



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

CAM FİBER TAKVİYELİ POLİMER
KOMPOZİTLERİN DELME PERFORMANSININ
SEMBOLİK REGRESYON YÖNTEMİ İLE
ANALİZİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

İsmail IŞIK

Danışman
Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

Nisan-2023
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

İsmail IŞIK tarafından hazırlanan “Cam Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Delme Performansının Sembolik Regresyon Yöntemi ile Analizi” adlı tez çalışması 13/04/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Ömer SEÇGİN

Danışman

Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Oktay ADIYAMAN

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

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

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

İsmail IŞIK
Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CAM FİBER TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLERİN DELME PERFORMANSININ SEMBOLİK REGRESYON YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

İsmail IŞIK

BATMAN ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

2023, 99 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

Doç. Dr. Ömer SEÇGİN

Dr. Öğr. Üyesi Oktay ADIYAMAN

Bu tez çalışmasında, $\pm 45^\circ$ oryantasyon açılı cam fiber takviyeli polimer (CFTP) kompozitlerin delinmesinde kesme kuvveti ve deformasyon faktörü üzerine delme yöntemi ve delme parametrelerinin etkileri deneysel olarak incelenmiş ve sembolik regresyon yöntemi ile analiz edilmiştir. CFTP kompozitlerin delinmesi hem matkap hem de zımba ile gerçekleştirilmiştir. Matkapla delme, altı farklı kesme hızında (6,25; 12,50; 25; 50; 100 ve 200 m/dak) ve dört farklı ilerleme hızında (0,025; 0,05; 0,1 ve 0,2 mm/dev); zımba ile delme, dört farklı uç açısına sahip zımbayla (düz, $15^\circ \setminus$ açılı, $15^\circ \vee$ açılı ve $15^\circ \wedge$ açılı) ve üç farklı ilerleme hızında (250, 500 ve 1000 mm/dak) gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda; matkapla delmede oluşan kesme kuvveti üzerine ilerleme hızı ve kesme hızının önemli bir etkisinin olduğu görülmüştür. Artan ilerleme hızı, kesme kuvvetini artırmıştır. Artan kesme hızı ise başlangıçta kesme kuvvetini düşürmüş ve belirli bir seviyeden sonra kesme kuvvetini arttırmaya başlamıştır. Matkapla delmede oluşan en yüksek kesme kuvveti yüksek ilerleme hızı ve kesme hızında gözlemlenmiştir. Zımba ile delmede oluşan kesme kuvvetlerinin değerleri, matkapla delmede oluşan değerlerden çok daha yüksek elde edilmiştir. Zımba cinsine ve ilerleme hızına bağlı olarak oluşan kesme kuvvetleri değişkenlik göstermiştir. En yüksek değerler düz uç açısına sahip zımba ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilmiştir. Kesme kuvveti için yapılan sembolik regresyon analizlerinde; matkapla delmede, kesme kuvveti üzerine en önemli faktörün ilerleme hızı, zımba ile delmede ise zımba cinsi olduğu görülmüştür. Matkapla delmede, delik girişinde oluşan deformasyon faktörü delik çıkışında oluşan deformasyon faktöründen daha düşük elde edilmiştir. Artan kesme hızı ve ilerleme hızıyla deformasyon faktörü artmıştır. Zımba ile delmede ise genel olarak delik girişinde oluşan deformasyon faktörü, delik çıkışında oluşan deformasyon faktöründen daha yüksek elde edilmiştir. Zımba cinsine ve ilerleme hızına bağlı olarak oluşan deformasyon faktörü değişkenlik göstermiştir. Deformasyon faktörü için yapılan sembolik regresyon analizlerinde; matkapla delmede, delik girişinde oluşan deformasyonun en fazla kesme hızından, delik çıkışında ise en fazla ilerleme hızından etkilendiği analiz edilmiştir. Zımba ile yapılan delme deneylerinde ise delik giriş ve çıkışındaki deformasyona etki eden en önemli parametrenin zımba cinsi olduğu görülmüştür. Tüm sembolik regresyon analizlerinden elde edilen matematiksel ifadelerin deneysel verileri tahmin etmede oldukça iyi olduğu test edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Deformasyon Faktörü, Delme, Fiber Takviyeli Kompozitler, Sembolik Regresyon Analizi, Zımbalama.

ABSTRACT

MS THESIS

DRILLING PERFORMANCE ANALYSIS OF GLASS FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITES BY SYMBOLIC REGRESSION METHOD

İsmail IŞIK

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

2023, 99 Pages

Jury

Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

Assoc. Prof. Dr. Ömer SEÇGİN

Asst. Prof. Dr. Oktay ADIYAMAN

In this thesis, the effects of drilling method and drilling parameters on cutting force and deformation factor in drilling of glass fiber reinforced polymer (CFTP) composites having $\pm 45^\circ$ orientation angle were experimentally investigated and analyzed by symbolic regression method. Drilling of CFTP composites was performed with both drill and punch. Drilling by drill was performed at six different cutting speeds (6.25; 12.50; 25; 50; 100 and 200 m/min) and four different feed rates (0.025; 0.05; 0.1 and 0.2 mm/rev); drilling by punch was performed at three different feed rates (250, 500 and 1000 mm/min) by punches having four different tip angles (straight, $15^\circ \setminus$ angled, $15^\circ \vee$ angled and $15^\circ \wedge$ angled). As a result of the experiments, it was observed that feed rate and cutting speed had a significant effect on the cutting force occurred in drilling with a drill. Increasing feed rate increased the cutting force. Increasing cutting speed decreased the cutting force at the beginning and started to increase the cutting force after a certain level. The highest cutting force in drilling with drill was observed at high feed rate and cutting speed. The values of cutting forces occurred in drilling by punch were much higher than those in drilling by drill. The cutting forces varied depending on the punch type and feed rate. The highest values in drilling by punch were obtained from the experiments performed with a punch with a flat tip angle. In symbolic regression analyses for the cutting force; it was seen that the most important factor on the cutting force in drilling with a drill is the feed rate, and the most important factor on the cutting force in drilling with a punch is the punch type. In drilling with a drill, the deformation factor at the hole entrance was lower than the deformation factor at the hole exit. The deformation factor increased as the cutting speed and feed rate increased. On the other hand, in drilling by punch, the deformation factor occurring at the hole entrance was generally higher than the deformation factor occurring at the hole exit. The deformation factor, depending on the punch type and the feed rate, varied. In the symbolic regression analyses for the deformation factor, it was analyzed that the deformation occurring at the hole entrance is affected the most by the cutting speed, and at the hole exit the most is affected by the feed rate. In the drilling experiments with punch, it was seen that the most important parameter affecting the deformation at the hole entrance and exit is the punch type. Mathematical expressions from all symbolic regression analyses were tested to be quite good at predicting experimental data.

Keywords: Deformation Factor, Drilling, Fiber Reinforced Composites, Punching, Symbolic Regression Analysis.

ÖNSÖZ

“Cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin delme performansının sembolik regresyon yöntemi ile analizi” başlıklı tez çalışması 7 bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler; Giriş, Kompozitler, Polimer Matrisli Kompozitler, Fiber Takviyeli Kompozitlerde İşleme Yöntemleri, Materyal ve Yöntem, Deneysel Sonuçlar ve Bulgular, Genel Sonuçlar ve Önerilerdir. Giriş bölümünde konunun önemine ve konu ile ilgili literatür araştırmasına yer verilmiştir. 2. 3. ve 4. bölümde kompozit malzemenin tanımı, tarihçesi, polimer matrisli kompozitler ve kullanılan reçineler, cam fiber üretimi ve fiber takviyeli kompozitlerde işleme yöntemleri ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Materyal ve Yöntem bölümünde; CFTP kompozit malzemenin üretimi, deney parametreleri, deneylerde kullanılan makinalar, teçhizatlar ve cihazlar açıklanmıştır. Deneysel Sonuçlar ve Bulgular bölümünde; CFTP kompozitin matkap ve zımba ile delinmesinde, delme parametrelerine bağlı olarak elde edilen kesme kuvveti ve deformasyon faktörü sonuçları verilmiş olup, bu verilere bağlı olarak sembolik regresyon yöntemi ile elde edilen analizler ayrıntılı olarak sunulmuştur. Genel Sonuçlar ve Öneriler bölümünde ise; kesme ve ilerleme hızı ile zımba cinsinin kesme kuvveti ile delik giriş ve çıkışlarında meydana gelen deformasyon faktörleri üzerine etkilerinin nasıl olduğu ve nelere dikkat edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Bu tez çalışmasının konu seçiminde, tezin yazılması ve şekillenmesinde; yönlendirme, bilgi ve tecrübeleriyle destek aldığım çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK’e, deneysel çalışma süresi boyunca desteklerini esirgemeyen değerli hocalarım: Sayın Prof. Dr. Erol KILIÇKAP’a, Sayın Doç. Dr. Ahmet YARDIMEDEN’e, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin DEMİR’e, Sayın Dr. Öğr. Üyesi Şehmus FİDAN’a, Sayın Arş. Gör. Dr. Serkan BATI’ya, Batman Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesinde Makine Öğretmeni abim Sayın Faruk IŞIK’a, Kozluk Meslek Yüksekokulu öğretim elemanlarından Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Halil DEMİREL’e, Dr. Öğr. Üyesi Abdullah Ferit EROL’a ve Öğr. Gör. Meriç ÖNCÜL’e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her koşulda bana maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, yüksek lisans boyunca bana sabır gösteren tüm aileme sevgi, saygı ve şükranlarımı sunarım.

İsmail IŞIK
BATMAN-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması	3
2. KOMPOZİTLER.....	8
2.1. Kompozit Malzemelerin Tarihi	8
2.2. Kompozit Malzemeler ve Özellikleri	12
2.3. Kompozit Malzemelerde Kullanılan Takviyeler	14
2.4. Kompozit Malzemelerde Kullanılan Matrisler	17
3. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER	19
3.1. Polimer Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Reçineler	19
3.1.1. Termoplastikler	20
3.1.2. Termosetler	20
3.2. Polimer Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Fiberler.....	22
3.3. Aramid Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler.....	23
3.4. Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler	24
3.5. Cam Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler	24
3.5.1. Cam fiberler ve üretimi	27
4. FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLERDE İŞLEME YÖNTEMLERİ.....	29
4.1. Kompozit Malzemeler İçin Geleneksel Olmayan İşleme Yöntemleri.....	29
4.1.1. Aşındırıcı su jeti ile işleme yöntemi	30
4.1.2. Lazer ile işleme yöntemi.....	32
4.1.3. Elektro erozyon ile işleme yöntemi	34
4.2. Kompozit Malzemeler İçin Geleneksel İşleme Yöntemleri	35
4.2.1. Kompozit malzemelerde talaş kaldırma yöntemiyle delme.....	35
4.2.2. Kompozit malzemelerde zımbalama yöntemiyle delme.....	41
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	44

