



T.C.

**BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GRAFİT VE B₄C DOLGULU CAM VE
KARBON ELYAF TAKVİYELİ EPOKSİ
KOMPOZİTLERİN MEKANİK, TRİBOLOJİK
VE DELME PERFORMANSLARININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İBRAHİM HALİL AKCAN

**Danışman
Doç. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ**

**Ocak-2023
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

İBRAHİM HALİL AKCAN tarafından hazırlanan “Grafit ve B₄C Dolgulu Cam ve Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozitlerin Mekanik, Tribolojik ve Delme Performanslarının İncelenmesi” adlı tez çalışması 12/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Erol KILIÇKAP

Danışman

Doç. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

Üye

Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdür V.
Prof. Dr. Osman PAKMA

Bu tez çalışması Batman Üniversitesi tarafından BTÜBAP-2021-YL-020 no’lu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu seminerdeki 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 seminar 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.

İbrahim Halil AKCAN

Tarih: 12/01/2023

İmza

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

GRAFİT VE B₄C DOLGULU CAM VE KARBON ELYAF TAKVİYELİ EPOKSİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK, TRIBOLOJİK VE DELME PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

İbrahim Halil AKCAN

BATMAN ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MAKİNE
MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

2023, 97 Sayfa

Jüri

Danışman Doç. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

Prof. Dr. Erol KILIÇKAP

Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

Bu çalışmada, grafit ve B₄C dolgu malzemelerinin karbon ve cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik, tribolojik ve delme performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Farklı oranlarda ağırlıkça (%5, %10 ve %15) grafit ve B₄C dolgulu cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerinin üretimi el yatırma yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozit malzemeler farklı parametrelerde mekanik (çekme ve eğilme testi), tribolojik (aşınma davranışı) ve delme testlerine tabi tutulmuştur. Ayrıca aşınma ve kopma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri incelenmiştir. Hem B₄C hemde grafit dolgusunun cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlere ilavesi mekanik özelliklerin düşmesine neden olmuştur. Artan dolgu oranlarında çekme ve eğilme mukavemetlerin daha fazla düştüğü tespit edilmiştir. B₄C ve grafit dolgusunun hem cam hemde karbon elyafli kompozitlerde aşınma direncini artırdığı gözlenmiştir. Delik delme işlemlerinde ilerleme hızı arttıkça ilerleme kuvvetlerini arttırdığı kesme hızı arttığında ise ilerleme kuvvetlerini azaldığı ortaya çıkmıştır. Cam elyaf takviyeli kompozitlerin ilerleme kuvvetleri değerleri karbon elyaf takviyeli kompozitlere göre daha düşük çıkmıştır. Cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerde delaminasyon değerleri ilerleme hızı arttıkça düştüğü, kesme hızı arttıkça yükseldiği tespit edilmiştir. Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin titreşim ve moment değerleri cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin değerlerinden daha yüksek çıktığı bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Aşınma, B₄C, Cam elyaf, Delik delme, Epoksi kompozit, Grafit, Karbon elyaf, Mekanik özellik

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF MECHANICAL, TRIBOLOGICAL AND DRILLING PERFORMANCES OF GRAPHITE AND B₄C FILLED GLASS AND CARBON FIBER REINFORCED EPOXY COMPOSITES

İbrahim Halil AKCAN

**INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES
OF BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

2023, 97 Pages

Jury

**Advisor Assoc. Prof. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ
Prof. Dr. Erol KILIÇKAP
Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK**

In this study, the effects of graphite and B₄C fillers on the mechanical, tribological and drilling performance of carbon and glass fiber reinforced epoxy composites were experimentally investigated. The production of glass and carbon fiber reinforced composite materials filled with graphite and B₄C at different rates (5, 10 and 15 wt.%) was carried out by hand lay-up method. The produced composite materials were subjected to mechanical (tensile and flexural test), tribological (wear behavior) and drilling tests in different parameters. In addition, Scanning Electron Microscopes (SEM) images of worm and fracture surfaces were examined. The addition of both B₄C and graphite fillers to glass and carbon fiber reinforced composites caused a decrease in mechanical properties. It was determined that tensile and flexural strengths decreased more with increasing filling ratios. It was observed that B₄C and graphite filler increase wear resistance in both glass and carbon fiber composites. In drilling operations, it was found that as the feed rate increased, the feed forces increase and the feed forces decreased as the cutting speed increases. The feed force values of glass fiber reinforced composites were lower than carbon fiber reinforced composites. It was determined that the delamination values of glass and carbon fiber reinforced composites decreased as the feed rate increases and increased as the cutting speed increases. It was found that the vibration and moment values of carbon fiber reinforced composite materials were higher than the glass fiber reinforced composite materials.

Keywords: Abrasion, B₄C, Glass fiber, Graphite, Drilling, Epoxy composite, Carbon fiber, Mechanical property

ÖNSÖZ

“Grafit ve B₄C dolgulu cam ve karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik, tribolojik ve delme parametrelerinin incelenmesi” adlı tez çalışması 7 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde kompozit malzemelerin üstün özellikleri ve buna bağlı olarak kullanıldığı alanlardan bahsedilmiştir. İkinci bölümde konu ile alakalı daha öncesinden yapılmış bilimsel çalışmalardan bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde kompozit malzemelerin tanımı, yapısı, sınıflandırılması ve üretim yöntemleri gibi konular açıklanmıştır. Dördüncü bölümde delme işlemine ait kesici takım malzeme ilişkisi, oluşan hasar mekanizmaları ve delaminasyon faktöründen bahsedilmiştir. Beşinci bölümde kompozit plakaların hazırlanışı, plakalardan elde edilen numunelere uygulanan çekme, eğilme, aşınma ve delme gibi yapılan deneyler ve kullanılmış olan deney cihazlarına yer verilmiştir. Altıncı bölümde çekme, eğilme, aşınma ve delme deneylerin değerlendirilmesi yapılmış, aşınma SEM görüntüleri, kesme kuvvetleri, titreşim ve moment, delaminasyon ölçümlerinin değerlendirilmesine yer verilmiştir. Yedinci bölümde elde edilen sonuçlara göre genel bir değerlendirme ve daha sonraki çalışmalar için yapılabilecek önerilere değinilmiştir.

Bu çalışmamda, benden desteğini ve yardımını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ’e teşekkür ederim.

Deney çalışmalarında bilgi ve tecrübeleri ile yardımcı olan Sayın Arş. Gör. Dr. Serkan BATI ’ya ve Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin DEMİR’e teşekkürlerimi sunarım.

Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BTÜBAP-2021-YL-020) tarafından proje kapsamında yaptığım çalışmalara destek olmasından dolayı Batman Üniversitesi’ne çok teşekkür ederim.

Bu süreçte bana destek olan eşime ve aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

İbrahim Halil AKCAN
BATMAN-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
3. KOMPOZİT MALZEMELERİN TANIMI VE YAPISI	12
3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	12
3.1.1. Matris malzemeye göre kompozit malzemenin sınıflandırılması.....	12
3.1.1.1. Metal matrisli kompozitler.....	13
3.1.1.2. Seramik matrisli kompozitler.....	13
3.1.1.3. Polimer Matrisli Kompozitler	14
3.1.2. Takviye Elemanlarına Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	16
3.1.2.1. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler	17
3.2. Elyaf Katkılı Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	26
3.2.1. El yatırma yöntemi	27
3.2.2. Püskürtme yöntemi	28
3.2.3. Vakum kalıplama.....	29
3.2.4. Elyaf sarma yöntemi	29
3.2.5. Profil çekme yöntemi	30
3.2.6. Reçine transfer kaplama	31
3.2.7. Basıncılı kaplama	31
3.2.7.1. Hazır kalıplama bileşimi / SMC	32
3.2.7.2. Hazır kalıplama bileşimi / BMC	32
4. DELME İŞLEMİ	34
4.1. Kesme Parametreleri	37
4.2. Kesici Takım Malzemesi ve Geometrisi	39
4.3. Takım Aşınması	40
4.4. Kompozit Malzemelerin İşlenmesiyle Oluşan Hasar Mekanizmaları	40
4.5. Delaminasyon Faktörü	41
5. MATERYAL VE METOD	42
5.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler.....	42
5.1.1. Cam elyaf ve karbon elyaf	42
5.1.2. Bor karbür (B ₄ C) ve grafit (Gr)	42

5.1.3. Epoksi reçine	42
5.2. Epoksi Karışımının Hazırlanması	43
5.3. Kompozit Plakaların Üretilmesi.....	43
5.4. Deney Numunelerinin Elde Edilmesi.....	46
5.5. Çekme Deneyi.....	46
5.6. Eğilme Deneyi.....	48
5.7. Aşınma Deneyi.....	49
5.8. Delme Deneylerinde Kullanılan Tezgah ve Dinanometre	53
5.9. İlerleme Kuvvetleri ve Moment Ölçümü	54
5.10. Delik Delme Deneylerinde Kullanılan Kesici Takımlar	55
5.11. SEM Cihazı	55
5.12. Delaminasyon Faktörü	56
5.13. Titreşim ölçümü	57
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	58
6.1. Çekme Deney Sonuçları.....	58
6.1.1. Çekme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması	58
6.2. Eğilme Deneyi Sonuçları	61
6.2.1. Eğilme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması.....	61
6.3. Aşınma Deneyi Sonuçları	64
6.3.1. Aşınma oranı sonuçları.....	64
6.3.2. Sürtünme Katsayısı Sonuçları	65
6.3.3. SEM morfolojisi	67
6.3.3.1. Aşınmış yüzeylere ait SEM morfolojisi	67
6.3.3.2. Çekme testi sonrası kopma yüzeylerine ait SEM morfolojisi.....	69
6.4. İlerleme Kuvvetlerinin Değerlendirilmesi	71
6.5. Titreşim ve Momentlerin Değerlendirilmesi.....	77
6.6. Delaminasyon Ölçümlerinin Değerlendirilmesi	78
7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	86
7.1. Genel Sonuçlar	86
7.2. Öneriler	87
KAYNAKLAR	88
ÖZGEÇMİŞ	97

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Uzay mekiklerinde kullanılan seramik matrisli kompozit örneği	14
Şekil 3.2. Termoset polimer zincirlerin çapraz bağlanması	16
Şekil 3.3. Elyaf takviyeli kompozitin iç yapısı	19
Şekil 3.4. Kompozit malzeme içerisindeki elyafların dağılımı	20
Şekil 3.5. Cam elyafların üretim aşaması.....	21
Şekil 3.6. Cam elyafların üretim sonrası aşamaları.....	21
Şekil 3.7. Karbon elyaflar örneği	22
Şekil 3.8. Değişik türlerde elde edilmiş karbon elyaflar	23
Şekil 3.9. Parçacık takviyeli kompozitlerin iç yapısı.....	25
Şekil 3.10. El yatırma yöntemi.....	28
Şekil 3.11. Püskürtme yöntemi.....	28
Şekil 3.12. Vakumla kalıplama yönteminin görseli	29
Şekil 3.13. Elyaf sarma yöntemi	30
Şekil 3.14. Profil çekme yöntemi	30
Şekil 3.15. RTM transfer kalıplama yöntemi	31
Şekil 3.16. Basınçlı kalıplama yöntemi	32
Şekil 4.1. Kompozit malzemeyi delme sırasında oluşan itme kuvveti ve kesici takımın şematik resmi	34
Şekil 4.2. Delme işlemini etkileyen faktörler.....	35
Şekil 4.3. Çap uzunluk ilişkisi.....	36
Şekil 4.4. Delme işlemleri (a) tek operasyonda delme işlemi, (b) ön delik delme işleminden sonra yapılan delme işlemi	36
Şekil 4.5. Kompozit bir malzemenin kopması sonrası görüntüsü	37
Şekil 4.6. Delik delmede kullanılan dinamometre	38

Şekil 4.7. Matkap delmesi sırasında oluşan kesme kuvvetleri	39
Şekil 4.8. Delaminasyon faktörü ve kompozitlerin delinmesi esnasında oluşan delaminasyonun gösterimi.....	41
Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan hassas terazi	43
Şekil 5.2. Elyaf kumaşların kesimi	44
Şekil 5.3. Elyaf kompozit plakalarının hazırlanması.....	45
Şekil 5.4. Kompozit plakaların kesimi ile deney numunelerinin elde edilişi	46
Şekil 5.5. Çekme cihazı	47
Şekil 5.6. Cam ve karbon elyaf takviyeli numuneler ve çekme sonrası oluşan kopma şekli.....	47
Şekil 5.7. Eğilme testi cihazı ve eğilme sonrası oluşan şekil	48
Şekil 5.8. Taguchi tasarımında kullanılan faktör ve seviyelerinin seçimi.....	50
Şekil 5.9. Taguchi mixed tasarım düzeni	50
Şekil 5.10. Takviye tipi ve oranı için Taguchi tasarımına tanımlanan faktörler ve seviyeleri.....	50
Şekil 5.11. Aşınma cihazı	52
Şekil 5.12. CNC dik işlem tezgahı	53
Şekil 5.13. İş parçasının dinamometreye bağlanma şekli.....	54
Şekil 5.14. Deneylerde kullanılan matkap.....	55
Şekil 5.15. SEM cihazının görüntüsü	56
Şekil 5.16. Delaminasyon faktörünü gösterimi.	56
Şekil 5.17. Cam dolgusuz kompozit malzeme için delaminasyon değerlerinin ölçüm yerlerinin gösterimi.....	57
Şekil 6.1. Dolgusuz ve grafit dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin gerilme- % uzama grafiği	59
Şekil 6.2. Dolgusuz ve B ₄ C dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin gerilme- % uzama grafiği	60
Şekil 6.3. Dolgusuz ve grafit dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin gerilme- % uzama grafiği	60
Şekil 6.4. Saf ve B ₄ C katkılı Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin Gerilme- % uzama grafiği	61

Şekil 6.5. Dolgusuz ve grafit dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin eğilme-yer değiştirme grafiği.....	62
Şekil 6.6. Dolgusuz ve B ₄ C dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin eğilme-yer değiştirme grafiği.....	63
Şekil 6.7. Dolgusuz ve grafit dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin eğilme-yer değiştirme grafiği.....	63
Şekil 6.8. Dolgusuz ve B ₄ C dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin eğilme-yer değiştirme grafiği.....	64
Şekil 6.9. Aşınma oranı grafiği (mm ³ /m)	64
Şekil 6.10. Sürtünme katsayısı grafiği.....	66
Şekil 6.11. Aşınmış yüzeylerin takviye, yük ve kayma mesafesine bağlı SEM görüntüleri.....	68
Şekil 6.12. Çekme testi sonrası kopmuş yüzeylere ait takviye, yük ve kayma mesafesine bağlı SEM görüntüleri	70
Şekil 6.13. Dolgusuz ve grafit dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme hızlarında ilerleme hızına bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvvetlerinin değişimi.....	72
Şekil 6.14. Dolgusuz ve grafit dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı ilerleme oranlarında kesme hızına bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvvetlerinin değişimi.....	72
Şekil 6.15. Dolgusuz ve B ₄ C dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme hızlarında ilerleme hızına bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvvetlerinin değişimi.....	74
Şekil 6.16. Dolgusuz ve B ₄ C dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı ilerleme oranlarında kesme hızına bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvvetlerinin değişimi.....	74
Şekil 6.17. Dolgusuz ve grafit dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme hızlarında ilerleme hızına bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvvetlerinin değişimi.....	75
Şekil 6.18. Dolgusuz ve grafit dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı ilerleme.....	75
Şekil 6.19. Dolgusuz ve B ₄ C dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme hızlarında ilerleme hızına bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvvetlerinin değişimi.....	76
Şekil 6.20. Dolgusuz ve B ₄ C dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı ilerleme oranlarında kesme hızına bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvvetlerinin değişimi.....	77

Şekil 6.21. Dolgusuz ve grafit dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme hızlarında ilerleme hızına bağlı olarak elde edilen delaminasyon değerlerinin değişimi.....	80
Şekil 6.22. Dolgusuz ve grafit dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı ilerleme oranlarında kesme hızına bağlı olarak elde edilen delaminasyon değerlerinin değişimi.....	81
Şekil 6.23. Dolgusuz ve B ₄ C dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme hızlarında ilerleme hızına bağlı olarak elde edilen delaminasyon değerlerinin değişimi.....	82
Şekil 6.24. Dolgusuz ve B ₄ C dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı ilerleme oranlarında kesme hızına bağlı olarak elde edilen delaminasyon değerlerinin değişimi.....	82
Şekil 6.25. Dolgusuz ve grafit dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme hızlarında ilerleme hızına bağlı olarak elde edilen delaminasyon değerlerinin değişimi	83
Şekil 6.26. Dolgusuz ve grafit dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı ilerleme oranlarında kesme hızına bağlı olarak elde edilen delaminasyon değerlerinin değişimi	84
Şekil 6.27. Dolgusuz ve B ₄ C dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme hızlarında ilerleme hızına bağlı olarak elde edilen delaminasyon değerlerinin değişimi.....	85
Şekil 6.28. Dolgusuz ve B ₄ C dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı ilerleme oranlarında kesme hızına bağlı olarak elde edilen delaminasyon değerlerinin değişim.....	85

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo	Sayfa
Tablo 3.1. Seçilen takviye elemanlarının bazı mekanik özellikleri.....	19
Tablo 3.2. Camların cinsleri ve bileşimleri.....	20
Tablo 3.3. Kompozit malzeme üretim yöntemleri şeması.....	26
Tablo 3.4. Kompozit üretim yöntemlerinin bazı yönlerden karşılaştırılması, 10: en büyük değer, 1: en küçük değer	33
Tablo 5.1. Karbon ve Cam elyaf özellikleri	42
Tablo 5.2. Borkarbür ve Grafit özellikleri	42
Tablo 5.3. Aşınma deneyleri için giriş parametreleri ve seviyeleri	49
Tablo 5.4. Takviye tipi, dolgu malzemesi, katkı oranı, kuvvet ve kayma mesafesi için Taguchi mixed tasarımı tarafından oluşturulan aşınma deney kombinasyonu.....	51
Tablo 5.5. Delik delme için kullanılan parametreler.....	54
Tablo 5.6. Kesici takımın geometrik ve kaplama özellikleri	55
Tablo 6.1. Çekme deneyi sonuçları.....	58
Tablo 6.2. Eğilme deneyi sonuçları.....	62
Tablo 6.3. Karbon ve cam elyaf takviyeli numunelerin titreşim ve moment değerleri .	78

SİMGELER KISALTMALAR

Simgeler

- a** : İz genişliği
D : Matkap ucu çapı
n : Devir sayısı
F : Takımın dakikada aldığı yol
F_z : Takımın bir devirde aldığı yol
V : Kesme hızı
Z : Matkaptaki diş adeti
 σ_f : Eğilme gerilmesi
P : Maksimum yük
L : İki destek arasındaki mesafe
b : Numunenin eni
d : Numunenin kalınlığı
 ΔV : Hacim kaybı
S : Aşınma mesafesi
R : Aşınma iz yarıçapı
r : Yarıçap
F_d : Delik çapı
D_o : Hasar çapı

Kısaltmalar

BMC	: Hazır Kalıplama Hamuru
CMK	: Seramik Matrisli Kompozitler
CNC	: Bilgisayarlı Sayısal Denetim
HSS	: Yüksek Hız Çeliği
MMK	: Metal Matrisli Kompozitler
PCD	: Çok Kristalli Elmas
PMK	: Polimer Matrisli Kompozitler
RTM	: Reçine Transfer Kalıplama
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskop
SMC	: Hazır Kalıplama Bileşimi

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, çok uzun yıllardır kullanılmasına rağmen 1960'lı yıllarından itibaren polimerik malzemelerin üretimi ile beraber her geçen gün yoğun bir şekilde kullanımı artmaktadır. Kompozit malzemeler, yüksek özellikli dayanımları, gösterge ve toklukları, hafiflikleri, üstün korozyon dirençleri ve düşük ısıl genleşmeleri nedeniyle otomotiv, uzay, denizcilik, kimya ve nükleer endüstriler dahil olmak üzere endüstrinin birçok alanında kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin anizotropik ve heterojen yapısı malzemelerde istenilen özelliklerin kazanılmasında en iyi konfigürasyonları ve tasarım seçenekleri sunmaktadır. Bu malzemelerin çoğu elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerdir. Bu yapıların ana matris malzemeleri epoksi reçine ve vinil ester gibi polimer esaslı reçineler, takviye elemanları ise cam, karbon veya aramit gibi liflerdir. Kompozit malzemelerde geniş kullanım alanı olan epoksi reçine, kolay bulunabilirliği ve yüksek mekaniklerinden dolayı matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Kompozit endüstrisinde kolay üretilebilirliği, ekonomikliği ve fonsiyonelliği olmasından dolayı cam elyaf kompozitler sıklıkla tercih edilmektedir. Öte yandan yüksek mekanik özelliklerinden dolayı da tercih edilen bir diğer elyaf türü ise karbon elyafıdır.

Kompozit yapıların istenilen geometride üretilebilmelerine rağmen, genellikle montajlanmasında delik açma işlemi sürekli olarak karşımıza çıkan bir işlemdir. Üstün özellikleri ile ön plana çıkan kompozitlerin matkapla delme işlemlerinde, elyaf çekmesi ve yüzey delaminasyonları gibi çeşitli sorunlarla karşılaşmaktadır. Kompozit malzemelerin delinmesi aşamasında yüzey hasarları malzeme kalitesini olumsuz yönde etkileyebilir. Bunun engellenmesi ve en düşük seviyede tutulması için kesme parametreleri (kesme derinliği, kesme ve ilerleme hızı vb.), takım geometrisi ve özellikleri (uç ve helis açısı, kaplamalı ve kaplamasız) açısından sürekli çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda özellikle delik kalitesini etkileyen delaminasyaon faktörü, titreşim, kesme kuvvetleri ve moment gibi deneysel sonuçlar irdelenmiştir (Basmacı ve Yörük (2020); Murthy ve ark. (2020); Demirhan (2021); Kırhasanoğlu ve Turgut (2021); Koyunbakan ve ark. (2021); Hussein ve ark. (2019); Krishnamoorthy ve ark. (2019); Özkaya ve ark. (2019); Li ve ark. (2015)).

Yapılan bu tez çalışmasında ise farklı oranlarda ağırlıkça (%5, %10 ve %15) farklı dolgu tipleri (grafit ve B₄C) kullanılarak üretilen iki farklı elyaf (karbon ve cam)

tipli kompozitlerin mekanik özellikleri, tribolojik davranışı ve birçok farklı parametrede delme özellikleri deneysel olarak araştırılmıştır.



2. LİTERATÜR TARAMASI

Kompozit malzemeler sahip oldukları üstün avantajlar sayesinde her geçen gün kullanımları artmaktadır. Kompozit malzemeleri daha da iyileştirmek adına sürekli çalışmalar yapılmakta ve kompozitlerin mekanik ve tribolojik performanslarını arttırmak için çeşitli dolgu malzemeleri kullanılmıştır. Aşağıda farklı dolgu malzemeleriyle cam ve karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozit malzemelerin mekanik ve tribolojik özelliklerini arttırmak için yapılmış bazı deneysel çalışmalar verilmiştir.

Kumfu ve ark. (2008), ultrasonik karıştırma ve el yatırma metodu ile mikro boyutlu Al_2O_3 parçacıklarını kullanarak aramid elyaf takviyeli epoksi kompozitleri üretip bu kompozitlerin mekanik özellikleri hakkında araştırma yapmışlardır. Yaptıkları bu araştırma sonucunda kullanılan parçacıkların kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir.

Chen ve ark. (2008), nano SiO_2 katkılı epoksi kompozitlerin mekanik ve ısı özelliklerini incelenmişlerdir. Nano SiO_2 'nin ağırlığının %10'undan azı; takviyeli kompozitlerin çekme modülünü %25 arttırdığı ve kırılma tokluğunu %30 arttırdığını tespit etmişlerdir. Ayrıca dolgu malzemesi arttıkça kompozit malzemelerin mukavemet ve kırılma tokluğunu azalttığını gözlemlemişlerdir.

Asi (2009), yaptığı çalışmada cam elyaf içerisine farklı oranlarda Al_2O_3 seramik parçacığı ilave ederek ürettiği kompozitlerin çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, young modülü, yüzde uzaması ve kesme mukavemetini incelemiştir. Al_2O_3 takviye oranının artmasıyla kompozitlerinin çekme ve kesme mukavemetlerinin düştüğünü gözlemlemiştir. Ağırlıkça %10 Al_2O_3 takviye oranına kadar kompozitlerin young modülünün arttığını, bunun üzerindeki oranlarda ise düşmeye başladığını görmüştür. Eğilme mukavemeti Al_2O_3 takviye oranının artmasıyla önce arttığını daha sonra azaldığını tespit etmiştir. Takviyesiz malzemeyle karşılaştırıldığında, ağırlıkça %10 oranına kadar Al_2O_3 takviyeli kompozitin eğilme mukavemetinin ve young modülünün arttığını belirlemiştir.

Wei ve ark. (2011), SiO_2 nanoparçacıkları ile takviye edilmiş bazalt kompozitlerde, ağırlıkça %5 SiO_2 nanoparçacık takviyesinin kompozitin çekme mukavemetinde %30, kesme mukavemetinde ise %15 artış sağladığını gözlemlemişlerdir.

Zhang ve ark. (2010), TiO_2 ve SiO_2 nanoparçacıklarını, hibrit politetrafloroetilen /Kevlar kumaş/fenolik kompozitlere farklı ağırlık oranlarında ekleyerek kompozit malzeme elde etmişlerdir. Kompozitlerden elde ettikleri numunelerin aşınma özelliklerini incelenmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda ise SiO_2 ve TiO_2 nanoparçacık katkılarının aşınma direnci üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir.

Ferreira ve ark. (2012), kevlar takviyeli epoksi kompozitlerde, modifiye edilmiş nano-kil parçacıklarının kompozitin yorulma davranışı üzerine etkisini belirlemek için ürettikleri kompozitlere ağırlıkça %3 oranında nano-kil ilave etmişlerdir. Nanokil katkısının kompozitin statik mukavemetini azalttığını, eğilme ve çekme yönlerindeki rijitliğini artırdığını, çekme yönündeki yorulma mukavemetini %12 artırdığını, eğilmedeki yorulma mukavemetini ise düşürdüğünü gözlemlenmiştir.

Raju ve ark. (2013), cam elyaf takviyeli epoksi kompozit malzemeler üretmek için ağırlıkça %0, %5, %7,5 ve %10 Al_2O_3 parçacıkları kullanmışlardır. Ürettikleri kompozitlerin tribolojik davranışlarını, mekanik özelliklerini (çekme mukavemeti, sertlik ve elastik modül gibi) araştırmışlardır. Eklenen katkı maddelerinin mekanik özellikleri iyileştirdiğini ve sürtünme katsayısını azalttığını gözlemlenmiştir.

Kadhim ve ark. (2013), epoksi reçineye farklı ağırlık oranlarında olan Al_2O_3 nanopartikülleri eklemişler, önce manyetik bir karıştırıcıda karıştırıp ve ardından homojenizatörle de karıştırdıktan sonra nanokompozit bir malzeme elde etmişlerdir. ASTM standartlarına göre ürettikleri kompozit malzemelerden numuneler alarak 3 nokta eğilme testi yapmışlardır. Elde edilen sonuçlarda maksimum eğilme mukavemetinin ağırlıkça %4 oranındaki kompozit malzemede olduğunu gözlemlenmiştir.

Harishanand ve ark. (2013), epoksi kompozitleri üretmek için ZnO , ZnO_2 ve CeO_2 gibi nano-metal partikülleri kullanarak kompozit bir malzeme üretmişler ve ürettikleri bu malzemenin mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre yoğunluk, sertlik, çekme, eğilme ve basınç dayanım değerlerinin kompozitte ağırlıkça %0,5 dolgu oranına kadar kompozit malzemede olumlu bir etki göstermediğini, ancak en iyi değerlerin kompozitte ağırlıkça %1 oranında CeO_2 eklendiği zaman elde edildiğini gözlemlenmiştir.

Reis ve ark. (2013), ağırlıkça %1,5 - %3 ve %6 nanokil kullanarak kevlar elyaf takviyeli epoksi kompozitleri üretmişlerdir. Üretilen kompozit malzemelerin darbe

özelliklerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, parçacıkları arayüz arasında daha iyi bağlamak için silan yapıştırıcı kullanmışlardır ve sonuçta, nanokil katkı maddelerinin genel olarak darbe dayanımını iyileştirdiğini ve en iyi sonuçların ağırlıkça %6 oranından elde edildiğini tespit etmişlerdir.

Taraghi ve ark. (2014), ağırlık oranı %0,3 - %0,5 ve %1 olan örme kevlar elyaf takviyeli epoksi kompozitleri elde etmek için çok duvarlı karbon nanotüpler kullanmışlar ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda, eklenen kompozitin katkı maddelerinin kompozitin elastik modülünü, eğilme modülünü ve darbe dayanımını net bir şekilde arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Nayak ve ark. (2014), çeşitli katkı maddeleri ile (Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2) cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. El yatırma yöntemi ile kompozit malzemeler üretmek için mikroskobik boyutta ve %2, %4 ve %6 oranında katkı maddeleri kullanıp, ürettikleri kompozit malzemelerin eğilme mukavemeti, eğilme modülü ve kesme mukavemeti gibi mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlarda katkı maddelerini birbirleriyle karşılaştırırken, mekanik özelliklere en fazla tesir eden katkı maddesinin genellikle SiO_2 katkı maddesinin olduğunu gözlemlemişlerdir.

Mohanty ve ark. (2014), epoksi reçineye ağırlıkça %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında Al_2O_3 nanoparçacıkları ekleyerek bir karışım hazırlamışlardır. Hazırladıkları karışımları cam ve karbon elyafa emdirerek kompozitler üretmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda, Al_2O_3 nanoparçacıklarının kompozitin çekme mukavemeti ve elastik modülü değerlerinde olumlu bir yönde iyileşme sağladığını gözlemlemişlerdir.

Knoll ve ark. (2014), %0,3 ağırlığında karbon nanoparçacıkları (çok duvarlı karbon nanotüpler ve düşük katmanlı grafen gibi) kullanarak karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitleri üretip, bunların yorulma dayanımlarını incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda üretilen bu kompozit malzemelerin statik özelliklerinde herhangi bir değişimin olmadığını, ancak yorulma ömürlerinde belirli bir ölçüde artış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Hosur ve ark. (2015), karbon elyaf kullanarak, epoksi içerisine ağırlıkça %2 montmorillonit nanokil ve ağırlıkça %0,3 çok duvarlı karbon nanotüp dolgusu ekleyerek kompozit bir malzeme elde etmişlerdir. Ayrıca, hibrit bir kompozit malzeme üretmek için %2 montmorillonit nanokil ve ağırlıkça %0,1 çok duvarlı karbon nanotüpler

kullanmışlardır. Bu kompozitler üzerinde dinamik mekanik analiz, termomekanik analiz ve 3 noktalı eğilme deneyleri yapmışlar ve nanoparçacık takviyesinin bu özellikleri önemli ölçüde iyileştirdiğini ve en iyi sonuçların hibrit nanoparçacık kompozitlerde elde edildiğini bulmuşlardır.

Moon ve Kim (2015), TiO_2 nano parçacıklarını, farklı çaplarda karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitleri üretmek için kullanmışlardır. TiO_2 nano parçacıklarını 20 nm, 100 nm ve 200 nm ebatlarında kullanmışlardır ve ısıtma işlemi tabii tutup, ürettikleri kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda kullandıkları elyafın çapı ne olursa olsun en iyi sonuçların 20 nm boyutunda alındığını gözlemlemişlerdir.

Erkliğ ve ark. (2016), karbon ve kevlar elyaf takviyeli epoksi kompozitleri üretmek için ağırlıkça %0,5, %1, %1,5, %2,5, %3 oranında nano SiO_2 parçacıkları kullanmışlar ve bunların gerilme ve bükülme davranışlarını kontrol etmişlerdir. Elde edilen sonuçlarda, nano SiO_2 parçacıkların oranı arttığında çekme mukavemetini iyileştirdiğini ve eğilme mukavemetinin de azaldığını gözlemlemişlerdir.

Manjunath ve ark. (2016), pultrüzyonla güçlendirilmiş tek yönlü cam elyaf ile %3 oranında nano Al_2O_3 , %7 oranında nano SiO_2 ve %5 oranında mikro-alümina trihidrat parçacıkları kullanıp epoksi kompozit malzemeler üretmişlerdir. Elde ettikleri kompozit malzemelerin çekme, eğilme ve darbe özelliklerini kontrol etmişler ve elde edilen sonuçlarda katkı maddelerinin kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir.

Salih ve ark. (2016), epoksi reçinesine önce farklı oranlarında nano SiO_2 ve nano TiO_2 parçacıkları ekleyip epoksi reçineyi kürlenmeye bırakmışlardır. Ayrıca nanoparçacık takviyeli karışımları el yatırma yöntemiyle cam ve kevlar elyaflara emdirerek kompozitler üretmişlerdir. Ürettikleri epoksi ve fiber takviyeli kompozitlerde, nanoparçacık takviyesinin kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda, nano parçacıklar eklenen epoksi reçinelerin mekanik özelliklerinin oluşan topaklanma nedeniyle azaldığını, ancak epoksi reçinelerle karşılaştırıldığında, cam ve kevlar kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin iyileştiğini gözlemlemişlerdir.

Liang ve ark. (2017), katı-sıvı ayrımı ile modifiye edilmiş Al_2O_3 nanoparçacıkları, vakum destekli reçine infüzyonu ile hazırlanan vinil ester

kompozitleri üretip bunların 25°C ve -60°C'deki mekanik özellikleri araştırmışlardır. Ağırlıkça %0 - %0,5 - %1 - %2 oranlarında nanopartikül kullanarak elde ettikleri kompozitlerin mekanik özelliklerinde olumlu yönde bir gelişme olduğunu gözlemlemişlerdir.

Afrouzian ve ark. (2017), SiO₂ parçacıklarının, dokuma cam elyaf takviyeli epoksi kompozitleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. El yatırma yöntemini kullanarak ürettikleri kompozitlere, SiO₂ parçacık oranını ağırlıkça %0, %0,5, %1, %3 oranlarında olacak şekilde tutmuşlar ve kompozitlerin çekme, eğilme ve balistik darbe dayanımına etkisini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlarda enerji emme ve çekme dayanımının en iyi %5 oranında çıktığını, eğilme mukavemetinin ise en iyi değerinin %3 oranında gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir.

Yukarıdaki çalışmalarda, araştırmacıların kompozit malzemelerin mekanik, tribolojik ve farklı özelliklerini geliştirmek için farklı boyuttaki (nano-mikro) partiküller kullandıkları görülmektedir. Ancak kompozit malzemelerin özelliklerindeki değişimler bu malzemelerin talaşlı işlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Özellikle fiber takviyeli kompozitlerde delme işlemlerinin ön plana çıkmasıyla birlikte kompozitlerde delme işlemleri ile ilgili bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Enemuoh ve ark. (2001), karbon fiber takviyeli epoksi kompozit malzemede hasarsız delme için kesme parametrelerini seçmeye yönelik çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada havacılık endüstrisinde sıklıkla kullanılan karbon fiber takviyeli epoksi kompozitler kullanılarak delme işlemini gerçekleştirmişlerdir. En iyi seçilmiş matkap uç açısı (118°) durumunda, delaminasyonsuz bir delik delmek için optimum fener mili hızı, 3200 dev/dk ve ilerleme hızı, 50,8 mm/dk civarında olduğunu belirtmişlerdir. Genel olarak, epoksi kompozitlerde delaminasyon içermeyen ve iyi yüzeyli deliklerin üretimi için yüksek hız ve düşük ilerleme hızı olduğunu belirtmişlerdir.

Sonbaty ve ark. (2004), yaptıkları deneysel çalışmada cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin delme işlemlerindeki parametrelerin ilerleme kuvveti, tork ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu parametreler arasında kesme hızı, ilerleme, matkap boyutu ve fiber hacim oranı yer almaktadır. Epoksi reçine için artan kesme hızının ilerleme kuvveti üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olduğunu torkun ise azaldığını belirlemişlerdir. İlerleme hızının artmasıyla ilerleme kuvveti ve torkun

arttığını, kesme hızı ve ilerlemenin yüzey pürüzlülüğüne çok fazla etki etmediğini belirlemişlerdir.

Kishore ve ark. (2008), cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerde delme deneyi gerçekleştirmişlerdir. Matkap uç geometrisi, kesme hızı ve ilerleme hızı olmak üzere üç önemli parametre incelemişlerdir. Matkap uç geometrisinin optimum seçimi, delme kaynaklı minimum hasarı belirlemek için önemli olduğunu belirtmişlerdir.

Kılıçkap (2010), delaminasyon faktörünün ilerleme oranı, kesme hızı ve matkap ucunun geometrisine bağlı olarak değiştiğini ve yaptığı bu araştırmada en düşük delaminasyon etkisinin, düşük ilerleme ve kesme hızında meydana geldiğini belirlemiştir.

