2012). Analysing cutting forces in machining processes for polymer-based composites. H. Hocheng (Ed.), *Machining technology for composite materials* (s. 75-115). Woodhead Publishing Limited.
- Chandramohan, D., ve Marimuthu, K. (2011). A review on natural fibers. *IJRRAS*, 8(2), 194-206.
- Chandran, P.S., Kumar, N.S., Narayanan, P., Pratheepan, P.C., Reghunath, R., ve Pilla, U.T.G. (2023). Effects of graphene oxide nanoparticles on delamination in CFRP and optimization using response surface modeling. *Macromolecular Symposia*, 412, 2200168. <https://doi.org/10.1002/masy.202200168>
- Che, D., Saxena, I., Han, P., Guo, P., ve Ehmann, K.F. (2014). Machining of carbon fiber reinforced plastics/polymers: A literature review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(3), 034001. <https://doi.org/10.1115/1.4026526>
- Chen, Q., Xia, Y., Yu, J., Zhang, T., Liu, B., ve Dai, Y. (2024). Property changes of chopped glass fiber-reinforced sheet molding compound composite in acid-base environment. *International Journal of Polymer Science*, 2024, 1496632. <https://doi.org/10.1155/2024/1496632>
- Choi, Y., Sugimoto, K., Song, S., Gotoh, Y., Ohkoshi, Y., ve Endo, M. (2005). Mechanical and physical properties of epoxy composites reinforced by vapor grown carbon nanofibers. *Elsevier*, 43(10), 2199-2208. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.03.036>
- Cui, J., Liu, W., Zhang, Y., Han, L., Yin, P., Li, Y., Zhou, M., ve Wang, P. (2022). A visual inspection method for delamination extraction and quantification of carbon fiber reinforced plastic (CFRP). *Measurement*, 196, 111252. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111252>
- Demirci, İ., Avcı, A., ve Demirci, M.T. (2021). Investigation of nano-hybridization effects on low velocity impact behaviors of basalt fiber reinforced composites. *Journal of Composite Materials*, 55(3), 401-414. <https://doi.org/10.1177/0021998320949640>
- Demirci, İ., ve Avcı, A. (2022). Effects of seawater corrosion environment on the impact behavior of multi-walled carbon nanotube and SiO₂ reinforced basalt/epoxy hybrid nanocomposites. *Journal of Composite Materials*, 56(4), 627-643. <https://doi.org/10.1177/00219983211060466>
- Desai, B., Kushwaha, U., ve Jha, S. (2020). Image filtering-techniques, algorithm and applications. *Gis Science Journal*, 7(11), 970-975.

- Devvanshi, N., Yadav, A., Yadav, A., Singh, A., ve Mishra, S. (2024). A review: polymer and their need. *Journal of Xidian University*, 18(6), 1191-1222. <https://doi.org/10.5281/Zenodo.12527672>
- Feito, N., Díaz-Álvarez, J., López-Puente, J., ve Miguelez, M.H. (2018). Experimental and numerical analysis of step drill bit performance when drilling woven CFRPs. *Composite Structures*, 184, 1147-1155. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.10.061>
- Feng, L., Xie, N., ve Zhong, J. (2014). Carbon nanofibers and their composites: A review of synthesizing, properties and applications. *Materials*, 7(5), 3919-3945. <https://doi.org/10.3390/ma7053919>
- Fiore, V., ve Valenza, A. (2013). Epoxy resins as a matrix material in advanced fiber-reinforced polymer (FRP) composites. J. Bai (Ed.), *Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications* (s. 88-121). Woodhead Publishing Limited.
- Gaitonde, V.N., Karnik, S.R., Rubio, J.C., Correia, A.E., Abrão, A.M., ve Davim, J.P. (2008). Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 203(1-3), 431-438. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.050>
- Gautam, R.K., ve Verma, A. (2019). Electrocatalyst materials for oxygen reduction reaction in microbial fuel cell. S.V. Mohan, S. Varjani, ve A. Pandey (Ed.), *Microbial electrochemical technology* (s. 451-483). Elsevier.