5.1. Cam Fiber Takviyeli Polimer (CFTP) Kompozit Malzemenin Üretimi.....	44
5.2. Çekme ve Eğilme Dayanımlarının Belirlenmesi	47
5.3. Delme Deneyinde Kullanılan Kesici Takımlar.....	49
5.4. Delme İşlemlerinin Gerçekleştirildiği CNC Tezgâhı	52
5.5. Delme Deney Parametrelerinin Belirlenmesi	53
5.6. Deneylerde Meydana Gelen Kesme Kuvvetlerinin Ölçümü	54
5.7. Deneylerde Meydana Gelen Ses ve Titreşimlerin Ölçülmesi.....	54
5.8. Delme Sonucu Oluşan Deformasyonun Ölçülmesi	55
5.9. Delme Deneylerinin Yapılışı	56
5.10. Sembolik Regresyon Yöntemiyle Analiz	58
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE BULGULAR	59
6.1. CFTP Kompozitin Çekme ve Eğilme Test Sonuçları	59
6.2. Ses ve Titreşim Sonuçları	60
6.3. Kesme Kuvveti Sonuçları ve Sembolik Regresyon Analizleri.....	61
6.3.1. Matkapla delmede oluşan kesme kuvveti ve analizi.....	62
6.3.2. Zimba ile delmede oluşan kesme kuvveti ve analizi	68
6.4. Deformasyon Faktörü Sonuçları ve Sembolik Regresyon Analizleri.....	74
6.4.1. Matkapla delmede oluşan deformasyon faktörü ve analizi	75
6.4.2. Zimba ile delmede oluşan deformasyon faktörü ve analizi	84
7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	93
7.1. Sonuçlar	93
7.1. Öneriler	94
KAYNAKLAR	95
ÖZGEÇMİŞ	100

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Matris, fiber ve kompozit arasındaki gerilim ve gerinim ilişkisi	8
Şekil 2.2. B-2 bombardıman uçağında kullanılan malzemeler.....	9
Şekil 2.3. V-22 helikopterinde kullanılan malzemeler	10
Şekil 2.4. Boeing 787 yolcu uçağında kullanılan malzemeler	11
Şekil 2.5. Kompozitlerde dağınık faz parçacıklarının şematik gösterimleri	12
Şekil 2.6. Kompozit malzemelere ait bir sınıflandırma şeması	14
Şekil 3.1. Bazı takviye elemanlarının spesifik özellikleri	23
Şekil 3.2. Cam fiber üretimi	28
Şekil 3.3. Farklı formlarda üretilen cam fiberler	28
Şekil 4.1. Delme işlemlerinin talaş kaldırma sürelerine oranı.....	36
Şekil 4.2. Kompozit malzemelerde matkapla delmenin şematik gösterimi	38
Şekil 4.3. Matkap uçlarının sınıflandırılması	39
Şekil 4.4. Deformasyon analizi için dairesel plaka modeli (helisel matkap)	39
Şekil 4.5. Kompozit panel için zımbalama işleminin şematik görüntüsü	42
Şekil 5.1. Ticari olarak temin edilen cam fiber malzeme	44
Şekil 5.2. Ticari olarak temin edilen vinilester, sertleştirici ve hızlandırıcı.....	44
Şekil 5.3. Matris malzemesinin hassas terazide tartılması	45
Şekil 5.4. CFTP kompozitlerin üretim aşamaları	46
Şekil 5.5. Üretilen kompozit malzemenin fırınlanması	46
Şekil 5.6. Deneyler için kesilen CFTP kompozit numuneler	47
Şekil 5.7. Çekme ve eğilme deney düzeneği	48
Şekil 5.8. Slindirik saplı HSS-R, DIN 338 matkap ucu	49

Şekil 5.9. Zımba olarak kullanılacak pistonların torna tezgâhında istenilen ölçüde kesilmesi	49
Şekil 5.10. CNC freze tezgâhında zımba uçlarının istenilen ölçülere getirilmesi	50
Şekil 5.11. Deneylerde kullanılan zımbaların şematik gösterimi	50
Şekil 5.12. Deneylerde kullanılan zımba cinsleri	50
Şekil 5.13. Deneylerde kullanılan dişi kalıp	51
Şekil 5.14. Deneylerde kullanılan dişi kalıbın şematik gösterimi	51
Şekil 5.15. Zımba ile delmenin şematik gösterimi	52
Şekil 5.16. Delme deneylerinin yapıldığı Brother Speedio S500X1 CNC tezgâhı	52
Şekil 5.17. Deneylerde kullanılan Kistler marka dinamometre ve amplifier	54
Şekil 5.18. Deneylerde kullanılan NI 9234 ivmeölçer modülü	55
Şekil 5.19. Deformasyon görüntülerinin mikroskopla çekilerek bilgisayara aktarılması	55
Şekil 5.20. Delik çevresinde oluşan deformasyon faktörünün ölçülmesi.....	56
Şekil 5.21. CFTP kompozitin matkapla delinmesi	57
Şekil 5.22. CFTP kompozitin zımba ile delinmesi	57
Şekil 6.1. CFTP kompozit malzemeye ait çekme ve eğilme dayanım grafikleri	59
Şekil 6.2. İlerleme hızına bağlı ses ölçüm grafikleri	60
Şekil 6.3. İlerleme hızına bağlı titreşim genliği grafikleri.....	61
Şekil 6.4. Matkapla delmede, kesme parametrelerine bağlı F_x , F_y ve F_z kuvvetleri.....	62
Şekil 6.5. Matkapla delmede, kesme hızına bağlı kesme kuvveti grafikleri	63
Şekil 6.6. Matkapla delmede, ilerleme hızına bağlı kesme kuvveti grafikleri	64
Şekil 6.7. F_M için elde edilen değişkenler arası korelasyon matrisi	65
Şekil 6.8. F_M için tahmini önerilen GEP ağacı	66
Şekil 6.9. F_M için nesiller boyunca etki değerlerinin değişim frekansı	66
Şekil 6.10. F_M için eğitim ve test aşamasında önerilen GEP ağacına ilişkin gerçek ve tahmini veriler	67

Şekil 6.11. Zımba ile delmede; 250, 500 ve 1000 mm/dak ilerleme hızlarındaki F_x , F_y ve F_z kuvvetleri	68
Şekil 6.12. Zımba ile delmede, ilerleme hızına bağlı kesme kuvveti grafikleri	69
Şekil 6.13. Zımba cinsine bağlı kesme kuvveti grafikleri	70
Şekil 6.14. F_{zb} için elde edilen değişkenler arası korelasyon matrisi.....	71
Şekil 6.15. F_{zb} tahmini için önerilen GEP ağacı	72
Şekil 6.16. F_{zb} için nesiller boyunca etki değerlerinin değişim frekansı.....	72
Şekil 6.17. F_{zb} için eğitim ve test aşamasında önerilen GEP ağacına ilişkin gerçek ve tahmini veriler	73
Şekil 6.18. Matkapla farklı kesme hızı ve ilerleme hızı parametrelerinde delinen kompozitin delik girişinde meydana gelen deformasyon görüntüleri	75
Şekil 6.19. Matkapla farklı kesme hızı ve ilerleme hızı parametrelerinde delinen kompozitin delik çıkışında meydana gelen deformasyon görüntüleri	75
Şekil 6.20. Matkapla delmede, kesme hızına bağlı deformasyon faktörü grafikleri	76
Şekil 6.21. Matkapla delmede, ilerleme hızına bağlı deformasyon faktörü grafikleri ...	78
Şekil 6.22. F_{dM} için elde edilen değişkenler arası korelasyon matrisleri.....	79
Şekil 6.23. F_{dMG} tahmini için önerilen GEP ağacı.....	80
Şekil 6.24. $F_{dMÇ}$ tahmini için önerilen GEP ağacı.....	80
Şekil 6.25. F_{dMG} için nesiller boyunca etki değerlerinin değişim frekansı.....	81
Şekil 6.26. $F_{dMÇ}$ için nesiller boyunca etki değerlerinin değişim frekansı	81
Şekil 6.27. F_{dMG} için eğitim ve test aşamasında önerilen GEP ağacına ilişkin gerçek ve tahmini veriler	83
Şekil 6.28. $F_{dMÇ}$ için eğitim ve test aşamasında önerilen GEP ağacına ilişkin gerçek ve tahmini veriler	83
Şekil 6.29. Farklı uç açısına sahip zımba ve ilerleme hızı parametrelerinde delinen kompozitin delik girişinde meydana gelen deformasyon görüntüleri	84
Şekil 6.30. Farklı uç açısına sahip zımba ve ilerleme hızı parametrelerinde delinen kompozitin delik çıkışında meydana gelen deformasyon görüntüleri	84
Şekil 6.31. Zımba ile delmede, ilerleme hızına bağlı deformasyon faktörü grafikleri ...	85

Şekil 6.32. Zimba cinsine bağlı deformasyon faktörü grafikleri	87
Şekil 6.33. F_{dzb} için elde edilen değişkenler arası korelasyon matrisleri	88
Şekil 6.34. F_{dzbG} tahmini için önerilen GEP ağacı	88
Şekil 6.35. $F_{dzbÇ}$ tahmini için önerilen GEP ağacı	89
Şekil 6.36. F_{dzbG} için nesiller boyunca etki değerlerinin değişim frekansı	89
Şekil 6.37. $F_{dzbÇ}$ için nesiller boyunca etki değerlerinin değişim frekansı	90
Şekil 6.38. F_{dzbG} için eğitim ve test aşamasında önerilen GEP ağacına ilişkin gerçek ve tahmini veriler	91
Şekil 6.39. $F_{dzbÇ}$ için eğitim ve test aşamasında önerilen GEP ağacına ilişkin gerçek ve tahmini veriler	92

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo	Sayfa
Tablo 2.1. Kompozit malzemelere ait avantaj ve dezavantajlar	13
Tablo 2.2. Çeşitli fiber takviye malzemelerinin özellikleri.....	16
Tablo 2.3. PMK’lar için yüksek performanslı takviye fiberler ve özellikleri.....	16
Tablo 2.4. SMK ve MMK’lar için yüksek performanslı takviye fiberler ve özellikleri	17
Tablo 3.1. Yaygın kullanılan bazı polimer reçinelerin özellikleri	22
Tablo 3.2. Boyuna ve enine yönlerde sürekli ve hizalanmış cam, karbon ve aramid fiber takviyeli polimer kompozitlerin özellikleri	26
Tablo 5.1. Polives 701 vinilester reçineye ait bazı özellikler	45
Tablo 5.2. Matkap ile delmede kullanılan deney parametreleri.....	53
Tablo 5.3. Zımba ile delmede kullanılan deney parametreleri.....	54
Tablo 5.4. Genetik ifade ağacına ilişkin parametre tanımları	58

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a	: Deformasyon yarıçapı (mm)
A	: Numunenin kesit alanı (mm ²),
b	: Numune genişliği (mm),
c	: Tek taraflı kalıp boşluğu (mm)
d	: Kesici takım çapı (mm)
dA	: Delaminasyon çatlağı alanındaki artış
D_m	: Deformasyon çapı (mm)
D_n	: Nominal çap (mm)
dU	: Sonsuz küçük gerinim enerjisi
E	: Elastik Modül (GPa)
f	: Devir başına ilerleme hızı (mm/dev)
F	: Kesme kuvveti (N)
F_ç	: Çekme testinde uygulanan yük (N),
F_d	: Deformasyon faktörü
F_{dM}	: Matkapla delme oluşan deformasyon faktörü
F_{dMÇ}	: Matkapla delmede delik çıkışındaki deformasyon faktörü
F_{dMG}	: Matkapla delmede delik girişindeki deformasyon faktörü
F_{dzb}	: Zımba ile delmede oluşan deformasyon faktörü
F_{dzbÇ}	: Zımba ile delmede delik çıkışındaki deformasyon faktörü
F_{dzbG}	: Zımba ile delmede delik girişindeki deformasyon faktörü
F_e	: Eğilme testinde uygulanan yük (N),
F_M	: Matkapla delmede oluşan kesme kuvveti (N)
F_x	: X yönündeki kuvvet (N)
F_y	: Y yönündeki kuvvet (N)
F_z	: Z yönündeki kuvvet – İtme kuvveti (N)
F_{zb}	: Zımba ile delmede oluşan kesme kuvveti (N)
G_{IC}	: Mod I’de birim alan başına kritik çatlak yayılma enerjisi (J/m ²)
h	: Takım altındaki kesilmemiş derinlik (mm)
K	: Boşluk katsayısı
L	: Destek aralık açıklığı (mm),
l	: Numunenin son boyu (mm),

l_0	: Numunenin ilk boyu (mm),
M	: Fiber takviyeli kompozitin birim genişliği başına rijitliği
n	: Dönme devri (dev/dak)
S	: Malzeme kesme mukavemeti (MPa)
t	: Malzeme kalınlığı (mm)
u	: Dakikadaki ilerleme (mm/dak)
V	: Kesme hızı (m/dak)
X	: Yer değiştirme (mm)
ZC	: Zımba cinsi
v	: Poisson oranı
σ_c	: Çekme gerilmesi (MPa)
σ_e	: Eğilme gerilmesi (MPa)