Khashaba ve ark. (2012), yaptıkları çalışmada cam elyaf takviyeli epoksi kompozitin delinmesinde, delme parametrelerinin (ilerleme, hız vb.) işlenebilirlik parametreleri (itme kuvveti, tork, delaminasyon, yüzey pürüzlülüğü) üzerindeki etkisini değerlendirmek için deneysel bir araştırma yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda, delme işlemi sırasında ilerleme kuvvetinin matkap ön aşınmasından büyük ölçüde etkilendiğini, bu etkinin yüksek kesme hızlarında daha belirgin bir hale geldiğini ve bununla delaminasyonu arttırdığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, artan matkap ön aşınmasının bir sonucu olarak ilerleme kuvvetinin artması, fiber/matris arayüzlerini tahrip ettiği ve yüzey pürüzlülüğünü arttırdığını gözlemlemişlerdir.

Ponnuvel ve Moorthy (2013) yaptıkları çalışmada çok cidarlı karbon nanotüplerin delme kalitesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Malzeme üzerinde 6mm çapa sahip HSS matkap ile delme testini yapmışlardır. Deliğin giriş ve çıkış taraflarında delaminasyon faktörünü ölçmek için görüntü işleme tekniği ve karbon nanotüplerin varlığının önemini ve kesme parametrelerinin etkisini incelemek için varyans analizi (ANOVA) kullanmışlardır. İstatistiksel analiz sonuçlarına göre karbon nanotüplerin eklenmesinin, hem giriş hem de çıkış taraflarında delinmiş delik kalitesini önemli ölçüde iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir.

Li ve ark. (2015), iki farklı karbon nanotüp dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompoziti karşılaştırmışlardır. Karbon fiber ve karbon nanotüplerin matris arasındaki arayüz kuvvetini arttırmak için mikrodalga kütleme ile işlemişlerdir. Yaptıkları araştırma sonucunda dolgusuz numunelere kıyasla karbon nanotüp dolgusunun delaminasyon faktörünü azalttığını tespit etmişlerdir.

Kuş ve Ekici (2017), yaptıkları çalışmada, petek geometrisinde farklı malzemelerden yapılmış sandviç kompozitler delinirken delik giriş ve çıkış bölgelerindeki delaminasyon faktörlerini incelemişlerdir. Çalışmada Taguchi yöntemi L_{18} 'e göre deneyler tasarlanmıştır. Delaminasyon faktörü için en etkili parametre delik giriş alanına %46 katkı sağlayan kesme hızı ve çıkış alanına %32,8 katkı sağlayan ilerleme hızı olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca çıkış deliği bölgesinde meydana gelen hasar türleri, kesilmemiş lifler ve parçalanma, delaminasyon olarak belirtmişlerdir.

Heidary ve ark. (2018), karbon nanotüpler ile güçlendirilmiş dokuma cam elyaf epoksi kompozitlerin delinmesinde ilerleme kuvveti, delaminasyon faktörü ve eğilme mukavemetini analiz etmek için deneyler yapmışlardır. Deneyler için dikkate aldıkları proses parametreleri, ilerleme hızı, fener mili hızı, matkap çapı ve nanokompozit laminatlarda bulunan karbon nanotüplerin ağırlık yüzdesidir. Delme deneyleri, Taguchi deney tasarımına dayalı olarak gerçekleştirilmiş ve daha sonra delinmiş numunelerin eğilme mukavemetini değerlendirmek için üç noktalı eğilme testleri yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre, ilerleme kuvveti ve delaminasyon faktörü üzerinde en büyük etkiye sahip olan faktör ilerleme hızı ve fener mili hızı olduğunu belirlemişlerdir.

Özkaya ve ark. (2019), delaminasyon faktörlerinin cam küre takviyeli polipropilen epoksi fazlı polimer matrisli kompozitler üzerinde delme sonrası delaminasyon etkisini deneysel olarak incelenmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda 0,05 mm/dev ilerleme hızında ve 15 m/dak kesme hızında en düşük delaminasyonun oluştuğunu ve bu sonucun karbür matkap tipinde meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Kompozitte takviye miktarı arttıkça delaminasyon faktörünün arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca %5 cam küre takviyesi içeren kompozitte en düşük delaminasyonun oluştuğunu gözlemlemişlerdir.

Krishnamoorthy ve ark. (2019), karbon elyaf takviyeli kompozitleri delerken uç açısının, kesme hızının ve ilerleme hızının ilerleme kuvveti üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deneylerde iki farklı uç açısına sahip matkaplar kullanılmışlardır. Yapılan delme işlemlerinde ilerleme hızındaki artışla ilerleme kuvveti ve delaminasyon faktörü arttığını ve kesme hızındaki artışla birlikte ilerleme kuvvetinin azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca hem ilerleme kuvveti hem de delaminasyon faktörü, ilerleme hızı ve kesme hızından bağımsız olarak uç açısının azalmasıyla azaldığını gözlemlemişlerdir.

Hussein ve ark. (2019), karbon fiber takviyeli epoksi kompozitlerin titreşim destekli delinmesi ile araştırma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada hem yüksek frekans hem de düşük frekanslı titreşim destekli delme yaparak delaminasyonu azaltmak ve kesme sıcaklığının etkisini incelemişlerdir. Titreşim destekli delmenin geleneksel delmeye göre kesme sıcaklığında önemli bir azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. En iyi delaminasyonun ve yüzey kalitesinin geleneksel delmelere göre titreşim destekli delme ile yapılan delmelerde olduğunu belirtmişlerdir.

Basmacı ve Yörük (2020), yaptıkları çalışmada farklı kesme parametrelerinin ve farklı çaplı matkap uçlarının, karbon elyaf takviyeli kompozitlerde delme, delaminasyon hasarı, delik çapı ve yüzey kalitesi üzerindeki etkileri kuru ve kriyojenik koşullarda deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, kuru ve kriyojenik koşullarda yapılan deneyde iki farklı kesme hızı, dört farklı ilerleme ve 2 farklı çapta matkap kullanılmıştır. Elde ettikleri sonuçlarda karbon elyaf takviyeli kompozitlerin kriyojenik teknikler kullanılarak delinmesinin daha kolay olduğunu ve delinen parçaların yüzey pürüzlülüğünü azaltarak işlenebilirliği büyük ölçüde geliştirdiğini göstermişlerdir. Ayrıca ilerleme kuvveti ve delaminasyon faktörünün arttığını gözlemlemişlerdir.

Murthy ve ark. (2020), bazalt-karbon fiber ile bir epoksi hibrit kompoziti elde ederek bu kompozit üzerinde delaminasyon hasarını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada delaminasyonun matkabın çapı ve ilerleme hızıyla doğru, dönme hızıyla ters orantılı olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca artan matkap uzunluğunun ve matkap çapının delaminasyonu etkilediğini tespit etmişlerdir.

Çobanoğlu ve Şeker (2020), yaptıkları çalışmada, burun açısı, adım sayısı ve kaplamanın delik silindirikliği ve delaminasyonu üzerindeki etkisini görmek için yeni tasarlanmış matkap geometrilerini karbon elyaf takviyeli malzemeler üzerinde test etmişlerdir. En iyi delaminasyon sonuçları 18° burun açısı ve kaplamasız matkapla elde ettiklerini gözlemlemişlerdir.

Demirhan (2021), yaptığı çalışmada cam elyaf takviyeli poliamid 66 malzemesinin delme işlemini incelemiştir. Üç farklı kesme hızında (40, 80 ve 120 m/dk) ve üç farklı ilerleme oranında (0,06, 0,09 ve 0,12 mm/dev) delme yapmıştır. Delme işlemleri, kaplamasız HSS takım ve TiAlN kaplı HSS takım olmak üzere iki farklı matkap türü, farklı ilerleme ve kesme hızı değerleri ile gerçekleştirmiştir. Cam elyaf takviyeli kompozitlerin delinebilirliği ilerleme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne

göre değerlendirildiğinde TiAlN kaplı takımların daha düşük değerler elde etmiştir. Ayrıca deneylerde kaplamalı matkap kullanılarak 120 m/dk kesme hızında ve 0,06 mm/dev ilerleme hızında %10 cam elyaf katkılı poliamidin en düşük yüzey pürüzlülük değerinin 0,88 μm olarak ölçmüştür. Ayrıca kaplamalı olan matkapların kaplmasız matkaplara göre daha olumlu sonuçlar elde ettiğini görmüştür.

Kırhasanoğlu ve Turgut (2021), yaptıkları çalışmada, karbon elyaf takviyeli polimer kompozitler üzerinde delme yaparak delik çıkış hasarı, matkap uç açısı, matkap helis açısı, kesme hızı ve ilerleme miktarına bağlı olarak araştırma yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda kesme hızı arttırıldığında delaminasyon oranının azaldığını, ilerleme hızı arttırıldığında ise delaminasyon oranının arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca en yüksek kesme hızı 100 m/dk ve en düşük ilerleme hızı 0,05 mm/dev ile 118° uç açısı ve $22,5^\circ$ helis açısına sahip matkapla en düşük delaminasyon değerinin elde edildiğini gözlemlemişlerdir.

Koyunbakan ve ark. (2021), yaptıkları çalışmada cam elyaf takviyeli kompozitleri farklı kesme parametreleri (kesme hızı, ilerleme) ve farklı çaplardaki matkaplar kullanarak delme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçları için Taguchi L_9 methodunu kullanmışlardır. Kesme hızı, ilerleme hızı ve matkap çapındaki değişikliklerin ilerleme kuvvetini etkilediğini belirtmişlerdir. Delik girişindeki deformasyon üzerinde kesme hızının %19,79, matkap çapının %55,54, ve ilerlemenin %6,65 oranında etkili olduklarını belirlemişlerdir. Delik çıkışındaki deformasyonda ise matkap çapının %12,30, ilerleme oranının %48,76 ve kesme hızının %35,78 oranında etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

3. KOMPOZİT MALZEMELERİN TANIMI VE YAPISI

Kompozit malzeme, iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilerek oluşturduğu bir malzemedir. Bir kompozit basitçe "makroskopik ölçekte arayüzde birbirinden farklı iki veya daha fazla bileşenden oluşan bir malzeme" olarak tanımlanabilir. Kompoziti oluşturan bileşenler genellikle özelliklerini korurlar (Rosato, 1997).

Kompozitlerde takviye olarak farklı yapıdaki malzemeler kullanılmaktadır. Takviye malzemesi kullanımının temel nedeni; malzeme üzerindeki yükleri taşıyarak matrisin rijitlik ve mukavemetini arttırmaktır. Kompozitlerde matrisin rolü, çoğunlukla kırılğan ve kırılğan olan takviye elemanlarını dış ve çevresel etkilerden korumak, kompozit üzerine gelen yükleri takviye elemanlarına aktarmak ve tüm kompozit yapıyı bir arada tutmak olarak açıklanabilir. Kısaca, bir malzemenin kompozit malzeme gereksinimlerini karşılayabilmesi için; doğal olarak oluşmayan, belli bir amaç için bir araya gelen, bileşenlerinin birbirini çözmeyen, bileşenlerinin kendi başına sahip olamadığı özellikleri gösterebilecek bir malzeme olması gerekmektedir (Sönmez, 2009).

Tarih boyunca, binlerce yıl önce samanla güçlendirilmiş kerpiç bloklar olarak evlerin yapımında kompozit bir malzeme gibi kullanılmıştır. 1930'lu yıllarda Amerika Birleşik Devletleri'nde cam elyafının keşfi ile modern kompozitlerin üretimi başlamış ve cam elyaf takviyeli kompozitler küresel pazarda yer edinmiştir (Kaya, 2016).

3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Özelliklerini ve kullanım alanlarını daha iyi anlayabilmek için kompozit malzemeleri belirli başlıklar altında toplayarak incelemek gerekmektedir. Kompozit malzemeler, kompozit yapıyı oluşturan malzemelere ve yapım yöntemlerine göre iki türe ayrılabilir. Kompozit malzemeler, matris malzemelerine ve takviye elemanlarına göre iki şekilde sınıflandırılır.

3.1.1. Matris malzemeye göre kompozit malzemenin sınıflandırılması

Matris fazı ana bileşendir, ürüne nihai şeklini verir ve takviye malzemesini bir arada tutarak onu dış ortamdan korur. Bir yük uygulandığında, herhangi bir hasara yol açmadan, yükü arayüzey yoluyla takviye elemanına aktarır. Matris, kompozitlerin darbe, dayanım ve tokluk gibi mekanik özellikleri için çok önemlidir.

Matris fazında arzu edilen özellikler: liflerin uygun şekilde sarılması sayesinde çok iyi sarmal, yüksek mukavemet, yüksek elastik uzama, yüksek kayma mukavemeti, düşük servis sıcaklıklarında sürünme, yüksek tokluk ve darbe mukavemeti, düşük termal iletkenlik ve iyi takviye malzemeleri kombinasyonudur. Kompozit malzemeleri matrislerine göre üç kategoriye ayırabiliriz: seramik, metal, polimer matrisli kompozitler.

3.1.1.1. Metal matrisli kompozitler

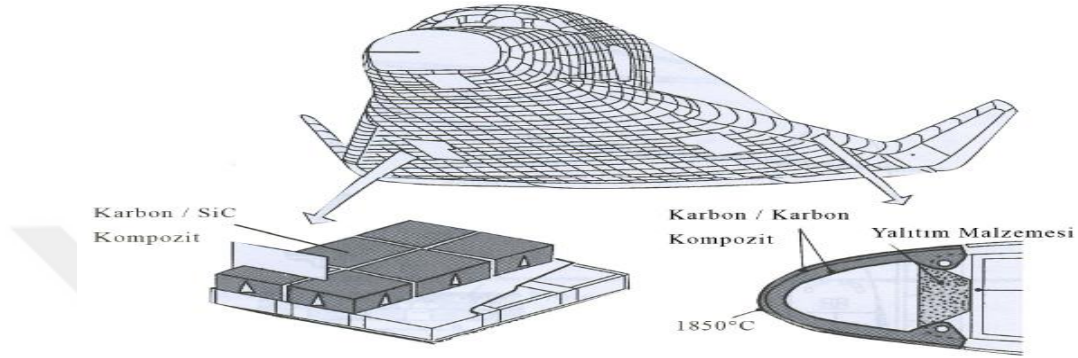
Metal matrisli kompozitler (MMK); en az biri metal olmak üzere iki veya daha fazla farklı malzemenin istenilen ve gerekli özellikleri sağlayacak şekilde sistematik olarak bir araya getirilmesiyle üretilen malzemelerdir. Matris malzemesi olarak metalin seçilmesinin ana nedeni; yüksek sıcaklıklarda çalışabilmeleri, yüksek basınç, eğilme ve çekme mukavemetlerine sahip olmaları, genel tokluklarının iyi olması, yüksek mukavemet/yoğunluk, yorulma ve farklı termal özellikler sergilemeleridir. Bu özellikleri dışında elektriksel ve ısı iletkenlikleri oldukça yüksektir, konvansiyonel metal üretim yöntemleri ile üretilebilirler, nemden etkilenmezler ve yanmazlık sergilerler ki bu da matris malzemesi olarak metalin seçiminde önemli rol oynamaktadır. Bazı metaller, lifler veya parçacıklarla takviye edilerek kompozit hale getirilebilir. Örnek olarak tungsten alaşımlarından yapılan fiber takviyeli metal alaşımlı kompozitler 1000 °C'ye kadar sıcaklıklara dayanabilmektedir ve bu kompozitler jet motorlarında kullanılmaktadır (Şahin, 2000).

3.1.1.2. Seramik matrisli kompozitler

Seramik matrisli kompozitler (CMK'ler); mükemmel fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı potansiyel adaylar olarak ortaya çıkmışlardır. Düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve rijitliklerine rağmen çok kırılgeandırılar, yani plastik olarak akmazlar. Kırılgeanlıkları seramikleri potansiyel olarak güvensiz hale getirir. Ayrıca seramikler genel olarak yüksek ısı ve kimyasal dirence sahiptir. Ancak yüksek erime sıcaklıkları ve sertlikleri, bunların işlenmesini zorlaştırır. Maliyetinin yüksek olması nedeniyle seramik matrisli kompozitlerden yapılan malzemelerin daha özenli ve düzgün bir şekilde tasarlanması gerekmektedir (Şahin, 2000).

Seramik yapılarda çatlaklar, çizikler, mikro çatlaklar ve kabarcıklar ciddi sorunlara neden olabilir. Elde edilen sonuçlarda, son yıllarda seramik matrisli

kompozitler alanındaki genel çalışma eğilimi, dayanıklı seramik kompozitlerin üretimine odaklanmıştır. Güçlendirici malzemelerle güçlendirilmiş seramikler, kullanım alanlarını genişletir. Seramik matrisli kompozitlerde takviyeler süreksiz ve sürekli şeklinde iki kısma ayrılmaktadır. Sürekli elyaf ile takviyelendirilen seramikler daha yüksek tokluğa sahip olmalarından dolayı ön plana çıkmaktadırlar. Seramik matrisli kompozit örneği Şekil 3.1’de verilmiştir (Ersoy, 2001).



Şekil 3.1. Uzay mekiklerinde kullanılan seramik matrisli kompozit örneği (Gay, 2007)

3.1.1.3. Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer matris kompozitler, genel olarak petrokimya tabanlı ürünlerdir ve kompozit uygulamaları içerisinde en çok kullanılan kompozit türüdür. Korozyona dayanıklı, uzun ömürlü, kolay işlenebilir, şekillendirilebilir ve birim kütle başına yüksek yük taşıma kapasitesine sahiptirler. En yaygın kullanılan ileri kompozitler, takviye elemanı olarak fiberlerle (grafit, aramid, boron gibi) takviye edilmiş bir polimer reçineden (epoksi, polyester, üretan gibi) oluşan grafit/epoksi gibi polimer matrisli kompozitler (PMK)’dir. Hammaddelerin genel olarak ucuz oluşu ve ayrıca çok komplike ve devasa parçaların bile kolaylıkla üretilebiliyor olması tercih edilmesindeki sebeplerden biridir (Vasiliev ve Morozov, 2001).

Polimerler termoset ve termoplastik olarak 2 farklı gruba ayrılmaktadır (Kickelbick, 2006). Polimer kompozitlerde takviye ilavesi kompozite dayanım ve sertlik kazandırırken, matris ise korozyon dayanımını arttırma, gelen yükleri iletme ve yapısal bütünlük gibi roller oynar. PMK'nın ana dezavantajları, düşük çalışma sıcaklığı, yüksek termal ve nem genleşme katsayıları ve belirli yönlerde düşük elastikiyettir.

Termoplastik Malzemeler; Termoplastik matrisler, düşük sıcaklıklarda serttirler ve ısıtıldıkları zaman yumuşarlar. Oluşması için ısıya ihtiyaç duyan termoplastik

malzemeler soğutulduklarında şeklini korurlar. Bu plastikler, özelliklerinde herhangi bir önemli değişiklik olmaksızın tekrar tekrar ısıtılarak yeni şekillere dönüştürülebilir ve işlem sırasında herhangi bir kimyasal farklılığa uğramazlar. Uygun çözücüler içinde çözülebilir ve bu şekilde çeşitli şekillerde kalıplanabilirler. Bu onlara yeniden şekillendirilme yeteneği sağlar. Termoplastikler amorf veya yarı kristal olabilir. Amorf termoplastiklerde moleküller rastgele dizilmiştir. Kristal bölgede, moleküller sıkı bir şekilde paketlenmiş düzenli bir yapı içindedir (Kaya, 2015).

Termoplastikler, birbirine bağlı uzun karbon atomu zincirlerine sahiptir. Termoplastik polimerlerdeki uzun moleküler zincirler, ikincil bağlarla bağlanır. Termoplastiklerdeki moleküller çapraz bağlanamazlar ve doğrusal yapıdadır. Termoplastik grubunu oluşturan en önemli plastikler naylon, akrilik polistiren, polietilen, selüloz ve vinildir (Yalçın ve Gürü, 2002).

Termoset Malzemeler; Daha çok elyaf takviyeli kompozitlerde kullanılan termoset matrisler, sıvı formda bulunurlar. Malzemenin mekanik özelliklerini büyük ölçüde geliştirir, büyük ölçüde geliştirilmiş kimyasal ve ısı direnci ile birlikte yapısal bütünlük sağlar. İzotropik olan termoset reçineler, elyaf takviyeli kompozitlerde genellikle düşük viskoziteye sahip olmaları tercih edilir. Poliamidler, kalıplanabilen ve en yüksek ısı direncine sahip plastiklerdeki yüksek moleküler ağırlıklı polimerlerdir (Itoh, 2002).

Termoset plastikler, kimyasal reaksiyonlarla kalıcı olarak şekillendirilip kürlendikten sonra, ısıtılarak yeniden şekillendirilemezler. Çok yüksek sıcaklıklara ısıtıldıklarında ayrışırlar. Bu sebeble polimerleşmiş halde ısıtılarak kalıplanırlar. Kalıplama sırasında polimerizasyon gerçekleşir ve plastik çapraz bağlar akışkanlığını kaybeder. Bu sebeble termosetler tekrardan üretim sürecine girmezler (Yalçın ve Gürü, 2002).

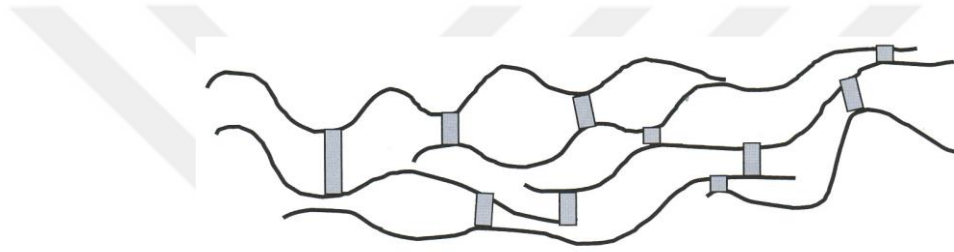
Termoset plastiklerin mühendislik alanlarında tercih edilmesini sağlayan özellikler şunlardır:

- Yüksek termal kararlılık,
- İyi sertlik,
- İyi dercede boyutsal kararlılık,
- Yük altında sürünme ve deformasyona karşı kararlılık,
- Hafiflik,

- Yüksek elektrik ve ısı yalıtımı özellikleri.

Termoset plastikler genellikle sıkıştırma veya transfer kalıplama yöntemleri ile şekillendirilir. Bununla birlikte, bazı durumlarda, kalıplama maliyetlerini azaltmak amacıyla termosetler için enjeksiyon kalıplama yöntemleri geliştirilmiştir.

Katılaşmadan önce, tek tek moleküllerden oluşurlar ve kürlenme sonrası meydana gelen kimyasal reaksiyonlar sonucu Şekil 3.2'de gösterildiği gibi çapraz bağlanarak oluşan üç boyutlu bir ağ yapısındadırlar. Fiziksel ve mekanik özellikleri, üç boyutlu ağ yapısını ve moleküller arası bağları oluşturan moleküllerin özelliklerine bağlıdır ve polimerizasyon safhasında çapraz bağ işlemi ile kontrol edilebilir. (Şahin, 2006).



Şekil 3.2. Termoset polimer zincirlerin çapraz bağlanması (Biron, 2007)

3.1.2. Takviye Elemanlarına Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerde takviye elemanlarının temel görevi; yükleri taşıyarak matrisin rijitliğini ve mukavemetini arttırmaktır. Malzeme de olması istenen yapı kovalent veya kovalent iyonik bağların karışımı olan yüksek mukavemetli, düşük yoğunluklu bir yapıdır. Bununla birlikte, bu malzemeler ince lifler haline getirildiğinde, yüzeyde daha az kusur görülür ve aslında tüm lif daha güçlüdür (Şahin, 2006).

Mühendislik uygulamalarında yer alan takviye malzemelerinin çoğunluğu lif olarak üretildiğinden katı halde yaklaşık 30 ila 50 kat daha güçlü, 3 kat daha rijit olup, kütle performansından daha yüksek performans sergiler. 5-20 μm çapındaki fiberlerin kompozit malzemelerin mühendislik performansını etkileyen en önemli faktörlerden biri olduğu iyi bilinmektedir. Ek olarak, elyaf şekli, uzunluğu, yönelimi, matrisin mekanik özellikleri ve yeterli elyaf/matris arayüz bağı gereklidir (Şahin, 2006).

Takviye elemanları, kompozit malzemeyi oluşturan ve kompozit malzemeye binen yükün büyük bir kısmını taşıyan en önemli elemanlardan biridir. Yükün elyaflara iletilmesi için fazlar arasındaki fiziksel ve kimyasal uyumun iyi olması ve arayüzey

bağlarının güçlü olması gerekmektedir. Takviye elemanının termal genleşme katsayıları ile matris arasındaki koordinasyon, kalıcı yapısal gerilmelerin gelişimi için önemlidir (Şahin, 2006).

Kompozit malzemeler üretilirken; takviye elemanlarının seçimi, üretim yöntemi, elyafların üretim sırasında matris tarafından ıslanma kabiliyeti, yönelimi ve lif içeriği, kompozitin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemektedir. Bu sebeplerden dolayı takviye elemanlarının seçimi ve özellikleri iyi bilinmelidir. Elyafalarda aranan özellikler aşağıdaki gibidir

- Yüksek elastisite modülü,
- Yüksek mukavemet,
- Düşük yoğunluk,
- Kimyasal uygunluk,
- Kolay üretilebilirlik,
- Isı direnci gibi kriterlere göre belirlenmelidir.

Elyaf üretimi üç yolla yapılır. Bunlar;

- Ergiterek liflendirme,
- Katı hal transformasyonu,
- Kimyasal buhar biriktirme yoludur.

Takviye elemanı olarak kullanılan bazı takviye elemanlarının tipik özellikleri Tablo 3.1'de gösterilmektedir.

3.1.2.1. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler

Sünekliği, eğilme ve darbe dayanımı düşük kırılğan matris malzemelerinin zayıf teknik özelliklerini iyileştirmek, mekanik özelliklerini iyileştirmek gibi amaçlarla elyaflara takviye edilmesiyle yapılan yapılardır. Bir elyaf, enine kesit/uzunluk oranı en az 1:100 olan ve rijit olmasına rağmen kalıplanacak kadar esnek olan bir malzeme olarak tanımlanabilir. Farklı türleri ve çeşitleri vardır. Dış yükleri ve kuvvetleri taşırlar. Elyaf takviyeli kompozitin iç yapısı Şekil 3.3'te verilmiştir (Ersoy, 2001; Saçak, 2002).

Elyaf dağılımı kompozitin gücünü belirler. Fiber çapı ve uzunluğu arttıkça, matristen fibere aktarılan yük artar. Elyafların kusursuzluğu, malzemeye tekdüze özellikler verir. Matris malzemesi miktarına bağlı olarak belirli bir oranın üzerinde takviye kullanımı teknik performansın düşmesine yol açabilmektedir. Polimer

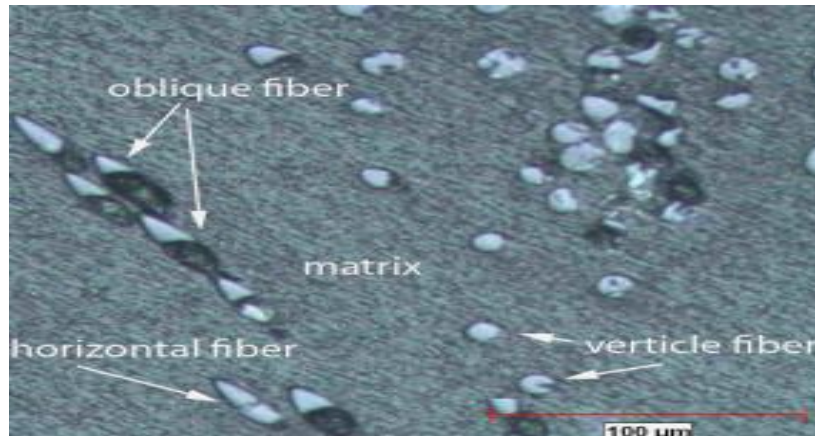
matrisin kısmen işlevsellik kaybı bile, malzemeyi işlevini yerine getiremez hale getirir çünkü kompozitte lifleri bir arada tutamaz (Saçak, 2002).

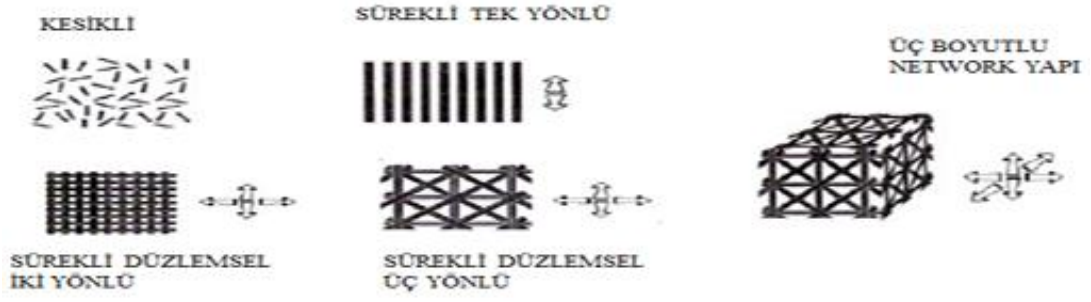
Elyaf boyutu kompozit malzemelerin performansını doğrudan etkileyen özelliklerden biridir. İnce liflerden oluşan kompozitlerde polimer matrisin ıslattığı alan daha fazladır. Polimerin elyaf kavisli yüzeyinin arttırılması, elyaf matris etkileşimlerinin artmasına yol açacaktır. Bu sayede kompozit yapı içerisinde daha dengeli bir yük ve kuvvet dağılımı sağlanmaktadır. Elyafların bir araya getirilmesiyle oluşan demetler, elyafların üretildiği polimerin toplu halinden daha güçlü bir yapıya sahiptir. Demetlenmiş elyaflara etki eden yükler ve kuvvetler, elyaf kırılması ve kopması gibi hasarlara neden olabilse de, kusurlar hala etkilenen elyaflarla sınırlıdır (Saçak, 2002).

Elyafların yapı içindeki dağılımı da (Şekil 3.4) yapının mukavemetini etkileyen önemli noktalardan biridir. Uzun liflerin birbirine paralel yerleştirilmesi, lif yönü boyunca etki eden kuvvetlere karşı yüksek gerilme mukavemeti sağlar, ancak lif yönüne dik etkiyen kuvvetlere karşı koymak için yeterince güçlü değildir. İki boyutlu elyaf konulması durumunda her iki yönde de aynı miktarda mukavemet sağlanır. Bu nedenle kısa boyutlu liflerin kullanılması kompozitlerde izotropik yapıların oluşmasına olanak sağlar. Kompozitin kullanım alanına göre fiberlerin yerleşimi nedeniyle farklı yükler için farklı direnç davranışları geliştirilebilir (Aran, 2007-2008).

Tablo 3.1. Seçilen takviye elemanlarının bazı mekanik özellikleri (Şahin, 2021)

Malzeme Cinsi	Yoğunluk (kg/m ³)	Elyaf çapı (μm)	Elastik modülü (GPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Özgül elastik modülü (GPa-m ³ /kg)	Özgül çekme dayanımı (MPa-m ³ /kg)
E-camı	2500	12	70	1500-2000	0,0280	0,700
S-camı	2600	10	90	4600	0,0346	1,7692
Karbon	1800	7-10	400	2000-2800	0,2222	1,3333
Karbon (YD)	1700	7-10	200	3000-3500	0,1176	1,9117
Karbon (Mesa-faz)	1900	7-10	220	3200	0,1157	1,6842
Basalt	2700	10-17	89	2800-4800	0,032	1,037-1,777
Bor	2600	140-160	400	3400	0,1538	1,3076
Al ₂ O ₃ (FP)	3950	20	380	1400-2100	0,0962	0,4050
Al ₂ O ₃	3300	3.0	300	2000	0,0909	0,6060
Al ₂ O ₃ /SiC	3100	10	206	1700	0,0664	0,5483
Silisy. Karbür	3200	1-50	480	7000	0,1500	2,1875
SiC (Nicalon)	2250	12	200	2500	0,0888	1,1111
Aramid fiber	1400	12	124	1379	0,08857	0,985
Kevlar-29	1400	12	62	3100	0,04428	2,2142
Kevlar-49	1400	12	131	3620	0,09357	2,5857
Aluminyum	2700	-	69	276	0,02555	0,102
Çelik	7800	-	207	648	0,02653	0,083
Cam epoksi kompozit (Tek yönlütakviyeli)	1800	10	38.60	1062	0,02144	0,590
Grafit-epoksi kompozit (Tek yönlü)	1600	7-10	181	1500	0.1131	0.937

**Şekil 3.3.** Elyaf takviyeli kompozitin iç yapısı (Ateş 2011)



Şekil 3.4. Kompozit malzeme içerisindeki elyafların dağılımı (Saçak, 2002)

Cam elyaf

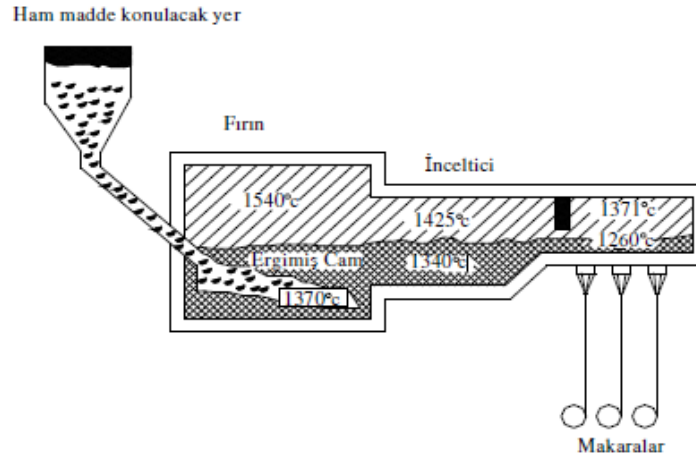
Cam elyaf esas olarak silikon dioksit (SiO_2)’den oluşmaktadır. Diğer bileşenler ise sodyum (Na), kalsiyum (Ca), Magnezyum (Mg), Alüminyum (Al), Baryum (Ba) ve Demir (Fe) gibi elementlerinin oksitlerinden meydana gelir. Polimer kompozitler içerisinde kullanılan en yaygın ve ucuz takviye elemanıdır. Tablo 3.2’de bazı cam cinslerine ait bilgiler verilmiştir.

Tablo 3.2. Camların cinsleri ve bileşimleri (Şahin, 2021)

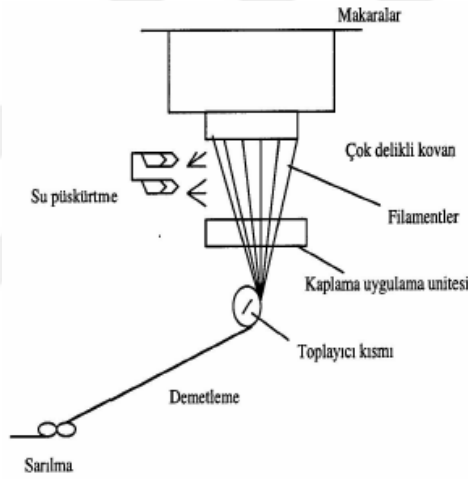
Malzeme cinsi	Formülü	E-camı	S-camı	C-camı
Kum	SiO_2	52,4	64,4	64,6
Al ve demir oksit	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$	14,4	25	4,1
Kalsiyum oksit	CaO	17,2	-	14,3
Magnezyum oksit	MgO	4,6	10,3	3,3
Potasyum oksit	Na_2O	0,8	0,3	9,6
Baryum iki oksit	B_2O_3	10,6	-	4,7
Baryum oksit	BaO	-	-	0,9

Cam elyaf üretimi için öncelikle hammadde elektrikli ocakta 1200-1500 °C civarında eritilir. Erimiş malzeme daha sonra bir soğutma bölgesine girmeden önce platin alaşımlı potanın tabanındaki binlerce delikten geçer.

Polimer kompozitlerdeki E-Cam; bor silis olup, elektrik yalıtımı iyidir. S-camı daha pahalı ancak daha yüksek modüle sahiptir. Bunun sebebi Mg ve AlSi içermesidir. C-camı, kimyasal özelliği ve korozyon direnci iyi olduğundan depolama tanklarının yapımında kullanılır fakat mekanik özellikler açısından yeterince iyi değildir. Camın mukavemeti, yüzey kusurlarına ve mikro çatlaklarla ilişkilendirilir. Cam elyafın kısmi üretim aşamaları ise Şekil 3.5’te ve 3.6’da gösterilmiştir (Deak ve Czigancy, 2009).



Şekil 3.5. Cam elyafın üretim aşaması (Şahin, 2021)



Şekil 3.6. Cam elyafın üretim sonrası aşamaları (Şahin, 2021)

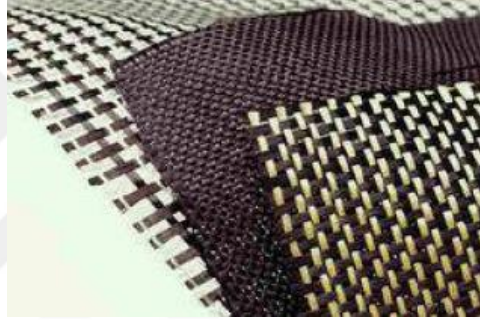
E-camı: Takviye elyaflarının içerisinde en fazla kullanılan cam türüdür. Maliyeti düşük, yalıtımı yüksek ve düşük su emiş oranı gibi özelliklere sahiptir.