- Geier, N., Davim, J.P., ve Szalay, T. (2019). Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review. *Composites Part A*, 125, 105552. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105552> [Get rights and content](#)
- Geier, N., Póka, G., Jacsó, Á., ve Csongor, P. (2022). A method to predict drilling-induced burr occurrence in chopped carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites based on digital image processing. *Composites Part B*, 242, 110054. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110054>
- Geng, D., Liu, Y., Shao, Z., Lu, Z., Cai, J., Li, X., Jiang, X., ve Zhang, D. (2019). Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review. *Composite Structures*, 216, 168-186. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.099>
- Ghori, S.W., ve Tirth, V. (2021). Manufacturing methods of fiber reinforced polymers. C.I. Pruncu, S. Gürgen, ve M.E. Hoque (Ed.), *Fiber-reinforced polymers: Processes and applications* (s. 237-255). Nova Science Publishers.
- Gundloori, R., Singam, A., ve Killi, N. (2019). Nanobased intravenous and transdermal drug delivery systems. S.S. Mohapatra, S. Ranjan, N. Dasgupta, R.K. Mishra, ve S. Thomas (Ed.), *Applications of targeted nano drugs and delivery systems* (s. 551-594). Elsevier.

- Gürbüz, M. (2025, Haziran 5). Kompozit malzemeler ve mekanik özellikleri. <https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/mgurbuz/126307/HAFTA%207.pdf>
- Haeger, A., Meinhard, D., Lissek, F., Kaufeld, M., Hoffman, M.J., Schneider, G., ve Knoblauch, V. (2016). Interaction between laminate quality, drilling-induced delamination and mechanical properties in machining of carbon fibre reinforced plastic (CFRP). *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, 47(11), 997-1014. <https://doi.org/10.1002/mawe.201600626>
- Hasan, Z. (2020). *Tooling for composite aerospace structures*. Butterworth-Heinemann.
- Hintze, W., Clausen, R., Schütte, C., ve Kroll, K. (2018). Evaluation of the total cutting force in drilling of CFRP: A novel experimental method for the analysis of the cutting mechanism. *Production Engineering*, 12, 431-440. <https://doi.org/10.1007/s11740-018-0807-2>
- Iliescu, D., Gehin, D., Gutierrez, M.E., ve Girot, F. (2010). Modeling and tool wear in drilling of CFRP. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 50, 204-213. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.10.004>
- Jagedeesh, P., Rangappa, S.M., Suyambulingam, I., Siengchin, S., Puttegowda, M., Binoj, J.S., Gorbatyuk, S., Khan, A., Doddamani, M., Fiore, V., ve Cuadrado, M.M.M. (2023). Drilling characteristics and properties analysis of fiber reinforced polymer composites: A comprehensive review. *Heliyon*, 9(3), e14428. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14428>
- Jiménez, V., Sánchez, P., Sánchez, M.L., Nieto-Márquez, A., Valverde, J.L., ve Romero, A. (2012). Carbon nanofibers: Synthesis, types, properties and chemical activation. Z. Bartul, ve J. Trenor (Ed.), *Advances in nanotechnology* (s. 225-254). Nova Science Publishers.
- Joseph, S., 2018, Image processing techniques and its applicationas: An overview, *IJARIII*, 4(3), 2168-2174.