Kısaltmalar

ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
CFTP	: Cam Fiber Takviyeli Polimer
FTP	: Fiber Takviyeli Polimer
GEP	: Genetik İfade Programlama
HSS	: Yüksek Hız Çeliği
HSS-R	: Haddelenerek Dövülmüş Yüksek Hız Çeliği
MMK	: Metal Matrisli Kompozitler
PE	: Polietilen
PEEK	: Polietereterketon
PEI	: Polieterimid
PMK	: Polimer Matrisli Kompozitler
PPS	: Polifenilen Sülfür
PS	: Polistiren
SMK	: Seramik Matrisli Kompozitler

1. GİRİŞ

Kompozitler, biri matris ve diğeri takviye fazı olan en az iki farklı malzemenin makro düzeyde birleştirilmesiyle elde edilen malzemeler olup, farklı alanlarda kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin kullanımı her geçen gün artmakta ve mühendislik uygulamalarında geleneksel malzemelere göre daha fazla tercih edilmektedir. Bunun ana nedeni, kompozit malzemelerin sahip olduğu üstün kimyasal, fiziksel, termal, elektriksel ve mekanik özellikler ile üretim aşamasında istenilen özelliklerin ayarlanabilir olmasıdır. Bu durum, yenilikçi ve çeşitli kompozit malzemelerin ortaya çıkmasına olanak sağlamaktadır. Bu sağlanan özelliklere ekonomiklik, üretim kolaylığı da ilave edildiğinde fiber takviyeli polimer (FTP) kompozitler ön plana çıkmakta ve daha fazla uygulama alanı bulmaktadır (Reis ve ark., 2018).

FTP kompozitler, tasarım esnekliği, iyi sönümlenme özellikleri, üstün mekanik özellikler ve termal kararlılık sergileyen malzemelerdendir. Ayrıca FTP kompozitler, yüksek darbe dayanımına sahip malzemeler arasında olup yüksek mukavemet-ağırlık oranına sahiptir. FTP kompozitlerin yaygın türlerinden biri, 1940’larda tanıtılan cam fiber takviyeli polimer (CFTP) kompozitlerdir. Cam fiber takviye malzemeleri, polimerlerin mekanik özelliklerini ve sertliğini geliştirmek için kullanılır. CFTP kompozitlerde, mukavemet ve tokluk sağlamak için takviye maddesi olarak dokuma, mat, knytex veya kumaş formundaki cam elyaflar tercih edilir. CFTP kompozitler, düşük maliyet ve yüksek özgül mukavemet/sertlik, yüksek özgül elastik modülü, yüksek yorulma mukavemeti, düşük özgül ağırlık, düşük termal iletkenlik, iyi korozyon direnci, iyi ısı ve ses yalıtımı gibi fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler sergilediğinden dolayı otomobil, havacılık, spor ekipmanları, gemi ve elektronik gibi endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Kannan ve ark., 2021; Solati ve ark., 2019a; Solati ve ark., 2019b). Kanat uçları, kanat pervaneleri, kuyruk kanatçıkları, radomlar ve rotor kanatları, CFTP kompozitler kullanılarak yapılan birincil yapısal bileşenlere örnek gösterilebilir. Bunlara ilaveten gemi güverteleri ve tekne gövdeleri de CFTP kompozitler kullanılarak üretilmektedir (Dhilipkumar ve Rajesh, 2023). Ancak bu kompozitlerin daha fazla yayılmalarını ve kullanımlarını engelleyen bazı nedenler bulunmaktadır. Bunlarda en önemlileri, son derece pahalı elyaf üretiminin yanı sıra gerekli, zor ve maliyetli ikincil üretim (delme, frezeleme veya çapak alma) işlemleridir (Pereszalai ve ark., 2021).

Filament sarma, el yatırma, reçine transfer kalıplama gibi üretim tekniklerine bağlı olarak nihai forma yakın üretilen CFTP kompozitler, büyük boru bağlantı ve uçak

parçalarının montajı gibi özel durumlarda, bileşenlerin özellikle delinmesine ihtiyaç duyulmaktadır (Prasanth ve ark., 2022). Ancak CFTP kompozitlerin delinmesinde, kompozitin heterojenik ve anizotropik yapısından kaynaklı sorunlarla karşılaşmaktadır (Kilickap, 2010). CFTP kompozitler, yumuşak epoksi matris ve sert lifler içerdiği için geleneksel delme işleminde, itme kuvveti iş parçasında fiberlerin kopmasına, tüylenmesine, parçalanmasına, tabakaların katmanlara ayrılmasına, matriste çatlamalara, takım aşınmasına ve termal bozulmalara sebebiyet verir (Prasad ve Chaitanya, 2019). Söz konusu kusurları azaltmak veya ortadan kaldırmak için bazı araştırmacılar, geleneksel olmayan işleme teknikleri üzerinde çalışmışlardır. Bu teknikler arasında su jeti, ultrasonik/titreşim destekli işleme ve lazerle işleme en yaygın olarak benimsenen yöntemler olmuştur. Bununla birlikte, bu yöntemlerin her birinin kendi sınırlamaları vardır. Su jeti ile kesme çok hızlı bir işleme tekniği olmasına rağmen, özellikle ince CFTP kompozitlerde büyük deformasyona neden olur ve CFTP kompozit tarafından emilen nem, kompozitin mekanik mukavemetini azaltır. Ultrasonik/titreşim destekli işleme, daha yüksek yüzey kalitesi sağlamasına rağmen kesme hızları çok düşüktür ve bu da ekonomik olarak kabul edilmemesini sağlar (Solati ve ark., 2019a). 1985 yılında CFTP kompozitlerin lazerle işlenmesi için ilk girişimde bulunulmuştur. En iyi lazer kesim kalitesini elde etmek için işleme alanındaki termal hasarı en aza indirmek amaçlanmıştır. Lazer işleme kalitesini etkileyen ana parametreler lazer gücü, kesme hızı, gaz basıncı ve mesafedir. Lazer işleme parametrelerinin yanlış seçilmesi, kesme alanında hasara ve yüzey kalitesinin azalmasına ve dolayısıyla mekanik mukavemetin kötüleşmesine neden olur. Özellikle lazer işleme sırasında, sıcaklık cam fiberin buharlaşma sıcaklığına (fiberi çevreleyen matrisin bozulma sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklığa) ulaştığında, matris deformasyonu veya polimer yanması meydana gelir (Solati ve ark., 2019b).

Araştırmacılar her ne kadar geleneksel olmayan işleme yöntemleri ile delme işlemi yapsa da geleneksel matkaplarla delme, havacılık ve otomotiv endüstrilerinde yapısal montajların sabitlenmesi için hala en ekonomik ve verimli işleme süreçlerinden biri olmaya devam etmektedir. Ancak bu delme yönteminde de deformasyon hala önemli bir sorun teşkil etmektedir (Palanikumar, 2011). Delme kaynaklı deformasyon, iş parçasının hem giriş hem de çıkış düzlemlerinde meydana gelir. Kesme hızı, takım malzemesi ve geometrisi, ilerleme hızı gibi parametreler deformasyonu etkilemektedir (Kilickap, 2010). Bu parametreler itme kuvvetini de etkilediği için bazı araştırmacılar,

itme kuvveti ve torkunu deformasyon faktörünü etkileyen parametrik faktörler olarak tanımlamışlardır. Deformasyon, yorulma ömrünü etkilediği için özellikle havacılık endüstrisinde parça reddine yol açabilir (Erturk ve ark., 2021). Diğer bir değişle deformasyon malzemenin yapısal bütünlüğünü azaltarak montaj problemlerine neden olur (Singaravel ve ark., 2021). Bu yüzden deformasyonu azaltmak için kesme parametrelerinin optimizasyonu ve analizi iyi yapılmalıdır.

1.1. Literatür Araştırması

CFTP kompozitlerin işlenmesi üzerine birçok bilimsel çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmalar; üretilen kompozitin delinmesi, frezelenmesi ve tornalanması gibi farklı talaşlı işleme yöntemlerini içermektedir. Ancak delme işlemi diğer talaşlı işlemlerden daha çok kullanıldığı için 1997-2022 yılları arasında delme üzerine yapılmış çalışmalardan bazıları aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir.

Ogawa ve ark. (1997) yaptıkları çalışmada, baskılı bir kablolama panosu için cam fiber takviyeli polimer (CFTP) kompozitlerin küçük çaplı matkaplarla delinmesinde, kesme parametrelerinin itme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini araştırmışlardır. Kesme hızı ve ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığını ve artan ilerleme hızı ile itme kuvvetinin de arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca artan ilerleme kuvvetinin yüzey kalitesini olumsuz yönde etkilediğini tespit etmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü için ilerleme hızının kesme hızından daha etkili olduğunu ve bu nedenle delik kalitesini iyileştirmek için ilerleme hızının düşük tutulması gerektiğini belirtmişlerdir.

Mathew ve ark. (1999), tek yönlü CFTP kompozit laminantların delinmesi sırasında bir trepanlama takım geometrisinin itme kuvveti ve torku üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Trepanlama takımının performansının, itme kuvveti, itme torku ve delik kalitesi açısından helisel matkaplardan daha üstün olduğunu belirtmişlerdir. Trepanlama takım ile delmede, CFTP kompozit malzemeden dairesel bir halka şeklinde malzeme çıkartıldığı için çıkarılan malzemenin toplam hacminin daha az olduğunu ve bu durumun da kesme kuvvetinin azalmasına katkı sağladığını ifade etmişlerdir. Trepanlama takımın helisel matkaplara kıyasla yaklaşık %50 daha az itme kuvveti ve yaklaşık %10 daha az tork ürettiğini, bu takımlarla delinen deliklerin iyi ve kabul edilebilir kalitede olduğunu ve diğer kesici takımlardan farklı olarak son birkaç elyafi bile kestiğini gözlemlemişlerdir.

Ramkumar ve ark. (2004), uçlu tungsten karbür, iki kanallı katı karbür ve üç kanallı katı karbür matkaplarla deldikleri CFTP kompozit laminantlara, delme esnasında titreşim vermişlerdir. İş parçasına verilen titreşiminin itme kuvveti, takım aşınması, sıcaklık ve güç üzerine etkilerini incelemişlerdir. İş parçasına küçük genlik ile düşük frekansta titreşim verilmesinin CFTP kompozit laminantların delinmesinde çok daha iyi performans sağladığını, delik kalitesini iyileştirdiğini ve delaminasyonu azalttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca üç tip matkap arasında üç kanallı katı karbürün en iyi performans sergilediğini gözlemlemişlerdir.