S-camı: Yüksek performanslı fakat yüksek maliyeti olan bir malzemedir. Yalnız hava sanayisinde kullanılır. Elyaf içinde bulunan tellerin çapları E-Cam'a göre daha küçüktür, bu sebeple elyaf sayısı artar ve sert yüzey elde edilerek birleşme özellikleri daha güçlü hale gelir.

C-camı: Kimyasal direnci yüksektir. Depolama tankı gibi yerlerde kullanılır. Mekanik özellikleri azdır.

Karbon elyaf

Karbonun elektriği çok iyi iletmesinin anlaşılması ile üretilmeye başlanmıştır. Cam elyafın sertliği metallere göre düşük olduğundan sertliğinin birkaç kat artırılması amacı vardı. Karbon elyafları çok yüksek bir ısı ile işleme tabi tutulduğunda, elyaflar karbonlaşır ve grafit elyafları haline gelir. Bir karbon elyaf epoksi matrisi ile birleştirildiğinde çok yüksek dayanıklılık ve sertlik özellikleri sergiler. Karbon elyaf üreticilerinin farklı geliştirme uygulamaları nedeniyle, karbon elyaf türleri de değişmektedir. Karbon elyafın (Şekil 3.7) yüksek üretim maliyeti kullanım alanını daraltmaktadır. Havacılık endüstrisi, spor ekipmanı veya tıbbi ekipman alanlarında kullanılır ayrıca değişik türdeki karbon elyaflar Şekil 3.8’de verilmiştir (Arıcasoy, 2006; Enşici, 2004).



Şekil 3.7. Karbon elyafı örneği (Enşici, 2004)

Karbon elyaflar 2 şekilde bulunmaktadır:

1. Sürekli elyaf: Bobin uygulaması, dokuma, örme ve tek yönlü bantta kullanılır, tüm reçinelerle uyumludur.

2. Kırpılmış elyaf: Mekanik parçalar ve kimyasal valfler yapmak için enjeksiyon kalıplama ve basınçlı kalıplamada yaygın olarak kullanılırlar. Ortaya çıkan malzeme çok iyi korozyon direnci ve yorulma direncinin yanı sıra yüksek mukavemet ve sertlik özelliklerine sahiptir. Karbon fiberler genellikle zift veya PAN'dan (poliakrilonitril) yapılır. Zift bazlı karbon fiberlerin mekanik özellikleri nispeten düşüktür. Bu nedenle yapısal uygulamalarda nadiren kullanılırlar. PAN karbon elyafına dört safhada dönüştürülmektedir:

1. Oksidasyon: Elyaflar, hidrojeni elyaftan ayıran ve onu daha uçucu oksijenle değiştiren 300 °C'de havada ısıtılır. Daha sonra karbonizasyon aşamasında elyaflar kesilir ve grafit fiçılara yerleştirilir. Polimer, bir merdiven yapısından kararlı bir halka

yapısına dönüşür. Bu aşamada elyafların rengi beyazdan kahverengiye ve ardından siyaha dönüşür.

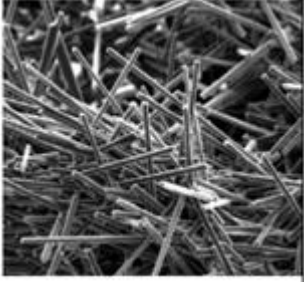
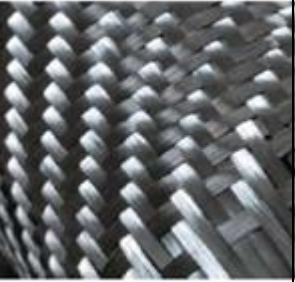
2. Karbonizasyon: Elyafın %100 karbonize olmasını sağlamak için elyaf, yanıcı olmayan bir atmosferde 3000 °C'ye kadar ısıtılır. Karbonizasyon sırasında uygulanan sıcaklık, üretilen elyafın türünü belirler.

3. Yüzey iyileştirmesi: Karbon yüzeyini temizlemek ve liflerin kompozitin reçinesine daha iyi yapışmasını sağlamak için bir elektrolitik banyoda biriktirilir.

4. Kaplama: Sonraki işlemlerde elyafların aşınmasını önleyen nötr bir bitim işlemidir. Elyaf lar reçine ile kaplanmış tır. Bu kaplama işlemi için yaygın olarak epoksi malzemeler kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerde kullanılan reçine ve elyaflar arasında bir arayüz görevi görür. Karbon elyafın diğer tüm fiberlere göre en önemli avantajı yüksek modül özelliğidir. Karbon elyaf diğer malzemelere göre en sert malzemedir. Bununla birlikte, karbon fiberin de bazı dezavantajları vardır (Hancox ve ark., 1994).

Bunlar;

- Etkili bağlayıcı eksikliği,
- Yüksek sıcaklıklarda oksidasyona karşı hassastır,
- Yüksek fiyatlı olması.

			
(a) Kesikli elyaflar	(b) Çok/tek uçlu sürekli fitil bobin ve kırılmış karbon elyaf	(c) Karbon reçine emdirilmiş tabaka	(d) Dokuma veya keçe karbon elyaf

Şekil 3.8. Değişik türlerde elde edilmiş karbon elyaflar (Şahin, 2021)

Aramid elyaf

Aramid aromatik poliamitin isminin kısaltılmışıdır. Poliamitler uzun zincir yapısına sahip polimerlerdir. Aramid molekülü içerisindeki altı karbon atomu birbirine hidrojen atomu ile bağlanmıştır. Polimerler hem matris olarak hem de elyaf olarak kullanılırlar. Örneğin Kevlar çok hafif olup kompozit malzemeye yüksek dayanım ve sertlik kazandırır. Aramid elyafın doğal rengi genellikle sarıdır ve farklı uygulamalar için farklı özelliklerde üretilebilir. Kevlar günümüzde zırh, sağlam halat, yangın koruyucu giysi, çelik yelek ve miğfer yapımında kullanılmaktadır. Kevlar dokunabilir, üretilebilir, kesilebilir ve dikilebilir çünkü lifli yapısı yüksek çekme gerilimine dayanabilen liflerden oluşur (Gündoğdu, 2018).

Bor elyaf

Karbon elyaftan daha güçlü ve daha pahalı bir elyaf türüdür. Bor, oda sıcaklığında katı olan ikinci hafif elementtir. Çekirdek tel adı verilen ince bir tel üzerine borun kaplanmasıyla yapılır. Bu nedenle bor elyafı aslında başlı başına bir kompozit malzemedir. Kullanım amacına göre farklı çaplarda üretilebilir. Yüksek mekanik özelliklerinden dolayı havacılık endüstrisinde kullanılmaktadır. Sıcaklık direncini arttırmak için silisyum karbür veya boron klorür ile kaplanır. Ayrıca bor klorür kaplama, çekme mukavemetini büyük ölçüde artırır. Yüksek maliyeti nedeniyle karbon fiberden daha az kullanılır (Gündoğdu, 2018).

Alümina elyaf

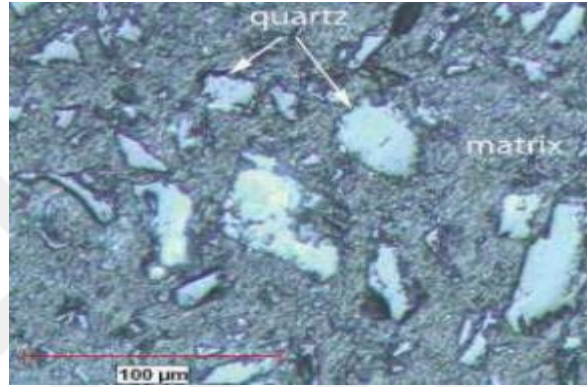
Alümina elyaflar, elyaf formundaki alümina filamentlerin SiO_2 ile kaplanmasıyla elde edilir. Alümina lifler düşük çekme dayanımına sahip olmalarına karşın, yüksek basınç dayanımına sahiptirler. Yüksek sıcaklık dayanımından dolayı uçak motorlarında da kullanılmaktadır.

Silisyum karbür elyaf

Bu elyaflar genellikle bir titanyum matris ile birlikte kullanılır. Silisyum karbür elyaf titanyum, alüminyum ve vanadyum alaşımlı matrisler ile jet motoru bileşenlerinde kullanılırlar. Bununla birlikte silisyum karbür elyaflar, bor elyaflardan daha yüksek bir yoğunluğa sahiptir. Bir karbon çekirdeğe silisyum karbür kaplanarak yapılan elyaflar düşük yoğunluğa sahiptir (Şahin, 2021).

Parçacıklı kompozitler

Matris malzemesi içinde parçacıklar halinde bulunan başka bir malzeme tarafından elde edilirler. Bu tür kompozit malzeme, bir boyutlu veya iki boyutlu mikroskobik parçacıklardan veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen mikroskobik parçacıklardan oluşan bir matrisin oluşturduğu bir malzemedir. Ortalama gömülü parçacık boyutu 1 μm 'den büyüktür ve elyaf hacim oranı %25'i geçmez. En yaygın kullanılan parçacıklar, alümina ve silisyum karbürden oluşan seramiklerdir. Şekil 3.9'da parçacık takviyeli kompozitlerin içyapısı verilmiştir (Onat, 2015).



Şekil 3.9. Parçacık takviyeli kompozitlerin içyapısı (Ateş ve Aztekin, 2011)

Tabakalı kompozitler

Farklı özelliklere sahip en az iki katmanın bir araya getirilmesiyle oluşan malzemelerdir. Metalden daha hafif olması ve yüksek mukavemet değerlerine sahip olması nedeniyle oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Bununla beraber, birçok katmanlı kompozit aynı zamanda yüksek mukavemet ve aşınma direnci, mükemmel ısı direnci ve çok yönlü yük taşıma özellikleri sergiler. Katmanlı kompozit malzemeler daha çok uçak kanatları, kanatları ve kuyruk grupları için yüzey kaplama malzemeleri olarak kullanılmaktadır (Onat, 2015; Ünal, 2011).

Karma (hibrit) kompozitler

Aynı kompozit yapıda iki veya daha fazla fiber içeren kompozitlere hibrit kompozitler denir. Hibrit kompozitler, tek fiber kompozitlerden daha iyi kompozit özellikler sergiler. Karada, havada ve suda taşınan yapısal araçlarda, spor ekipmanlarında, hafif ve ortopedik bileşenlerde bulunur. Hibrit kompozitlere örnek verecek olursak, zırh, güçlü halat imalatı, yanmaz kalkan ve elektrik endüstrisi, dökümhane, izolasyon tesisleri, motorlar ve daha birçok alanda kullanılan grafitin

birleşimidir; Kevlar, ucuz ve sert bir elyafıdır. Çok düşük basınç dayanımına sahipken grafit, düşük tokluğa ancak çok yüksek basınç dayanımına sahip pahalı bir elyafıdır. Bu iki elyafın bir araya gelmesiyle oluşan hibrit kompozitler, grafitte göre daha yüksek tokluk değerlerine, daha düşük maliyete ve kevlar elyaf kompozitlere göre daha yüksek basınç dayanımına sahiptir (Zor, 2008).

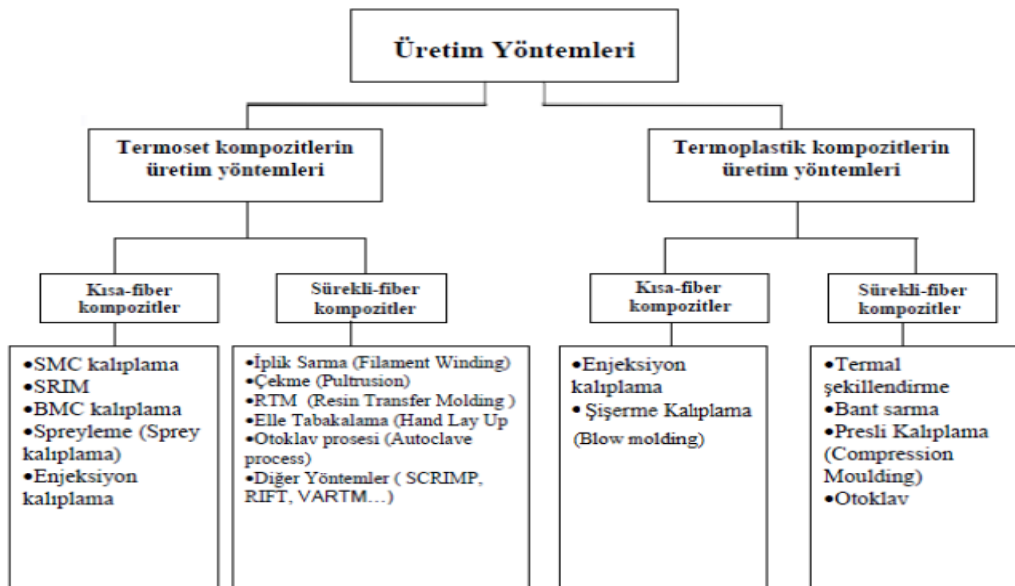
3.2. Elyaf Katkılı Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemeler, bileşen malzemelerinin en yüksek performansı ile üretilmekte ve bileşenlerinin zayıf yönlerini istenilen doğrultuda en üst düzeyde iyileştirmektedir.

Kompozit malzemelerin üretimi, gerekli özellikler dikkate alınarak gerçekleştirilir. Böylece kullanılan matris ve elyafların özelliklerine uygun bir kompozit malzeme üretilmiş olur. Kompozit malzemeler üretilirken farklı alanlardaki kullanımlarını karşılamak için birçok farklı üretim yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemlerin her birinin çeşitli avantajları ve bazı faydaları vardır. Bu nedenle uygun bir üretim yönteminin benimsenmesi nihai ürünün kalitesini etkileyen önemli parametrelerden biridir (Aktaş, 2010).

En çok kullanılan üretim yöntemlerinden bazıları aşağıdaki Tablo 3.3'te gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Kompozit malzeme üretim yöntemleri şeması (Mazumdar, 2002)

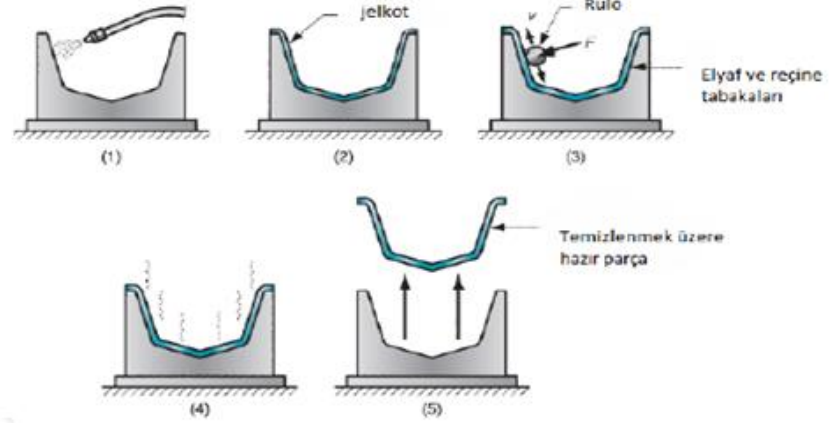


3.2.1. El yatırma yöntemi

Kompozit üretiminde en eski ve en sık kullanılan yöntemlerden biridir. Emek yoğun olmasına rağmen küçük miktarlarda büyük parçalar üretmek için tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde herhangi bir ısıyla sertleşen reçine (polyester, vinil ester, fenolik üretilen, epoksi) kullanılabilir. Takviye olarak bilinen lifler (cam, karbon, aramid) kullanılabilir. Ancak ağır aramid liflerinin bu yöntemle reçine emdirilmesi oldukça zordur.

Başlangıçta kalıbın yüzeyi, ayırıcı madde ile tamamen kaplanacak şekilde iyice parlatılır. Bu işlem parçanın kalıptan kolayca ayrılması için çok önemlidir. Yoğun kullanım, ürün yüzeyinin bozulmasına neden olabilir. Daha sonra jelkot yüzeye sürülür ve kurumaya bırakılır. Bundan sonra, kalıbın yüzeyine cam elyafı yerleştirilir ve bir fırça ile reçine ile emprenye edilir. Burada, reçinenin jelleşme süresini ayarlamak için hızlandırıcılar ve peroksitler reçineye karıştırılır. Bu işlemin amacı, jelleşme süresi boyunca hava kabarcıklarını önleyerek polyesterin cam elyafına kurlenmeden uygulanmasını sağlamaktır. Bu işlem sırasında cam elyafını polyestere batırmak için fırçalar, hava kabarcığı oluşumunu önlemek için çeşitli boyutlarda rulolar kullanılır. İlk katı yaparken hava kabarcığı oluşmamasına dikkat ederek bitirilir, ardından diğer katlara da aynı işlemi uygulayarak istenilen kalınlıkta laminat elde edilir. Çeşitli dolgular, istenirse boyalar; ahşap veya metal ekler içerebilir. Ardından sistemin kurlleme sürecine geçmesi beklenir. Kurlleşme 1-2 saat içerisinde tamamlanır. Kurlleşme süresini kısaltmak için yapılması gereken, ortam sıcaklığını yükselterek stirenin uçuculuğunu arttırmaktır. Bu işlemlerden sonra ürün kalıptan çıkarılır, çapakları alınır ve kullanılacağı yere göre test edilerek istenilen ebatta kesilebilir (Başbudak, 2003).

Bu üretim aşamasında takviye elemanı olarak kullanılan malzemeler, keçe ve cam elyaf kumaşlardır. Tekneler, depolar, otomobil parçaları, makine parçaları, rüzgar türbin kanatları, tekne imalatı, bazı mimari kalıp uygulamaları ve birçok teknik parçanın tamamı el yatırması yöntemi (Şekil 3.10) ile üretilmektedir.

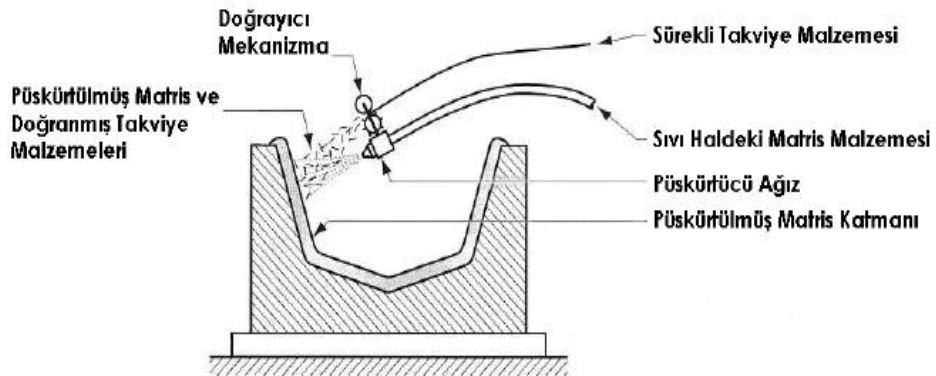


Şekil 3.10. El yatırma yöntemi (Groover, 2014)

3.2.2. Püskürtme yöntemi

El yatırması yönteminin alet ile yapılan şekli olarak kabul edebileceğimiz püskürtme yönteminde (Şekil 3.11) sadece kırılmış elyaf kullanılmaktadır. Özel bir tabanca yardımı ile kırılmış elyafların kalıp yüzeyine, sertleştirici eklenmiş reçine uygun hızda püskürtülür. Tabanca üzerinde bulunup bağımsız çalışan bir kırıcı ile elyafın kırılma işlemi yapılır. Kullanılabilecek elyaf miktarı %35 ile sınırlı tutulmalıdır, çünkü %35'ten daha fazla cam elyaf kullanıldığında ıslanma tam olmamaktadır ve reçine tüm cam alyafı sürükleyememektedir. Oluşacak hava kabarcıklarını gidermek ve laminatın tamamen ıslanabilmesi için malzeme kalıp üzerine püskürtüldükten sonra, rulolama işlemi yapılır (Aricasoy, 2006; Enşici, 2004).

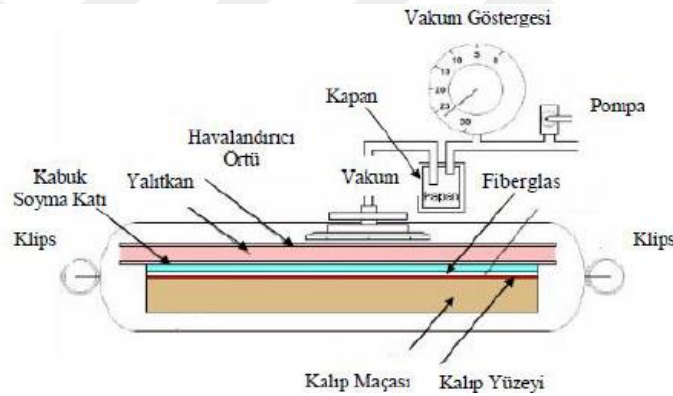
Püskürtme yöntemi basit ve düşük maliyetli olmasının yanı sıra boyut sınırlaması olmadan kompleks parçalar da üretilebilir. Otomotiv kaportası, kayak, küvet ve yüzme havuzların yüzey kısımları bu yöntemle kaplanır (Aktaş, 2010).



Şekil 3.11. Püskürtme yöntemi (Akovali, 2021)

3.2.3. Vakum kalıplama

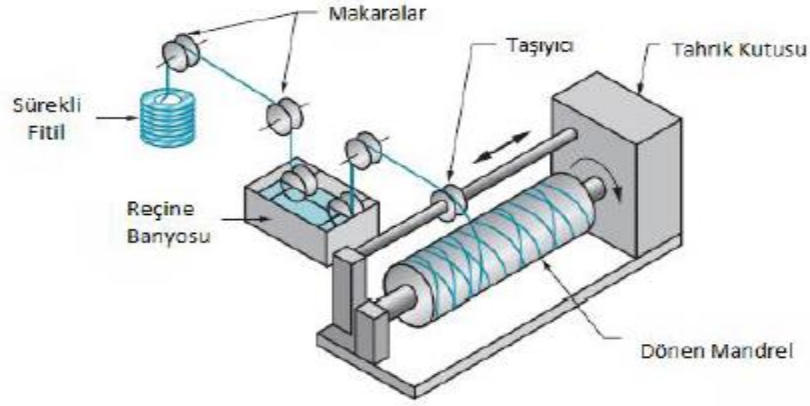
Bu yöntemde polyester ve vinilester reçine uygulandığında fazla oranda stirenin reçineden çıkarılmasına sebebiyet verir ve polimerleşmeyi engeller bunun için epoksi ve fenolik reçine kullanılması uygundur. Vakum şekillendirme beş aşamadan oluşur. Birinci aşamada kalıp ayırıcı emprenye edildikten sonra kumaş yüzeye yerleştirilir ve reçine-sertleştirici karışımı rulo veya fırça ile emprenye edilir. Daha sonra lamine yapının üstüne delikli bir bariyer filmi yerleştirilir. Bununla birlikte, havanın kaçmasına izin veren ve fazla reçineyi tutmak için kullanılan diyaframın üzerine kumaş yerleştirilir. Reçine emdirilmiş yapının dış ortamdan izole edilmesi için plastik vakumlu membranlar ve çift taraflı yapışkan mastikler kullanılmıştır. Vakumlama işlemi (Şekil 3.12) vakum pompası kullanılarak yapılır ve daha sonra malzeme pişirilir. Vakum şekillendirmede polimerizasyon, X-ışınları, bir fırın veya bir otoklav (ısı ve basıncın bir kombinasyonu) kullanılarak elde edilir (Akovali, 2001).



Şekil 3.12. Vakumla kalıplama yönteminin görseli (Turgut ve ark., 2007)

3.2.4. Elyaf sarma yöntemi

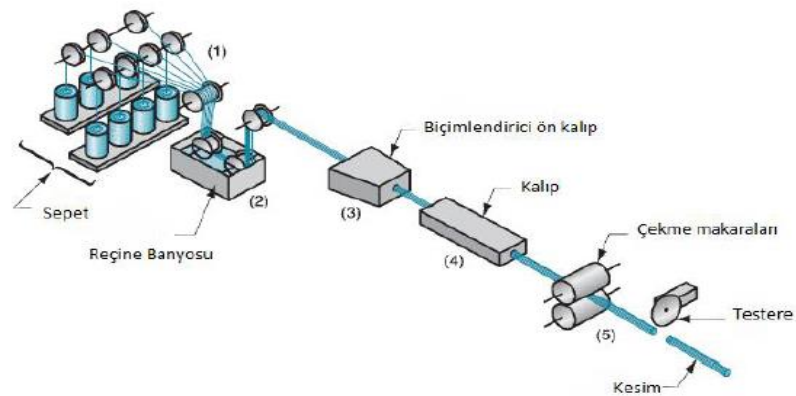
Özel şekilli ürünlerin seri üretimi için uygundur. Filament sarımında elyaflar sürekli reçine ile ıslatılır ve bir makaradan çekilir ve dönen bir kalıba sarılır. Kalıbın farklı açılarda sarılmasıyla sürekli elyaflar elde edilir ve bu da farklı mekanik özelliklere sahip ürünlerle sonuçlanır. Yeterli sayıda elyaf tabakası sarıldıktan sonra ürün sertleşecektir. Döner kalıp daha sonra ayrılır. Bu yöntemle (Şekil 3.13) üretilen ürünler genellikle silindirik borular, otomobil dingilleri, su depoları, yat direkleri, dairesel basınç depolarıdır (Aricasoy 2006, Enşici 2004).



Şekil 3.13. Elyaf sarma yöntemi (Groover, 2014)

3.2.5. Profil çekme yöntemi

İlk olarak 1948'de kullanılan profil çekme, sabit kesitli kompozit profil ürünleri üretmek için düşük maliyetli, seri üretim yöntemidir. Sisteme eklenen elyaf, reçine ile ısıtıldıktan sonra 120-150 °C'ye kadar ısıtılan şekillendirme aleti ile sertleştirilir. Kalıplar genellikle krom kaplı parlak çelikten yapılır. Çok yüksek bir mekanik dayanım elde edilir. Bunun nedeni ise elyafların sürekli kullanılmasıdır. Cam elyaf miktarı %60-65 olmalıdır çünkü daha sonraki kullanımlarda elyafın ıslanması tam değildir. Yanal yükleri barındırmak için özel örgüler kullanılmalıdır. Profil çekme yöntemi (Şekil 3.14), endüstriyel levha profilleri, kapı ve pencere profilleri, otoyol korkulukları, elektrik sanayi levha profilleri ve diğer ürünlerin üretimi için uygundur (Onat 2015; Köksal 2012).

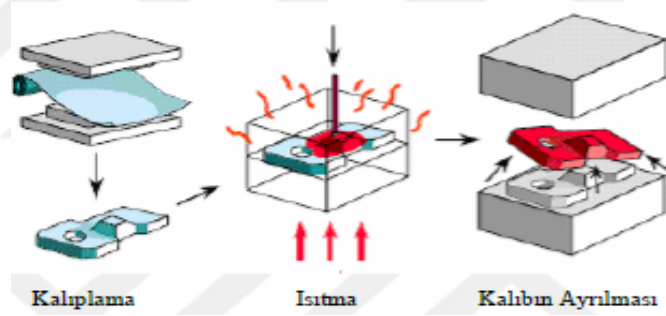


Şekil 3.14. Profil çekme yöntemi (Groover, 2014)

3.2.6. Reçine transfer kaplama

Sıvı transfer kalıplama yöntemi olarak da bilinen reçine transfer kalıplama prosesi (Şekil 3.15) (RTM) düşük maliyetli ekipman kullanımıyla maliyet açısından verimli parçaların üretimini sağlamaktadır.

Bu yöntemde iki parçalı bir kalıp kullanılır. Erkek ve dişi kalıplar arasına önceden kesilen veya şekillendirilen takviye boşluğu dolduracak şekilde yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Reçine, enjeksiyon kanalından gelen basınç altında kalıba pompalanır. Enjeksiyon basıncı genellikle 2,75-3,5 bar'dır. Matris enjeksiyon, soğuk, sıcak veya 80 °C'ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir. Bu yöntemde, iç hava vakum kullanılarak giderilebilir ve reçinenin elyaflara iyi bir şekilde nüfuz etmesi sağlanabilir. Elyafaların kalıba koyulması yoğun çaba sarfı gerektirmektedir. Kalıp kapalı olduğu için zararlı gazlar azaltılır ve gözeneksiz ürünler elde edilebilir. Karmaşık parçalar bu şekilde üretilir. Tıbbi cihazlar, rüzgar türbini kanatları, uçak bileşenleri, tekneler, depolama tankları ve daha fazlası gibi bileşenler bu yöntem kullanılarak hazırlanır (Yöney, 2007).



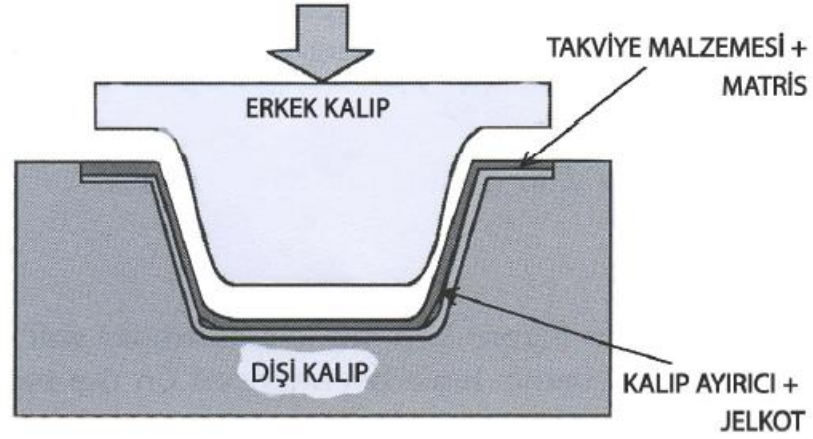
Şekil 3.15. RTM transfer kalıplama yöntemi (Park, 2004)

3.2.7. Basınçlı kaplama

Hazırlanan kalıp gövdesindeki cam elyaf, reçine, katkı ve dolgu malzemesi içeren bileşimin kalıp boşluğuna konularak kapalı erkek kalıbın basınç ve ısı yardımıyla ürün haline getirilmesidir (Şekil 3.16) (Sönmez, 2009).

Diğer kompozit üretim yöntemleriyle elde edilemeyen karmaşık şekillerin üretilmesi ve araç gövdesine metal parçaların gömülmesi gibi avantajlara sahiptir. Sıkıştırma kalıplamada, her iki yüzey de bir kalıpla oluşturulur. Kalıp yüzeyine jelkot ve kalıp ayırıcı uygulanarak, imal edilecek parçanın yüzey kalitesi iyileştirilebilir ve parça sorunsuz bir şekilde kalıptan çıkarılabilir. Kalıp metal olduğu için maliyeti daha fazladır. Büyük parçaların üretilmesi, büyük ve pahalı presler gerektirir. Diğer bir

dezavantaj, kalıplanmış parçaların buzdolabında saklanma zorunluluğudur (Sönmez, 2009).



Şekil 3.16. Basınçlı kalıplama yöntemi (Gay ve Hoa, 2007)

Hazır kalıplama yöntemi için kullanılan bileşimler farklılık gösterse de hazır kalıplama bileşikleri iki çeşittir:

- SMC Hazır Kalıplama bileşimi
- BMC Hazır Kalıplama bileşimi

3.2.7.1. Hazır kalıplama bileşimi / SMC

SMK pestil biçiminde, takviye malzemesi olarak kırılmış lif ile dolgu malzemesi içeren reçinenin önceden birleştirilmesi ile oluşan bir malzemedir. Levha halindeki çeliğin kompozitin kavramsal olarak karşılığıdır. Kompozitin toplam ağırlığının %25-30 oranında, 25 mm ve 50 mm arası uzunluğa sahip kesikli lifler kullanılmaktadır. Plakalar arasında takviye elemanı ve reçine sandviç görünümündedir. Çoğunlukla 1 m genişliğinde ve 3 mm kalınlığında üretilmektedir (Aricasoy, 2006; Enşici, 2004).

3.2.7.2. Hazır kalıplama bileşimi / BMC

Bu yöntem RTM'ye benzer ama farklı olarak reçine-elyaf karışımının kalıp dışarısında karıştırıldıktan sonra eritilerek basınç altında boş kalıp içine enjekte edilir. Bu yöntemle yalnızca düşük viskoziteli ısıyla sertleşen reçineler kullanılabilir. Diğer yöntemlere göre daha hızlıdır. Malzemenin yüksek ısı direnci, boyutsal kararlılığı, elektrik iletkenliği, rijitlik ve dayanım özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. Küçük ve

büyük ev aletleri imalatında ve otomotiv sektöründe çocuk oyuncaklarından uçak parçalarına kadar pek çok ürün bu yöntemle üretilmektedir. Tablo 3.4'te kompozit üretim yöntemlerinin karşılaştırılması verilmiştir (Aricasoy, 2006; Enşici, 2004).

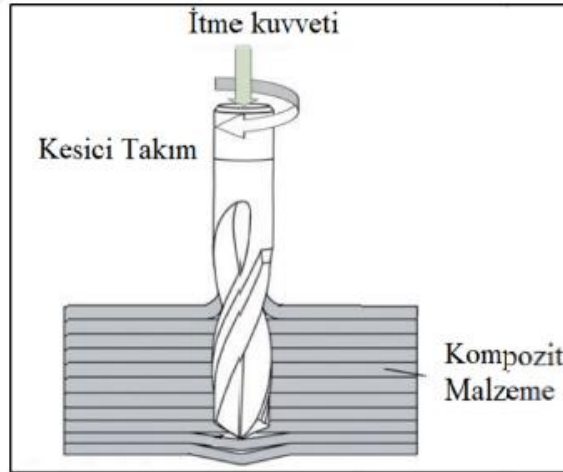
Tablo 3.4. Kompozit üretim yöntemlerinin bazı yönlerden karşılaştırılması, 10: en büyük değer, 1: en küçük değer

Yöntem	Ekipman Maliyeti	Üretim Hızı	İşçiliğin önemi	Parçanın mümkün olan karmaşıklığı	Tekrar Üretilirliği
El Yatırması	1	3	10	9	1
Vakumlu Torba	2	2	10	9	3
Püskürtme Yöntemi	4	4	10	8	1
Elyaf sarma Yöntemi	6	6	2	4	9
Pultrüzyon	7	9	2	2	10
SMC	10	8	4	9	10
Merkezkaç Döküm	9	7	3	3	6
Sürekli Laminasyon	10	10	2	1	10
Enjeksiyon	10	10	2	10	10

4. DELME İŞLEMİ

Geleneksel delme yöntemi, ekonomi ve basit uygulanabilirlik gibi nedenlerle çeşitli endüstriyel ürünler elde etmek için kullanılan mekanik işlemenin üçte birini içerir ve genellikle en son yapılan işlemlerden biridir. Kompozit yapılar istenilen geometride üretilse de, montaj sırasında delme işlemine yaygın olarak ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu malzemelerin delinmesinden dolayı; tabakalar arası çatlaklar ve ayrışma, elyaf çekmesi ve kopması, elyaf/reçine ayrışması, mikro çatlaklar, delik alanının deformasyonu, gerilme yoğunlaşması ve delik yüzey kalitesi vb. hatalar oluşabilir. Açılan delik derinliği arttıkça, deliğin kontrolü ve talaşın tahliyesi zorlaşmaktadır. Derin delik delme işlemlerinde deliğin yüzeyi ve kalitesinin önemi ön plana çıkarken, kısa deliklerde düşük maliyetli işlem için yüksek talaş akışkanlığında delik delme daha avantajlıdır. Bu iki yöntemi birbirinden ayıran temel özellik deliğin derinliği ve çapı olarak ifade edilebilir. Talaş tahliyesi, kalite ve talaş akışı ile ilişkili değişkenlerde de bu iki delme yöntemini ayıran en belirgin farklılıklardır. Delme sırasında oluşan kuvvet ve kesici takım Şekil 4.1’de delme işlemini etkileyen faktörler ise Şekil 4.2’de verilmiştir (Tonshoff, 1994; Kılıçkap, 2010).



Şekil 4.1. Kompozit malzemeyi delme sırasında oluşan itme kuvveti ve kesici takımın şematik resmi (Saeedifar, 2016)



Şekil 4.2. Delme işlemini etkileyen faktörler (El-Hofy, 2013)

Delme, bazı açılardan tornalama ve frezeleme işlemleriyle karşılaştırılabilirken, delmede talaş kırma ve boşaltma kritik öneme sahiptir. İşleme delik ile sınırlıdır, yani delik ne kadar derinse, işlemi kontrol etmek ve talaşları çıkarmak o kadar zor olur. Birçok parça, kalite ve güvenilirliğe ek olarak giderek daha fazla değer verilen kısa deliklere ve yüksek talaş kaldırma oranlarına sahiptir. Delme işlemleri; doluda delme, delik büyütme, faturalama (kademeli delik delme) ve raybalama olmak üzere 4 başlık altında toplanabilir.