- K., S., ve Kavan, P. (2017). Investigation and optimization of machining parameters in drilling of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites. *Pigment & Resin Technology*, 46(1), 21-30. <https://doi.org/10.1108/PRT-03-2016-0029>
- Karcı, A. (2009). *Uçak yapısal parçalarında kullanılan karbon/epoksi kompozit malzemelerin yorulma davranışı*, [Doktora Tezi]. Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kaybal, H.B., Ünüvar, A., Koyunbakan, M., ve Avcı, A. (2019). A novelty optimization approach for drilling of CFRP nanocomposite laminates. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100, 2995-3012. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2873-1>
- Khan, T. (2025, Nisan 29). Types of composite matrix materials and their applications. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=24166>

- Kojnoková, T., Nový, F., ve Markovičová, L. (2022). The study of chemical and thermal influences of the environment on the degradation of mechanical properties of carbon composite with epoxy resin. *Polymers*, 14(16), 3245. <https://doi.org/10.3390/polym14163245>
- Kumar, H. (2014). Temperature: Stabilization in oxidation stage during carbon fibre production. *International Journal of Engineering Science Invention*, 3(8), 23-27.
- Kundu, R. (2022). Image processing: Techniques, types, & applications. <https://www.v7labs.com/blog/image-processing-guide>
- Lee, C.S., ve Kim, Y.J. (2018). Introduction to carbon nanofibers: Synthesis, applications and performance. C-S. Lee (Ed.), *Carbon nanofibers: Synthesis, applications and performance* (s. 3-22). Nova Science Publishers.
- Lengsfeld, H., Mainka, H., ve Altstädt, V. (2021). *Carbon fibers: Production, applications, processing*. Hanser.
- Li, N., Li, Y., Zhou, J., He, Y., ve Hao, X. (2015). Drilling delamination and thermal damage of carbon nanotube/carbon fiber reinforced epoxy composites processed by microwave curing. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 97, 11-17. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.06.005>
- Li, L., Wang, J., ve Peng, T. (2025). The influence of pH environments on the long-term durability of coir fiber-reinforced epoxy resin composites. *Sustainability*, 17(1), 364. <https://doi.org/10.3390/su17010364>
- Liu, C. (2024). A Review of digital image processing techniques and future prospects. *International Journal of Computer Science and Information Technology*, 4(3), 223-233. <https://doi.org/10.62051/ijcsit.v4n3.22>
- Lu, Z.M., ve Guo, S.Z. (2017). *Lossless information hiding in images*. Zhejiang University Press.
- Maghami, A., Salehi, M., ve Khoshdarregi, M. (2021). Automated vision-based inspection of drilled CFRP composites using multi-light imaging and deep learning. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 35, 441-453. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.07.015>
- McClements, D. (2024, Aralık 8). All about polymers. <https://www.xometry.com/resources/materials/what-is-polymer/>
- Mekuye, B., ve Abera, B. (2023). Nanomaterials: An overview of synthesis, classification, characterization, and applications. *Nano Select*, 4, 486-501. <https://doi.org/10.1002/nano.202300038>
- Melito, S. (2025, Temmuz 14). Thermoplastics vs. thermoset plastics: Material properties overview. <https://www.fictiv.com/articles/thermoplastic-vs-thermoset-plastic-mechanical-properties-overview>

- Merino-Pérez, J.L., Royer, R., Ayvar-Soberanis, S., Merson, E., ve Hodzic, A. (2015). On the temperatures developed in CFRP drilling using uncoated WC-Co tools Part I: Workpiece constituents, cutting speed and heat dissipation. *Composite Structures*, 123, 161-168. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.12.033>
- Merino-Pérez, J.L., Royer, R., Merson, E., Lockwood, A., Ayvar-Soberanis, S., ve Marshall, M.B. (2016). Influence of workpiece constituents and cutting speed on the cutting forces developed in the conventional drilling of CFRP composites. *Composite Structures*, 140, 621-629. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.01.008>
- Molina-Moya, M.Á., García-Martínez, E., Miguel, V., Coello, J., ve Martínez-Martínez, A. (2023). Experimental analysis and application of a multivariable regression technique to define the optimal drilling conditions for carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites. *Polymers*, 15(18), 3710. <https://doi.org/10.3390/polym15183710>
- Mustafa, N.S, Omer, M.A.A., Garlnabi, M.E.M., ve Ismail, H.A. (2016). Reviewing of general polymer types, properties and application in medical field. *International Journal of Science and Research*, 5(8), 212-221. DOI: 10.21275/ART2016772
- Newcomb, B.A. (2016). Processing, structure, and properties of carbon fibers. *Composites: Part A*, 91, 262-282. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.10.018>
- Olliges, R. (2025, Nisan 9). Carbon fiber weaves: What they are and why to use them. <https://www.elevatedmaterials.com/carbon-fiber-weaves-what-they-are-and-why-to-use-them/>
- Özkan, D., Gök, M.S., ve Karaoğlanlı, A.C. (2020). Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite materials, their characteristic properties, industrial application areas and their machinability. A. Öchsner, ve H. Altenbach (Ed.), *Engineering design applications III* (s. 235-253). Springer International Publishing.