Ekici ve Işık (2009), CFTP kompozit malzemenin delinmesi esnasında delik yüzeyinde oluşan yüksek gerilme kuvvetleri sebebi ile delik çıkış kenarlarında oluşan yüzey hasarlarını incelemişlerdir. Değişik kesme parametreleri (kesme hızı, ilerleme ve takım uç geometrisi) altında delinen kompozitin delik çıkışındaki hasar faktörü ölçümleri sonucunda, yüksek kesme hızı ve düşük ilerlemenin hasar faktörünü azalttığını tespit etmişlerdir. Kesici takım uç açısının ve ağız sayısının artması ile hasar faktörünün de arttığını, en düşük hasar faktöre 90 m/dak kesme hızında, 0,06 mm/dev ilerleme hızında 60° uç açısına sahip iki ağızlı kesici takımla ulaşıldığını belirtmişlerdir. Ayrıca cam fiber parçacıklarının iş parçası yüzeyi ile takım arasına gelmesi sonucunda kesici takımlarda kenar aşınması oluştuğunu gözlemlemişlerdir.

Kilickap (2010), CFTP kompozitin delinmesinde, kesme parametrelerinin (kesme hızı: 5, 10, 15 ve 20 m/dak, ilerleme hızı: 0,1, 0,2, 0,3 ve 0,4 mm/dev, matkap uç açısı: 118° ve 135°) delik giriş ve çıkışındaki deformasyon faktörüne etkisini Taguchi yöntemiyle analiz etmiştir ve minimum deformasyon faktörü için optimum kesme parametrelerini belirlemeye çalışmıştır. İlerleme hızı ve ardından kesme hızının deformasyon faktörünü etkileyen önemli parametreler olduğunu ifade etmiştir. Kesme hızı ve ilerleme hızının artmasıyla delik giriş ve çıkışındaki deformasyon faktörünün arttığını, delik çıkışındaki deformasyon faktörünün delik girişindeki deformasyon faktöründen daha yüksek olduğunu, 118° uç açısına sahip matkapla delinen kompozit malzemede daha az deformasyon faktörü elde edildiğini tespit etmiştir. Minimum deformasyon faktörü için kesme hızı ve ilerleme hızının düşük seviyede tutulması gerektiğini belirtmiştir.

Palanikumar (2011), CFTP kompozitlerin delinmesinde, Taguchi gri ilişkisel analiz yöntemini kullanarak dönme devri ve ilerleme hızının itme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve deformasyon faktörü gibi çoklu performans özelliklerine etkilerini

incelemiştir. Artan ilerleme hızının itme kuvvetini, yüzey pürüzlülüğünü ve deformasyon faktörünü arttırdığını, artan dönme devrinin ise genel olarak itme kuvvetini, yüzey pürüzlülüğünü ve deformasyon faktörünü azalttığını gözlemlemiştir. Yüksek dönme devri ve düşük ilerleme hızının aynı anda en düşük itme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve deformasyon faktörü elde etmek için önerilen seviyeler olduğunu belirtmiştir. Gri ilişkisel varyans analizinden %72,49 ile ilerleme hızının ve %12,73 ile dönme devrinin kontrol edilebilir faktörler üzerinde katkı oranına sahip olduğunu belirtmiştir.

Karaca (2016), CFTP kompozitlerde deformasyon faktörüne etki eden kesme hızı, ilerleme hızı ve matkap uç açısı gibi delme parametrelerinin delik çıkışında oluşan deformasyon faktörüne etkisini incelemiştir. Deformasyon faktörüne etki eden en önemli etkenin ilerleme hızı olduğunu, matkap uç açısının deformasyonun oluşumunda ilerleme hızından sonra ikinci sırada önemli etkiye sahip olduğunu ve kesme hızının ise deformasyon faktörüne önemli bir etkisinin olmadığı tespit etmiştir. İlerleme hızının artmasıyla deformasyon faktörünün arttığını, bu kompozitlerin delinmesinde düşük ilerleme hızlarının ve küçük uç açılı matkapların tercih edilmesi gerektiğini ifade etmiştir.

Mohan ve Kulkarni (2018), CFTP kompozitlerin delinmesinde, delme parametrelerinin tork üzerindeki etkisini yanıt yüzey yöntemi ile incelemiştir. Kompozit malzeme kalınlığı ve matkap çapının torku etkileyen önemli parametreler olduğunu, dönme devri ve ilerleme hızının ise tork oluşumu üzerinde daha az etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Optimum torku orta ilerleme hızı, yüksek dönme devri, düşük malzeme kalınlığı ve düşük matkap çapından elde etmişlerdir.

Prasad ve Chaitanya (2019), CFTP kompozitin delinmesinde, dönme devri, ilerleme hızı, malzeme kalınlığı ve fiber oryantasyon açısı parametrelerinin deformasyon faktörü üzerine etkisini Taguchi yöntemi ile analiz etmişlerdir. Yukarı çekmeden kaynaklı (delik girişi) deformasyonunun aşağı itmeden kaynaklı (delik çıkışı) deformasyondan az olduğunu gözlemlemiştir. Deformasyon üzerinde en etkili parametrenin ilerleme hızı olduğunu, bunu sırasıyla malzeme kalınlığı, fiber oryantasyon açısı ve dönme devrinin takip ettiğini belirtmişlerdir. Delik girişindeki minimum deformasyonu düşük dönme devri, düşük ilerleme hızı, yüksek malzeme kalınlığı ve 0° fiber oryantasyon açısından elde ederlerken, delik çıkışındaki minimum deformasyonu ise orta dönme devri, düşük ilerleme hızı, düşük malzeme kalınlığı ve 90° fiber oryantasyon açısından elde etmişlerdir.

Sahami ve Heidary (2020), filament sarma işlemi ile ürettikleri CFTP kompozit boruların delinmesinde, dönme devri, ilerleme hızı, matkap çapı ve geometrisi gibi delme parametrelerinin itme kuvveti ve deformasyon faktörü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca CFTP kompozit borunun içerisine buz kütlesi koyarak minimum ve maksimum deformasyon parametrelerinin elde edildiği delme parametrelerinde delme işlemini tekrarlamışlardır ve deformasyon faktörünün buz kütlesi kullanımı ile değişimini analiz etmişlerdir. Takımın geometrik şeklinin ve ilerleme hızının deformasyon faktörü üzerinde en önemli iki etkiye sahip parametre olduğunu, bunları dönme devri ve matkap çapının takip ettiğini açıklamışlardır. Kompozit borunun içerisine buz kütlesi koyularak yapılan delme işleminde deformasyonun önemli ölçüde azaldığını gözlemlemişlerdir. Matkap çapı ve buz kütlesi destek durumunun, artık basma mukavemeti üzerinde büyük etkiye sahip olduğunu ve bunları ilerleme hızı, dönme devri ve matkap geometrisinin takip ettiğini belirtmişlerdir.

Erturk ve ark. (2021), CFTP kompozitlerin delinmesinde, matkap cinsinin, dönme devrinin ve ilerleme hızının itme kuvveti, tork ve kesme sıcaklığı üzerine etkilerini analiz etmişlerdir. İlerleme hızının artmasıyla itme kuvvetinin ve torkunun arttığını ifade etmişlerdir. Dönme devrinin artmasıyla itme kuvveti ve tork üzerinde kayda değer bir değişikliğin olmadığını belirtmişlerdir. İtme kuvveti ve tork değerlerinin karbür uçlarda birbirine yakın olduğunu, HSS-TiN kaplı matkaplarda biraz daha yüksek olduğunu ve HSS-R matkaplarda ise en yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca artan dönme devriyle kesme sıcaklığının arttığını, ancak ilerleme hızına bağlı olarak kesme sıcaklığında önemli bir değişikliğin olmadığını vurgulamışlardır.

Kannan ve ark. (2021), CFTP kompozitlerin normal matkap ve içi boş matkaplarla delinmesinde, dönme devri ve ilerleme hızının deformasyon faktörü ve işleme süresi üzerine etkilerini incelemişlerdir. İçi boş matkabın daha düşük et kalınlığı nedeniyle normal matkaptan daha iyi sonuçlar verdiğini ve sadece çevresi boyunca daha az malzeme çıkardığından delik etrafındaki deformasyon faktörünü ve işleme süresini azalttığını gözlemlemişlerdir. İlerleme hızı arttıkça deformasyon faktörünün arttığını ve işleme süresinin azaldığını, dönme devri arttıkça işleme süresinin ve deformasyon faktörünün azaldığını belirtmişlerdir.

Pereszalai ve ark. (2021), karbon ve cam fiber takviyeli polimer kompozitlerin farklı takım pozisyonları (eğim açısı) ve helis takım yolu ile frezelenerek delinmesinde, kesme parametrelerinin kesme kuvveti ve deformasyon faktörü üzerine etkilerini

araştırmışlardır. Hem kesme kuvvetinin hem de deformasyon faktörünün helis takım yolundan önemli ölçüde etkilendiğini gözlemlemişlerdir.

Singaravel ve ark. (2021), helisel matkap, ağaç matkabı ve parmak freze çakısıyla deldikleri CFTP kompozitlerde, kesici takım cinsinin, dönme devrinin ve ilerleme hızının delik çap sapması, dairesellik hatası, yüzey pürüzlülüğü ve deformasyon faktörü üzerine etkilerini analiz etmişlerdir. Dönme devri arttıkça çap sapmasının, dairesellik hatasının, yüzey pürüzlülüğünün ve deformasyon faktörünün azaldığını belirtmişlerdir. İlerleme hızı arttıkça çap sapmasının azaldığını, dairesellik hatasının ve deformasyon faktörünün arttığını, ancak yüzey pürüzlülüğünün orta ilerleme hızı için düşük elde edildiğinin ve bu değerlerin yüksek seviyeye çıkartılması ile yüzey pürüzlülük değerinin tekrar arttığını belirtmişlerdir. En düşük çap sapması, yüzey pürüzlülüğü ve deformasyon faktörü değerlerini parmak freze çakısının kullanıldığı delme deneylerinden elde edildiğini ve bunu ağaç matkabının kullanıldığı delme deneylerinin takip ettiğini ifade etmişlerdir.

Kalita ve ark. (2022), CFTP kompozitin delinmesinde, malzeme kalınlığı, matkap çapı, dönme devri ve ilerleme hızı parametrelerinin üçer seviyesi için yüzey pürüzlülüğü değişimini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerini yanıt yüzey yöntemine bağlı olarak gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu için genetik algoritma ve geliştirilen modeldeki her bir süreç parametresinin önemini belirlemek için varyans analizi yapmışlardır. Delme işleminde, ilerleme hızının en önemli parametre olduğunu ve bunu malzeme kalınlığı takip ettiğini belirtmişlerdir. İlerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin arttığını ve daha küçük bir matkap çapı değerinin minimum yüzey pürüzlülüğü için oldukça önemli olduğunu ifade etmişlerdir.

Kubher ve ark. (2022), polimer kompozit laminantların delinmesinde, işleme kaynaklı hasar ve işleme kuvvetleri üzerine kesme sıcaklığının etkisini sonlu eleman çerçevesinde ele almışlardır. Sonlu elemanlar analizinin itme kuvveti, deformasyon hasarı ve kesme sıcaklığı için delme deneyleriyle uyum gösterdiğini vurgulamışlardır.

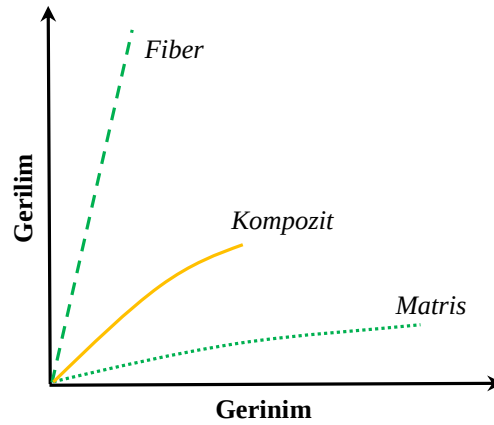
Prasanth ve ark. (2022), CFTP kompozitlerin işlenmesinde, takım cinsi ve geometrisi, dönme devri, ilerleme hızı ve kesme derinliğinin yüzey kalitesi ve işleme kuvveti üzerine etkilerini incelemişlerdir. Diğer kesici takımlara göre nispeten yüksek eğimli ve açılı takımlarla işlenen kompozitlerde daha düşük deformasyon ve daha iyi işlenmiş yüzey kalitesi elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Özellikle dönme devri arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin azaldığını ve işleme kuvvetinin arttığını belirtmişlerdir.