Doluya delik delme

Doluya delik delme işlemi en yaygın delme yöntemidir. Bu yöntem kullanılarak, tek bir işlemde katı bir malzemede önceden belirlenmiş çapta bir delik açılır.

Delik büyütme

Delik büyütme genellikle daha büyük delik çapları için kullanılır. Bu metot doluya delik delme kadar güç harcama gerektiren bir metot olmamakla beraber tüm çapı işlemez, sadece deliğin etrafındaki bir yuvarlağı işler. Tüm malzemeyi talaş olarak çıkarmak yerine, deliğin merkezi çevresinde bir çekirdek malzeme boşluğu bırakılır ve bu yaklaşım her şeyden önce delik içi uygulamalar için uygundur.

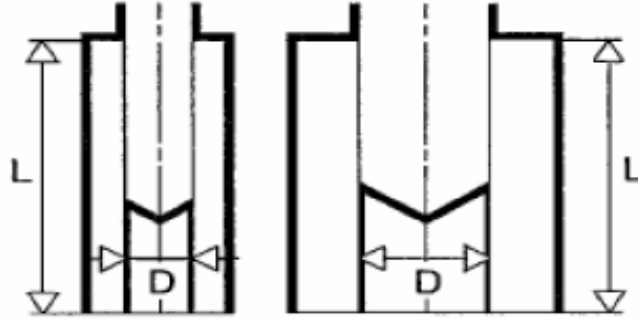
Fatura açma

Fatura açma (kademeli delme), mevcut bir deliğin, etrafındaki büyük miktarda talaş kaldıran ve özel olarak tasarlanmış bir aletle genişletilmesidir.

Raybalama

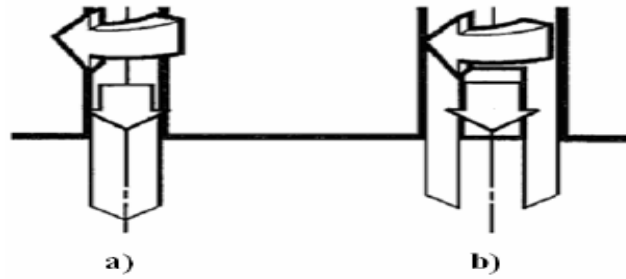
Raybalama, mevcut bir deliğin son (bitirme) işlemidir. Bu süreç, yüksek yüzey kalitesi ve sıkı toleranslar sağlamak için sıkı çalışma toleransları gerektirir. Literatürde

uzun delikler delik boyunun delik çapından 10 kat fazla olduğu durumlar olarak ifade edilmektedir. Delik boyu ve çap oranı arasındaki ilişki (Şekil 4.3) 3 olduğunda kısa delik 4/10 arasında olduğunda ise normal delik olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 4.3. Çap uzunluk ilişkisi (Çakır, 2000)

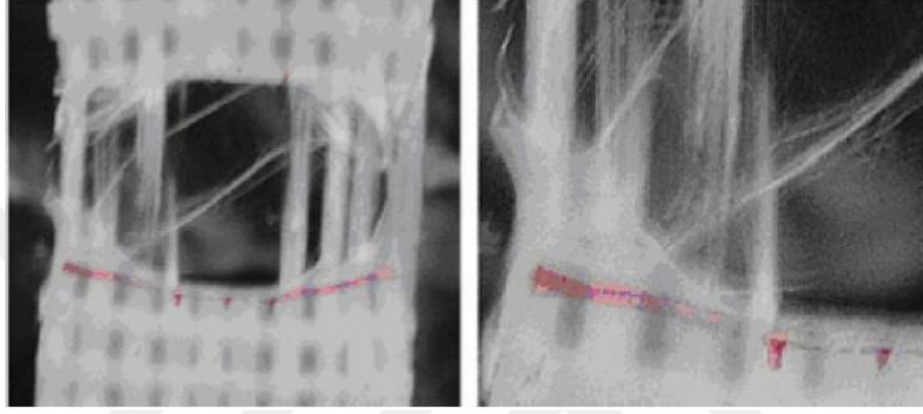
Dolu bir malzemenin tek parça birtakım kullanılarak belirli bir çapta, tek operasyonda delinmesi en yaygın delik delme metodudur. Çevreden kesme yöntemi, bir önceki delme işlemi kadar güç gerektirmez ve esas olarak büyük çaplı delikleri delmek için kullanılır. Bu yöntem, iç ve dış kesici takımların kullanıldığı, tüm malzemeyi talaş olarak çıkarmak yerine merkezde silindirik bir çekirdek oluşturularak tek işlemde yapılan bir delme işlemidir. Delme işlemlerine ait görüntü şekil 4.4'te verilmiştir (Çakır, 2000).



Şekil 4.4. Delme işlemleri (a) tek operasyonda delme işlemi, (b) ön delik delme işleminden sonra yapılan delme işlemi (Çakır, 2000)

Deformasyon, malzemenin bütünlüğünü bozarak dayanımını azaltan bir durumdur. Delik yüzeyinde oluşacak hasar, kompozit malzemeler için ciddi bir problemdir. Bunun önüne geçmek için iş parçası, kesici takım ve kesme parametrelerine dikkat edilmesi gerekmektedir (Şahin, 2021).

Kesici kenar basıncı nedeniyle, kompozit yapıdaki esnek elyaflar, matris malzeme üzerinde kısmen yer değiştirir. Kesme basıncına dayanamayan bu elyaflar koptuğunda, matris parçacıkları işlenmiş yüzeyden ayrılmaya zorlanır ve elyaf kopması oluşur (Şekil 4.5). Elyaf kırılması, elyafın matris arayüzünden ayrılmasına ve elyafın dışarı çekilmesine neden olur. Elyaf-matris arayüzündeki ayrılma, matrinden fiberlere yük transferini önler. Ayrıca, elyaf-matris arayüzündeki gerilim nedeniyle çoğunlukla etkilenmeyen alttaki katmanda da gerilim oluşturur (Gündoğdu, 2018).



Şekil 4.5. Kompozit bir malzemenin kopması sonrası görüntüsü (Avcı, 2007)

Kompozit malzemeleri aşınmış, deforme olmuş veya körelmiş kesici takımlarla işlerken, kompozit malzemedeki kırılğan matris uygulanan yük nedeniyle kırılabilir. Kompozit yapılarda ise elyaflar, kesici takımın körelmesi, aşınması veya kesici takım malzemesinin/geometrisinin uygun olmaması gibi nedenlerle kesici takım tarafından kırılabilir ve sonunda dışarı çekilebilir (Çavuş, 2015).

4.1. Kesme Parametreleri

Kesme kuvvetlerinin belirlenmesi ve analizi, istenilen özelliklere göre üretilen iş parçalarının kalitesinin arttırılması ve talaşlı imalat işlemlerinin (tornalama, frezeleme, delme, taşlama vb.) maliyetlerinin düşürülmesi için yapılan araştırmalarda önemli rol oynamaktadır (Turgut, 2009; Günay, 2003).

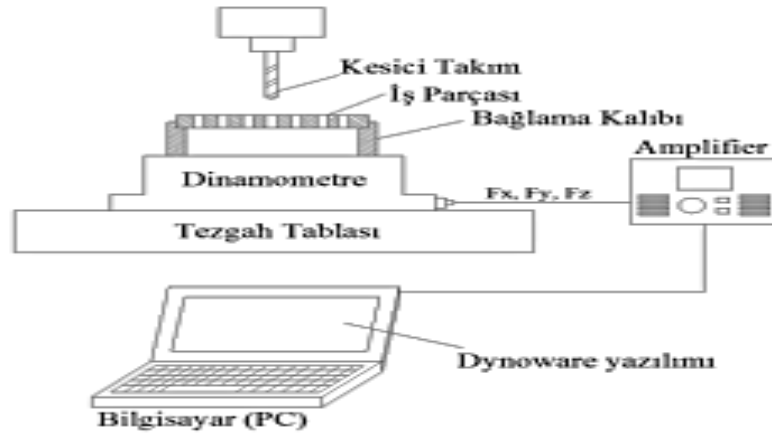
Kompozitlerin kesme işlemi metallerden çok farklıdır. Çoğu metalden farklı olarak, kompozite zarar vermez ve işlem sırasında takviye elyaflarını yok ederken genellikle matrisi keser. Kompozit malzemelerin işlenmesinde genel bir ilke, yeterli boşluğa sahip keskin bir kesme kenarının temiz bir kesimle sonuçlanması ve aletin iş parçasına sürtünme eğilimini azaltmasıdır. Takım aşınmasına dikkat edilmezse kesme

kenarı geometrisi değişir. Bu, hızlı ve aşırı ısı oluşumuna, kenarların kırılmasına ve parça kalitesinin düşmesine neden olabilir (Gündoğdu, 2018).

Yüksek hız, düşük takım ömrü ve düşük hız, yüksek takım ömrü anlamına gelir. Bu nedenle, karbon fiber kompozit malzemelerin işlenmesinde takım ömrü, kesme hızı ile doğru orantılıdır. Aramid fiber kompozitlerin işlenmesinde, ilerleme hassas bir şekilde ayarlanırsa yüksek kesme hızları avantajlıdır. Cam elyaf kompozitlerde yapıdaki elyaf miktarının artması işlenebilirliği azaltır. İşlenebilirlik açısından, sadece kompozit tipine değil, elyaf/matris oranına da dikkat edilmelidir (Çakır, 2006).

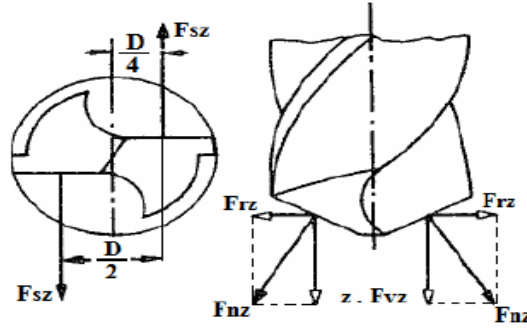
Talaş kaldırma sırasında takım tezgahı tarafından tüketilen enerjinin belirlenmesi, takım tezgahlarının ve bağlama parçasının tasarımı, boyutu ve takım tezgahının rijitliği ve görünüşlerinin hesaplanması için işleme sırasında kesme kuvvetinin belirlenmesi çok önemlidir. Kesme kuvvetlerine veya tüketilen enerjiye bağlı olarak talaş kaldırma sırasında optimizasyona dayalı uyarlanabilir bir kontrol sistemi oluşturmak için kullanılır (Işık ve Çakır, 2000).

Şekil 4.6'da delme işlemlerinde kesme kuvvetlerini ölçmek için kullanılan bir dinamometrenin şematik bir diyagramını göstermektedir.



Şekil 4.6. Delik delmede kullanılan dinamometre (Gökçe ve ark., 2017)

Delme sırasında ağza karşılık gelen talaş kaldırma kuvvetinin bileşenleri, yani kesme kuvveti, ilerleme kuvveti ve radyal kuvvet, Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Nozulların konumu nedeniyle her nozulda oluşan radyal kuvvetler birbirini dengeler. Bu nedenle delmede sadece F_s ve F_v kuvvetleri etkindir.



Şekil 4.7. Matkap delmesi sırasında oluşan kesme kuvvetleri (Akkurt, 1998)

Bir ağza karşılık gelen kesme kuvveti Eşitlik 4.1’de ve toplam kesme kuvveti ise Eşitlik 4.2’de verilmiştir (Akkurt, 1998).

$$F_{sz} = A_{sz} k_s = \frac{dsz}{2} k_s = \frac{ds}{4} k_s \quad (4.1)$$

$$F_s = z F_{sz} = 2 F_{sz} = d \cdot sz k_s = \frac{ds}{2} k_s \quad (4.2)$$

Kesme hızını, matkap ucunun bir dakikada kesme doğrultusunda aldığı yol, ilerleme hızını ise, takımın 1 devirde aldığı yol olarak tanımlayabiliriz. Eşitlik 4.3’te kesme hızı formülü verilmiştir;

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (4.3)$$

Burada;

V: Kesme hızı (m/dk)

D: Matkap ucunun çapı (mm)

n : Bir dakikada yaptığı devir sayısıdır.

Delik delme işleminde ilerleme hızı formülü ise Eşitlik 4.4’te verilmiştir;

$$F = n \cdot z \cdot F_z \quad (4.4)$$

Burada;

z: Matkaptaki diş adeti

Fz: Takımın bir devirde aldığı yol

F: Takımın dakikada aldığı mm cinsinden yoldur.

4.2. Kesici Takım Malzemesi ve Geometrisi

Cam ve karbon elyaf gibi yüksek mukavemetli takviyelerin kullanıldığı kompozitlerde takım malzemesi önemliyken, daha düşük mukavemetli takviyelerin kullanıldığı kompozitlerde takım geometrisi daha önemlidir. Takım seçimi, kullanılacak olan takviye elemanının yapısına göre seçilmektedir. Her kesici takımın malzeme özelliklerinden dolayı belirli bir dayanım değeri vardır. Bu nedenle her kesici takım,

belirli kesme koşullarında belirli bir çalışma süresinden sonra aşınmaya başlar. Eğer kesme şartları iyi ayarlanmazsa kırılma gibi hatalar dahi olabilir. Aslında optimum özelliklerde kesici takım yapılarak ömürleri çok daha uzun hale getirilebilir. Fakat bu sağlanmaya çalışıldığında, böyle bir kesici takımın maliyetinin çok yüksek olması gibi bir negatif yönü olacaktır. Araştırmacılar her iki yönden de kesici takımı mükemmel hale getirmek için kaplamaları geliştirmişlerdir. Genel olarak kesici takımların ana malzemesi çok pahalı olmayan malzemelerden yapılmaktadır. Bununla birlikte, malzemenin mukavemeti, sıcaklık direnci ve aşınma direnci gibi parametreleri iyileştirmek için kaplama yöntemleri geliştirdiler (Akıncıoğlu, 2011).

Kesici takımlara uygulanan kaplama yöntemi, takımın performansını artıran bir işlemdir. Yüksek kaplama sertliği ve yüksek aşınma direncine sahip elmas takımlar, kompozit malzeme işleme için ilk tercihtir. Takım malzemesinin parçacık boyutu küçüldükçe takım aşınması azalır. Çok ince taneli sementit karbür ve çok kristalli elmas (PCD) aletler, cam ve karbon fiber takviyeli kompozitlerin işlenmesi için kullanılır (Akıncıoğlu, 2018).

4.3. Takım Aşınması

Sürtünmeye bağlı aşınma, tüm endüstrilerin ciddiye alması gereken bir tehlikedir. Zamanında ve sistematik önlemler alınmazsa maliyetli sonuçlara yol açabilir. Talaş kaldırma sırasında takımın iş parçası ile temas halinde aşınması genellikle takım malzemesi kaybı olarak kabul edilebilir. Bu kayıp çeşitli şekillerde olabilir (Evkaya, 2003).

- Küçük aşınma parçacıkları nedeniyle kademeli takım malzemesi kaybı şeklinde,
- Talaşlı imalatla, yüzeye gömülmüş sert parçacıkların takım üzerindeki sürtünme etkisi,
- Takımın çok küçük parçalar halinde ufalanması şeklinde,
- Kesme sıvısında çok fazla aktif katkı varsa, takımı aşındırması ile.

4.4. Kompozit Malzemelerin İşlenmesiyle Oluşan Hasar Mekanizmaları

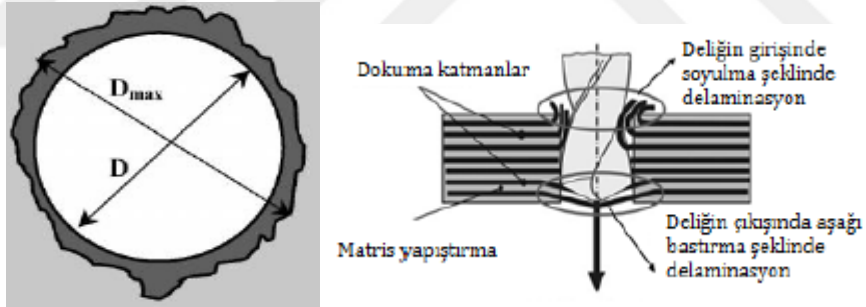
Kompozitlerin işlenmesinden kaynaklanan hasar mekanizmaları, geleneksel malzemelerden daha karmaşıktır. Bu durumun oluşmasında, kompozit yapıda matris ve takviye fazının birleşme şekli, elyaf oryantasyonu, tabaka dizilişi, elyaf tipi, arayüz bağı

ile yükleme türü ve malzemenin bulunduğu ortam gibi birçok faktör etkilidir. Kompozit malzemelerin işlenmesi nedeniyle; mekanik hasar, kimyasal hasar, termal hasarlar meydana gelmektedir (Çavuş, 2015).

4.5. Delaminasyon Faktörü

Delaminasyon, kompozitte delme işleminden sonra takviye fazının matris malzemesinden ayrılmasıdır. Sonuç olarak, hasarlı kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri düşer. Kompozit malzemeler askeri, havacılık ve uzay gibi kritik alanlarda kullanılmasından dolayı kompozit malzemelerde delaminasyon en az düzeyde olmalıdır. Kompozit malzemelerin delinmesi sırasında, iş parçasındaki delik girişinde ve delik çıkışında delaminasyon yaygın bir olgudur (Şekil 4.8). Delik etrafındaki delaminasyonu belirlemek için delaminasyon alanındaki en büyük çapın (D_{max}) bulunması gerekir. Delaminasyon faktörü (D_f), delme esnasında hasar bölgesinde oluşan maksimum hasar çapının (D_{max}) matkap çapına (D) oranlanmasıyla hesaplanan sayısal bir değerdir. Delaminasyon faktörü Eşitlik 4.5'teki formülle belirlenmektedir.

$$D_f = D_{max}/D \quad (4.5)$$



Şekil 4.8. Delaminasyon faktörü ve kompozitlerin delinmesi esnasında oluşan delaminasyonun gösterimi (Kılıçkap, 2010)

Bu faktör, kompozit malzeme delme işleminin yüzey hasarını değerlendirmek için önemli bir parametredir. Kompozit malzeme işleme sırasında yüzey hasarı, iş parçalarının işleme kalitesinin değerlendirilmesinde önemli bir faktördür (Şahin, 2021).

5. MATERYAL VE METOD

5.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler

5.1.1. Cam elyaf ve karbon elyaf

Bu tez çalışmasında kullanılan cam elyaf kumaşın (90°) yapısı örgülü cam elyaftır ve düz (plain) dokuludur. Karbon elyaf olarak tek yönlü karbon elyaf kullanılmıştır. Karbomid firmasından temin edilen karbon ve cam elyaf için bazı teknik bilgiler aşağıdaki Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Karbon ve Cam elyaf özellikleri

	Karbon Elyaf	Cam Elyaf
Alansal Ağırlık	200 gr/m ²	220 gr/m ²
Kopma Uzaması	% 1,40	% 2,50
Çekme Dayanımı	2500 MPa	1300 MPa
Elastite Modülü	230 MPa	65 GPa

5.1.2. Bor karbür (B₄C) ve grafit (Gr)

Matris malzemesi içerisinde kullanılan takviye tipleri (B₄C ve Gr) Ege Nanotek’ten sipariş edilen bor karbür ve grafit tozu kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan borkarbür ve grafit özellikleri aşağıda Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2. Borkarbür ve Grafit özellikleri

Bor Karbür (B₄C)		Grafit (Gr)	
Toz Boyutu	30 mikron	Toz Boyutu	30 mikron
Safılık	% 96	Safılık	% 99,9
Renk	Siyah	Renk	Siyah
Yoğunluk	2,52 g/cm ³	Yoğunluk	2,09-2,23 g/cm ³

5.1.3. Epoksi reçine

Bu tez çalışmasında kullanılan Epoksi Reçine, ARC 152 laminasyon epoksi reçinesi ve sertleştiricisidir. Epoksi reçine malzemesi Arc Marina firması tarafından temin edilmiştir. Firma önerileri dikkate alınarak 100 gram reçineye 25 gram sertleştirici eklenmiştir.

5.2. Epoksi Karışımının Hazırlanması

Kompozit plakalarda kullanılacak reçine ve takviye elemanlarının miktarları hassas terazide tartılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde radwag marka hassas terazi kullanılmış ve kullanılan hassas terazi Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

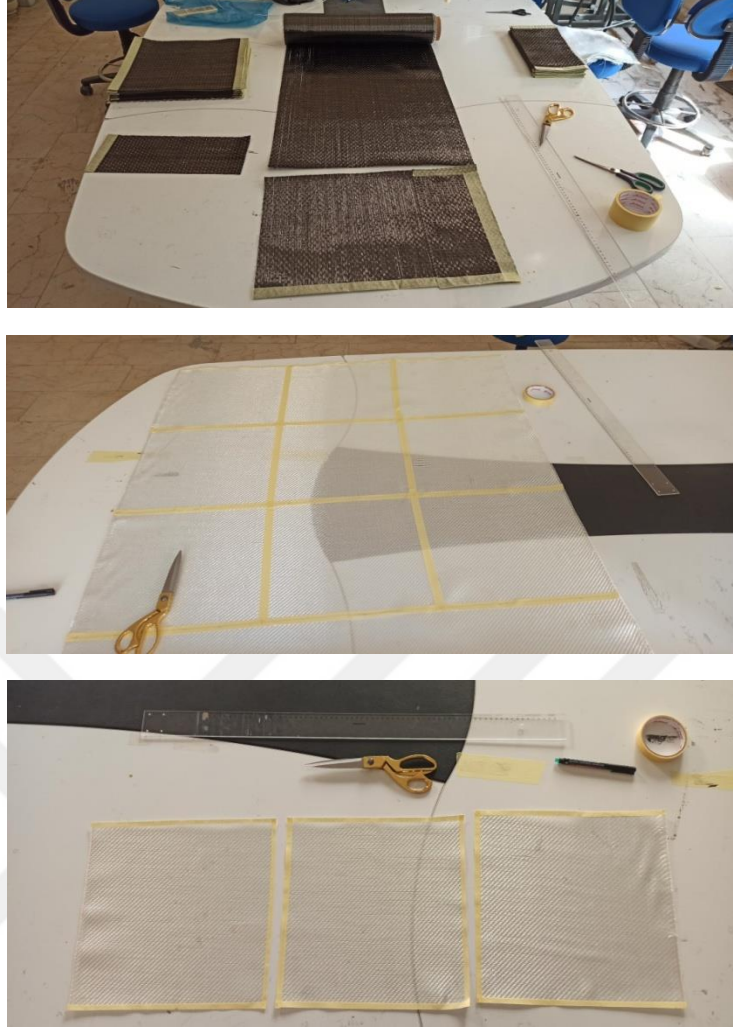


Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan hassas terazi

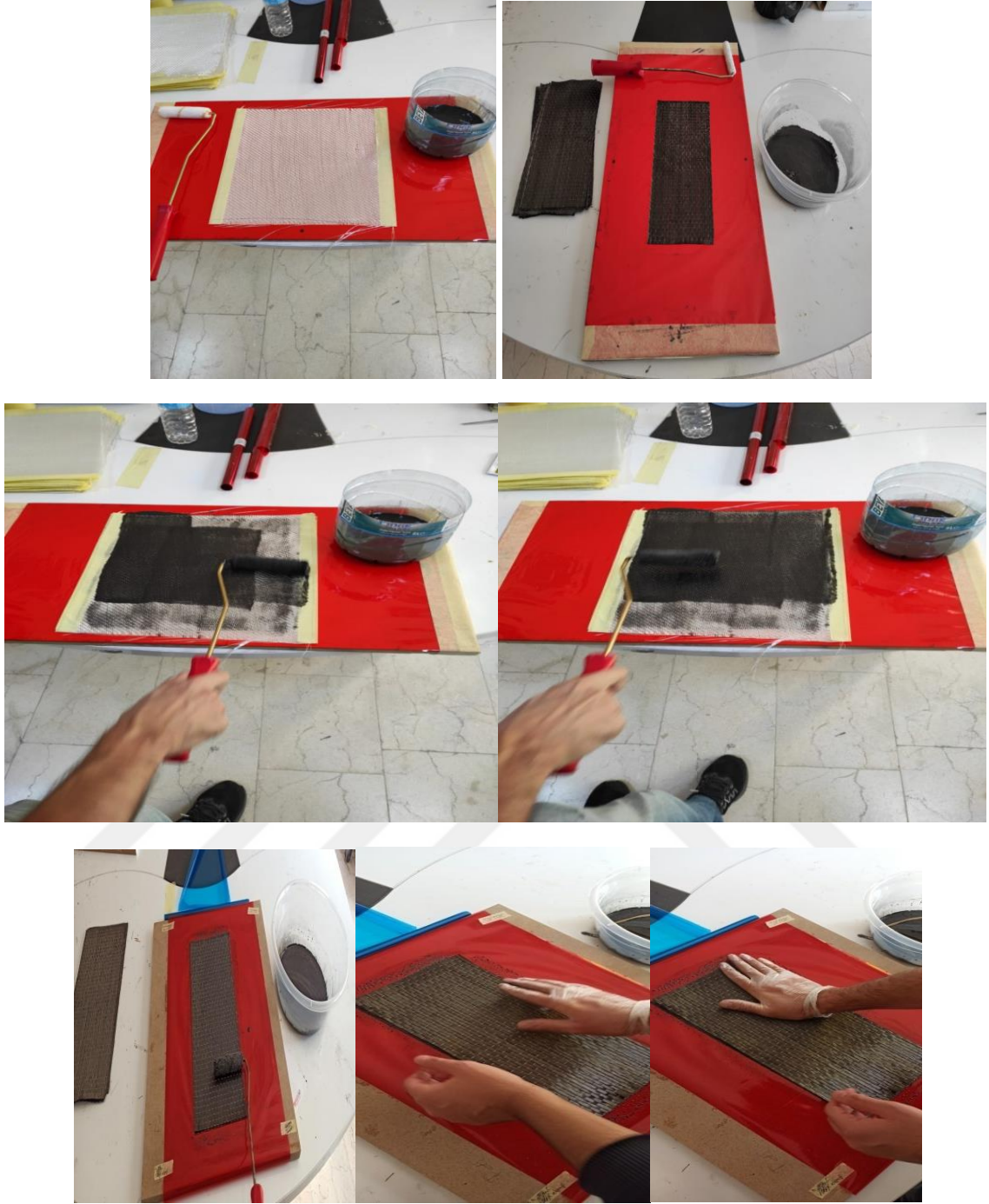
Kompozit plakalarda kullanılmak üzere reçine içerisine sırasıyla ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında B₄C ve Gr ayrı ayrı eklenerek karışım hazırlanmıştır.

5.3. Kompozit Plakaların Üretilmesi

Kompozit plakalar el yatırma metodu ile Batman Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi kompozit laboratuvarında üretilmiştir. Öncelikle plakaları oluşturmak için elyaflar 30 cm x 30 cm ölçülerinde kesilmiştir. Daha sonra reçine karışımı hazırlanmıştır. Düz bir zemin üzerine kesilen elyaflardan biri bırakılarak bir rulo fırça yardımıyla hazırlanan reçine ve dolgu karışımı kumaşlara sürülmüştür. Üzerine reçine sürülen birinci tabakanın üstüne yeni kumaş tabakası serilerek bu işlem tekrarlanmıştır. Bu işlem 13 kat boyunca uygulanmıştır. Üretim aşamaları Şekil 5.2 - Şekil 5.3’te gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Elyaf kumaşların kesimi



Şekil 5.3. Elyaf kompozit plakalarının hazırlanması

Elyafaların düz zemine yapışmasını engellemek amacıyla zeminin yüzeyi şeffaf kap ile kaplanmıştır. İşlem bittikten sonra elyaf üstüne tekrar şeffaf kap serilip üzerine ağırlık konulmuştur. Yapılan kompozit plakalar önce saf reçine ile daha sonra reçineye %5, %10 ve %15 oranlarında B₄C ve Gr ayrı ayrı eklenerek kompozit plakalar hazırlanmıştır. Ayrıca hibrit kompozitlerde ise %7,5 Gr ve %7,5 B₄C takviyeleri ilave edilerek kompozit plakalar üretilmiştir.

5.4. Deney Numunelerinin Elde Edilmesi

Hazırlanan kompozit plakalar yatar daire testere tezgahında çekme, eğilme, aşınma ve delik delme için standartlara göre kesilerek numuneler elde edilmiştir. Numunelerin kesim işlemleri Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Kompozit plakaların kesimi ile deney numunelerinin elde edilişi

5.5. Çekme Deneyi

Çekme deneyi ASTM D638 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Numunelerin kalınlıkları 4 mm'dir. Çekme deneyinde Batman Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi'nde bulunan SHIMADZU marka test cihazı kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan çekme test cihazı, çekme numuneleri çekme sonrası oluşan kopma şekli sırasıyla Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilmiştir. Her parametre için 3 adet çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. Çekme işlemi 1 mm/dk sabit çekme hızında yapılmıştır. Böylece kompozit numunelerinin çekme mukavemetleri belirlenmiştir.



Şekil 5.5. Çekme cihazı



a) Cam elyaf takviyeli kompozitler b) Karbon elyaf takviyeli kompozitler



c) Kopma görüntüsü

Şekil 5.6. Cam ve karbon elyaf takviyeli numuneler ve çekme sonrası oluşan kopma şekli

5.6. Eğilme Deneyi

Üç nokta eğilme testi, malzemelerin eğilme ve kırılma davranışlarını belirlemek için önemli bir testtir. Eğilme testleri, malzeme kırılıncaya kadar her iki desteğin üzerine serbestçe yerleştirilen dikdörtgen veya dairesel yassı bir numunenin ortasına bir kuvvet uygulanarak gerçekleştirilir. Eğilme deneyleri Batman Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi'nde bulunan 3 nokta eğilme cihazında gerçekleştirilmiştir. Eğilme deneylerinde kullanılan test cihazı ve eğilme sonrası oluşan şekil Şekil 5.7'de verilmiştir. Deneylerde çekme cihazında kullanılan Shimadzu marka cihazın çenesi değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Eğilme deneylerinde ASTM D790 standartı kullanılmıştır. Eğilme testi 1mm/dk hızında gerçekleştirilmiştir. Her parametre için 3 adet eğilme deneyi yapılmıştır.



Şekil 5.7. Eğilme testi cihazı ve eğilme sonrası oluşan şekil

Eğilme gerilmesi formülü Eşitlik 5.1’de verilmiştir.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \text{ (MPa)} \quad (5.1)$$

Buradaki eşitlikte

σ_f : Eğilme gerilmesini (MPa)

P: Maksimum yükü (N)

L: İki destek arasındaki mesafeyi (mm)

b: Numunenin enini (mm)

d: Numunenin kalınlığını (mm) ifade etmektedir.

Eğilme test cihazı ve Eşitlik 5.1’de verilen formül ile numunelerin eğilme mukavemetleri hesaplanmıştır.

5.7. Aşınma Deneyi

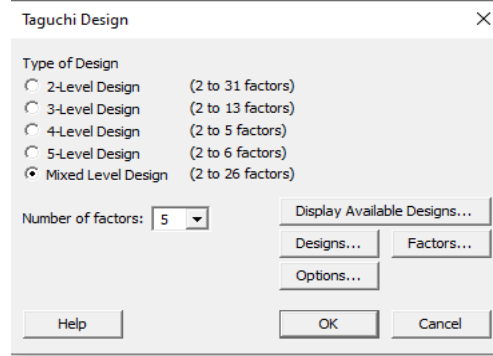
Gr ve B₄C dolgulu, cam ve karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin aşınma deneylerinin farklı kayma mesafesi ve kuvvet altında yapılması için çok sayıda aşınma deney sayısına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu aşınma deneylerinin bütün kombinasyonlarının yapılması gerek maliyet gerekse de zaman açısından ciddi maliyetler oluşturacağından dolayı Taguchi deney tasarımı kullanılmıştır. Bu çalışmada Taguchi deney tasarımının kullanım amacı aşınma deneylerindeki tüm parametreleri kapsayacak şekilde daha az deney sayısı ile tüm parametrelerin birbiriyle olan ilişkisini belirlemektir. Bu doğrultuda, aşınma deneyleri için giriş parametreleri ve seviyeleri Tablo 5.3’te verilmiştir.

Tablo 5.3. Aşınma deneyleri için giriş parametreleri ve seviyeleri

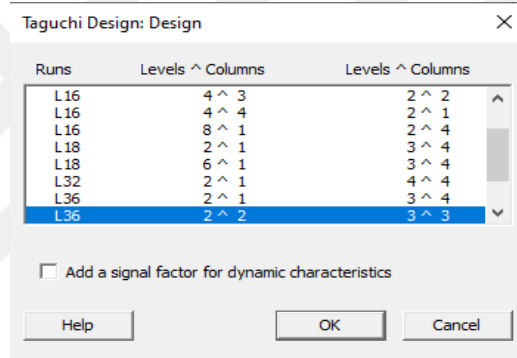
Seviyeler	Takviye malzemesi	Dolgu malzemesi	Katkı oranları (%)	Kayma mesafesi (m)	Kuvvet (N)
1	Cam	Gr	5	250	5
2	Karbon	B ₄ C	10	500	10
3			15	750	15

Takviye tipi ve oranının aşınma üzerindeki etkisini belirlemek için Taguchi methodu üç faktörlü karışık seviye tasarımı kullanılmıştır (Şekil 5.8). Taguchi mixed tasarım olarak ise L36 (2²–3³) düzeni seçilmiştir (Şekil 5.9). Faktör ve seviyeleri Taguchi yöntemine tanımlanarak (Şekil 5.10) takviye tipi ve oranını için deney kombinasyonu oluşturulmuştur. Taguchi mixed tasarımı tarafından oluşturulan deney

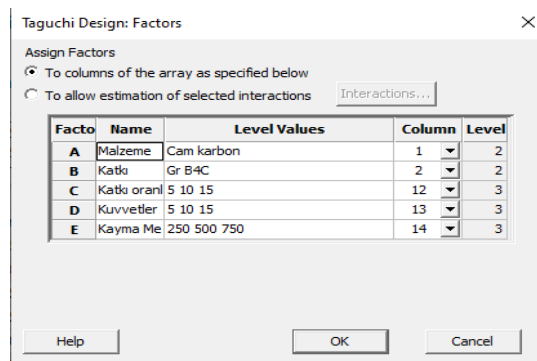
kombinasyonu Tablo 5.4'te verilmiştir. Aşınma deneyleri için kullanılan Taguchi tasarım analiz programından elde edilen grafikler S/N oranları grafikleri değerleri alınarak aşınma değerleri yorumlanmıştır.



Şekil 5.8. Taguchi tasarımında kullanılan faktör ve seviyelerinin seçimi



Şekil 5.9. Taguchi mixed tasarım düzeni



Şekil 5.10. Takviye tipi ve oranı için Taguchi tasarımına tanımlanan faktörler ve seviyeleri

Tablo 5.4. Takviye tipi, dolgu malzemesi, katkı oranı, kuvvet ve kayma mesafesi için Taguchi mixed tasarımı tarafından oluşturulan aşınma deney kombinasyonu

Deney No	Takviye Malzemesi	Dolgu Malzemesi	Katkı oranları (%)	Kuvvetler (N)	Kayma Mesafesi (m)
1	Cam	Gr	5	5	250
2	Cam	Gr	10	10	500
3	Cam	Gr	15	15	750
4	Cam	Gr	5	5	250
5	Cam	Gr	10	10	500
6	Cam	Gr	15	15	750
7	Cam	Gr	5	5	500
8	Cam	Gr	10	10	750
9	Cam	Gr	15	15	250
10	Cam	B ₄ C	5	5	750
11	Cam	B ₄ C	10	10	250
12	Cam	B ₄ C	15	15	500
13	Cam	B ₄ C	5	10	750
14	Cam	B ₄ C	10	15	250
15	Cam	B ₄ C	15	5	500
16	Cam	B ₄ C	5	10	750
17	Cam	B ₄ C	10	15	250
18	Cam	B ₄ C	15	5	500
19	Karbon	Gr	5	10	250
20	Karbon	Gr	10	15	500
21	Karbon	Gr	15	5	750
22	Karbon	Gr	5	10	500
23	Karbon	Gr	10	15	750
24	Karbon	Gr	15	5	250
25	Karbon	Gr	5	15	500
26	Karbon	Gr	10	5	750
27	Karbon	Gr	15	10	250
28	Karbon	B ₄ C	5	15	500
29	Karbon	B ₄ C	10	5	750
30	Karbon	B ₄ C	15	10	250
31	Karbon	B ₄ C	5	15	750
32	Karbon	B ₄ C	10	5	250
33	Karbon	B ₄ C	15	10	500
34	Karbon	B ₄ C	5	15	250
35	Karbon	B ₄ C	10	5	500
36	Karbon	B ₄ C	15	10	750

Taguchi deney kombinasyonlarından elde edilen parametrelerde, aşınma deneylerinin yapılabilmesi için numuneler 40 mm x 40 mm boyutlarında kesilmiştir. Aşınma deneyleri Batman Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi'nde bulunan Turkeyus marka pin on disk aşınma cihazında yapılmıştır. Deneylerde kullanılan aşınma test cihazı Şekil 5.11'de verilmiştir. Numuneler aşınma cihazındaki döner tablaya

sabitlenmiş olup, 300 dev/dk dönme hızında aşındırılmıştır. 6 mm çapa sahip çelik bilye numune yüzeyine temas ettirilerek aşınma deneyi gerçekleştirilmiştir. Aşınma oranı için kullanılan denklem Eşitlik 5.2’de verilmiştir.

$$\text{Aşınma oranı} = \frac{\Delta V}{S} \quad (5.2)$$

Burada;

ΔV : Hacim kaybı (mm^3)

S: Aşınma mesafesi (m) olarak ifade edilir.