- Pardo, A., Le Gall, J., Heinemann, R., ve Bagshaw, L. (2021). The impact of tool point angle and interlayer gap width on interface borehole quality in drilling CFRP/titanium stacks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114, 159-171. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06733-z>
- Parhi, R. (2018). Nanocomposite for transdermal drug delivery. Inamuddin, A.M. Asiri, ve A. Mohammad (Ed.), *Applications of nanocomposite materials in drug delivery* (s. 353-389). Woodhead Publishing.
- Park, S.J., ve Seo, M.K. (2011). *Interface science and composites*. Elsevier.
- Peacock, A.J., ve Calhoun, A. (2006). *Polymer chemistry: Properties and applications*. Hanser.

- Poór, D.I., Geier, N., Pereszlai, C., ve Xu, J. (2021). A critical review of the drilling of CFRP composites: Burr formation, characterisation and challenges, *Composites Part B: Engineering*, 223, 109155. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109155>
- Pramod, R., Basavarajappa, S., ve Davim, J.P. (2015). A review on investigations in drilling of fiber reinforced plastics. J. P. Davim (Ed.), *Machinability of fibre-reinforced plastics* (s. 132-143). De Gruyter.
- Premnath, A.A. (2019). Drilling studies on carbon fiber-reinforced nano-SiC particles composites using response surface methodology. *Particulate Science and Technology*, 37(4), 474-482. <https://doi.org/10.1080/02726351.2017.1398795>
- Rajak, D.N., Wagh, P.H., ve Linul, E. (2022). A review on synthetic fibers for polymer matrix composites: Performance, failure modes and applications. *Materials*, 15(14), 4790. <https://doi.org/10.3390/ma15144790>
- Rampal, Kumar, G., Rangappa, S.M., Siengchin, S., ve Zafar, S. (2022). A review of recent advancements in drilling of fiber-reinforced polymer composites. *Composites Part C: Open Access*, 9, 100312. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100312>
- Reddy, H.N., ve Ganta, N. (2019). Overview of manufacturing PMC's. *International Journal of Recent Research in Civil and Mechanical Engineering*, 6(2), 4-7.
- Rubio, J.C.C., Abrão, A.M., Faria, P.E., Correia, A.E., ve Davim, J.P. (2008). Delamination in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP). *Journal of Composite Materials*, 42(15), 1523-1532. DOI: 10.1177/0021998308092205
- Santos, P., Silva, A.P., ve Reis, P.N.B. (2023). Effect of carbon nanofibers on the strain rate and interlaminar shear strength of carbon/epoxy composites. *Materials*, 16(12), 4332. <https://doi.org/10.3390/ma16124332>
- Santulli, C. (2021). Natural and synthetic fibers in polymer-based composites. C.I. Pruncu, S.Gürgen, ve M.E. Hoque(Ed.), *Fiber-reinforced polymers: Processes and applications* (s. 45-72). Nova Science Publishers.
- Sastri, V.R. (2014). *Plastics in medical devices: Properties, requirements, and applications* (2nd ed.). Elsevier.