2. KOMPOZİTLER

2.1. Kompozit Malzemelerin Tarihi

Kompozitlerin farklı bir malzeme sınıflandırması olarak ortaya çıkışı, 20. yüzyılın ortalarında, cam fiber takviyeli polimerler gibi çok fazlı kompozitlerin üretimi ile başlamıştır. Ahşap, samanla güçlendirilmiş kilden yapılmış tuğlalar, deniz kabukları ve hatta çelik ve benzeri alaşımlar çok fazlı malzemelerden binlerce yıldır üretildiği bilinmesine rağmen, üretim sırasında benzer olmayan malzemelerin birleştirilmesine yönelik bu yeni kavramın tanınması, metallere, seramiklere ve polimerlerden ayrı bir sınıf olarak kompozitlerin yeni bir malzeme olarak ortaya çıkmasına yol açmıştır.

Kompozitler, geleneksel metal alaşımları, seramikler ve polimer malzemelerin herhangi biri tarafından karşılanamayan özellik kombinasyonlarını içermektedir. Bu yüzden bileşenlerini oluşturan elemanların ortak özelliklerini sergilerler (Şekil 2.1).

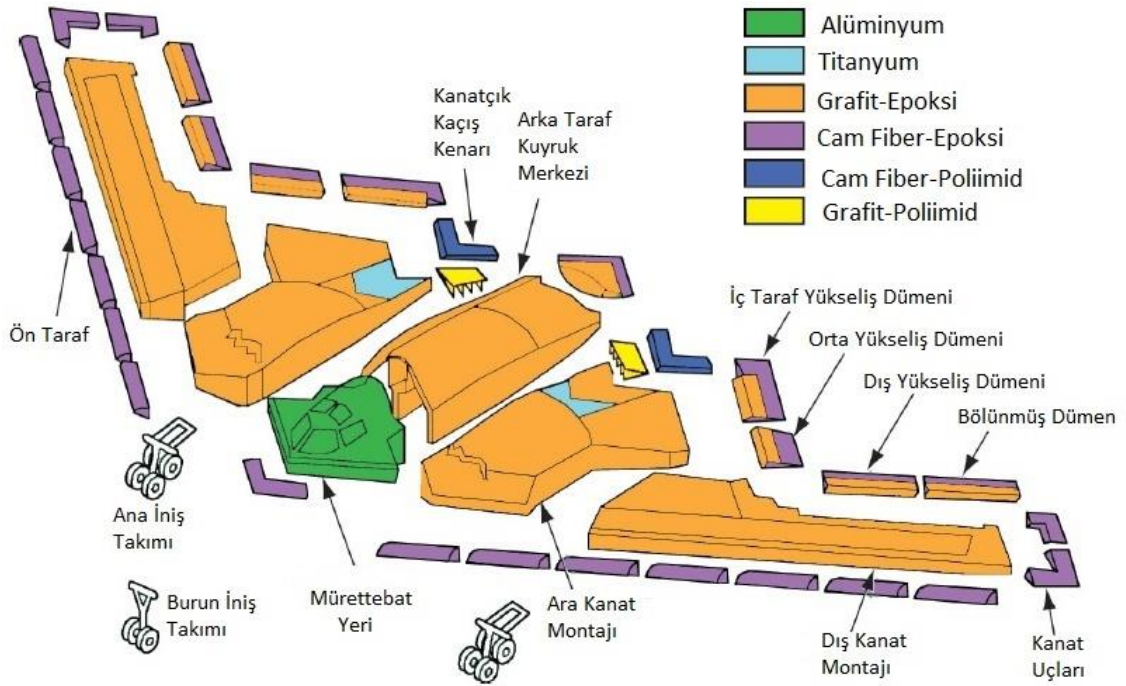


Şekil 2.1. Matris, fiber ve kompozit arasındaki gerilim ve gerinim ilişkisi (Nijssen, 2015)

Havacılık, sualtı, biyomühendislik ve ulaşım endüstrilerinin yüksek teknoloji uygulamalarında özel ve olağandışı özelliklere sahip malzemelere ihtiyaç vardır. Örneğin; uçak mühendisleri giderek daha düşük yoğunluklu, güçlü, sert, aşınmaya ve darbe dayanımına karşı dayanıklı yapısal malzemelere ihtiyaç duymaktadır. Bu kombinasyon özelliklerinin bir arada bulundurulması oldukça karmaşıktır. Monolitik malzemeler arasında, güçlü malzemelerin yoğunluğu yüksektir. Bu malzemelerin mukavemet veya sertliğini arttırmak genellikle toklukta bir azalmaya sebebiyet verir (Callister ve Rethwisch, 2018).

Organik matrisli kompozitler, II. Dünya Savaşı sırasında havacılık endüstrisinin yapısal malzemelerden önemli ölçüde daha yüksek mukavemet ve sertlik değerlerine sahip malzemeler üretme çabalarından ve alüminyum esaslı alaşımlar gibi yapısal

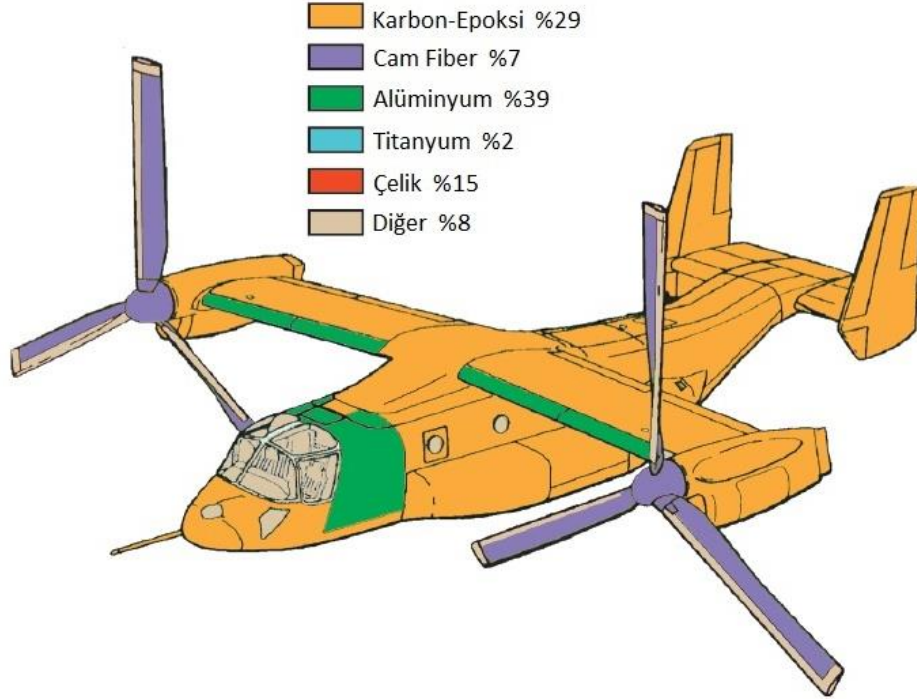
malzemelerin korozyona ve yorulma hasarı gibi sorunların üstesinden gelmek için ortaya çıkmıştır. Savaşın sonunda, cam fiber takviyeli polimerler (CFTP), filaman sargılı roket motorlarında başarıyla kullanılmış ve çeşitli diğer prototip yapısal uçak uygulamalarında da kullanılmaya başlanmıştır. Bu malzemeler 1950’lerde daha geniş kullanım alanı bulmuş ve malzemelerin korozyon direncinde önemli gelişmeler sağlamıştır. 1960’larda spor ekipmanlarındaki ticari uygulamalarda da kullanılarak daha büyük bir pazar sağlamıştır. 1970’lerdeki enerji krizi, organik matrisli kompozitlerin ticari uçaklara girmesi için önemli bir teşvik sağlamış ve bu teşvikte askeri uçaklardaki başarılı deneyimi önemli bir rol oynamıştır. Bu dönemde, yüksek performanslı karbon fiberlerin piyasaya sürülmesiyle yapısal verimlilikte çarpıcı gelişmeler meydana gelmiştir. Gelişmiş üretim yetenekleri ve tasarım metodolojileri, askeri ve ticari uçak ve uzay aracı yapıları için organik matrisli kompozitlerin kullanımında önemli artışlar için ortam oluşturmuştur (Miracle ve Donaldson, 2001).



Şekil 2.2. B-2 bombardıman uçağında kullanılan malzemeler (Younossi ve ark., 2001)

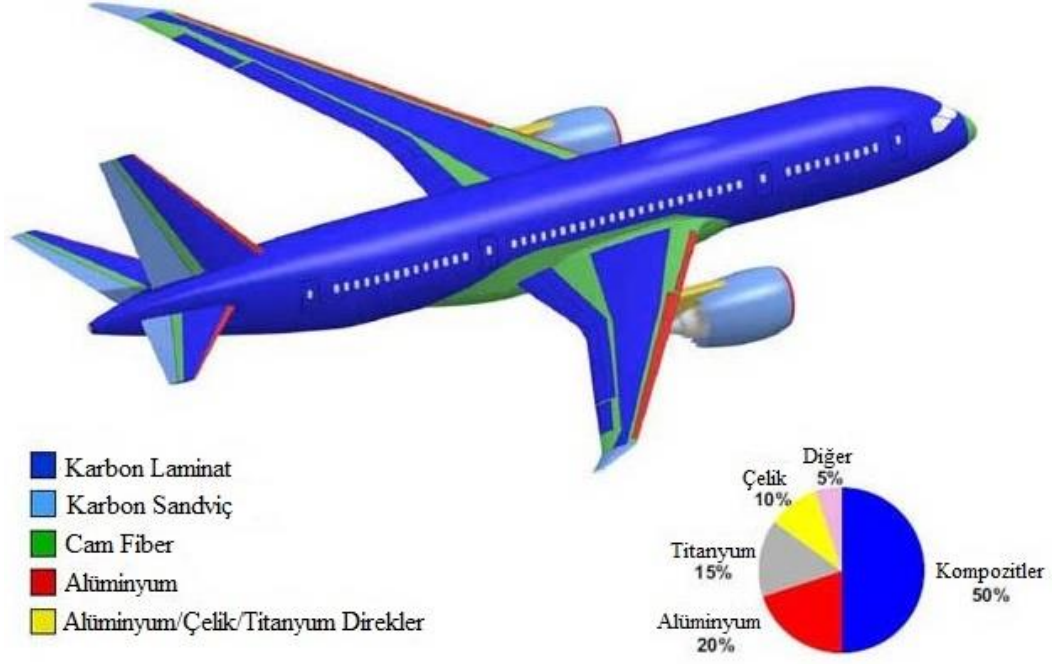
1970’lerde, F-15 E/F savaş uçağının yalnızca %2’si organik matrisli kompozitlerden oluşuyorken, sonraki yıllarda kompozit malzeme ve yapıların araştırma, geliştirme, imalat, test ve uçuş hizmeti gösterimine yönelik önemli yatırımlar yapılması ve kompozitlerin askeri ve sivil araçlarında (kara ve deniz) kullanımına yönelik paralel programların devam etmesi, kompozit malzemelerin kullanımını daha da arttırmıştır. Yakın tarihte yeni nesil ABD taktik savaş uçağı olan F-22’nin üretiminde %24 oranında

organik matrisli kompozitler kullanılmıştır. B-2 bombardıman uçağı (Şekil 2.2) ve mevcut helikopterlerde (Şekil 2.3) daha da yüksek oranda kompozitler tercih edilmiştir (Miracle ve Donaldson, 2001).