Şekil 5.11. Aşınma cihazı

Aşınma; kütle kaybı, aşınma miktarı, aşınma direnci, aşınma oranı ve özgül aşınma oranına göre belirlenebilir. Adhesiv aşınma testlerine maruz kalan yüzeyin hacmi belirlenerek aşınma hacmi elde edilmiştir. Bu doğrultuda ampirik denklemler kullanılmaktadır. ASTM G99-95 standartlarına göre aşınma oranını hesaplamak için kullanılan denklem Eşitlik 5.3’te verilmiştir (ASTM G99-95, 1995).

$$AH = 2 * \pi * R[r^2 * \sin^{-1}(a/2 * r) - (a/4) * (4 * r^2 - a^2)^{1/2}] \quad (5.3)$$

Burada;

R: Aşınma iz yarıçapı,

r: Bilye yarıçapı

a: İz genişliğidir.

Aşınma direnci, bir malzemenin kütle kaybına veya aşınma hacmine karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Aşınma hacmi iz genişliği veya iz derinliği ile

ölçülebilmektedir. Tez çalışmasında yapılan aşınma deneylerinde malzeme yüzeyinde oluşan iz genişliği dikkate alınarak aşınma hacmi hesaplanmıştır.

5.8. Delme Deneylerinde Kullanılan Tezgah ve Dinanometre

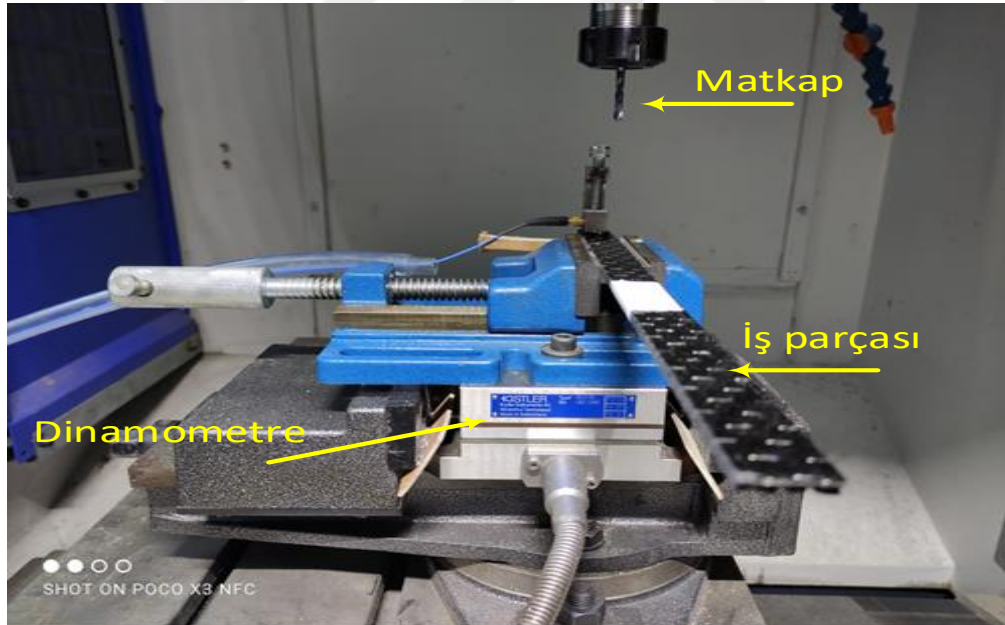
Kuru kesme koşullarında yapılan delme deneyleri Dicle Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesinde bulunan bilgisayar kontrollü Brother marka speedio S500X1 CNC dik işleme tezgahında gerçekleştirilmiştir. CNC dik işleme tezgâhının devir sayısı maksimum 10000 dev/dak, gücü 9.5kVA ve işleme kapasitesi 500 mm x 400 mm'dir. Delik delme deneyleri için kullanılan CNC cihazının görüntüsü Şekil 5.12'de verilmiştir. Delik delme deneylerinde kullanılan işleme parametreleri Tablo 5.5'te gösterilmiştir. Kompozit iş parçalarının üzerinde yapılan delme deneyleri Tablo 5.5'te belirtilen parametrelere göre yapılmıştır. 25 mm x 130 mm boyutlarında olan numunelerin kalınlıkları 4 mm'dir boydan boya delme işlemi uygulanmıştır. Kompozit malzemelerin delik delme deney düzeneği Şekil 5.13'te verilmiştir.



Şekil 5.12. CNC dik işlem tezgahı

Tablo 5.5. Delik delme için kullanılan parametreler

Devir Sayısı, n (dev/dak)	İlerleme, f (mm/dev)	Kesme hızı, V_c (m/dak)
500	0,025	6.25
500	0,05	6.25
500	0,1	6.25
500	0,2	6.25
1000	0,025	12.5
1000	0,05	12.5
1000	0,1	12.5
1000	0,2	12.5
2000	0,025	25
2000	0,05	25
2000	0,1	25
2000	0,2	25
4000	0,025	50
4000	0,05	50
4000	0,1	50
4000	0,2	50

**Şekil 5.13.** İş parçasının dinamometreye bağlanma şekli

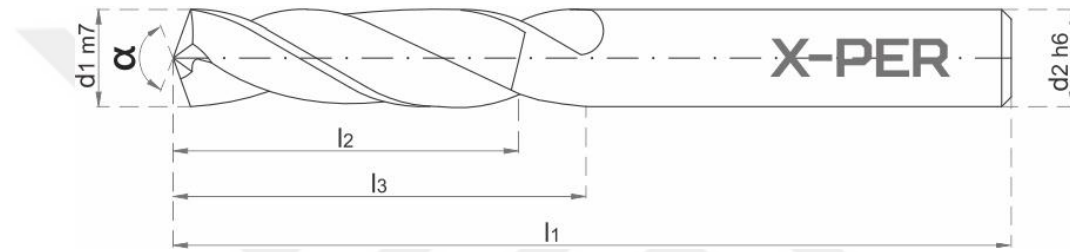
5.9. İlerleme Kuvvetleri ve Moment Ölçümü

Kompozit malzemelerin delinmesi sırasında oluşan ilerleme yönündeki kuvvetlerin ve moment değerlerin belirlenmesi için Dicle Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Talaşlı İmalat Laboratuvarında bulunan Kistler marka 9257B model kuvvet ölçüm cihazı (Dinamometre) kullanılmıştır. Delik delme deneylerinde

elde edilen kuvvet ve moment değerleri, dinamometre vasıtasıyla alınan sinyaller, çok kanallı amplifier olan Kistler 5070-A vasıtası ile bilgisayara aktarılmış olup Kistler DynoWare 2825A yazılımı kullanılarak ölçülmüştür.

5.10. Delik Delme Deneylerinde Kullanılan Kesici Takımlar

Delik delme deneylerinde, Karcan kesici takım firmasından temin edilen kompozit malzemeler için özel üretilmiş AlTiN kaplamalı karbür matkaplar kullanılmıştır. Kompozit malzemelerin kuru kesme şartlarında delinmesinde kullanılan matkap Şekil 5.14'te ve Matkaplara ait geometrik ve kaplama özellikleri Tablo 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.14. Deneylerde kullanılan matkap

Tablo 5.6. Kesici takımın geometrik ve kaplama özellikleri

d1m7	d2h6	Uç açısı α	Helis açısı	Boşluk açısı	l1	l2	l3
4	6	118°	30°	11°	66	22	24
Kaplama tipi	Kaplama Katman sayısı	Kaplama bileşimi	Kaplama kalınlığı				
PVD	4	Alüminyum titanyum nitrür (AlTiN)	1,78µm				

5.11. SEM Cihazı

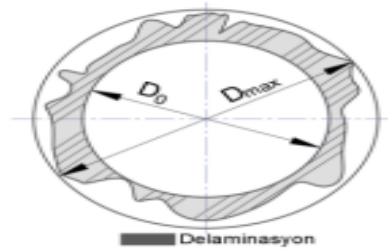
Aşınma izleri ve çekme sonrası kopma yüzeylerin incelenmesi için taramalı Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) ölçümleri Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarında bulunan Quanta 650 Field Emission markalı SEM cihazında alınmıştır. SEM cihazına ait görüntü Şekil 5.15'te verilmiştir.



Şekil 5.15. SEM cihazının görüntüsü

5.12. Delaminasyon Faktörü

Delik delme operasyonlarında 2 farklı yerden delaminasyon ölçümü yapılmaktadır. Bunlar deliğin giriş ve çıkış kısmıdır. Kompozit malzemelerde delaminasyon hasarı malzemenin yapısal bütünlüğü açısından önemli bir konudur. Özellikle delik delme operasyonlarında delaminasyon kritik ölçümlerden biridir. Delaminasyon faktörünün şematik olarak gösterilmesi Şekil 5.16’da verilmiştir (Karataş ve ark. 2021).



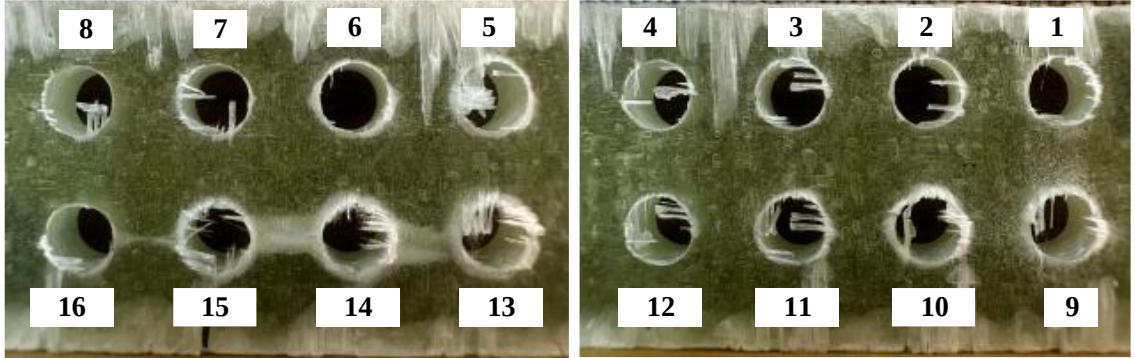
Şekil 5.16. Delaminasyon faktörünü gösterimi (Karataş ve ark. 2021).

Delik delme operasyonlarında delaminasyon faktörünün belirlenmesinde Eşitlik 5.4’teki denklemden yararlanılmıştır.

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_0} \quad (5.4)$$

Eşitlik 5.4’te verilmiş olan delaminasyon faktörü (F_d); delik çapı (D_0) ile deliğin çevresindeki en büyük hasarçapı (D_{max}) arasındaki oran olarak ifade edilmiştir. Dört farklı kesme hızı ve ilerleme oranlarında gerçekleştirilen delik delme işlemleri sonucu delik çıkışında oluşan delaminasyon değerleri hesaplanmıştır. Örnek olarak cam

dolgunsuz kompozit malzeme için delaminasyon değerlerinin ölçümünü gösteren şekil Şekil 5.17’de verilmiştir.



Şekil 5.17. Cam dolgunsuz kompozit malzeme için delaminasyon değerlerinin ölçüm yerlerinin gösterimi

5.13. Titreşim ölçümü

Kompozit malzemelerinin delik delme esnasında oluşan titreşimler, 3 boyutlu ölçüm yapan NI-9230 isimli titreşim ölçüm cihazı ile ölçülmüştür. Her bir kompozit malzemenin delinmesi sırasında bilgisayar bağlantılı bir şekilde 3 boyutlu ivmeye bağlı olarak veriler toplanmıştır. Daha sonra bu veriler excell ortamına aktarılıp elde edilen değerler tablolaştırılmıştır.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. Çekme Deney Sonuçları

Çekme deneyi için malzemeler ASTM D638 standartlarına göre kesilmiştir. Deney süresi boyunca veriler kayıt altına alınmış olup numunelerin gerilme - birim şekil değiştirme değerleri belirlenmiştir. Çekme deneylerinde her bir parametre için 3 deney yapılmış olup elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır.

6.1.1. Çekme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması

Grafit ve B₄C parçacık dolgulu, cam ve karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin gerilme mukavemeti – yüzde uzama değerleri Tablo 6.1’de gösterilmiştir. Kompozit malzemelere ait gerilem mukavemeti ve uzama değerlerine ait grafikler Şekil 6.1-Şekil 6.4’te verilmiştir.

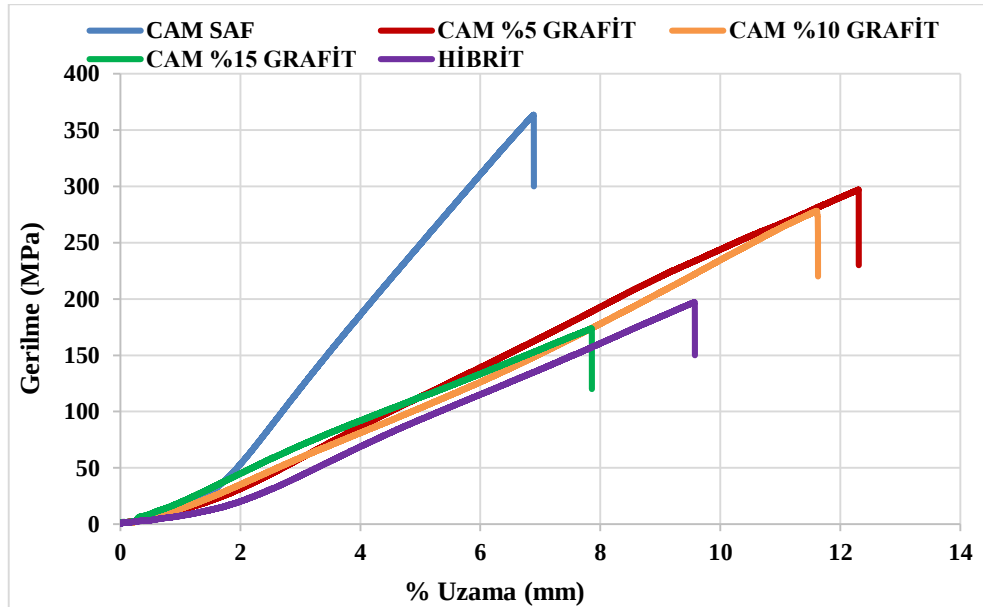
Tablo 6.1. Çekme deneyi sonuçları

Elyaf türü	Numuneler	Gerilme (MPa)	% Uzama (mm)
Cam	Dolgunsuz	363	6,89
Cam	%5 Gr	297	12,3
Cam	%10 Gr	278	11,62
Cam	%15 Gr	173	7,85
Cam	%5 B ₄ C	223	9,89
Cam	%10 B ₄ C	205	9,51
Cam	%15 B ₄ C	194	8,64
Cam	Hibrit (%7,5 Gr, %7,5 B ₄ C)	197	9,57
Karbon	Dolgunsuz	655	8,51
Karbon	%5 Gr	600	14,42
Karbon	%10 Gr	566	13,13
Karbon	%15 Gr	361	9,25
Karbon	%5 B ₄ C	448	11,5
Karbon	%10 B ₄ C	407	11,1
Karbon	%15 B ₄ C	363	10,3
Karbon	Hibrit (%7,5 Gr, %7,5 B ₄ C)	400	11,05

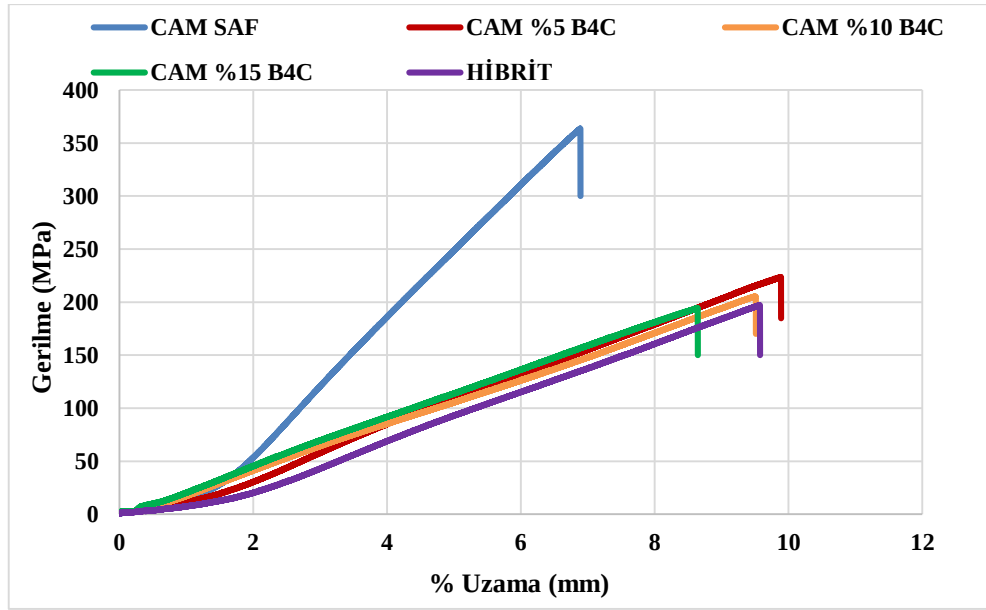
Şekil 6.1 - Şekil 6.4’teki gerilme mukavemet değerleri incelendiğinde, dolgunsuz numuneye göre epoksi matrisindeki dolgu içeriğinin artması cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerinin mekanik özelliklerini düşürdüğü açıkça görülmektedir. Kompozitlerin nihai gerilme mukavemeti, dolgu içeriğinin artmasıyla kademeli olarak azalmıştır. Gerilmedeki değişimlere bakıldığında cam elyaf türünde en yüksek gerilme dolgunsuz numunede, en düşük gerilme %15 dolgu oranına sahip

numunede görülmüştür. Karbon elyaf türünde en yüksek gerilme aynı şekilde dolgusuz numunede, en düşük gerilme %15 dolgu oranına sahip numunede tespit edilmiştir. Her iki elyaf türünde de dolgusuz numuneden sonra hibrit numunesine kadar gerilmede kademeli olarak düşüş görülmüştür. Hibrit kompozit malzemelerin gerilme mukavemet değerleri %15 takviyeli numunelerin gerilme mukavemet değerinden daha yüksek elde edilmiştir. Cam ve karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin dolgu malzemesi ilave edildikten sonra gerilme mukavemet değerlerindeki düşüşün sebebi artan yüksek dolgu içeriğiyle beraber oluşan topaklanma ile yapı içerisindeki boşluklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatüre bakıldığında yaptığımız çekme deneylerinden elde ettiğimiz sonuçların daha önceki çalışmalarla örtüştüğü görülmektedir (Kharat ve Sidhu 2016; Patankar ve ark 2011).

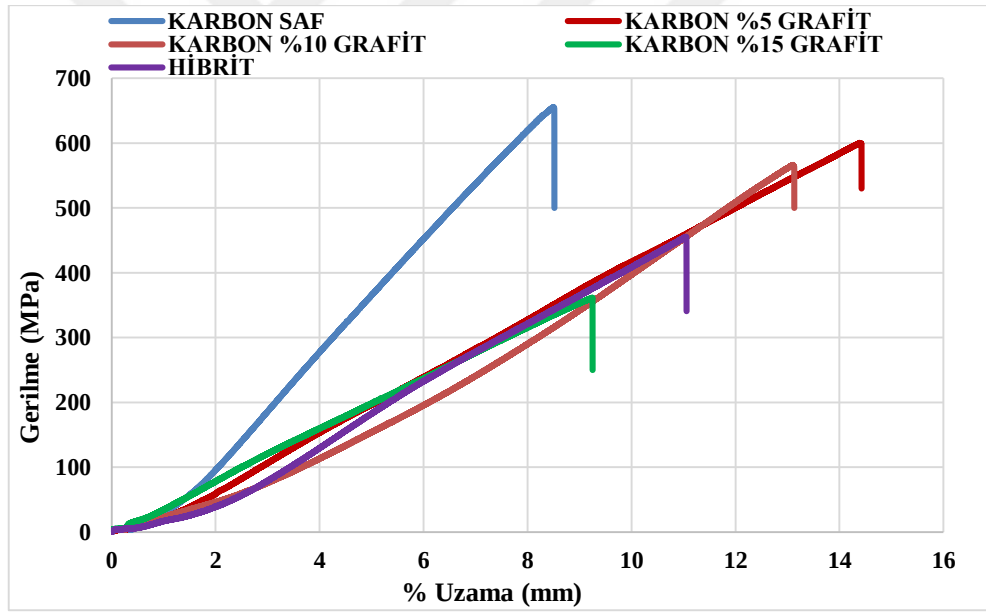
Şekil 6.1 - Şekil 6.4'teki uzama değerlerindeki değişimlere bakıldığında cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlere dolgu ilavesinin kompozitin % uzama değerlerini artırdığı anlaşılmaktadır. Ancak dolgu oranının artmasıyla birlikte yüzde uzamanın düştüğü, hibrit kompozitlerde ise tekrar artmaya başladığı görülmektedir. Yapılan benzer çalışmalarda artan dolgu ilavesinin epoksi ve dolgu malzemesi arasındaki bağı zayıflatmasından ve topaklanmayı arttırmasından dolayı kırılabilirliğin arttığını ifade etmişlerdir (Asi ve ark. 2008; Ozsoy ve ark. 2015).



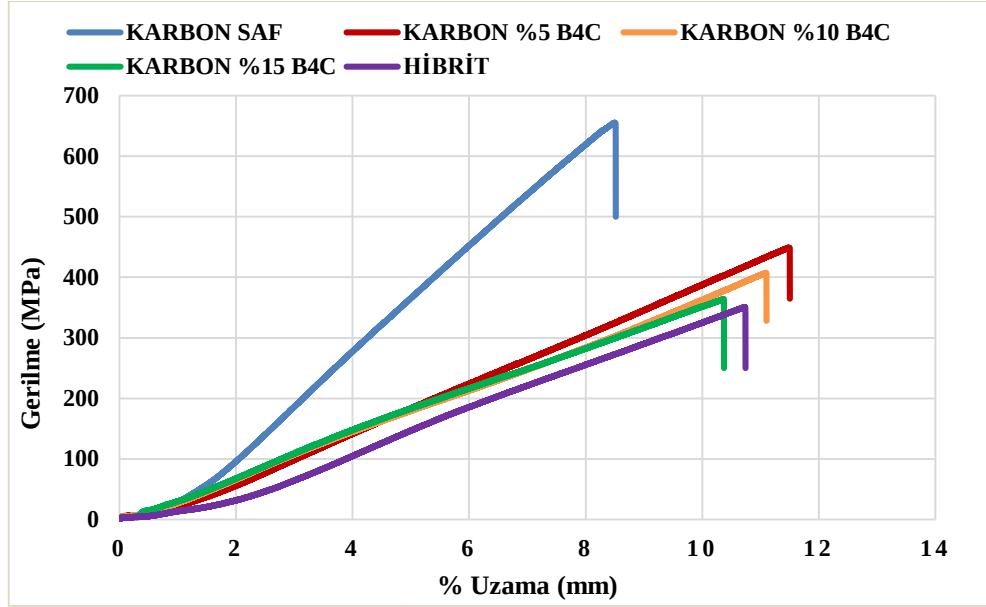
Şekil 6.1. Dolgusuz ve grafit dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin gerilme- % uzama grafiği



Şekil 6.2. Dolgusuz ve B₄C dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin gerilme- % uzama grafiği



Şekil 6.3. Dolgusuz ve grafit dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin gerilme- % uzama grafiği



Şekil 6.4. Saf ve B₄C katkılı Karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin gerilme- % uzama grafiği

6.2. Eğilme Deneyi Sonuçları

Eğilme deneylerinde her bir parametre için 3 adet test yapılarak sonuçların ortalaması alınmıştır. Dolgusuz ve dolgulu kompozit malzemelere ait eğilme deney sonuçları Tablo 6.2’de verilmiştir. Dolgulu ve dolgusuz cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlere ait eğilme deney grafikleri Şekil 6.5 - Şekil 6.8’de gösterilmiştir.

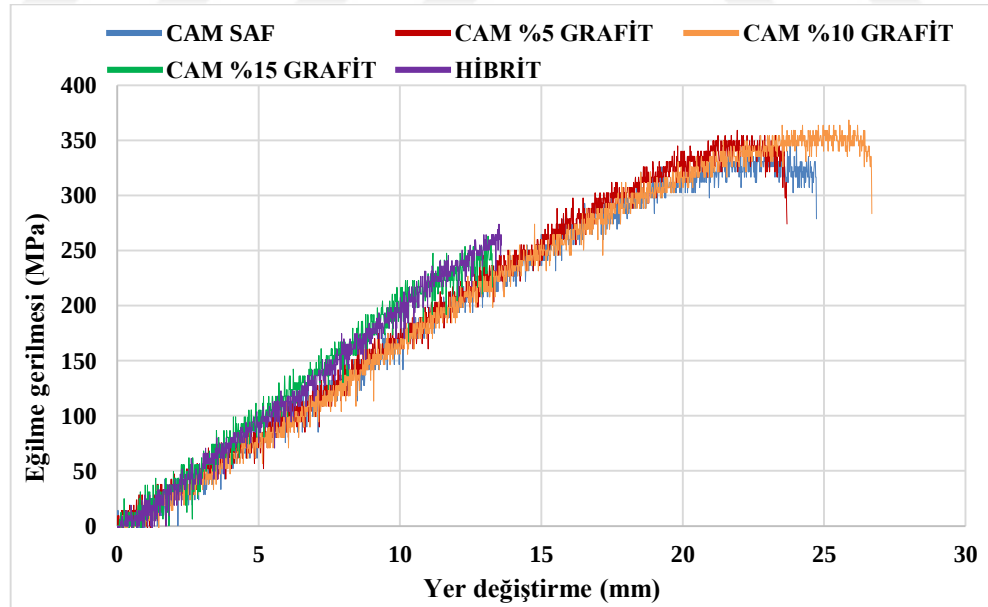
6.2.1. Eğilme deneyi sonuçlarının karşılaştırılması

Dolgu maddesi ile matris arasındaki ara yüzey bağlarının veya yapışmalarının ve homojen dolgu dağılmasının partikül takviyeli sistemlerin bazı mekanik özellikleri üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu iyi bilinmektedir. Fiber ve matris arasındaki güçlü ara yüzey bağı, daha yüksek eğilme özelliklerine katkıda bulunur. Şekil 6.5 - Şekil 6.8’deki grafikler incelendiğinde cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerde % 10 dolgu oranına kadar hem B₄C hemde grafit dolgulu kompozitlerin eğilme dayanımlarını arttığı gözlenmiştir. Dolgu oranı %15’e çıkarıldığında ise olumsuz bir etki yaparak eğilme mukavemetinin düştüğü tespit edilmiştir. Ancak karbon elyaf türüne ait hibrit kompozit malzemesinin eğilme gerilmesi dolgusuz kompozit malzemeye göre bir miktar artış göstermiştir. Bunun sebebi karbon elyaf malzemesinin cam elyafa göre daha sağlam bir yapıya sahip olmasından ötürü olduğu söylenebilir. Grafit ve B₄C dolgu malzemelerinin yüksek oranlarda ilavesinin dolgu maddesiyle epoksi reçine arasında zayıf bir arayüzey bağ oluşturduğu ve artan yüksek dolgu

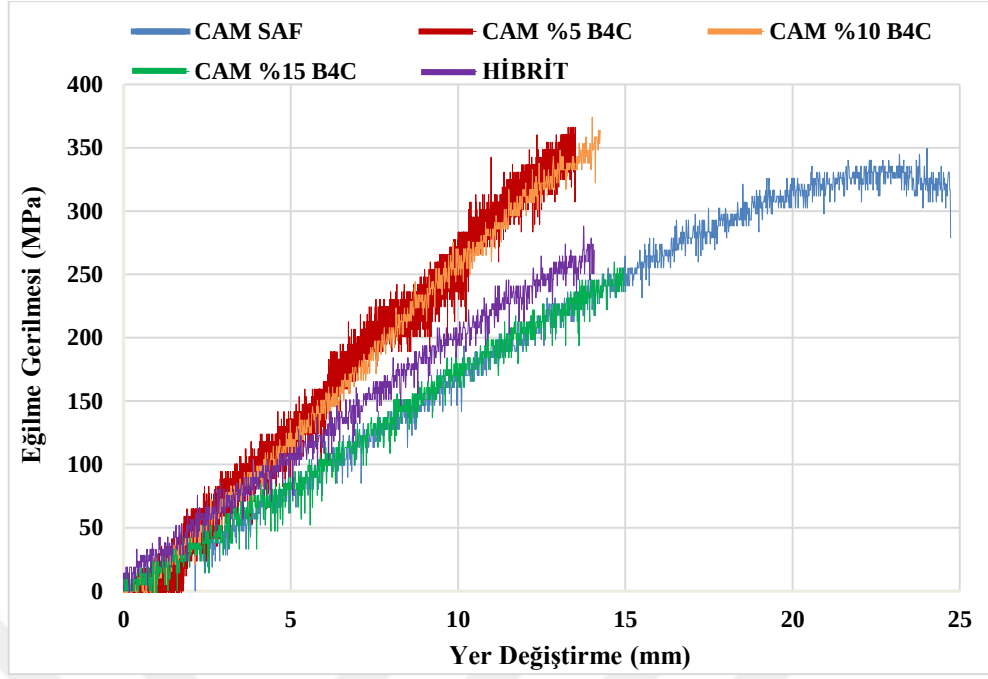
takviyesinin matris fazına yapışamaması nedeniyle eğilme gerilmesini düşürdüğü yapılan literatür araştırmasında görülmüştür (Asi ve ark. 2008 - Ozsoy ve ark. 2015).

Tablo 6.2. Eğilme deneyi sonuçları

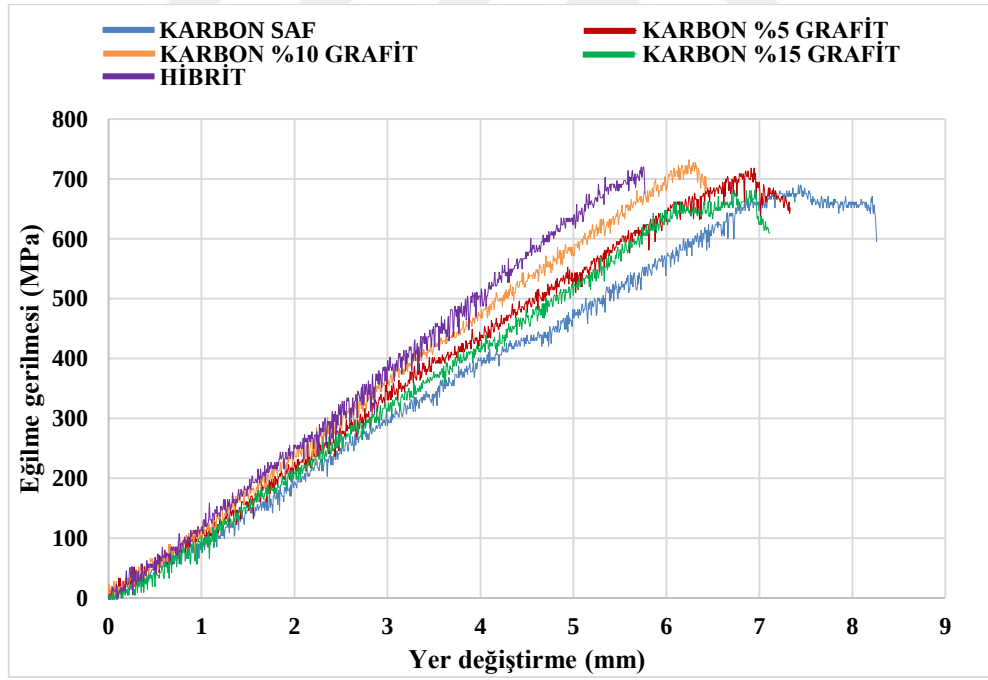
Elyaf türü	Numuneler	Eğilme (MPa)
Cam	Dolgusuz	349
Cam	%5 Gr	358
Cam	%10 Gr	368
Cam	%15 Gr	259
Cam	%5 B ₄ C	365
Cam	%10 B ₄ C	384
Cam	%15 B ₄ C	262
Cam	Hibrit (%7,5 Gr, %7,5 B ₄ C)	287
Karbon	Dolgusuz	689
Karbon	%5 Gr	717
Karbon	%10 Gr	731
Karbon	%15 Gr	679
Karbon	%5 B ₄ C	703
Karbon	%10 B ₄ C	745
Karbon	%15 B ₄ C	708
Karbon	Hibrit (%7,5 Gr, %7,5 B ₄ C)	719



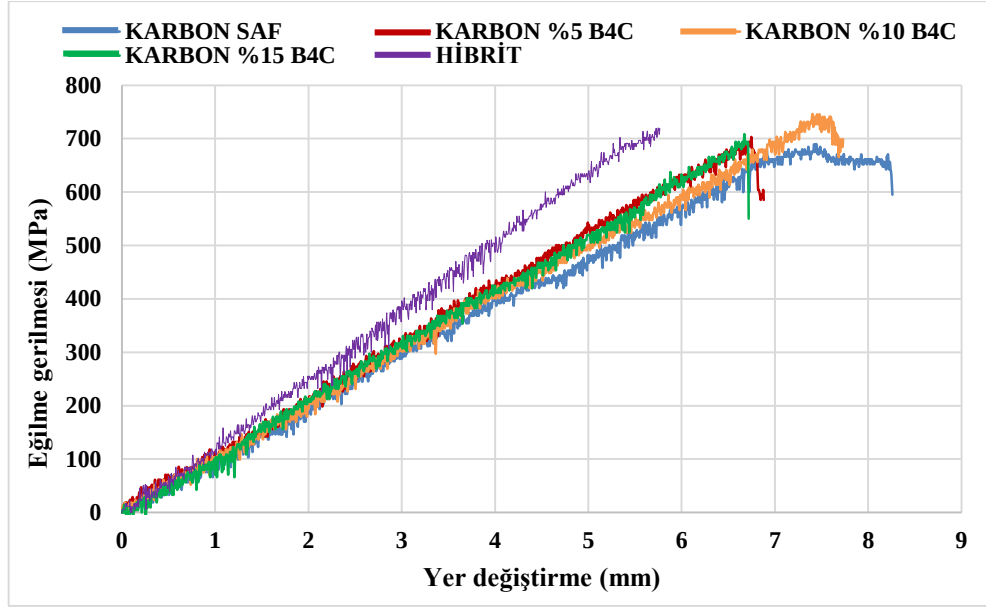
Şekil 6.5. Dolgusuz ve grafit dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin eğilme-yer değiştirme grafiği



Şekil 6.6. Dolgusuz ve B₄C dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin eğilme-yer değiştirme grafiği



Şekil 6.7. Dolgusuz ve grafit dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin eğilme-yer değiştirme grafiği



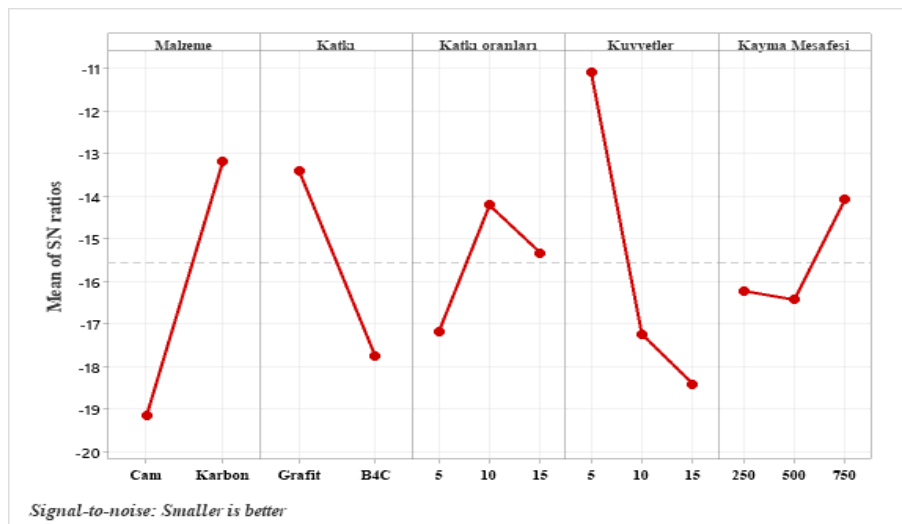
Şekil 6.8. Dolgusuz ve B₄C dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin eğilme-yer değiştirme grafiği

6.3. Aşınma Deneyi Sonuçları

%5, %10 ve %15 grafit ve B₄C katkı oranlarında cam ve karbon elyaf takviyeli numunelerin Taguchi tasarım tablosuna göre yapılan aşınma testleri 300 m/sn hızında 5 N, 10 N ve 15 N yük altında ve 250 m, 500 m ve 750 m kayma mesafesinde oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

6.3.1. Aşınma oranı sonuçları

Elyaf tipi, dolgu tipi, dolgu oranları, kuvvet ve kayma mesafesine bağlı aşınma oranı grafiği Şekil 6.9'da verilmiştir.