- Sethi, S., ve Ray, B.C. (2015). Environmental effects on fibre reinforced polymeric composites: Evolving reasons and remarks on interfacial strength and stability. *Advances in Colloid and Interface Science*, 217, 43-67. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.12.005>
- Shahabaz, S.M., Shetty, N., Shetty, S.D., ve Sharma, S.S. (2020). Surface roughness analysis in the drilling of carbon fiber/epoxy composite laminates using hybrid Taguchi-Response experimental design. *Materials Research Express*, 7(1), 015322. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab6198>

- Shaik, F., Malkapuram, R., Shekar, K.C., ve Varma, P.D. (2022). Evaluation of delamination in the drilling of CFRP composites. *Advances in Materials Research*, 11(4), 375-390. <https://doi.org/10.12989/amr.2022.11.4.375>
- Sheikh-Ahmad, J.Y., ve Davim, J.P. (2012). Cutting and machining of polymer composites. L. Nicolais, A. Borzacchiello, ve S.M. Lee (Ed.), *Wiley encyclopedia of composites* (s. 648-658). Wiley.
- Shuvo, Z.H., Rahman, M.Z., Saha, B., ve Ador, M.S.H. (2024). Composite materials from synthetic and natural sources: Fabrication techniques and applications. S. Hashmi (Ed.), *Comprehensive materials processing* (2. baskı, s. 303-328). Elsevier.
- Singh, S., Maurya, P., ve Soni, K. (2023). Nanoparticles: Their classification, types and properties. *International Journal of Innovative Research in Technology*, 9(8), 159-166.
- Sorrentino, L., Turchetta, S., ve Bellini, C. (2018). A new method to reduce delaminations during drilling of FRP laminates by feed rate control. *Composite Structures*, 186, 154-164. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.12.005> [Get rights and content](#)
- Speight, J.G. (2011). *Handbook of industrial hydrocarbon processes*. Gulf Professional Publishing.
- Stark, W., ve Bohmeyer, W. (2013). Non-destructive evaluation (NDE) of composites: using ultrasound to monitor the curing of composites. V.M. Karbhari (Ed.), *Non-destructive evaluation (NDE) of polymer matrix composites* (s. 136-181). Woodhead Publishing Limited.
- Tan, L. (2008). *Digital signal processing*. Elsevier.
- Uthaman, A., Xian, G., Thomas, S., Wang, Y., Zheng, Q., ve Liu, X. (2020). Durability of an epoxy resin and its carbon fiber-reinforced polymer composite upon immersion in water, acidic, and alkaline solutions. *Polymers*, 12(3), 614. <https://doi.org/10.3390/polym12030614>
- Wang, R., Zheng, S., ve Zheng, Y. (2011). *Polymer matrix composites and technology*. Woodhead Publishing Limited.
- Wang, H., Zhang, X., ve Duan, Y. (2018). Effects of drilling area temperature on drilling of carbon fiber reinforced polymer composites due to temperature-dependent properties. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96, 2943–2951. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1810-7>
- Weitsman, Y.J. (1995). *Effects of fluids on polymeric composites- A review* (Report No. MAES 95-1.0 CM). The University of Tennessee.
- Xu, J., Li, C., Mi, S., An, Q., ve Chen, M. (2018). Study of drilling-induced defects for CFRP composites using new criteria. *Composite Structures*, 201, 1076-1087. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.06.051>

- Xu, J., Geier, N., Shen, J., Krishnaraj, V., ve Samsudeensadham, S. (2023). A review on CFRP drilling: Fundamental mechanisms, damage issues, and approaches toward high-quality drilling. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 9677-9707. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.023>
- Zhang, X., Huang, W., Wu, C., ve Cao, S. (2023). Defect measurement in CFRP drilling based on digital image processing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 127, 5405–5419. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11838-8>
- Zhou, Y., Pervin, F., Jeelani, S., ve Mallick, P.M. (2008). Improvement in mechanical properties of carbon fabric–epoxy composite using carbon nanofibers, *Journal of Materials Processing Technology*, 198(1-3), 445-453. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.07.028>Get rights and content