Şekil 2.3. V-22 helikopterinde kullanılan malzemeler (Younossi ve ark., 2001)

Yüksek sertlik, yüksek mukavemet ve düşük yoğunluğa ek olarak kompozitlerin gösterdiği avantajlar arasında korozyon direnci, uzun yorulma ömürleri, termal özellikler ve karmaşık şekilleri kolaylıkla elde etme yeteneği yer alır (Miracle ve Donaldson, 2001). Özellikle yüksek mukavemet/ağırlık oranından dolayı kompozitler, ağırlığın etkili bir faktör olduğu endüstrilerde mevcut olan geleneksel malzemelerin yerini almak için ideal bir seçim olmuştur. Boeing (Şekil 2.4) ve Airbus uçaklar gibi kritik yapılar ağırlıklı olarak kompozitlerden oluşur. Bu da kompozit endüstrisinin gelişmiş ülkelerde muazzam bir şekilde büyümesine katkı sağlamıştır. ABD’de kompozit endüstrisi 2014 yılında %6,3’lük bir büyüme gerçekleştirmiş ve bu da değer olarak 8,2 milyar dolara tekabül etmektedir. Bu gelişmiş ülkelerdeki kompozit endüstrisinin önemini ortaya koymakta ve kompozitlerin diğer mühendislik uygulamalarında da kullanımının artmasına ortam oluşturmuştur. Günümüzde ise kompozitler araba tamponları, bisiklet ve tenis raketi gibi uygulamalarda kullanılarak günlük yaşamımızın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir (Kalita ve ark., 2022).



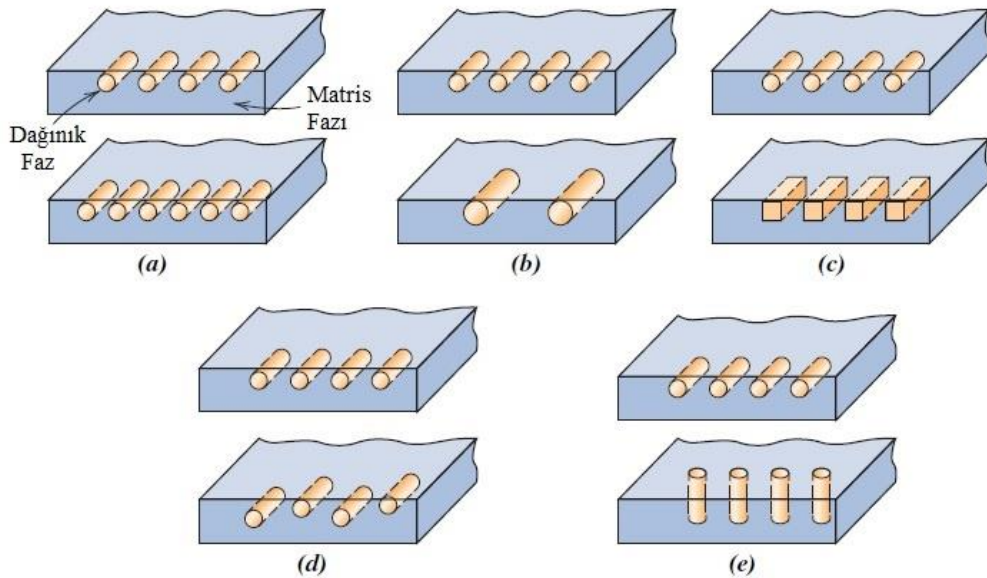
Şekil 2.4. Boeing 787 yolcu uçağında kullanılan malzemeler (Anonim, 2022)

Metal Matrisli Kompozitler (MMK), 1950’lerde ve 1960’ların başında ortaya çıkmıştır. Ana motivasyonu yüksek kimyasal eylemsizlik, yüksek kesme mukavemeti ve yüksek sıcaklıklarda iyi özellik tutma dahil olmak üzere avantajlarını koruma ve metalik malzemelerin yapısal verimliliğini önemli ölçüde artırmaktır. Sinterlenmiş alüminyum tozu üzerindeki ilk çalışmalar, süreksiz olarak güçlendirilmiş MMK’larda öncü olmuştur. Önce bor ve ardından silisyum karbür (SiC) gibi yüksek mukavemetli monofilamentlerin geliştirilmesi, 1960 ve 1970’li yıllarda fiber takviyeli MMK’lar üzerinde önemli gelişmeler sağlamıştır. İşleme, fiber hasarı ve fiber-matris etkileşimleri ile ilgili sorunlar belirlenmiş ve faydalı malzemeler üretmek için bunların üstesinden gelinmeye çalışılmıştır. 1970’lerin başındaki durgunluk, önemli araştırma ve geliştirme finansman kesintilerine neden olduğundan, MMK’ların keşif ve geliştirme aşamasını sona erdirmiştir. 1970’lerin sonlarında SiC bıyık takviyeleri kullanılarak süreksiz olarak güçlendirilmiş MMK’lar üzerinde çabalar yeniden başlamıştır. Bıyık takviyelerine ait yüksek maliyeti ve bıyık hasarından kaçınmanın zorluğu, partikül takviye kavramını ortaya çıkarmıştır. Ancak çok daha düşük maliyet ve daha kolay işleme ile ortaya çıkan malzemeler, neredeyse eşdeğer güç ve sertlik sağladığı için hem süreksiz hem de fiber takviyeli MMK’lardaki yenilikler 1980’lerde devam etmiştir. Performans ve malzeme kalitesindeki önemli gelişmeler, hedef pazarlar için MMK bileşenlerinin üretiminde uzmanlaşmış, ancak geniş çapta ilgi görmemiştir. 1990’ların başında ABD, Hava

Kuvvetleri Başlık III programı altında Amerika Birleşik Devletleri'nde havacılık endüstrisine bağlı bir MMK teknoloji üssü kurmak için önemli bir yatırım yapmıştır. Bu program, askeri ve ticari havacılık uygulamaları için önemli avantajlar sağlamıştır. MMK pazarı, 20. yüzyılın sonunda havacılık ve uzay pazarında beş kat daha büyümüş ve bu büyüme hala devam etmektedir (Miracle ve Donaldson, 2001).

2.2. Kompozit Malzemeler ve Özellikleri

Kompozitler, tek başına kullanılan bileşenlerinden daha iyi özellikler sergileyen en az iki ve/veya daha fazla farklı malzemenin (fazların) uygun bir şekilde bir araya getirilmesiyle elde edilen malzemeler olarak tanımlanabilir. Metalik alaşımların aksine, kompozitte kullanılan fazlar kimyasal, fiziksel ve mekanik olarak farklı olmalı ve bir ara yüz ile birbirinden ayrılmalıdır (Campbell, 2010). Birçok kompozit malzeme sadece dağınık faz ve matris fazı olmak üzere iki fazdan oluşur. Kompozit malzemelerin özellikleri, bu fazlara ait özelliklerinin, fazların göreceli miktarlarının ve dağınık fazın geometrisinin bir fonksiyonudur. Kompozitlerin özelliklerini etkileyebilecek dağınık faz parçacıklarının çeşitli geometrik ve uzaysal özelliklerinin şematik gösterimleri Şekil 2.5'te verilmiştir (Callister ve Rethwisch, 2018).



Şekil 2.5. Kompozitlerde dağınık faz parçacıklarının şematik gösterimleri (Callister ve Rethwisch, 2018)
a) Yoğunluk, b) boyut, c) şekil, d) dağılım ve e) oryantasyon

Matris fazı, bir polimer, metal veya seramiktir. Polimerlerin mukavemeti ve sertliği düşüktür. Metallerin mukavemet ve sertliğe orta seviyelerdeyken, sünekliği

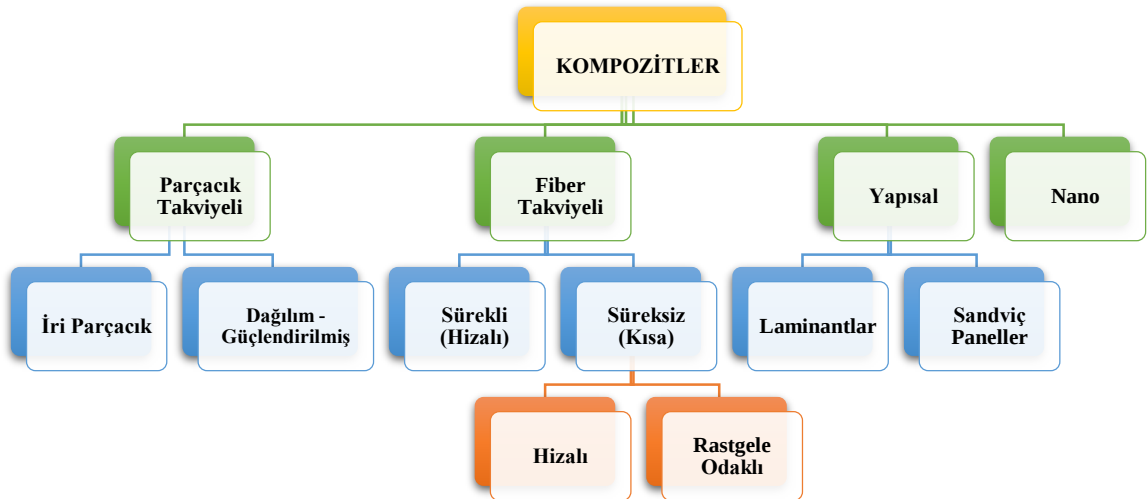
yüksektir. Seramikler ise kırılğan olmalarına rağmen yüksek mukavemet ve sertlik gösterirler. Matris fazı, liflerin uygun aralıkta ve oryantasyonda tutulmasını sağlar. Buna ilaveten liflerin aşınmaya ve çevresel faktörlere karşı korunması başta olmak üzere birçok kritik görevi yerine getirir. Polimer ve metal matrisli kompozitlerdeki matris fazı, arayüzeydeki kesme yüklemesi yoluyla yükleri liflere iletir. Seramik matrisli kompozitlerdeki amacı ise mukavemet ve sertlikten ziyade tokluğu arttırmaktır. Bu sebeple seramik matrisli kompozitlerde düşük bir arayüzey mukavemet bağının elde edilmesi arzu edilmektedir (Campbell, 2010).

Kompozit malzemeler, birçok avantaja sahip olmalarına rağmen bazı dezavantajları da vardır. Kompozit malzemelere ait avantaj ve dezavantajlar Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Kompozit malzemelere ait avantaj ve dezavantajlar (Nijssen, 2015)

AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
1. Ağırlıktan tasarruf sağlar. 2. Malzeme kullanımında ve süreçte yüksek derecede özgürlük getirir. 3. Kolay renklendirilebilme özelliği vardır. 4. Yarı saydam olabilirler. 5. Sertlik, mukavemet, termal ve elektriksel direnç ayarlanabilir. 6. Toplam bakım maliyeti düşüktür. 7. Suya ve kimyasallara karşı dayanıklıdır. 8. Fazlarında dayanıklı malzemelerin kullanılmasına olanak sağlarlar. 9. Üretimleri otomatik olarak gerçekleştirilebilir.	1. Malzeme maliyetleri yüksektir. 2. Bazen gelişmiş hesaplama yöntemleri gerektirebilir. 3. Renk ve parlaklığın korunması her zaman tahmin edilemez. 4. Yapısal davranış ve bağlantı yöntemleri hakkında nispeten sınırlı bilgiye sahip olmak. 5. Son yüzey işleme henüz iyi gelişmemiş. 6. Ultraviyole ışığına duyarlı. 7. Geri dönüşümü henüz iyi gelişmemiş. 8. Yüksek sermaye gerektirebilecek üretim yöntemleri.