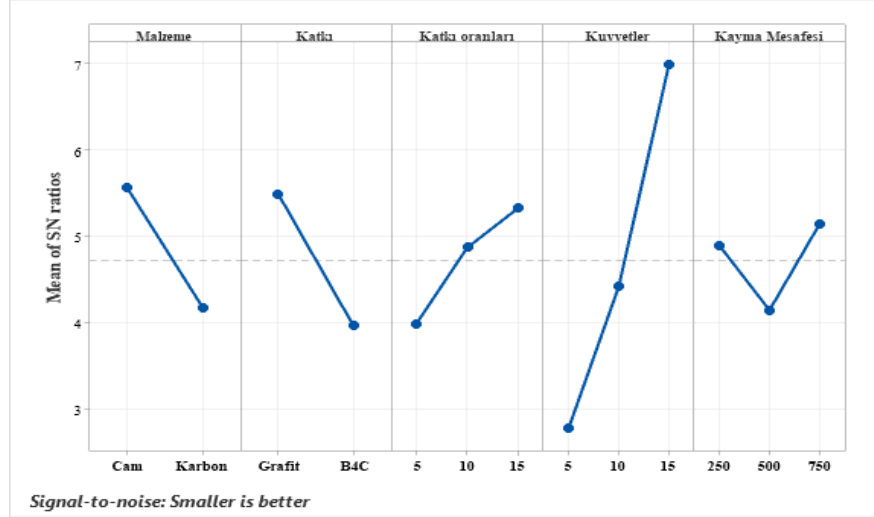


Şekil 6.9. Aşınma oranı grafiği (mm³/m)

Şekil 6.9'daki grafikte elyaf tipinin aşınma davranışı üzerindeki etkisi incelendiğinde cam elyafın karbon elyafa göre daha çok aşındığı görülmüştür. Benzer şekilde yapılan başka bir çalışmanın da yaptığımız çalışmayla paralellik arz ettiği belirlenmiştir (Suresha ve Chandramohan, 2006). B₄C ve grafit dolgu malzemeleri karşılaştırıldığında B₄C dolgusunun grafit dolgu malzemesine kıyasla aşınma oranını daha çok arttırmıştır. Literatür incelendiğinde grafitin katı yağlayıcı özelliğe sahip olmasından ötürü aşınmaya karşı olan direnci arttırdığı bilinmektedir (Sudheer ve ark., 2014; Suresha ve Chandramohan 2007). Katkı oranlarının etkisi incelendiğinde ise %5 katkı oranına sahip kompozit malzemelerin %10 ve %15 katkı oranına sahip kompozit malzemelere göre daha çok aşındığı tespit edilmiştir. Katkı oranı %10'dan %15'e çıkıldığında aşınmaya karşı direncin düştüğü görülmüştür. Belirli bir oranın üzerine çıkıldığında aşınma sırasında kompozit yapı içerisindeki aşındırıcı parçacıkların matris içerisinden çıkarak kompozit ile çelik bilye arasında abrasiv bir etki yaptığı söylenebilir (Raju ve ark., 2013). Şekil 6.9'da uygulanan kuvvetin aşınma oranı üzerindeki etkisi incelendiğinde 5N yükten 10N yüke çıkıldığında aşınma oranının ciddi bir şekilde arttığı belirlenmiştir. 10N'dan 15N'a çıkıldığında ise aşınmadaki artış oranının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlar literatürde yapılan çalışmalarla paralellik arz etmiştir (Arun ve ark., 2017; Kim ve ark., 2012). Kayma mesafesinin aşınma üzerindeki etkisine bakıldığında 250m'den 500m kayma mesafesine kadar aşınma oranı azalmış, 750m mesafede ise aşınma oranı tekrar artmaya başlamıştır. Artan yüksek dolgu oranı sertleşmeyi arttırdığından bilyenin reçineyi aşındırdıktan sonra sert dolgu maddesine denk gelmesi ile aşınma oranını azalttığı görülmüştür. Suresha ve ark. (2007), artan kayma mesafelerinde aşınma oranının düştüğünü gözlemlemişlerdir. Şekil 6.9'daki grafikler incelendiğinde Sinyal/Noise (S/N) oranlarına bağlı olarak aşınma oranı üzerinde en büyük etkiye kuvvetlerin sahip olduğu tespit edilmiştir. En az etkiye ise kayma mesafesi olduğu anlaşılmaktadır.

6.3.2. Sürtünme Katsayısı Sonuçları

Elyaf tipi, dolgu tipi, dolgu oranları, kuvvet ve kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı grafiği Şekil 6.10'da verilmiştir.



Şekil 6.10. Sürtünme katsayısı grafiği

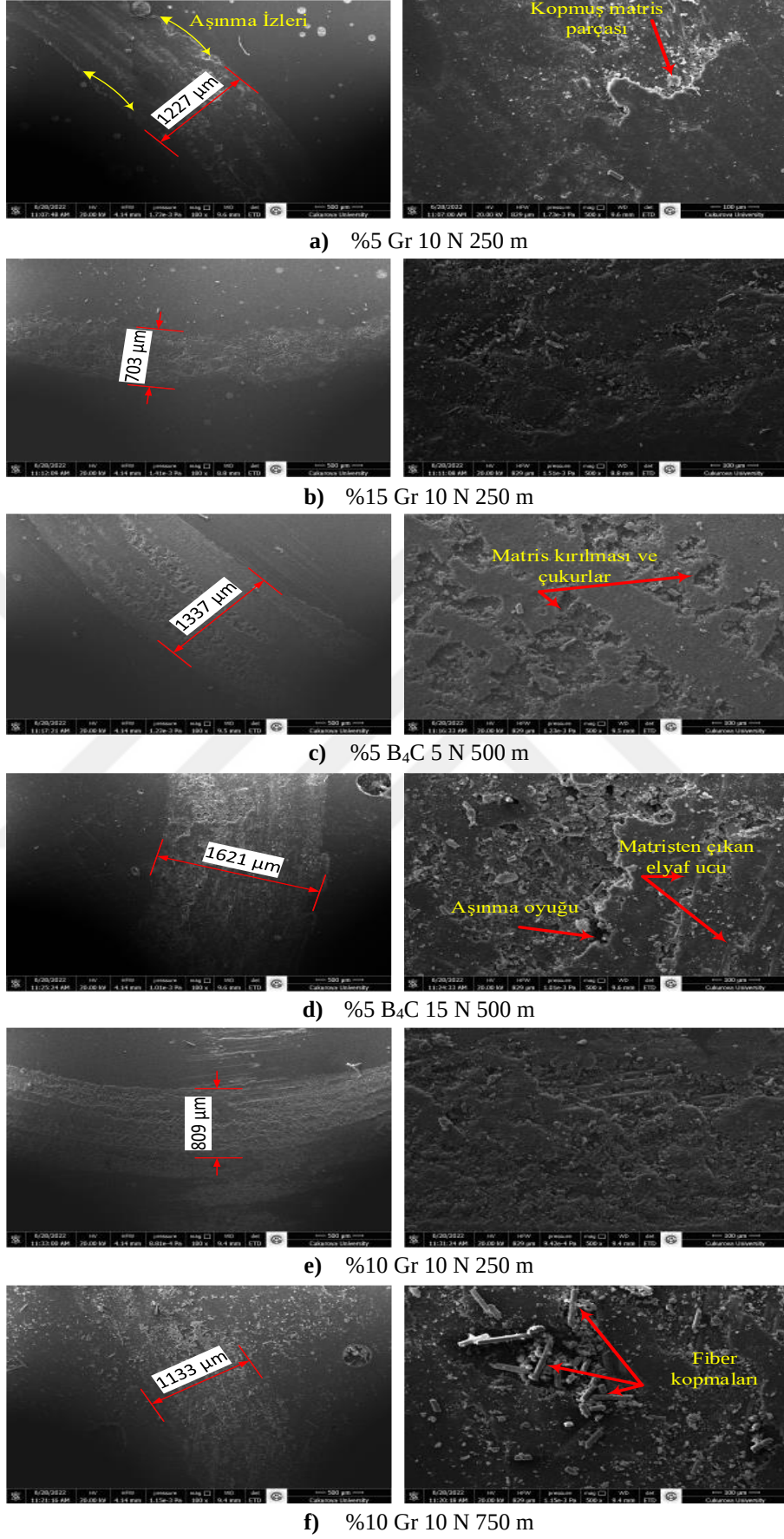
Şekil 6.10'daki grafik incelendiğinde elyaf tipleri karşılaştırıldığında cam elyafın sürtünme katsayısının karbon elyafa göre daha düşük olduğu görülmektedir. Takviye tipinin etkisi incelendiğinde ise grafit takviyeli cam ve karbon elyafli kompozitlerin sürtünme katsayılarının B₄C takviyeli cam ve karbon elyafli kompozitlere nazaran daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumun aşınma sırasında B₄C parçacıklarının matris içinden çıkarak pin ile malzeme arasında sıkışıp sürtünme katsayısının artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Takviye oranının etkisine bakıldığında ise artan takviye oranlarında hem grafit hem de B₄C takviyeli kompozitlerin sürtünme katsayılarının düştüğü gözlemlenmiştir. Şekil 6.10'daki yükün etkisi incelendiğinde grafit ve B₄C için yükteki artışla birlikte sürtünme katsayısının azaldığı görülmüştür. Daha yüksek yüklerde, numune yüzeyinden ayrılan grafit parçacıkları, numune ile kayma yüzeyi arasında sıkışıp, aralarında ince bir tabaka oluşturarak yağlayıcı görevi görür ve böylece sürtünme katsayısını azalmasına yardımcı olur. Bu durum Shivamurthy ve ark. (2012) yaptığı çalışmayla paralellik arz etmektedir. Kayma mesafesinin etkisine bakıldığında ise artan kayma mesafesinde sürtünme katsayısının önce artmaya başladığı daha sonra tekrar azalma eğilimine girdiği görülmektedir. Bu durumun aşındırıcı çelik bilyenin öncelikle yumuşak matris malzemeyi aşındırdıktan sonra açığa çıkan grafit ve B₄C takviyelerinin numune ile aşındırıcı pin arasında doğrudan temasını azaltması neticesinde sürtünme katsayısının düştüğü söylenebilir (Anjum ve ark., 2013). Şekil 6.10'daki grafikler incelendiğinde Sinyal/Noise (S/N) oranına bağlı olarak sürtünme katsayısı üzerinde en büyük etkiye kuvvetlerin sahip olduğu tespit edilmiştir. Sürtünme katsayısı üzerinde en az etkiye ise kayma mesafesi olduğu anlaşılmaktadır.

6.3.3. SEM morfolojisi

Aşınmış yüzeylerin ve çekme testi sonrası kopma yüzeylerinin takviye, yük ve kayma mesafesine bağlı SEM görüntüleri incelenmiştir.

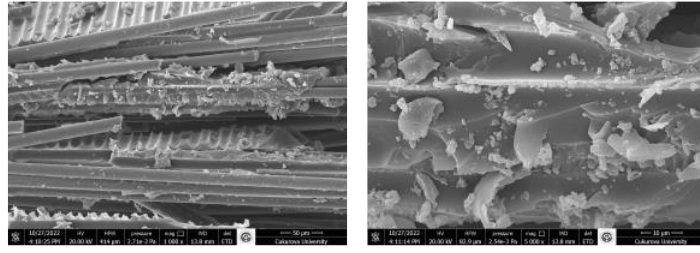
6.3.3.1. Aşınmış yüzeylere ait SEM morfolojisi

Grafit ve B₄C takviyeli kompozitlerin farklı parametrelerine ait (takviye oranı, yük ve kayma mesafesi) aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri (100x - 500x) Şekil 6.11'de verilmiştir. Şekil 6.11a - Şekil 6.11b incelendiğinde grafit takviyeli kompozitler için aynı yük ve kayma mesafesinde grafit takviye oranı %5'ten %15'e çıkarıldığında aşınma izlerinin daraldığı ve daha az aşınmaya maruz kaldığı görülmektedir. Grafit takviyesinin aşınmadaki yağlayıcı özelliğinden dolayı artan takviye oranında malzemenin aşınmaya karşı daha dirençli olmasını sağlamıştır. Artan grafit takviyesi ile aşınmış yüzeydeki oyuk, çatlak ve matris kopmalarının daha az olduğu tespit edilmiştir. Suresha ve ark. (2009) ve Basavarajappa ve ark. (2009) çalışmamızla uyumlu olarak grafit takviyesinin kompozitin tribolojik özelliğini geliştirdiği belirtmişlerdir. Şekil 6.11c - Şekil 6.11d incelendiğinde ise sabit takviye oranı ve kayma mesafesi altında uygulanan yükün etkisine bağlı olarak artan yükün iz genişliğini arttırdığı belirgin bir şekilde görülmektedir. Artan yük ile aşınma oyuklarının daha belirgin bir hale geldiği, matris kopmalarının fazlaştığı, matriste oluşan boşluk sayısının arttığı, yumuşak bir yüzey görüntüsünden daha fazla zarar görmüş bir yüzeye evrildiği gözlemlenmiştir. Şekil 6.11e - Şekil 6.11f incelendiğinde sabit takviye oranı ve yükte, artan kayma mesafesinin aşınmayı arttırdığı tespit edilmiştir. Mesafe arttıkça lif aşınması ve yırtılması uzun elyaf demetlerinden bazı liflerin koptuğu, matris tabakasının daha fazla deformasyona uğradığı, gözenekli ve çukurumsu yapının belirginleştiği gözlemlenmiştir.

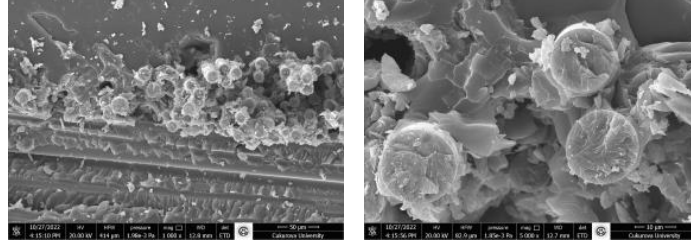
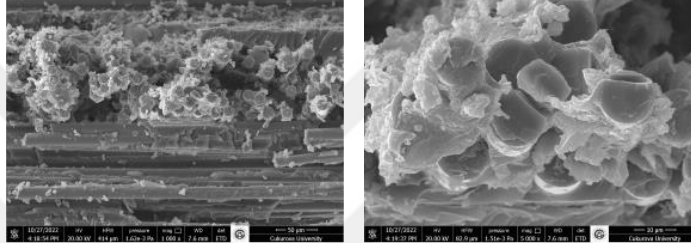
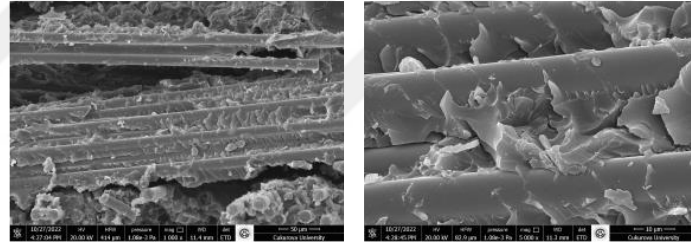
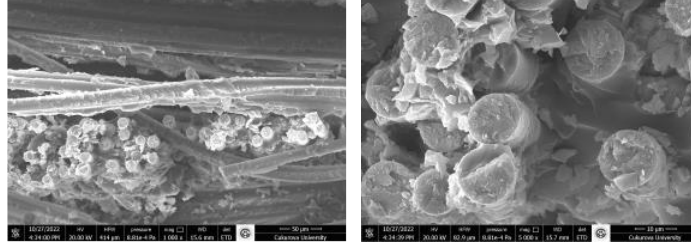


6.3.3.2. Çekme testi sonrası kopma yüzeylerine ait SEM morfolojisi

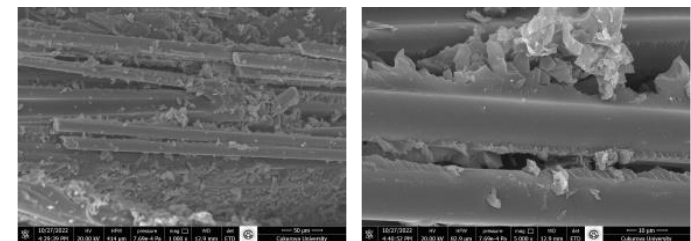
Dolgulu ve dolgusuz cam elyaf kompozitlerin kopma yüzeylerine ait SEM görüntüleri Şekil 6.12’de verilmiştir. Kırılma kesit morfolojisi incelendiğinde dolgusuz kompozitlerde matris ve elyaf arasındaki yapışmanın daha iyi gerçekleştiği Şekil 6.12’de görülmektedir. Dolgu ilavesi ve dolgu oranının artırılmasıyla matris-dolgu ve matris-elyaf arasındaki yapışmanın gittikçe azaldığı topaklanmaya bağlı olarak yapı içerisinde kopma kesitinde boşlukların arttığı ve buna bağlı olarak da yük taşıma kapasitesini düşüğü gözlemlenmiştir (Şekil 6.11 - Şekil 6.12). Dolgu ilavesinde en önemli parametre dolgunun matris içerisinde homojen dağılımı ile yayılımı ve bunun sonucunda kompozitin yük taşıma kapasitesinin artmasını sağlamasıdır. Shivamurthy ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada, cam elyaf takviyeli kompozite %3 oranında grafit dolgusunun çekme dayanımını arttırdığı, bu oranın üzerine çıkıldığında ise çekme dayanımının düşmeye başladığını hem SEM görüntülerinden hemde çekme testi sonuçlarından tespit etmişlerdir.



a) Dolgusuz cam elyafli kompozit

b) %5 B₄C cam elyafli kompozitc) %10 B₄C cam elyafli kompozitd) %15 B₄C cam elyafli kompozit

e) %5 Gr cam elyafli kompozit



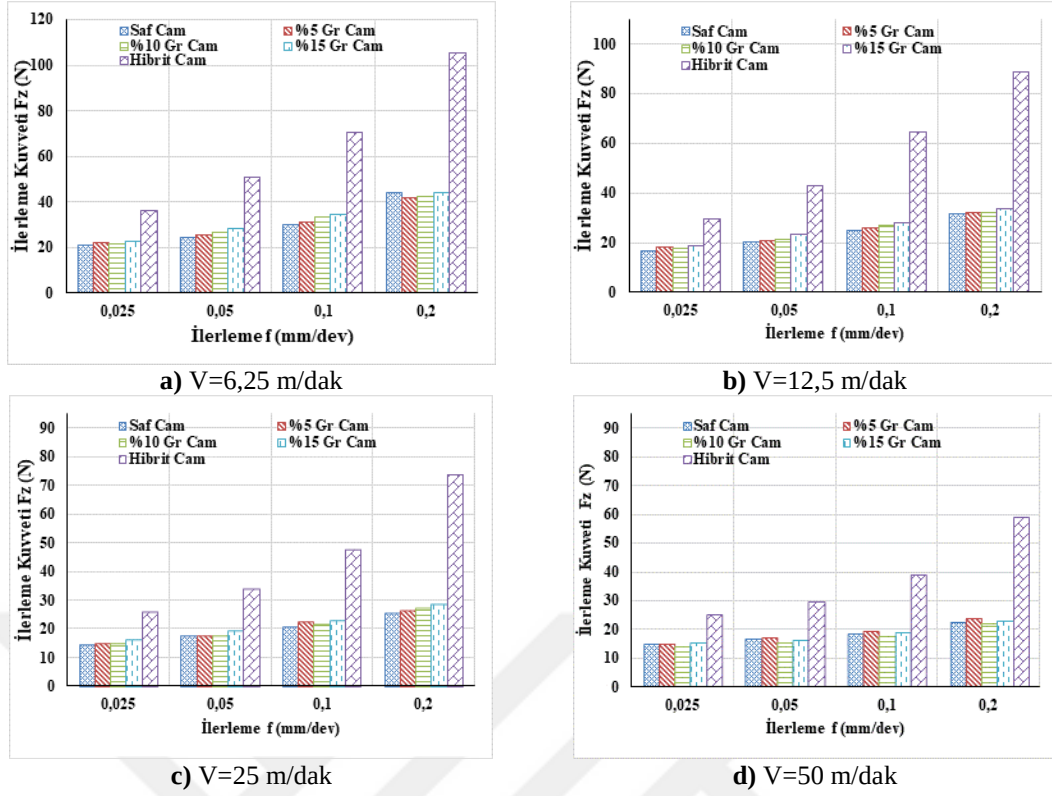
f) %10 Gr cam elyafli kompozit

Şekil 6.12. Çekme testi sonrası kopmuş yüzeylere ait takviye, yük ve kayma mesafesine bağlı SEM görüntüleri

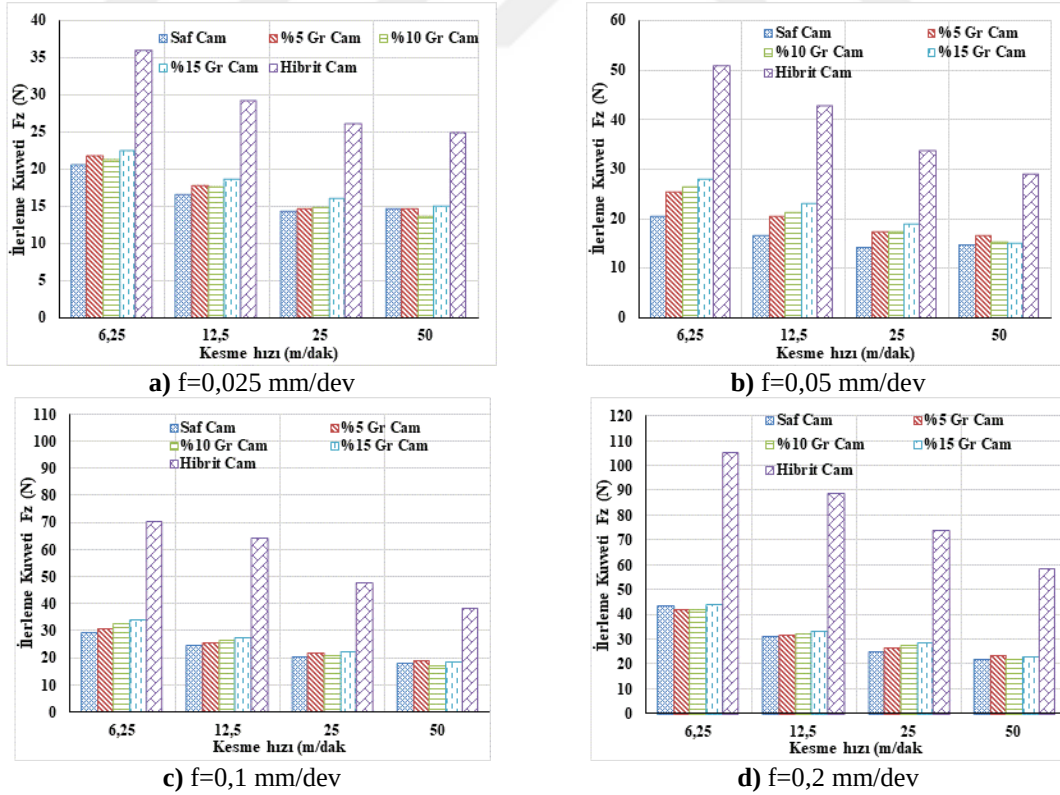
6.4. İlerleme Kuvvetlerinin Değerlendirilmesi

%5, %10 ve %15 grafit ve B₄C katkı oranlarında cam ve karbon elyaf takviyeli numunelere 4 farklı ilerleme oranında ($f_1=0,025$ mm/dev, $f_2=0,005$ mm/dev, $f_3=0,1$ mm/dev ve $f_4=0,2$ mm/dev) ve 4 farklı kesme hızı oranında ($V_1=6,25$ m/dak, $V_2=12,5$ m/dak, $V_3=25$ m/dak ve $V_4=50$ m/dak) boydan boya delik delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Dolgusuz, Grafit ve B₄C dolgulu, cam ve karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme parametrelerinde delik delme esnasında elde edilen ilerleme kuvvetleri Şekil 6.13 - Şekil 6.20’de verilmiştir. Şekil 6.13 - Şekil 6.20’deki ilerleme kuvvetleri grafikleri incelendiğinde, kesme hızı arttığında ilerleme kuvvetlerinin düştüğü görülmektedir. Söz konusu bu durum literatürle paralellik arz etmektedir (Parasuraman ve ark., 2021). Kesme hızı arttığında kesme bölgesindeki sıcaklık artacaktır. Bu durum malzemenin yumuşamasına katkı sağlayarak daha kolay delme işlemi gerçekleştirerek ilerleme kuvvetlerin azalmasına yardımcı olacaktır. Farklı kesme parametrelerinde elde edilen dolgusuz, grafit ve B₄C dolgulu, cam ve karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin delinmesinde elde edilen ilerleme kuvvetleri grafikleri incelendiğinde, ilerleme oranının artmasıyla ilerleme kuvvetlerinin arttığı Şekil 6.13 - Şekil 6.20’deki grafiklerden tespit edilmiştir. Söz konusu bu durum literatürde yapılan çalışmalarla benzerlik göstermiştir (Bayraltar ve ark. 2016; Raju ve ark. 2013). İlerleme oranının artmasıyla birim zamanda kaldırılan talaş kaldırma hacminin artması matkaba gelen yükü artırır, aynı zamanda ilerleme sırasında artan sürtünme ve talaş sıkışması ilerleme kuvvetlerinin artmasına neden olmaktadır. Şekil 6.13 - Şekil 6.20’deki grafikler incelendiğinde en düşük ilerleme kuvveti $V_4=50$ m/dak ve $f_1=0,025$ mm/dev kesme parametrelerinde elde edilirken en yüksek ilerleme kuvveti değerleri ise $V_1=6,25$ m/dak ve $f_4=0,2$ mm/dev de elde edilmiştir.

Dolgusuz ve grafit dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme ve ilerleme hızlarına bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvvetleri değişim grafikleri Şekil 6.13- Şekil 6.14’te verilmiştir. Şekil 6.13 - Şekil 6.14’teki grafikler incelendiğinde dolgusuz cam elyafli kompozit malzemenin grafit ve hibrit dolgulu kompozitlere kıyasla ilerleme kuvvetlerinin daha düşük olduğu görülmektedir. Grafit dolgulu kompozitlerde grafit dolgusunun ve grafit takviye oranının dolgusuz cam kompozitle kıyaslandığında, ilerleme kuvvetini çok az arttırdığı Şekil 6.13 - Şekil 6.14’teki grafiklerden anlaşılmaktadır. Ancak hibrit kompozitlerde B₄C takviyesi bulunmasından ötürü ciddi oranda bir ilerleme kuvveti artışı görülmektedir.

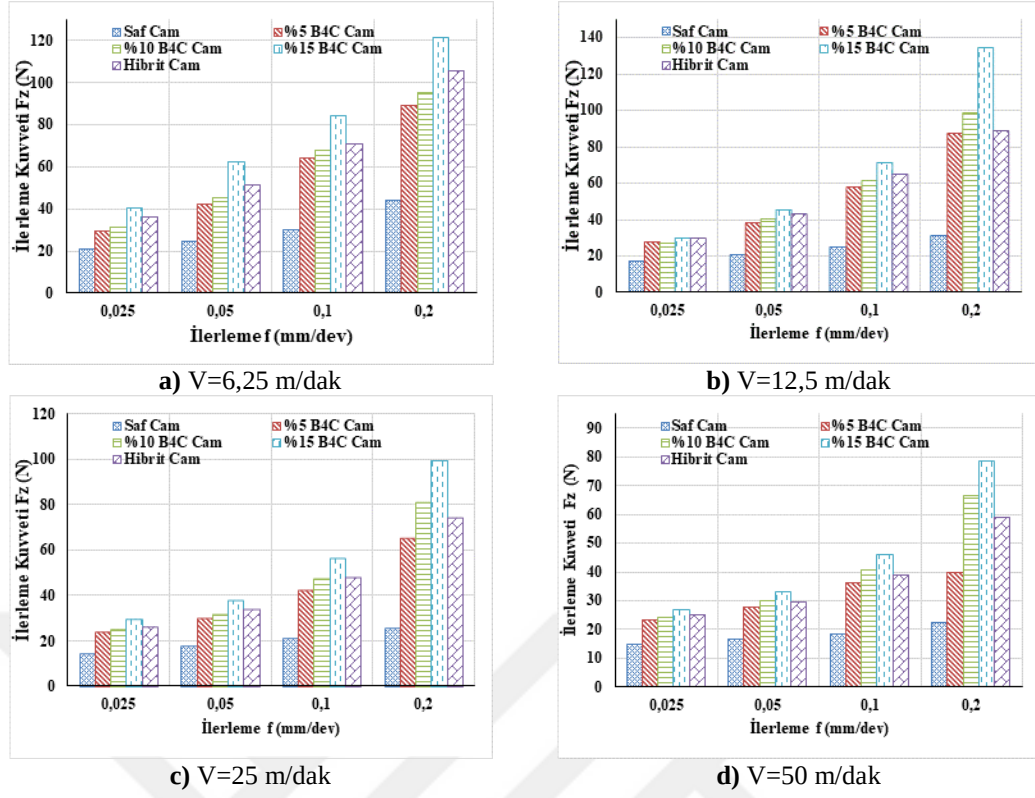


Şekil 6.13. Dolgusuz ve grafit dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme hızlarında ilerleme hızına bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvvetlerinin değişimi

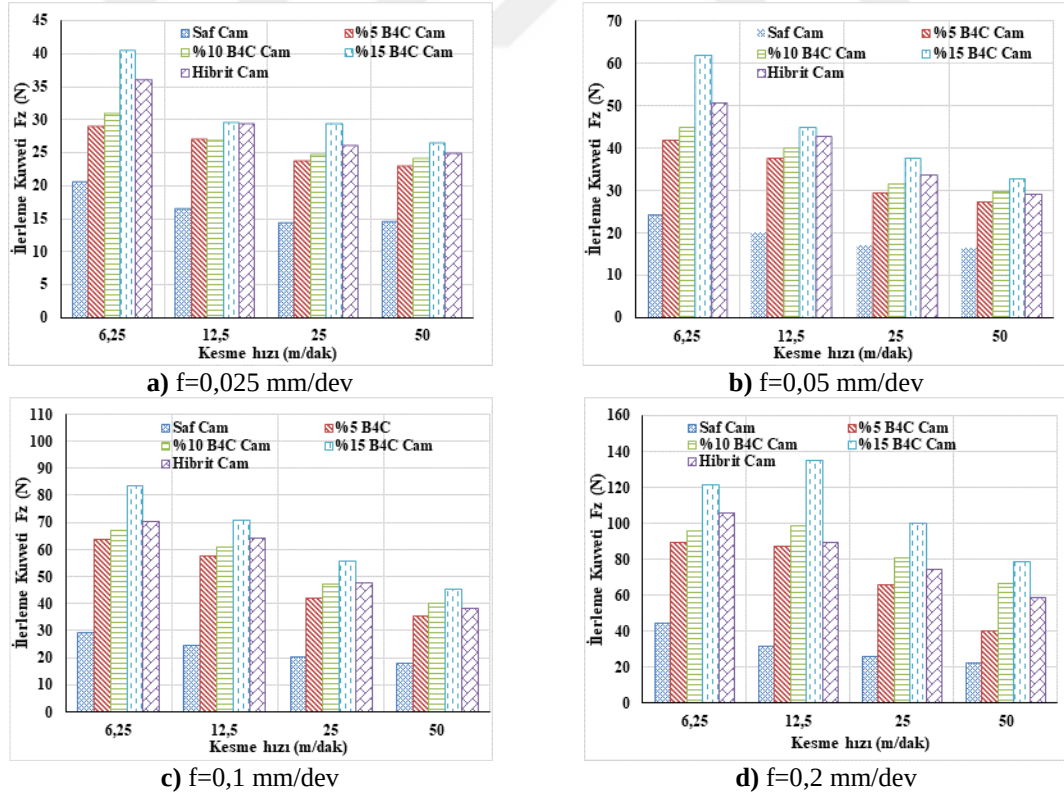


Şekil 6.14. Dolgusuz ve grafit dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı ilerleme oranlarında kesme hızına bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvvetlerinin değişimi

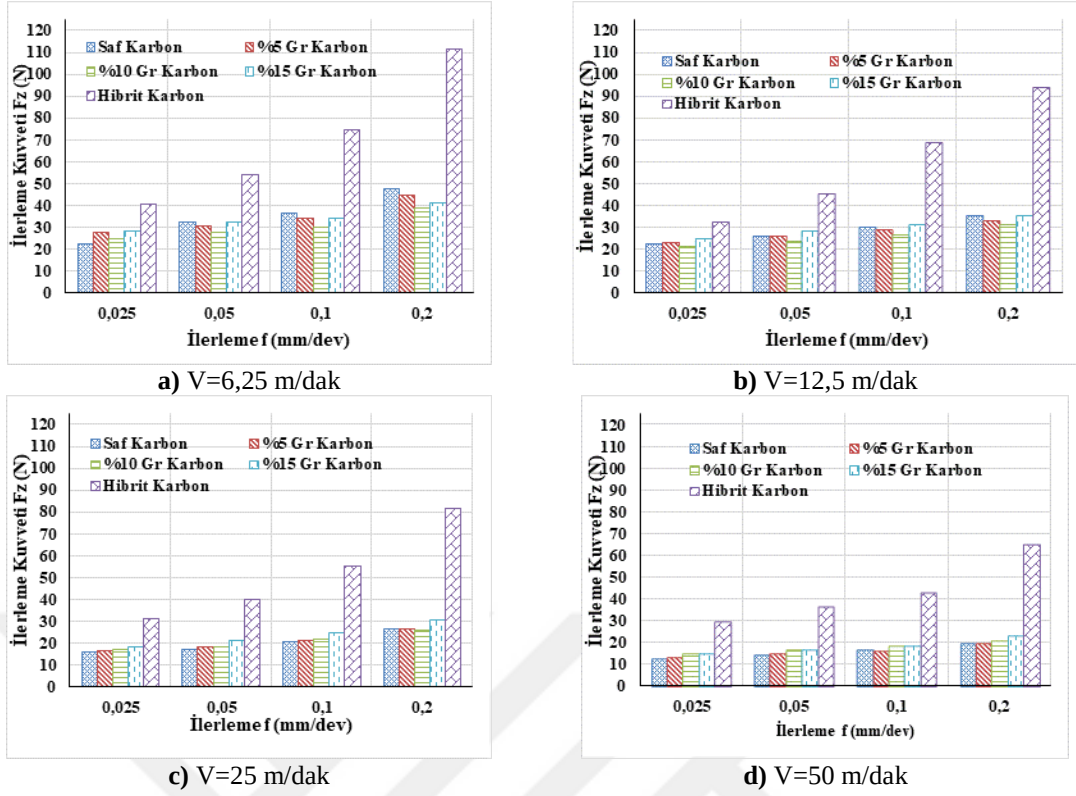
Bunun nedeni ise B₄C seramik dolgu malzemesinin çok yüksek sertliğe sahip olması delme esnasında matkabın daha fazla zorlanmasına sebep olarak ilerleme kuvvetlerinin daha yüksek çıkmasına neden olmuştur. Dolgusuz ve B₄C dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme ve ilerleme hızlarına bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvvetleri değişimi grafikleri Şekil 6.15 - Şekil 6.16'da verilmiştir. Şekil 6.15 - Şekil 6.16'daki grafikler incelendiğinde B₄C dolgu malzemesinin ve dolgu oranının ilerleme kuvvetlerini kayda değer oranlarda arttırdığı tespit edilmiştir. Hem ilerleme oranlarının hem de B₄C dolgu malzemesinin oranının artırılması ilerleme kuvvetlerini çok ciddi bir şekilde yükselmesine sebep olmuştur. Hibrid kompozitlerde ise ilerleme kuvvetleri %5 ve %15 B₄C dolgulu kompozitlerin arasında çıktığı Şekil 6.15 - Şekil 6.16'daki grafiklerden anlaşılmaktadır. Bunun nedeni ise hibrid kompozitlerde %7,5 oranında grafit takviyesi olmasından kaynaklanmaktadır. Grafit dolgu malzemesinin B₄C dolgulu malzemesine kıyasla daha yumuşak olması delme esnasında ilerleme kuvvetlerinin daha düşük çıkmasını sağlamıştır. Dolgusuz ve grafit dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme ve ilerleme hızlarına bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvvetleri değişim grafikleri Şekil 6.17 - Şekil 6.18'de verilmiştir. Şekil 6.17 - Şekil 6.18'deki grafikler incelendiğinde düşük kesme hızı ve yüksek ilerleme oranlarında grafit dolgulu kompozitlerin ilerleme kuvveti değerleri saf karbon kompozitlerden daha düşük çıktığı tespit edilmiştir. Diğer bir ifadeyle karbon elyaflı kompozitlerde grafit dolgusu düşük kesme hızı ve yüksek ilerleme oranlarında ilerleme kuvvetlerinin düşmesini sağlamıştır. Düşük ilerleme ve yüksek kesme hızlarında hem grafit dolgusunun hem de grafit dolgu oranının ilerleme kuvvetlerinin artmasına sebep olduğu Şekil 6.17 - Şekil 6.18'deki grafiklerden anlaşılmaktadır. Dolgusuz ve grafit dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin delinmesinde elde edilen ilerleme kuvvetleri incelendiğinde en yüksek ilerleme kuvvetleri hibrit dolgulu karbon elyaflı kompozitlerden elde edilmiştir. Söz konusu bu durum hibrit kompozitlerde B₄C dolgu malzemesinin olmasından kaynaklanmaktadır.