Kompozit malzemeler farklı şekillerde sınıflandırılabilirler. Kompozitlerin sınıflandırılması için basit bir şema Şekil 2.6’da verilmiştir.



Şekil 2.6. Kompozit malzemelere ait bir sınıflandırma şeması (Callister ve Rethwisch, 2018)

Şekil 2.6’da da görüldüğü gibi kompozitler, parçacık takviyeli, fiber takviyeli, yapısal ve nanokompozit olmak üzere dört ana bölümde incelenebilir. Birinci bölümü oluşturan parçacık takviyeli kompozitlerde, parçacık boyutları tüm yönlerde yaklaşık olarak aynıdır. Diğer bir deyişle dağılmış faz eş eksenlidir. Parçacıklar iri veya güçlendirilmiş olabilir. İkinci bölümü oluşturan fiber takviyeli kompozitlerde, fiberin uzunluk-çap oranı ve geometrisi oldukça önemlidir. Fiberler sürekli veya süreksiz olabilirler. Sürekli fiberlerin en boy oranı uzun olup tercih edilen bir yönetime sahiptirler. Tek yönlü kumaş, dokuma kumaş ve sarmal sarımı sürekli fiberlere örnekler verilebilir. Süreksiz fiberler ise kısa en boy oranlarına ve genellikle rastgele bir yönetime sahiptirler. Süreksiz takviye örnekleri, kırılmış lifler ve rastgele keçeleri içermektedir. Üçüncü bölümü oluşturan yapısal kompozitler, düşük yoğunluklara ve yüksek derecede yapısal bütünlüğe sahip olacak şekilde tasarlanmış çok katmanlı malzemelerdir. Laminant veya sandviç şeklinde olabilirler. Beşinci bölümde ise dağılmış faz parçacıklarının boyutları nanometre boyutta olduğu için bu kompozitler, nanokompozitler olarak isimlendirilir (Campbell, 2010; Callister ve Rethwisch, 2018).

2.3. Kompozit Malzemelerde Kullanılan Takviyeler

Kompozit malzemelerde kullanılan takviye elemanları, mukavemet ve sertlik sağlar. Genellikle takviye elemanları matris malzemesinden daha sert, daha güçlü ve daha rijittir. Takviye elemanları parçacık, bıyık, fiber ve ince tel şeklindedirler. Parçacıklı takviyeler, yaklaşık olarak eşit boyutlara sahiptir. Küresel, trombosit, düzenli veya

düzensiz geometride olabilirler. Boyutları mikron mertebesinde ve tercih edilen bir yönü yoktur. Parçacık takviyeler ilave edildikleri kompozit malzemelerin mekanik özelliklerde minimum iyileştirme sağlar. Ancak maliyeti azalttığı için sıklıkla dolgu malzemesi olarak tercih edilirler. Bıyıklar, kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile üretilen tek kristalli takviye elemanlarıdır. Tek kristalli oldukları için bıyıklar anizotropiktirler. Boylarının çapa oranı 10-1000 ve çapları 0,1-1µm arasındadır. Fiber takviye elemanlarına göre hem uzunluk hem de çap olarak küçüktürler. Küçük çaplarının bir sonucu olarak, yüksek derecede kristalin mükemmelliğe sahiptirler ve neredeyse kusursuzdurlar, bu da olağanüstü yüksek mukavemetlerinden dolayı bilinen en güçlü malzemeler arasında sayılmasını sağlar. Bu yüksek mukavemetlerine rağmen, bıyıklar aşırı pahalı oldukları için takviye malzemesi olarak yaygın olarak kullanılmazlar. Bunlara ilaveten bıyıkları matris malzemesine dahil etmek zordur ve çoğu zaman pratik değildir. Grafit, silisyum karbür, silisyum nitrür ve alüminyum oksit, bıyık malzemeleri olarak kullanılmaktadır (Callister ve Rethwisch, 2018). Fiberler, parçacık ve bıyıklara nazaran oldukça uzun bir eksene sahiptir. Genellikle dairesel kesitlidirler ve normalde imalat işlemi sırasında çekme yoluyla elde edilirler. Çekme işlemi, molekülleri yönlendirir. Böylece fiberler üzerindeki gerilim yükleri, moleküler zincirlerin birbirine dolanmasından ziyade zincirleri kendilerine daha fazla çeker (Sheikh-Ahmad, 2009; Campbell, 2010). Bu da fiberlerin diğer yönler göre uzunluk yönünde daha yüksek mukavemet ve sertlik sergilemesine neden olur. Çoğu malzeme fiberli formda diğer formlardan daha güçlü ve daha serttir. Bunun nedeni, büyük hacimli fiber malzemeye göre küçük hacimli fiber malzemenin daha az ve daha küçük kusurlara sahip olmasıdır. Fiberler, yaygın olarak daha yumuşak bir matrisin güçlendirilmesi için kullanılır (Sheikh-Ahmad, 2009). İnce teller ise nispeten büyük çaplara sahiptirler. Tipik malzemeleri arasında çelik, molibden ve tungsten bulunur. Otomobil lastiklerinde, yüksek basınca dayanıklı hortumlarda ve filament sargılı roket kasalarında ince teller takviye elemanı olarak kullanılırlar (Callister ve Rethwisch, 2018). Kompozitlerde kullanılan çeşitli takviyeler ve özellikleri Tablo 2.2’de sınıflandırılarak verilmiştir.

Fiber takviye malzemelerinin bir seramik matrisli kompozitteki (SMK’deki) ana görevi kompoziti mümkün olan en yüksek nihai sıcaklıkta kullanımını kolaylaştırmak, üstün kırılma tokluğu sunmak ve erken kırılma özelliğini azaltmaktır. MMK’daki görevi sünekliğini azaltarak kompozitin nihai kullanım sıcaklığını sürdürmektir. Polimer matrisli kompozitte (PMK’da) ise matris malzemesinin mukavemetini ve sertliğini

arttırarak ortaya çıkan parça tasarım gereksinimlerini karşılayabilir veya mevcut bir parçayı eşit güç, sertlik ve daha düşük ağırlıkta kullanıma sunmaktır (Wallenberger, 2001). PMK’larda kullanılan fiber takviyeleri ve özellikleri ile SMK ve MMK da kullanılan fiber takviyeleri ve özellikleri sırasıyla Tablo 2.3 ve Tablo 2.4’te verilmiştir.

Tablo 2.2. Çeşitli fiber takviye malzemelerinin özellikleri (Callister ve Rethwisch, 2018)

<i>Malzeme</i>	<i>Özgül Ağırlık</i>	<i>Çekme Mukavemeti GPa (10⁶ psi)</i>	<i>Özgül Mukavemet GPa</i>	<i>Elastik Modülü GPa (10⁶ psi)</i>	<i>Özgül Modül GPa</i>
Bıyıklar					
Grafit	2,2	20 (3)	9,1	700 (100)	318
Silisyum Nitrür	3,2	5-7 (0,75-1,0)	1,56-2,2	350-380 (50-55)	109-118
Alüminyum Oksit	4,0	10-20 (1-3)	2,5-5,0	700-1500 (100-220)	150
Silisyum Karbür	3,2	20 (3)	6,25	480 (70)	150
Fiberler					
Alüminyum Oksit	3,95	1,38 (0,2)	0,35	379 (55)	96
Aramid (Kevlar 49)	1,44	3,6-4,1 (0,525-0,600)	2,5-2,85	131 (19)	91
Karbon	1,78-2,15	1,5-4,8 (0,22-0,70)	0,70-2,70	228-724 (32-100)	106-407
E-Cam	2,58	3,45 (0,5)	1,34	72,5 (10,5)	28,1
Boron	2,57	3,6 (0,52)	1,40	400 (60)	156
Silisyum Karbür	3,0	3,9 (0,57)	1,30	400 (60)	133
UHMWPE (Spektrum 900)	0,97	2,6 (0,38)	2,68	117 (17)	121
Metalik Teller					
Yüksek Mukavemetli Çelik	7,9	2,39 (0,35)	0,30	210 (30)	26,6
Molibden	10,2	2,2 (0,32)	0,22	324 (47)	31,8
Tungsten	19,3	2,89 (0,42)	0,15	407 (59)	21,1

Tablo 2.3. PMK’lar için yüksek performanslı takviye fiberler ve özellikleri (Wallenberger, 2001)

<i>Ticari İsmi</i>	<i>Genel İsim</i>	<i>Bileşen</i>	<i>Yoğunluk g/cm³</i>	<i>Elastik Modülü GPa</i>	<i>Çekme Dayanımı MPa</i>	<i>Spesifik Modülü Mm</i>	<i>Spesifik Dayanım Mm</i>	<i>Kopma Uzunluğu %</i>	<i>Termal Genleşme Katsayısı 10⁻⁶/K</i>	<i>Fiber Çapı µm</i>
Doğal Fiberler										
-----	Kenaf	%63 selilöz	1,52	90	1000	6,0	0,067	2	-----	-----
Oksit Cam Fiberler										
-----	E-Cam	Borosilikat	2,54	76-79	3100-3800	3,1-3,2	0,124-0,153	4,8	5	5-10
-----	S-Cam	Mg/Al silikat	2,48	88-91	4400	3,6-3,7	0,181	5,7	2,9	5-10
Astro-quartz	Quartz	Silika %90,999	2,15	69	3400	3,3	0,161	5	0,5	9
Aramid Fiberler										
Technora T-200	Düşük Modül	Poli p fenilen tereftalamit	1,39	70	3000	5,1	0,220	4,4	-----	12
Twaron	Ara Modül		1,45	121	3100	8,5	0,218	2	-3,5	12
Kevlar 149	Yüksek Modül		1,47	179	3500	12,4	0,243	2	-2	12

Tablo 2.4. SMK ve MMK'lar için yüksek performanslı takviye fiberler ve özellikleri (Wallenberger, 2001)

Ticari İsmi	Genel İsim	Bileşen	Yoğunluk g/cm ³	Elastik Modülü GPa	Çekme Dayanımı MPa	Spesifik Modülü Mm	Spesifik Dayanım Mm	Kopma Uzunluğu %	Termal Genleşme Katsayısı 10 ⁻⁶ /K	Fiber Çapı µm
Metal Fiberler										
Brunsmet	-----	Ostenitik Çelik	7,90	197	1450	2,54	0,0187	-----	8,5	12
Karbon ve Grafit Fiberler										
Panex	Standart Modül	Karbon	1,74	228	3600	13,40	0,211	1,50	-----	8
Torayca T1000	Yüksek Mukavemet	Karbon	1,82	294	7100	16,50	0,398	2,40	-----	7
Thornel K-110X	Ultra Yüksek Modül	Karbon	2,18	964	3100	45,20	0,145	0,30	-1,5	10
Oksit Seramik Fiberler										
Nextel 610	-----	>%99 alümina	3,88	373	2900	9,80	0,076	0,80	7,9	14
Nextel 720	-----	%85 alümina	3,40	260	2100	7,80	0,063	0,81	6,0	12
Saphikon	-----	α safir	3,96	470	3500	12,10	0,090	2,00	9,0	125
Oksit olmayan Seramik Fiberler										
Tyranno LM	-----	%9,8 O ve %1 Zr	2,48	192	3300	7,90	0,136	2,20	3,5	11
-----	SCS-6	SiC ve C	3,00	390	4000	13,30	0,136	-----	4,6	140
Hi-Nicalon-S	-----	%99,8 SiC ve %0,2 O	3,10	420	2600	13,80	0,086	0,70	3,5	12

Tablo 2.2 ve Tablo 2.4'te farklı takviye elemanlarının özellikleri verilse de kompozitlerin mekanik özellikleri, fiberlerin hacim oranlarına, oryantasyonlarına, matris ve takviye özelliklerine, matrisin/takviyenin arayüzey bağlanmasının doğasına ve farklı tabakaların tabakalar arası bağlanmasına bağlıdır. Stresin matristen fibere uygun bir şekilde aktarılması için iyi bir arayüzey bağı gereklidir. Fiber ile matris arayüzey bağı, kompozitlerin mekanik özelliklerini belirlemede oldukça önemli bir yere sahiptir. Arayüzdeki zayıf bağlanma veya süreksizlik, onu bir gerilim yoğunlaşma bölgesi haline getirir ve yüklemenin erken aşamasında arayüzde ayrılmaya/deformasyona neden olur (Veerakumar ve ark., 2021).