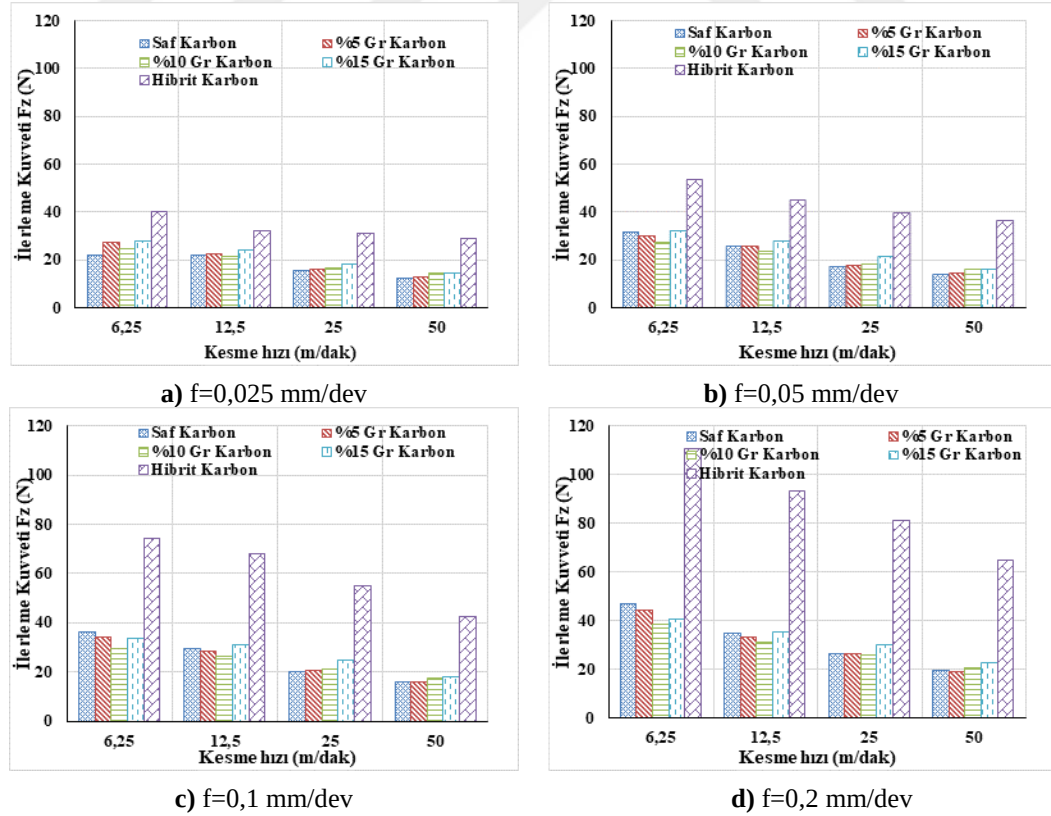
Şekil 6.15. Dolgusuz ve B₄C dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme hızlarında ilerleme hızına bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvvetlerinin değişimi



Şekil 6.16. Dolgusuz ve B₄C dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı ilerleme oranlarında kesme hızına bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvvetlerinin değişimi

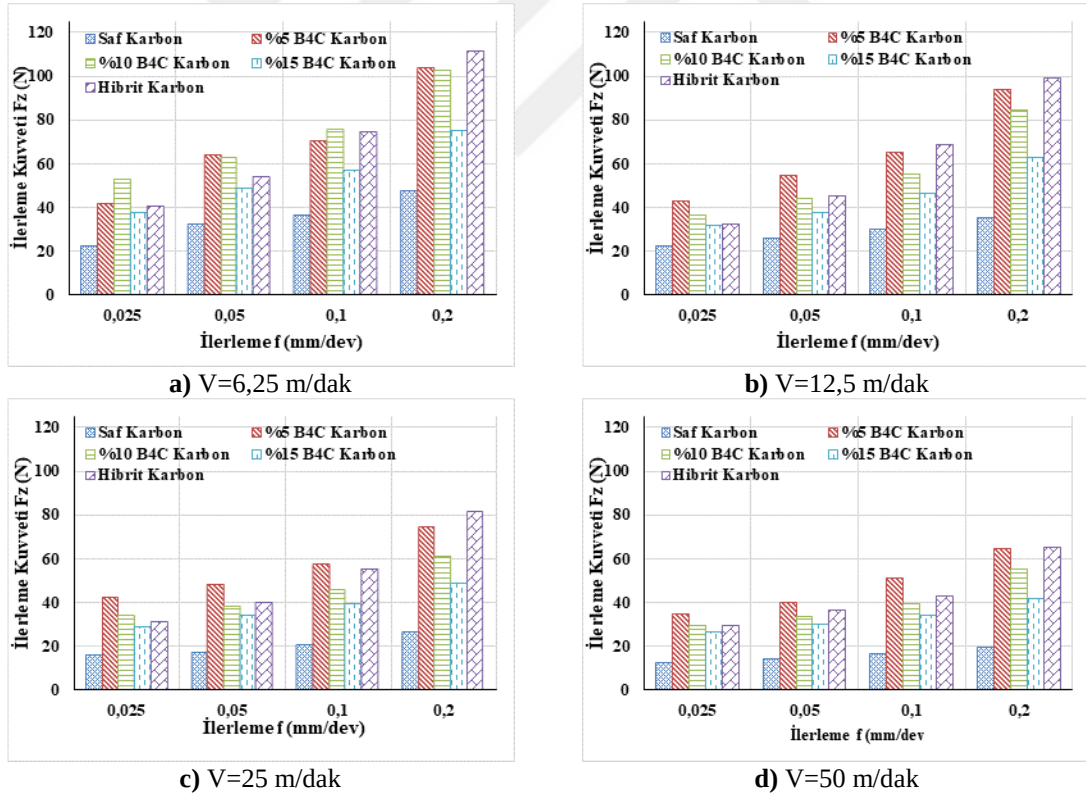


Şekil 6.17. Dolgusuz ve grafit dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme hızlarında ilerleme hızına bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvvetlerinin değişimi

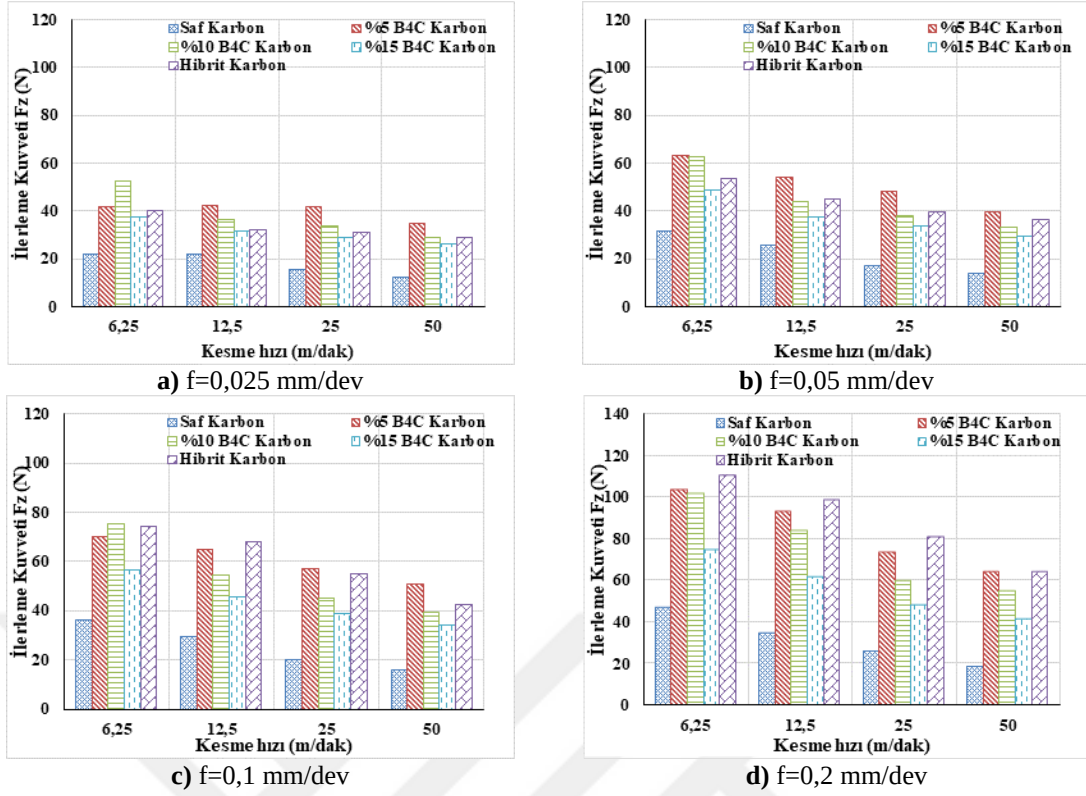


Şekil 6.18. Dolgusuz ve grafit dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı ilerleme oranlarında kesme hızına bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvvetlerinin değişimi

Dolgosuz ve B₄C dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme ve ilerleme hızlarına bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvvetleri değişimi Şekil 6.19 - Şekil 6.20’de verilmiştir. Şekil 6.19 - Şekil 6.20’deki ilerleme kuvvetleri grafikleri incelendiğinde genel olarak karbon takviyeli kompozitlere B₄C dolgusu ilerleme kuvvetlerinin artmasına neden olmuştur. Ancak dolgu oranı arttıkça ilerleme kuvvetlerinin düştüğü tespit edilmiştir. B₄C dolgusunun yüksek oranlarda topaklanmaya eğilimli olmasından dolayı yüksek dolgu oranlarında homojen bir yapının elde edilmediği ve bu nedenle kuvvetlerin düştüğü düşünülmektedir. Şekil 6.19 - Şekil 6.20’deki dolgosuz ve B₄C dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin delinmesinde elde edilen ilerleme kuvvetleri grafikleri incelendiğinde, yüksek ilerleme oranlarında en yüksek ilerleme kuvvetleri hibrit dolgulu karbon elyaf takviyeli kompozitlerden elde edilmiştir. En düşük ilerleme kuvvetleri ise bütün kesme parametrelerinde dolgosuz karbon elyaf takviyeli kompozitlerin delinmesinde ortaya çıkmıştır.



Şekil 6.19. Dolgosuz ve B₄C dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme hızlarında ilerleme hızına bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvvetlerinin değişimi



Şekil 6.20. Dolgunsuz ve B₄C dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı ilerleme oranlarında kesme hızına bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvvetlerinin değişimi

6.5. Titreşim ve Momentlerin Değerlendirilmesi

%5, %10 ve %15 B₄C ve grafit katkı oranlarında karbon ve cam elyaf takviyeli numunelerin delinmesi sırasında ölçülen titreşim ve moment değerleri için en yüksek ilerleme kuvvetlerinin elde edildiği ($V_1=6,25$ m/dak ve $f_4=0,2$ mm/dev) ve en düşük ilerleme kuvvetlerinin elde edildiği ($V_4=50$ m/dak ve $f_1=0,025$ mm/dev) kesme parametrelerindeki ölçümler referans alınmıştır. Ölçülen titreşim ve moment değerleri birbirine çok yakın çıktığı için özellikle en yüksek ve en düşük ilerleme kuvvetlerinin elde edildiği kesme parametrelerindeki ölçümler dikkate alınarak değerlendirilmiştir. %5, %10 ve %15 grafit ve B₄C katkı oranlarında karbon ve cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme ve ilerleme hızlarına bağlı olarak elde edilen titreşim ve moment değerleri Tablo 6.3'te verilmiştir. Tablo 6.3'teki titreşim ve moment değerleri incelendiğinde cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin hem titreşim hem de moment değerleri arasında değişen işleme parametrelerine bağlı olarak elde edilen değerler arasında belirgin bir fark olmadığı görülmüştür. Aynı durum karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin hem titreşim hem de moment değerleri içinde geçerlidir. Malzeme türüne bağlı olarak karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerin hem titreşim hem de moment değerleri birbirleriyle karşılaştırıldığında ise karbon elyaf takviyeli kompozit

malzemelerin delinmesi sırasında ölçülen hem titreşim hem de moment değerleri cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin hem titreşim hem de moment değerlerinden daha yüksek çıktığı Tablo 6.3'ten tespit edilmiştir. Ortaya çıkan bu durum, karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerinden daha sert olması nedeniyle delme esnasında oluşan hem titreşim hem de moment değerlerinin daha yüksek çıkması şeklinde açıklanabilir.

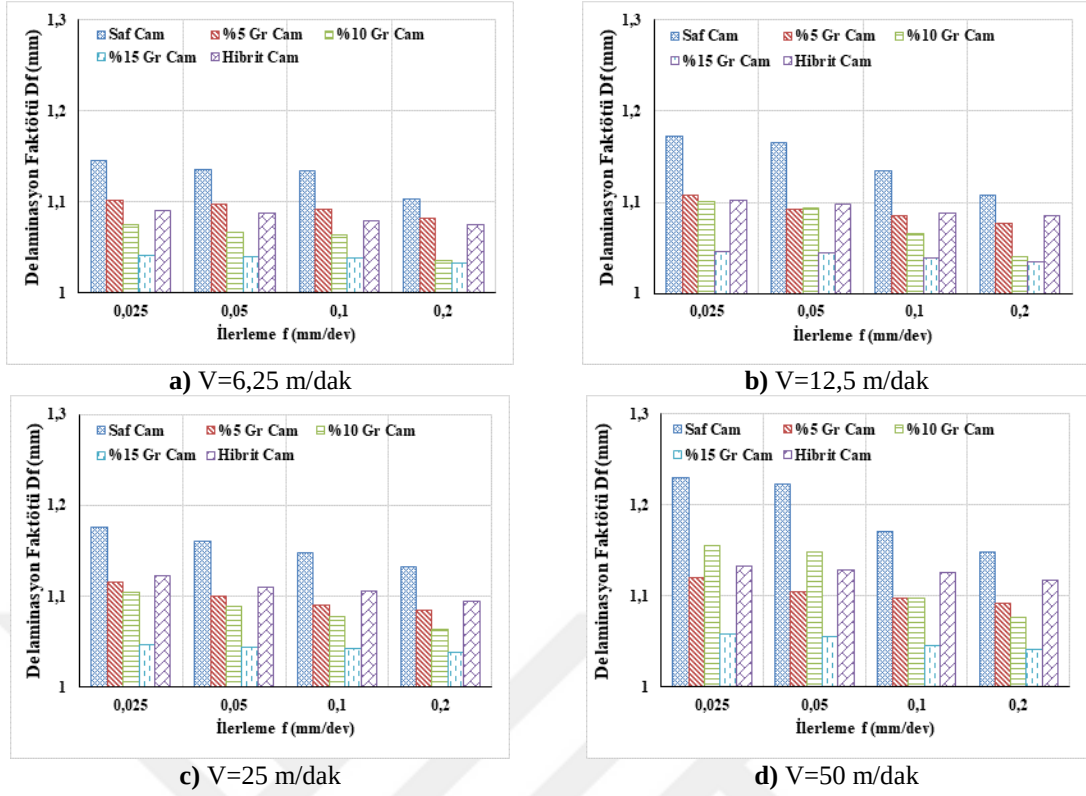
Tablo 6.3. Karbon ve cam elyaf takviyeli numunelerin titreşim ve moment değerleri

Kesme parametreleri	Malzeme türü	Moment	Titreşim	Malzeme türü	Moment	Titreşim
$V_1=6,25$ m/dak ve $f_4=0,2$ mm/dev	Saf cam	1,163	0,085459	Saf karbon	1,56	0,093593
$V_4=50$ m/dak ve $f_1=0,025$ mm/dev		0,22	0,085210		0,67	0,093093
$V_1=6,25$ m/dak ve $f_4=0,2$ mm/dev	Cam %5 Gr	1,18	0,085275	Karbon %5 Gr	1,05	0,093283
$V_4=50$ m/dak ve $f_1=0,025$ mm/dev		0,24	0,085130		0,58	0,093110
$V_1=6,25$ m/dak ve $f_4=0,2$ mm/dev	Cam %10 Gr	1,28	0,085311	Karbon %10 Gr	1,01	0,093178
$V_4=50$ m/dak ve $f_1=0,025$ mm/dev		0,29	0,085180		0,74	0,093068
$V_1=6,25$ m/dak ve $f_4=0,2$ mm/dev	Cam %15 Gr	1,43	0,086321	Karbon %15 Gr	1,29	0,093212
$V_4=50$ m/dak ve $f_1=0,025$ mm/dev		0,41	0,086105		0,48	0,093038
$V_1=6,25$ m/dak ve $f_4=0,2$ mm/dev	Cam hibrit	2,93	0,087153	Karbon hibrit	3,29	0,097617
$V_4=50$ m/dak ve $f_1=0,025$ mm/dev		0,48	0,086950		0,88	0,095117
$V_1=6,25$ m/dak ve $f_4=0,2$ mm/dev	Cam %5 B ₄ C	2,69	0,087051	Karbon %5 B ₄ C	2,99	0,096410
$V_4=50$ m/dak ve $f_1=0,025$ mm/dev		0,89	0,864450		0,94	0,095415
$V_1=6,25$ m/dak ve $f_4=0,2$ mm/dev	Cam %10 B ₄ C	2,96	0,087190	Karbon %10 B ₄ C	3,38	0,096167
$V_4=50$ m/dak ve $f_1=0,025$ mm/dev		0,37	0,086589		0,78	0,095063
$V_1=6,25$ m/dak ve $f_4=0,2$ mm/dev	Cam %15 B ₄ C	3,42	0,087349	Karbon %15 B ₄ C	2,21	0,095480
$V_4=50$ m/dak ve $f_1=0,025$ mm/dev		0,65	0,086788		0,7	0,095013

6.6. Delaminasyon Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

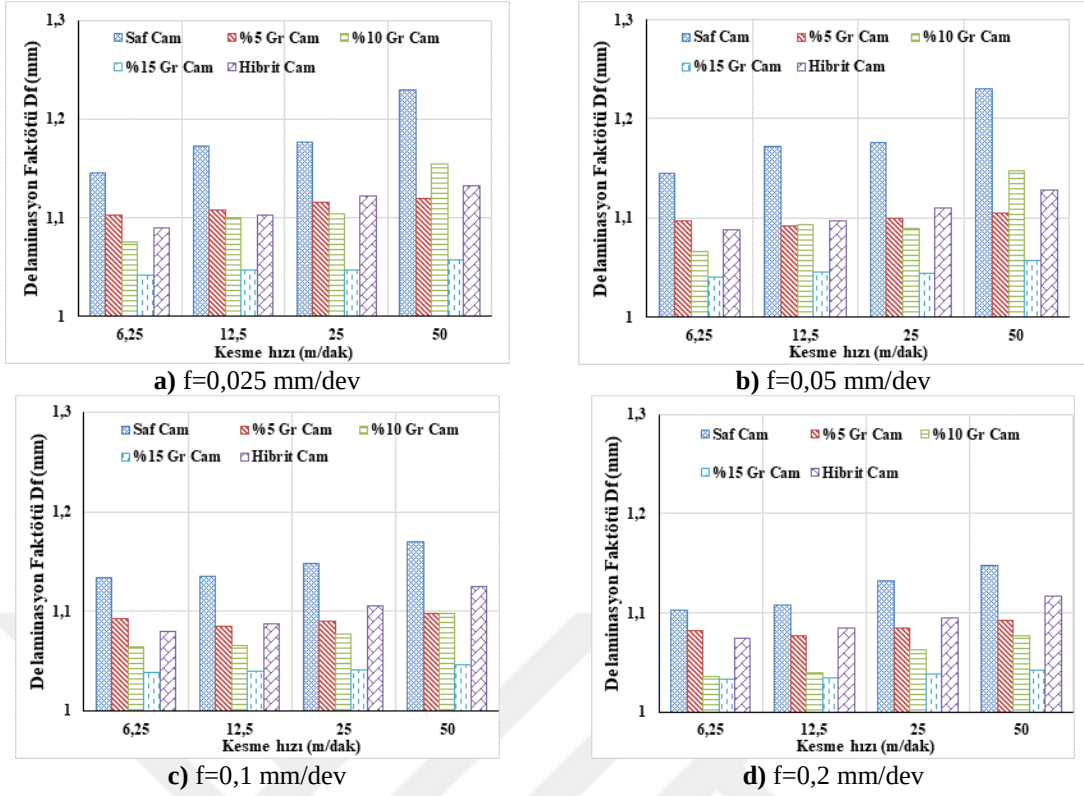
Delaminasyon, kısaca kompozit malzemelerde tabakaların birbirinden ayrılması şeklinde tarif edilebilir. Delaminasyon tabakalı kompozitlerde çok sık karşılaşılan hasar tipidir. Çünkü üretilen kompozitlerde tabakalar arasındaki mukavemet düşüktür. Bu

yüzden delik delme operasyonlarında çok sık karşılaşılan hasar tipi olarak karşımıza çıkmaktadır. Kompozit malzemelerde delaminasyon malzemede ömür ve rijitlik kaybı gibi olumsuz sonuçlara neden olacağından önemli bir çalışma konusudur. 4 farklı ilerleme oranında ($f_1=0,025$ mm/dev, $f_2=0,005$ mm/dev, $f_3=0,1$ mm/dev ve $f_4=0,2$ mm/dev) ve 4 farklı kesme hızı oranında ($V_1=6,25$ m/dak, $V_2=12,5$ m/dak, $V_3=25$ m/dak ve $V_4=50$ m/dak) %5, %10 ve %15 grafit ve B4C katkı oranlarında cam ve karbon elyaf takviyeli numunelerin boydan boya delik delme işlemi sonrası delaminasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Delaminasyon ölçümleri delik çıkışından ölçülmüştür. Dolgusuz, Grafit ve B4C dolgulu, cam ve karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme parametrelerinde delik delme esnasında elde edilen delaminasyon değerleri Şekil 6.21- Şekil 6.28’de verilmiştir. Şekil 6.21 - Şekil 6.28’deki delaminasyon grafikleri incelendiğinde, kesme hızı arttığında delaminasyon değerlerinin arttığı görülmektedir. Söz konusu bu durum literatürle paralellik arz etmektedir (Melentiev ve ark., 2016; Krishnaraj ve ark. 2012). Yüksek kesme hızlarında sürtünmeden dolayı sıcaklığın artması matris tokluğunu düşürmekte, delik çapının büyümesine ve bunun sonucunda delaminasyon değerlerinin yükselmesine neden olmaktadır. Farklı kesme parametrelerinde elde edilen dolgusuz, grafit ve B4C dolgulu, cam ve karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin delinmesinde elde edilen ilerleme kuvvetleri grafikleri incelendiğinde, ilerleme oranının artmasıyla delaminasyon değerlerinin azaldığı Şekil 6.21 - Şekil 6.28’deki grafiklerden tespit edilmiştir. Söz konusu bu durum literatürde yapılan çalışmalarla benzerlik göstermiştir (Sunny, 2014; Ghasemi, 2011). Düşük ilerleme hızlarında matkabın kompoziti delme süresini arttırması kesici takım ile kompozit malzeme arasında yüksek sürtünmeye ve delme bölgesinde daha fazla ısı oluşmasına neden olmaktadır. Bu durumda delik çıkışında termal tahribatın artmasından dolayı delaminasyon üzerinde olumsuz bir etkiye neden olduğu düşünülmektedir. Bu yüzden ilerleme hızının artması delaminasyon değerlerinin düşmesini sağlamıştır. Şekil 6.21 - Şekil 6.28’deki grafikler incelendiğinde hem cam hemde karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerde, en düşük delaminasyon değerleri $V_1=6,25$ m/dak ve $f_4=0,2$ mm/dev kesme parametrelerinde elde edilirken en yüksek delaminasyon değerleri ise $V_4=50$ m/dak ve $f_1=0,025$ mm/dev’de elde edilmiştir.



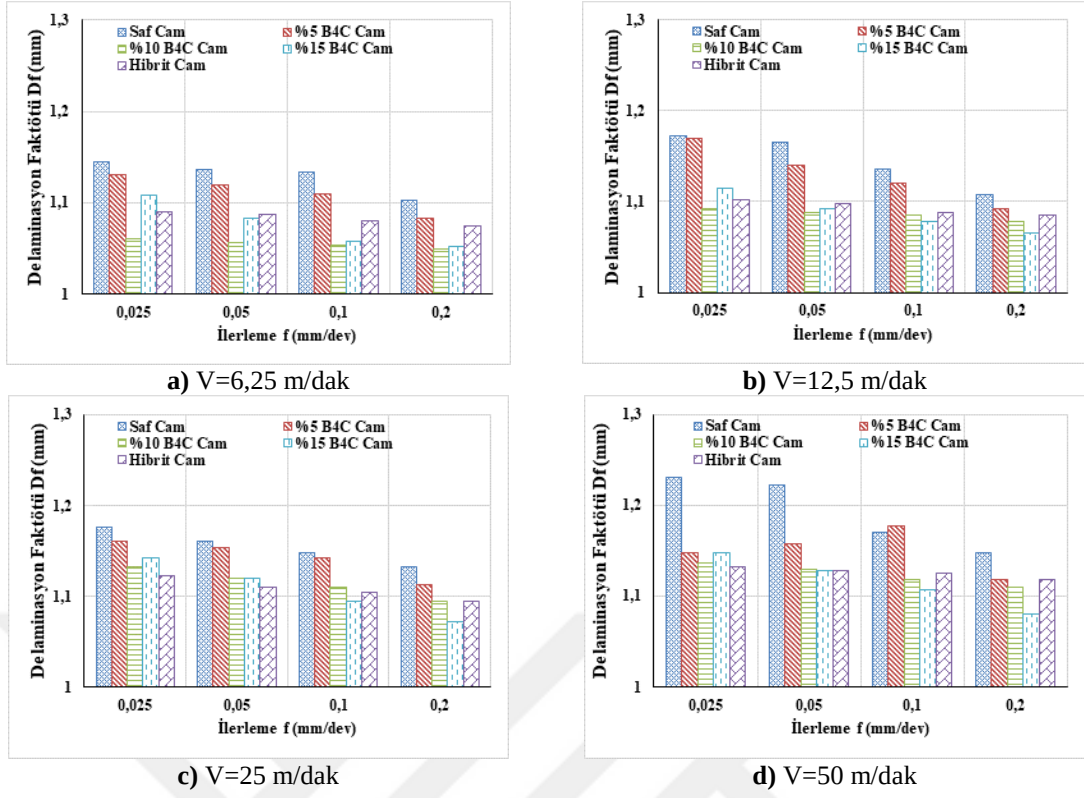
Şekil 6.21. Dolgusuz ve grafit dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme hızlarında ilerleme hızına bağlı olarak elde edilen delaminasyon değerlerinin değişimi

Dolgusuz ve grafit dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme ve ilerleme hızlarına bağlı olarak elde edilen delaminasyon değerlerinin değişim grafikleri Şekil 6.21 - Şekil 6.22’de verilmiştir. Şekil 6.21 - Şekil 6.22’deki grafikler incelendiğinde dolgusuz cam elyafli kompozit malzemenin grafit ve hibrit dolgulu kompozitlere kıyasla delaminasyon değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise grafit takviyeli kompozitlerin içerisinde yer alan grafitin yağlayıcı özelliğinden kaynaklanmaktadır. Grafit dolgulu kompozitlerde grafit dolgusunun ve grafit takviye oranının dolgusuz cam kompozitle kıyaslandığında, delaminasyon değerlerini azalttığı Şekil 6.21 - Şekil 6.22’deki grafiklerden anlaşılmaktadır. Ancak hibrit kompozitlerde görülen delaminasyon değerleri %10 ve %15 grafit dolgulu cam elyaf takviyeli kompozitlere göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Hibrit kompozitlerin içerisinde yer alan B₄C’nin grafitten daha sert olması delaminasyon değerlerinin daha yüksek çıkmasına sebep olmuştur.

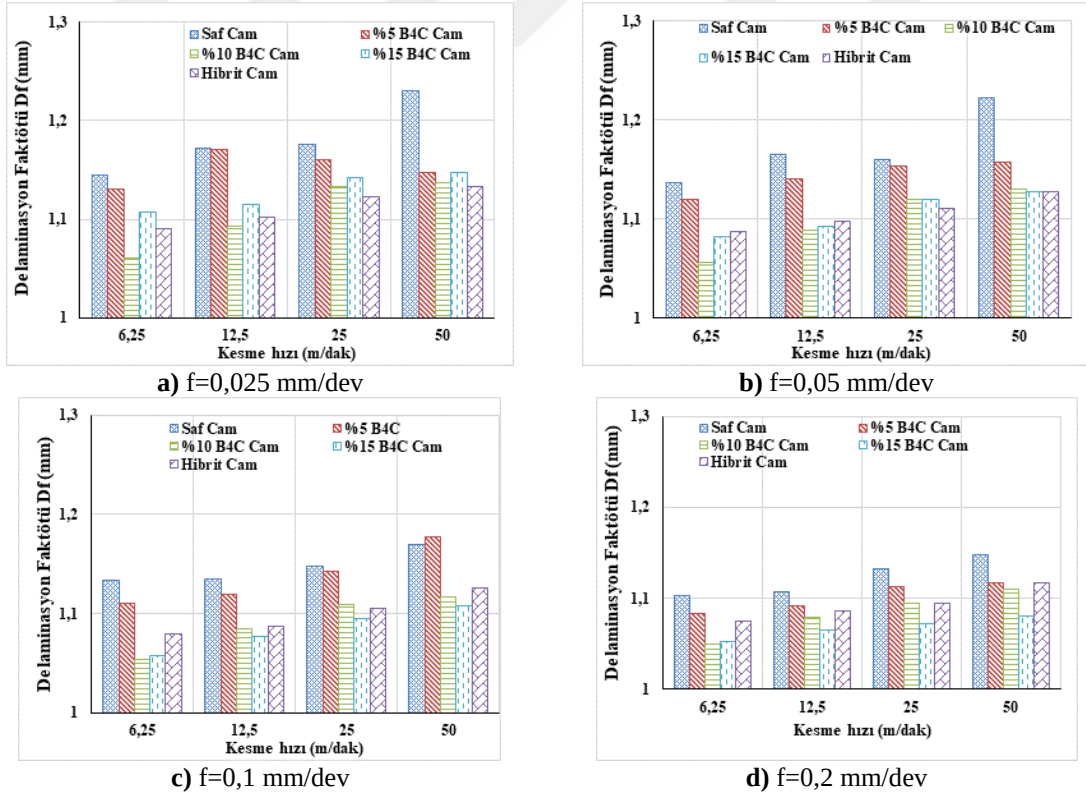


Şekil 6.22. Dolgusuz ve grafit dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı ilerleme oranlarında kesme hızına bağlı olarak elde edilen delaminasyon değerlerinin değişimi

Dolgusuz ve B₄C dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme ve ilerleme hızlarına bağlı olarak elde edilen delaminasyon değerlerinin değişim grafikleri Şekil 6.23 - Şekil 6.24'te verilmiştir. Şekil 6.23 - Şekil 6.24'teki grafikler incelendiğinde %5, %10 ve %15 B₄C dolgulu cam kompozit malzemelerde delaminasyon değerleri saf camdan daha düşük çıkmıştır. B₄C dolgu malzemesinin ve dolgu oranının delaminasyon değerlerini azalttığı tespit edilmiştir (Şekil 6.23 - Şekil 6.24). Dolgusuz ve B₄C dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitler kendi aralarında kıyaslandığında düşük ilerleme hızlarında en iyi delaminasyon değerleri %10 B₄C dolgu oranında elde edilirken yüksek ilerleme hızlarında ise %15 B₄C dolgu oranında elde edilmiştir.

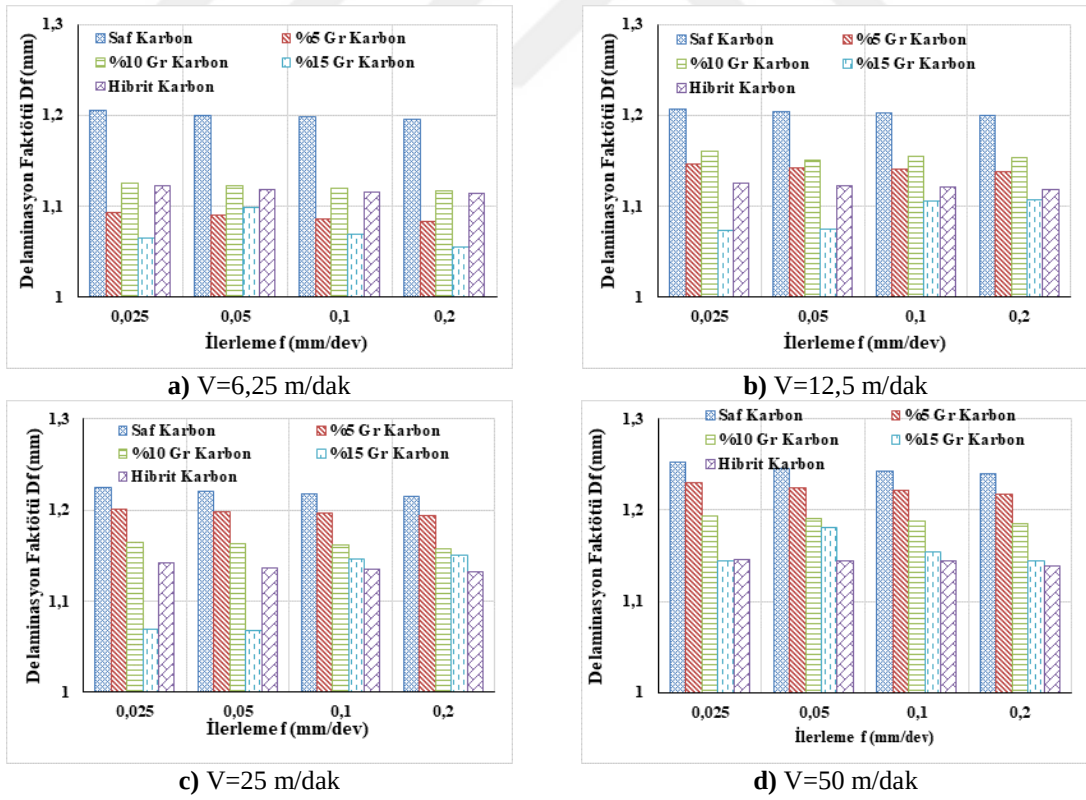


Şekil 6.23. Dolgusuz ve B₄C dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme hızlarında ilerleme hızına bağlı olarak elde edilen delaminasyon değerlerinin değişimi

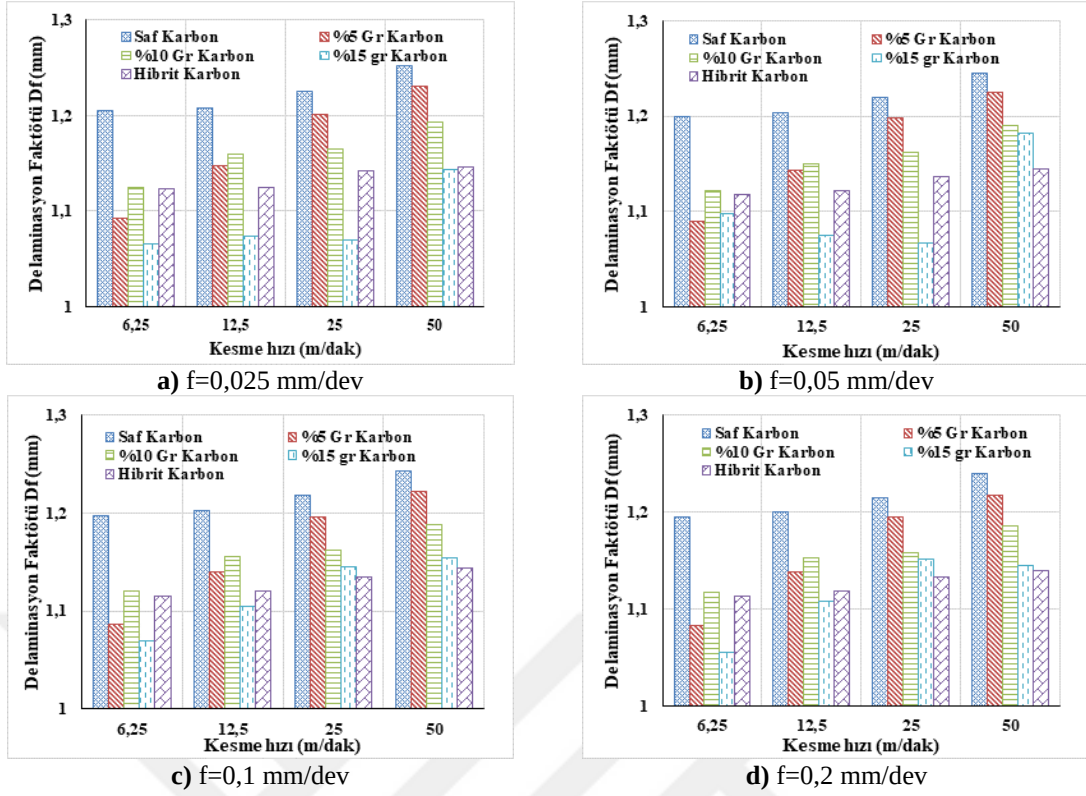


Şekil 6.24. Dolgusuz ve B₄C dolgulu cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı ilerleme oranlarında kesme hızına bağlı olarak elde edilen delaminasyon değerlerinin değişimi

Dolgunuz ve grafit dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme ve ilerleme hızlarına bağlı olarak elde edilen delaminasyon değerlerinin değişim grafikleri Şekil 6.25 - Şekil 6.26'da verilmiştir. Şekil 6.25 - Şekil 6.26'daki grafikler incelendiğinde grafit dolgulu kompozitlerin delaminasyon değerleri saf karbon kompozitlerden daha düşük çıktığı tespit edilmiştir. Düşük kesme hızlarında dolgu ilavesi ve dolgu oranının artması delaminasyon değerlerinin azalmasında önemli bir faktör olmuştur. Ancak yüksek kesme hızlarında %15 dolgu oranındaki kompozit malzemelerin delaminasyon değerlerinde belirgin bir düşüş gerçekleşmiştir. Şekil 6.25 - Şekil 6.26'daki grafiklere bakıldığında farklı kesme ve ilerleme hızlarında en yüksek delaminasyon değeri dolgunuz karbon elyafli kompozitten elde edilirken en düşük delaminasyon değeri ise %15 grafit dolgulu kompozitten elde edilmiştir. Dolgunuz karbon ve hibrit karbon kompozitlerin delaminasyon değerleri kendi aralarında karşılaştırıldığında en yüksek delaminasyon değerleri dolgunuz karbon kompozitlerde elde edilirken en düşük delaminasyon değerleri ise hibrit karbon kompozitlerden elde edilmiştir.

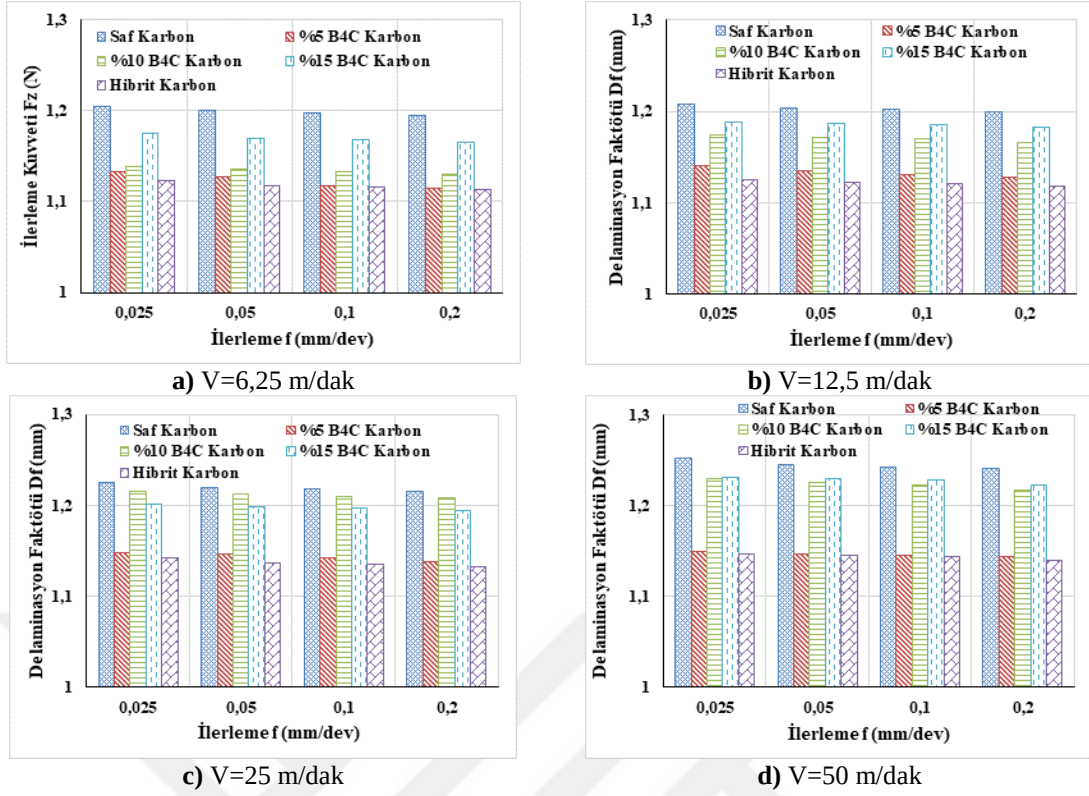


Şekil 6.25. Dolgunuz ve grafit dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme hızlarında ilerleme hızına bağlı olarak elde edilen delaminasyon değerlerinin değişimi

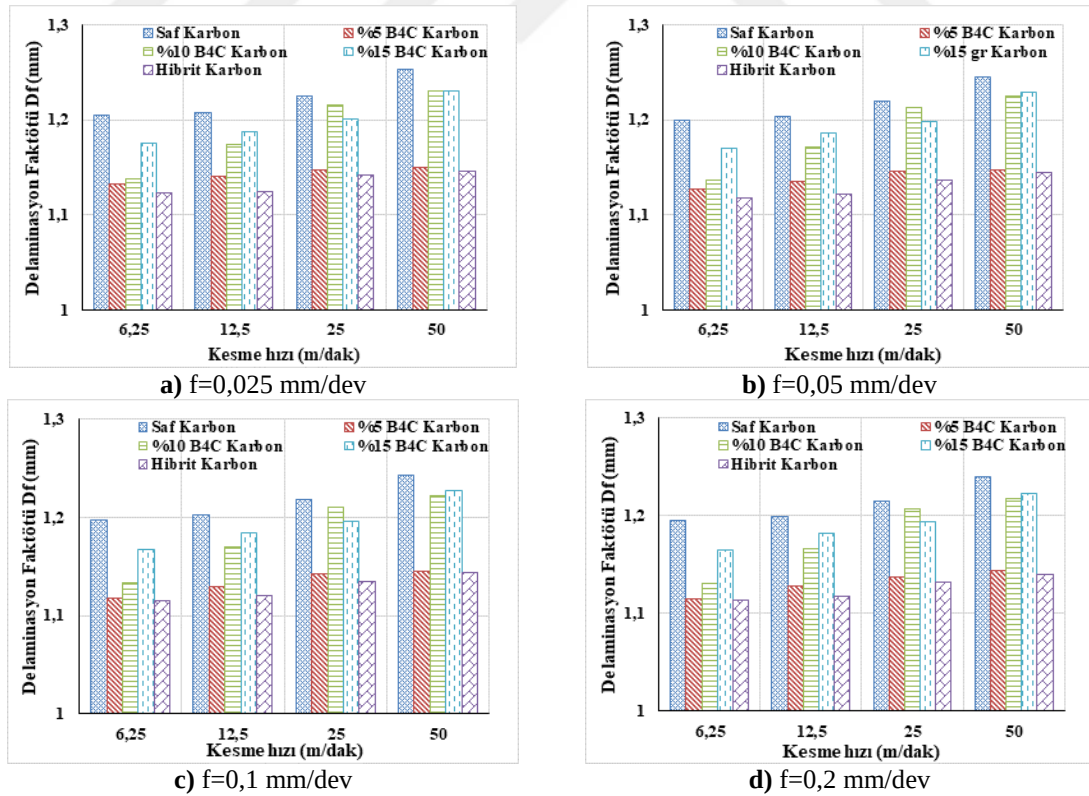


Şekil 6.26. Dolgusuz ve grafit dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı ilerleme oranlarında kesme hızına bağlı olarak elde edilen delaminasyon değerlerinin değişimi

Dolgusuz ve B₄C dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme ve ilerleme hızlarına bağlı olarak elde edilen delaminasyon değerlerinin değişimi Şekil 6.27 - Şekil 6.28’de verilmiştir. Şekil 6.27 - Şekil 6.28’deki delaminasyon değerlerinin grafikleri incelendiğinde genel olarak karbon takviyeli kompozitlere B₄C dolgusu delaminasyon değerlerinin azalmasını sağlamıştır. B₄C dolgulu kompozitlerde en düşük delaminasyon değerleri %5 B₄C dolgulu kompozitlerde en yüksek delaminasyon değerleri ise %15 B₄C dolgulu kompozitlerde görülmüştür. Dolayısıyla dolgu oranının artırılması delaminasyon değerlerini olumsuz etkilemiştir. Dolgusuz ve B₄C dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin delaminasyon değerleri incelendiğinde en düşük delaminasyon değerleri hibrit kompozitlerde görülmüştür. Hibrit kompozitlerde grafit dolgusunun delaminasyon değerlerinin düşmesine katkı sağladığı Şekil 6.27 - Şekil 6.28’deki grafiklerden anlaşılmaktadır. Yüksek kesme hızlarında takviye oranının %10’dan %15’e çıkarılması delaminasyon değerleri üzerinde düşük bir etki göstermiştir.



Şekil 6.27. Dolgusuz ve B₄C dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı kesme hızlarında ilerleme hızına bağlı olarak elde edilen delaminasyon değerlerinin değişimi



Şekil 6.28. Dolgusuz ve B₄C dolgulu karbon elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin farklı ilerleme oranlarında kesme hızına bağlı olarak elde edilen delaminasyon değerlerinin değişim

7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada B₄C ve grafit dolgulu karbon ve cam elyaf takviyeli kompozit tabakalar üretilmiştir. Üretilen bu tabakalardan numuneler elde edilip bu numunelerin mekanik, tribolojik ve delme performansları araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Dolgusuz cam elyaf takviyeli kompozitin çekme dayanımı 363 MPa'a çıkarken %15 grafit takviyesinde 173 MPa'a düşmüştür. Artan grafit dolgu oranının mekanik özellikler üzerinde olumsuz etki yaptığı bulunmuştur. B₄C takviyesinde ise en yüksek takviye oranında 194 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir. Hem B₄C hemde grafit dolgusunun cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerde çekme dayanımı düşürdüğü belirlenmiştir.
- Karbon elyaf takviyeli kompozitlerde, cam elyaf takviyeli kompozitlerde olduğu gibi hem takviye hem de takviye oranının artırılması çekme mukavemetini iyileştirmediği görülmüştür.
- Cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerde düşük dolgu oranlarında eğilme mukavemetini bir miktar arttırdığı yüksek dolgu oranlarında ise eğilme mukavemetini düşürdüğü ortaya çıkmıştır.
- Dolgu maddelerinin cam ve karbon elyafli kompozitlerde aşınma davranışları üzerindeki etkisi incelendiğinde grafit dolgusunun B₄C dolgusuna kıyasla aşınma oranını daha çok düşürdüğü belirlenmiştir. Dolgu oranının %10 kadar artırılması aşınma oranını düşürürken %15 takviye oranında ise bir miktar yükseltmiştir. Yükün etkisi incelendiğinde ise artan yüklerle birlikte aşınma oranının yükseldiği gözlenmiştir.
- Hem dolgu oranının hemde kuvvetin artırılması sürtünme katsayısını düşürmüştür. Cam elyaf takviyeli kompozitlerin sürtünme katsayısının karbon elyafli kompozitlere kıyasla daha düşük çıktığı görülmüştür.
- SEM görüntüleri incelendiğinde artan dolgu oranında aşınma izlerinin daraldığı ve kompozit malzeme yüzeyinin daha az aşındığı görülmüştür. Artan yüklerde ise matris ve lif kopmalarının arttığı SEM görüntülerinde tespit edilmiştir. Düşük kayma mesafelerinde yüzey deformasyonun oyuk ve çatlakların daha az olduğu ortaya çıkmıştır.

- Hem cam hemde karbon elyaf takviyeli kompozitlerde ilerleme hızının artışına bağlı olarak ilerleme kuvvetlerinin arttığı, kesme hızının artışına bağlı olarak ise azaldığı tespit edilmiştir.
- Karbon elyaf takviyeli kompozitlerden elde edilen ilerleme kuvvetleri cam elyaf takviyeli kompozitlerden elde edilen ilerleme kuvvetlerinden daha yüksek çıktığı bulunmuştur.
- Grafit takviyesi ilerleme kuvveti üzerinde ciddi bir artış sağlamazken, B₄C takviyesinde ise kayda değer bir artış görülmüştür.
- Cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerde delaminasyon değerlerinin artan ilerleme hızında düştüğü, artan kesme hızında ise yükseldiği ortaya çıkmıştır.
- Cam elyaf takviyeli kompozitlerde grafit dolgusunun artmasıyla delaminasyon değerlerinin düştüğü belirlenmiştir. B₄C dolgulu cam elyaf takviyeli kompozitlerde ise en düşük delaminasyon değerleri %10 B₄C dolgu oranında elde edilmiştir.
- Karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin titreşim ve moment değerleri cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin titreşim ve moment değerlerinden daha yüksek çıktığı bulunmuştur.

7.2. Öneriler

- Bu çalışmada mikro B₄C ve grafit partikülleri kullanılmıştır. Nano B₄C ve grafit partikülleriyle üretim yapılarak dolgu boyutunun etkileri araştırılabilir.
- Daha düşük oranlarda B₄C ve grafit eklenerek mekanik, tribolojik ve delme testleri tekrarlanıp karşılaştırma yapılabilir.
- Farklı katkı maddesi veya farklı takviye malzemesi kullanılarak üretim gerçekleştirilebilir.
- Kuru kesme şartlarında yapılan delme işlemi ıslak işleme şartlarında gerçekleştirilerek delaminasyon ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Afrouzian, A., Aleni, H. M., Liaghat, G. and Ahmadi, H., 2017, Effect of nano-particles on the tensile, flexural and perforation properties of the glass/epoxy composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 36(12), 900–916.
- Akınyede, O., Mohan, R., Kelkar, A. and Sankar, J., 2009, Static and Fatigue Behavior of Epoxy Fiberglass Composites Hybridized with Alumina (Al_2O_3), *Journal of Composite Materials*, 43(7), 769-781.
- Akıncıoğlu, S., 2011, Aisi D2 Sağuk İş Takım Çeliğinin Farklı Kesici Takım ve Parametreler Kullanılırken Delinebilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Akıncıoğlu, S., 2018, Bor oksit tozunun fren balatalarının tribolojik özelliklerine etkisi., *Sakarya Üniversitesi, Journal of Science* 22.
- Aktaş, M., 2010, Kompozit malzeme üretim yöntemleri, Dokuz Eylül Üniversitesi, http://www.deu.edu.tr/userweb/mehmet.aktas/Kompozit_Malzemeler/Ders.pdf [Ziyaret Tarihi, 16 Aralık 2021].
- Aran, A., 2007-2008, Mal 201 Malzeme Bilgisi Ders Notları, 75-77.
- Asi, O., 2009, Mechanical Properties of Glass-Fiber Reinforced Epoxy Composites Filled with Al_2O_3 Particles, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, DOI, 10.1177/0731684408093975.
- ASTM G99-95, 1995, ASTM G99-95a (reapproved 2000): standard test method for wear testing with a pin on disk apparatus.
- Ateş, E., ve Aztekin, K., 2011, Parçacık ve fiber takviyeli polimer kompozitlerin yoğunluk ve basma dayanımı özellikleri, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26 (2), Ankara, 479 – 486.
- Akovali, G., 2001, Handbook of Composite Fabrication, Rapra Technology Ltd., Shawbury, U.K.
- Akkurt, M., 1998, Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları, *Birsan Yayınevi*, Ankara, 8-50.
- Arun, A. ve Singh, K. K., 2017, Friction and wear behaviour of glass fibre reinforced polymer composite (GFRP) under dry and oil lubricated environmental conditions, *Materials Today Proceeding* 4, 7285–7292.
- Avcı, A., Ekrem M. ve Erkendirici Ö.F., 2007, Cam kumaş takviyeli termoplastik kompozitlerde kırılma davranışlarının incelenmesi, 8. *Uluslararası Kırılma Konferansı*, İstanbul, 422-434.

- Bazrgari, D., Moztarzadeh, F., Sabbagh-Alvani, A. A., Rasoulianboroujeni, M., Tahriri, M. and Tayebi, L., 2018. Mechanical properties and tribological performance of epoxy/Al₂O₃ nanocomposite, *Ceramics International*, 44(1), 1220-1224.
- Basavarajappa, S., Ellangovan, S. and Arun, K.V., 2009, Studies on dry sliding wear behaviour of Graphite filled glass-epoxy composites, *Mater. Des.* 30, 2670–2675.
- Basmacı, G., Yörük, A. S., 2020, Karbon Fiber Takviyeli Kompozit Malzemenin Kuru ve Kriyojenik Şartlarda Delinebilirliğinin Deneyisel Araştırılması, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11, 164-175.
- Bayraktar, Ş., and Turgut, Y., 2016, Investigation of the cutting forces and surface roughness in milling carbon fiber reinforced polymer composite material, *Materials and Technology*, 50 (4), 591 - 600.
- Biron, M., 2007, Thermoplastics and Thermoplastic Composites, Technical Information for Plastic Users, Elsevier, Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Başbudak, M., 2003, Termoset Plastikler, İstanbul, *Maya Basımevi*, 55-63.
- Bhowmick, S., Sun, G., Alpas, A.T., 2016, Low friction behaviour of boron carbide coatings (B₄C) sliding against Ti–6Al–4V, 308, 316-327.
- Çakır, M.C., 2000, Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri, Vipaş A.Ş, Bursa, 350-390.
- Çavuş, Y., 2015, Karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin alışılmış takımlarla işlenebilirliği, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 36-60.
- Çobanoğlu, T., Şeker, U., 2020, Design and Test of a New Step Drill to Reduce The Operation Time and Increase The Hole Quality for CFRP Materials, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42, 553.
- Deak, T., ve Czigany, T., 2009, Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibers A Comparision, *Textile Research Journal* 79(7), 645-651.
- Demirhan, M., 2021, Cam Elyaf Takviyeli PA66 Kompozit Malzemenin İşlenebilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük, Türkiye.
- Enemuoh, E., El-Gizawy, A., Okafor A., 2001, An approach for development of damage-free drilling of carbon fiber reinforced thermosets, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 41, 1795–1814.
- EL-HOFY, H.A.-G., 2013, Fundamentals of machining processes: conventional and nonconventional processes 2nd ed., CRC press, 140-150, USA
- El-Sonbaty, I., Khashaba, U. A., Machaly, T., 2004, Factors Affecting the Machinability of GFR/Epoxy Composites, *Composite Structures*, 63, 329-338.

- Ekici, R., 2016, Repeated low-velocity impact behavior of particle-reinforced metal matrix composites, *2nd International Conference on Engineering and Natural Sciences (ICENS 2016)*, 1877-1882, Sarajevo.
- Ekici, R., Kaburcuk, M., 2015, Low-velocity impact behavior of Al 6061/SiC particulate metal matrix composites, *Journal of Composite Materials*, 49(7), 853-871.
- Ekici, R., kosedag, E., 2017, Comparison of the low-velocity impact behaviors of SiC and Pumice particle-reinforced metal matrix composites, *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 5 (10), 101-105.
- Erklig, A., Jabbar, A. and Alsaadi, M., 2016, Tensile and flexural behavior of nano-silica modified carbon/Kevlar hybrid composites. *International 69 Conference on Advanced Technology & Sciences*, September 01-03, Konya, p.1151-1154.
- Ersoy, H. Y., 2001, Kompozit Malzeme, Literatür Yayınları, İstanbul. 30-57.
- Elias, G.K., 2012, Varadarajan, A.S., Joseph, R., Influence of Process Parameters on Cutting Force and Torque of Drilling of Glass Fiber Reinforced Epoxy Composites, *International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering (IJCTEE)* 2(2).
- Evkaya, M., 2003, Metallerde aşınmaya karşı yapılan kaplamada uygun toz materyali ve kaplama yönteminin bilgisayar destekli seçimi, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 32-41.
- Ferreira, J.A.M., Reis, P.N.B., Costa, J.D.M. and Richardson, M.O.W., 2012, Fatigue behaviour of Kevlar composites with nanoclay-filled epoxy resin, *Journal of Composite Materials*, 47(15), 1885–1895.
- Gay, D., ve Hoa, V.S., 2007, Composite Materials Design and Application, CRC Pres Boca Raton, 70-165.
- Ghasemi, F.A., Hyvadi, A., Payganeh G., Arab, N.B.M., 2011, Effects of Drilling Parameters on Delamination of Glass Epoxy Composites, *Australian Journal of Basic Applied Sciences*, 5(12), 1433-1440.
- Gökçe, H., Yavuz, M., & Karayel, M., 2017, İmalat süreçlerinde kesme kuvvetlerinin belirlenmesi amaçlı dinomometre tasarımı ve imalatı, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(2), 27-32.
- Günay, M., 2003, Talaş Kaldırma İşlemlerinde Kesici Takım Talaş Açısının Kesme Kuvvetlerine Etkisinin Deneyisel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 40-49.
- Gündoğdu, H., 2018, Cam Elyaf Takviyeli SMK Kompozitlerin İşlenebilirlik ve vidalı Birleştime Yeteneklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 17-25.

- Groover, M.P., 2014, Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes and Systems, Lehigh University, ABD, 331-340.
- Harishanand, K.S., Nagabhushana, H., Nagabhushana, B.M., Panda, P., Gupta, R., Muruli, M.S., Raghavendra, N. and Mahesh K.R.V., 2013, Comparative Study on Mechanical Properties of ZnO, ZrO₂ and CeO₂ Nanometal Oxides Reinforced Epoxy Composites. *Advances in Polymer Science and Technology, An International Journal*, 3(1), 7-13.
- Hancox, N.L. ve Rayner M.M, 1994, Design Data for Reinforced Plastics, Chapman & Hall, Londra, 4-10.
- Hussein, R., Sadek, A., Elbestawi, M. A., Attia, M. H., 2019, Chip Morphology and Delamination Characterization for Vibration-Assisted Drilling of Carbon Fiber-Reinforced Polymer, *Manufacturing and Materials Processing*, 3, 23.
- Hosur, M., Mahdi, T., Islam, MD. E., Tcherbi-Narteh, A. And Jeelani, S., 2015, Fabrication and Performance Of Carbon/Epoxy Composites with Hybrid of Nanoclay and Mwcnts, *20th International Conference on Composite Materials*, 19-24th July, Copenhagen.
- Itoh, M., Inoue, K., Hirayama, N., Sugimoto, M., Seguchi, T., 2002, Fiber reinforced plastics using a new heat-resistant silicon based polymer, *Journal of materials science*, 37 (17), 3795-3801.
- Işık, Y., Çakır M.C., 2000, Takım Çeliklerinin Talaşlı İmalatında Kesme Kuvvetleri İle Takım Ömrü Arasındaki İlişkinin Deneysel Olarak İncelenmesi, *IX. Mühendislik Sempozyumu*, 2-4.
- Karataş, M.A., Motorcu, A.R. and Gökkaya, H., 2021, Study on delamination factor and surface roughness in abrasive water jet drilling of carbon fiberreinforced polymer composites with different fiber orientation angles, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences Engineering*, 43(1), 1-29.
- Kaya, A. İ., 2015, Atık Kağıtlardan Geri Kazanılmış Liflerden Kompozit Malzeme Üretim Olanaklarının Araştırılması. Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Orman Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta.
- Kaya, A.İ., 1995, Atık Kâğıtlardan Geri Kazanılmış Liflerden Kompozit Malzeme Üretim Olanaklarının Araştırılması, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Doktora tezi, Isparta, 239.
- Kaya, A. İ., 2016, Kompozit malzemeler ve özellikleri., *Putech & Composite Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*.
- Kadhim, M. J., Abdullah, A. K., Al-Ajaj, I. A., and Khalil, A. S., 2013, Mechanical Properties of Epoxy/Al₂O₃ Nanocomposites, *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, 2(11), 10-16.

- Khashaba, UA., El-Sonbaty, IA., Selmy, Al., Megahed, AA., 2012, Drilling analysis of woven glass fiber-reinforced/epoxy composites, *Journal of Composite Materials* 2013 47, 191 originally published online 21 February 2012, DOI, 10.1177/0021998312438620.
- Kishore, R.A., Tiwari, R., Dvivedi A., Singh I., 2008, Taguchi analysis of the residual tensile strength after drilling in glass fiber reinforced epoxy composites, Department of Mechanical and Industrial Engineering, *Indian Institute of Technology Roorkee*, Uttranchal 247 667, India.
- Kharat, WS., Sidhu, JS., 2016, Development of epoxy based composites filled with boron carbide (B_4C), tungsten disulphide (WS_2) and evaluation of its mechanical properties. *IntJMech Eng Res.* 6, 19–30.
- Kılıçkap, E., 2010, CETP Kompozitlerin Delinmesinde Oluşan Deformasyona Delme Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi, 2. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, Balıkesir, 76-84.
- Kınayyığıt, F, Cam Elyaf Takviyeli Plastik Kompozitler Ders Notları.
- Kim, S. S., Shin, M. W., and Jang H., 2012, Tribological properties of short glass fiber reinforced polyamide 12 sliding on medium carbon steel, *Wear* 274–275, 34–42.
- Koboevic, N., Jurjevic, M., Koboevic, Z., 2012, Influence of Cutting Parameters on Thrust Force, Drilling Torque and Delamination During Drilling of Carbon Fibre Reinforced Composites, *Tehnicki Vjesnik*, 19(2), 391-398.
- Knoll, J. B., Riecken, B.T., Kosmann, N., Chandrasekaran, S., Schulte, K. and Fiedler, B., 2014, The effect of carbon nanoparticles on the fatigue performance of carbon fibre reinforced epoxy. *Composites Part A, Applied Science and Manufacturing*, 67, 233-240.
- Kickelbick, G., 2006, Hybrid Materials, Synthesis, characterization and Applications, Wiley-VCH, Weinheim, 87-90.
- Kırhasanoğlu, E. Ö., Turgut, Y., 2021, Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin İstifli Delinmesinde Delik Çıkış Hasarının Deneysel Araştırılması, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 152-159.
- Koyunbakan, M., Ünüvar, A., Eskizeybek, V., Avcı, A., 2021, CETP Kompozitlerin Ağaç Matkabıyla Delinme Performanslarının Deneysel İncelenmesi, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 770-776,10.
- Kumfu, S., Nhuapeng, W., Thamjaree, W. and Tunkasırı, T., 2008, Mechanical Properties and Microstructure of Aramid/ Al_2O_3 /Epoxy Resin Laminated Composites, *Advanced Materials Research*, 55-57, 389-392.
- Kuş, A., Ekici, E., 2017, Sandviç Kompozitlerin Delinmesinde Delaminasyon., *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 3, 22.

- Krishnaraj, V., Prabukarthi A., Ramanathan A., Elanghovan, N., Kumar, M.S., Zitoune, R., Davim, J.P., 2012, Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates. *Composites 43/B*, 1791-1799.
- Krishnamoorthy, A., Prakash, S., Lilly Mercy, J., Ramesh, S., 2019, Machinability Studies in Drilling Carbon Fiber Reinforced Composites, Hole-Making and Drilling Technology for Composites, 161-180.
- Liang, W., Duan, Z., Sun, K., Liang, H., Wang, Z. and Guo, C., 2017, Mechanical Performance of Nano- Al_2O_3 -Modified Composites at Cryogenic and Room Temperatures, *Polymer Composites*, 1548-0569.
- Li, N., Li, Y., Zhou, J., He, Y., 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 (2015) 11–17.
- Manjunath, M., Renukappa, N. and Suresha, B., 2016, Influence of micro and nanofillers on mechanical properties of pultruded unidirectional glass fiber reinforced epoxy composite systems, *Journal of Composite Materials*, 50(8), 1109-1121.
- Mazumdar, S.K., 2002, Composite manufacturing, materials, product and process engineering, CRS Press, Florida, 30-32, 129, 159- 173.
- Melentiev, R., Priarone, P.C., Robiglio, M., Settineri, L., 2016, Effects of tool geometry and process parameters on delamination in CFRP drilling, An overview *Procedia Cirp*, 45, 31-34.
- Mohan, N.S., Kulkarni, S.M., Ramachandra, A., 2007, Delamination Analysis in Drilling Process of Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) Composite Materials, *Journal of Materials Processing Technology*, (186), 265-271.
- Mohanty, A., Srivastava, V. K. and Sastry, P.U., 2014, Investigation of mechanical properties of alumina (Al_2O_3) nanoparticle-loaded hybrid glass/carbon-fiber-reinforced epoxy composites, *Journal of Applied Polymer Science*, 131(1), 1-7.
- Moon, C. and Kim, B., 2015, Nanoparticle Size Effect on Mechanical Properties of Carbon Fiber-reinforced Polymer Composites, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(2), 186-190.
- Murthy, B. R., Beedu, R., Bhat, R., Naik, N., Prabakar, P., 2020, Delamination Assessment in Drilling Basalt/Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composite Material, *Journal of Materials Research and Technology*, 9, 7424-7433.
- Nayak, R. K., Dash, A. and Ray, B.C., 2014, Effect of Epoxy Modifiers ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$) on Mechanical Performance of epoxy/glass Fiber Hybrid Composites, *Procedia Materials Science*, 6, 1359-1364.

- Onat, A., 2015, Kompozit Malzemeler Ders Notu, İnternet kaynağı [online], Sakarya Meslek Yüksekokulu Makina ve Metal Teknolojileri Bölümü Metalurji Programı, http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/78375/31395/kompozit_malzemelerdersnotu.pdf [Ziyaret tarihi 26 Kasım 2021].
- Özkaya, F., Özen, F., İhan, E., Aslanlar, S., 2019, Cam Küre Takviyeli Polipropilen Kompozit Malzemelerin Delaminasyon Faktörünün Deneysel Olarak İncelenmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19, 843-849.
- Parasuraman, S., Elamvazuthi, I., Kanagaraj, G., Natarajan, E., and Pugazhenth, A., 2021, Assessments of process parameters on cutting force and surface roughness during drilling of AA7075/TiB₂ in situ composite, *Materials*, 14(7), 1726.
- Patankar, S., Mohan, RV., Kelkar AD., 2011 Thermophysical and tensile behavior of hybrid epoxy composites with boron carbide (B₄C) particulates, *18th International Conference on Composites Materials*, Korea.
- Park, C.H., Lee, W.I., Han, W.S., Vautrin, A., 2004, Simultaneous Optimization of Composite Structures Considering Mechanical Performance and Manufacturing Cost, *Composites Structures*, 65, 117-127.
- Popan, I. A., Bâlc, N., Popan, A. I., 2021, Avoiding CFRP Delamination During Abrasive Water Jet Piercing, A New Piercing Method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- Reis, P.N.B., Ferreira, J.A.M., Zhang, Z.Y., Benameur, T. and Richardson, M.O.W., 2013, Impact response of Kevlar composites with nanoclay enhanced epoxy matrix. *Composites Part B, Engineering*, 46, 7-14.
- Raju, B.R., Suresha, B., Swamy, R.P. and Kanthraju, B.S.G., 2013, Investigations on Mechanical and Tribological Behaviour of Particulate Filled Glass Fabric Reinforced Epoxy Composites, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 1(July), 160-167.
- Raju, B.R., Suresha, B., Swamy, R.P., and Kanthraju, B.S.G., 2013, Assessment of cutting parameters influencing on thrust force and torque during drilling particulate filled glass fabric reinforced epoxy composites, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 1, 101-109.
- Rosato, D. V., 1997, *Designing With Reinforced Composites*, Hanser Gardner Publications.
- Saçak, M., 2002, *Polimer Kimyası*, Gazî Kitabevi, Ankara, 19-50.
- Saeedifar, M., Fotouhi, M., Ahmadi Najafabadi, M., 2016, Investigation of PushOut Delamination using Cohesive Zone Modelling and Acoustic Emission Technique, *Journal of Composite Materials*, 50(25), 3577-3588.

- Salih, S.I., Salih, W.M., and Hameed, M.A.A., 2016, Preparation and Characterization of Polymers Blends Hybrid Nano composites for Structural Applications, *Advances in Natural and Applied Sciences*, 10(15), 90-103.
- Suresha, B., Seetharamu, S. and Kumaran, P.S., 2009, Investigations on the influence of graphite filler on dry sliding wear and abrasive wear behaviour of carbon fabric reinforced epoxy composites, 267, 1405–1414.
- Shivamurthy, B., Bhat, K. U., and Anandhan, S., 2013, Mechanical and sliding wear properties of multi-layered laminates from glass fabric/graphite/epoxy composites, *Materials & Design*, 44, 136-143.
- Sunny, T., Babu, J., Philip, J., 2014, Experimental Studies on Effect of Process Parameters on Delamination in Drilling GFRP Composites Using Taguchi Method, *Procedia Materials Science* 6, 1131–1142.
- Sunny, T., Babu, J., Philip, J., 2014, Experimental Studies on Effect of Process Parameters on Delamination in Drilling GFRP Composites Using Taguchi Method, *Procedia Materials Science* 6(Icmpc), 1131–1142,
- Sönmez, M., 2009, Polimer Matrisli Kompozitlerin Endüstri Ürünleri Tasarımında Önemi ve Geleceği, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 41-42, 82.
- Şahin, Y., 2006, Kompozit Malzemelere Giriş, *Seçkin Yayınevi*, Ankara, 100-106.
- ŞAHİN, E., 2011, AlMg₃/SiCp Kompozit malzemelerinin darbe davranışının takviye oranı ile değişiminin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne.
- Taraghi, I., Fereidoon, A. and Mohyeddin, A. 2014, The effect of MWCNTs on the mechanical properties of woven Kevlar/epoxy composites, *Steel and Composite Structures*, 17(6), 825-834.
- Turgut, Y., Korkut, İ., 2009, Talaşlı İmalatta Kesme Kuvveti Ölçme Sistemleri, *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, 1.
- Turgut, T., Kayran A., Alemdaroğlu N. ve Ceylan M., 2007, Vakum torbalama yöntemi ile kompozit malzemeden yapı üretimi örnek bir havacılık uygulaması, *Mühendis ve Makine*, 48, 14-21.
- Tonshoff, H.L., Spintig, W., König, W., Neises, A., 1994, Machining of Holes Developments in Drilling Technology, *Annals of the CIRP*, 43 (2), 551-560.
- Ulcay, Y., Akyol, M., Gemci, R., 2002, Polimer Esaslı Lif Takviyeli Kompozit Malzemelerin Arabirim Mukavemeti Üzerine Farklı Kür Metotlarının Etkisinin İncelenmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi*, Bursa, (7), 94-95.

- Ünal, O., 2011, Kompozit malzemeler, [online], Afyon Kocatepe Üniversitesi, <http://kocaelimakine.com/wp-content/uploads/2011/11/kompozit-malzemeler-ders-notlari-osman-unal.pdf> [Ziyaret Tarihi, 5 Aralık 2021].
- Vasiliev, V. V., Morozov, E., 2001, Mechanics and analysis of composite materials, *Elsevier Science Ltd.*, Kidlington, UK, 22-23.
- Wang, B., Duan, Y. and Zhang, J., 2016, Titaniumdioxide TiO₂ nanoparticles-coated aramid fiber showing enhanced interfacial strength and UV resistance properties, *Materials and Design*, 103, 330–338.
- Yalçın H., Gürü M., 2002, Malzeme Bilgisi, Ankara, Palme Yayıncılık, 30-35.
- Yöney, H., 2007, El Yatırma Yöntemiyle Elyaf Takviyeli Kompozit Yapıların Üretilmesi ve Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 54-56.
- Zhang, H., Zhang, Z. and Guo, F., 2010, A Study on the Sliding Wear of Hybrid PTFE/Kevlar Fabric/Phenolic Composites Filled with Nanoparticles of TiO₂ and SiO₂, *Tribology Transactions*, 53, 678-683.
- Zor, M., 2008, Kompozit malzemelerle ilgili genel bilgiler, [online], Dokuz Eylül Üniversitesi, http://kisi.deu.edu.tr//mehmetzor./compositematerials/2Genel_bilgiler.pdf [Ziyaret Tarihi, 17 Aralık 2021].

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : İbrahim Halil AKCAN
Uyruğu : T.C.

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Üniversite	Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi ve Makine Mühendisliği, Merkez, Batman	2023
Yüksek Lisans	Batman Üniversitesi, Merkez, Batman	

UZMANLIK ALANI

Konstrüksiyon ve İmalat

YABANCI DİLLER

İngilizce