2.4. Kompozit Malzemelerde Kullanılan Matrisler

Kompozitlerde kullanılan matris fazı metal, polimer veya seramik olabilir. Ancak en yaygın kullanılan matris malzemeleri metaller ve polimerlerdir. Çünkü seramik matrisler yüksek erime sıcaklığı gerektirir ve gevreklerdir (Callister ve Rethwisch, 2018).

Fiber takviyeli kompozitler için matris fazı çeşitli işlevlere hizmet eder. Bunlardan birincisi, fiberlerin birbirine bağlanmasını ve dışarıdan gelen gerilmelerin

fiberlere dağıtılmasını sağlamaktır. Kompozite uygulanan yükün küçük bir bölümü matris fazı tarafından sürdürülür. Matrisin ikinci görevi, fiberlerin mekanik aşınmasını önlemek veya çevre ile kimyasal reaksiyonların bir sonucu olarak yüzey hasarından korunmasını sağlamaktır. Bu tür etkileşimler, düşük çekme gerilimi seviyelerinde arızaya yol açabilir ve çatlaklar oluşturarak yüzey kusurlarını ortaya çıkarabilir. Matrisin son görevi ise yumuşaklığı ve plastisitesi sayesinde, kırılgan çatlakların elyaftan elyafa yayılmasını önler. Başka bir deyişle, matris fazı, çatlak ilerlemesine karşı bir bariyer görevi görür (Callister ve Rethwisch, 2018).

Fiber ve matris arasındaki arayüzey bağ kuvvetlerinin yüksek olması, fiber kopmasını en aza indirir ve mekanik özelliklerin artmasına katkı sağlar. Bu yüzden yüksek arayüzey bağı, fiber ile matris kombinasyonunda arzu edilen önemli bir husustur. Çünkü kompozit malzemenin mukavemet özellikleri büyük ölçüde bu bağın büyüklüğü ile doğrudan ilişkili olup matristen fiberlere stres aktarımının optimum olmasına katkı sağlar (Callister ve Rethwisch, 2018).

3. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİTLER

Polimer matrisli kompozitler (PMK'lar), matris malzemesi olarak polimer reçine ve takviye elemanı olarak liflerden oluşan malzemelerdir. Bu malzemeler, oda sıcaklığı özellikleri, üretim kolaylığı ve maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda en çok kullanılan ve kullanım alanı bulan kompozitlerdir. PMK'ların çeşitli sınıflandırmaları ve uygulamaları vardır. PMK'larda polimer reçine olarak termoplastik ve termosetler tercih edilebilir. En çok tercih edilen polimer reçineler epoksi, vinilester ve polyesterdir. PMK'larda kullanılan en yaygın takviye elemanları ise aramid, karbon ve cam fiberlerdir (Callister ve Rethwisch, 2018).

Kenaf, sisal, kenevir ve jüt gibi doğal fiber takviyeler çevre bilincinin gelişmesiyle son zamanlarda polimer matris malzemelerine fiber takviyesi olarak girmiştir. Ancak bu fiberlerin mekanik, termal gibi özellikleri aramid ve karbon gibi sentetik fiberlerin özelliklerinden daha düşüktür. Ancak ekonomik ve cam fibere alternatif olmaları sayesinde genellikle polimer matris malzemesine ilave edilen bu fiberler otomotiv sektöründe ve bazı basit uygulamalarda kullanılmaktadır (Wallenberger, 2001).

3.1. Polimer Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Reçineler

Çevremiz polimer malzemelerle doludur. İlk bakışta, çoğu polimer arasında fark görülmemektedir. Ancak farklı amaçlar için farklı polimer matris malzemeleri tercih edilmektedir. Örneğin, plastik kahve fincanları polistirenden (PS'den), elektrikli süpürge darbeye dayanıklı akrilonitril bütadien stirenden (ABS'den) ve su şişesi ise inert polietilenden (PE'den) yapılmıştır. Bu bağlamda polimer malzemeler kullanılacak alana uygun şekilde seçilmesi gerekmektedir (Nijssen, 2015).

Fiber malzemeleri polimer malzemelerle karıştırarak yüksek mukavemet ve sertlik özelliklerinden kısmen ödün vermek mantıklı görünmeyebilir. Aslında çoğu üretim tekniği, kompozite mümkün olduğu kadar az polimer eklemeye dayanmaktadır. Fiber takviye elemanına polimer matris malzemesi ilave edilmesinin en önemli ve en belirgin nedeni, polimer matris malzemesinin bir yapıştırıcı görevi görmesi ve fiber takviye elemanlarının birbirine bağlamasıdır. Polimerin daha az belirgin, ancak çok önemli işlevi ise fiber takviye elemanlarının birlikte daha verimli bir şekilde çalışabilmesini sağlamasıdır. Çünkü polimer matris malzemesi yükleri bir fiberden diğerine kesme gerilmeleri yoluyla iletmektedir. Ayrıca polimer matris malzemesi,

kompozitin dış etkenlere (nem, kimyasallar ve ultraviyole ışık vb.) karşı duyarlılığını belirler. Bu yüzden, kompozitlerde çeşitli polimerler kullanılmaktadır (Nijssen, 2015).

Polimer matrisli kompozitlerde, termosetler ve termoplastikler olmak üzere iki tip matris malzemesi söz konusudur. Bir termoset matris malzemesi, kompozit üretimi esnasında mek peroksit ve kobalt gibi sertleştirici ve hızlandırıcı kimyasallarla reaksiyona giren ve sertleşen düşük viskoziteli bir reçinedir. Bu reçineler, işlem sırasında sertleştiği için ısıtılarak yeniden işlenemez. Termoplastik matris malzemeleri ise erime sıcaklığının üzerinde ısıtılarak işlenen yüksek viskoziteli bir reçinedir. Bu reçineler ise erime sıcaklığının üzerinde yeniden ısıtılabilir ve tekrar tekrar işleme tabi tutulabilir (Campbell, 2010).

3.1.1. Termoplastikler

Termoplastikler, ısıtıldığında eriyen, şekillendirilebilen ve soğutulduğunda katı şeklini geri kazanan polimerlerdir. En yaygın kullanılan takviyesiz polimerler termoplastiklerdir. Termoplastikler, moleküler anlamda uzun dolaşmış zincirlerden meydana gelir. Isıtıldığında moleküler hareketler yoluyla bir miktar hareket özgürlüğü kazanır (Nijssen, 2015). Bu tür malzemelere ABS, PE, PS, polietereterketon (PEEK), polifenilen sülfür (PPS) ve polieterimid (PEI) örnek verilebilir (Callister ve Rethwisch, 2018).

Termoplastikler viskoziteleri (sıvı halde yüksek viskozite, moleküler duruma bağlı olarak) nedeniyle genellikle bir elyaf takviyesinde kullanılması uygun değildir. Bunun nedeni fiberleri yeterince ıslatamamasıdır, dolayısıyla bu tür matris malzemeleri ile iyi bir kompozit oluşturulmasından söz etmek mümkün olmayabilir. Bunu mümkün hale getirmek için yüksek basınçlar ve sıcaklıklar gereklidir. Yaygın olarak kullanılan yöntem, takviye fazı ve erimiş polimerin basınçlı kalıplama yöntemi ile üretilmesidir (Nijssen, 2015).

3.1.2. Termosetler

Termoset reçineler ısıtıldığında erimezler, fakat sonunda parçalanırlar. Çoğu termoset malzemeler, kürlenmemiş polimerlerin çok düşük viskoziteye sahip olmasını sağlayan nispeten kısa zincirlerden meydana gelir. Kürlleme işlemi ile kimyasal reaksiyon

başlatılır ve kısa zincirlerin bağ ve üç boyutlu çapraz bağlı ağ oluşumu sağlanır. Bu süreçte üretim yöntemine bağlı olarak sıcaklık ve basınç düzenlenebilir (Nijssen, 2015).

FTP kompozitlerde kullanılan en yaygın polimerler malzemeler; polyester, vinilester ve epoksidir. **Polyesterler**, kısmen düşük fiyatları nedeniyle yat yapımında, otomobil endüstrisinde, tanklarda, borularda ve yapay taşlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Polyesterler sıvı halde bulunurlar. Polyesterin kalıp içerisinde sertleşmesi, oda sıcaklığında çok yavaştır. Uygun bir kürlenme işlemi için kürlenmemiş polyestere peroksit gibi bir katalizör eklenir. Katalizör eklenmesinin nedeni kimyasal reaksiyonu hızlandırmaktır. Polyester malzemelerin bazıları suya karşı hassastır. Orto polyester yerine izoftalik asit polyester kullanılıyorsa, hareketli yüzme havuzu zeminleri üretilebilir. **Vinilesterler**, polyester reçinelerin sunabileceğinden daha yüksek bir kimyasal direncin gerekli olduğu uygulamalarda tercih edilir. Vinilester reçineler, neme karşı hassasiyeti daha azdır. Bu yüzden suya maruz kalan polyester yapıların üzerine koruyucu kaplama olarak uygulanabilir. Vinilesterlerin dezavantajı, içerdiği aromatik eter bileşikler nedeniyle sararabilmeleridir. Koruyucu bir kaplama olarak bir vinilester tabakası kullanmak akıllıca olur, ancak estetik açıdan bazen bunun üzerine başka bir tabaka ile kaplama yapılabilir (Nijssen, 2015). **Epoksiler**, polyesterler ve vinilesterlerden daha pahalıdır. Vakum enjeksiyon teknolojilerinin yükselişi ile pazar payları artmıştır. Epoksi reçineler genellikle epiklorohidrinin bisfenol 'A' ile reaksiyona sokulmasıyla üretilir. Uçucu monomerik bileşen içermediklerinden dolayı polyester ve vinilester reçinelerinden oldukça farklıdırlar. Epiklorohidrin ve bisfenol 'A' oranları değiştirilerek farklı reçineler oluşturulur. Epiklorohidrin oranının azalmasıyla reçinenin moleküler ağırlığı artmaktadır. Bu şekilde üretilen reçineler, dağılımı viskozite/erime noktası özelliklerini yöneten farklı moleküler ağırlık türlerinin karışımlarından oluşur. Yüksek viskozitelerinin bir sonucu olarak, epoksi reçineleri, viskoziteyi oda sıcaklığında laminasyonun mümkün olduğu bir seviyeye düşürmek için sıklıkla yüksek sıcaklıklarda (50-100 °C) işlenir veya inert bir çözücü içinde çözülür. Bununla birlikte, reçine, solventin tamamı buharlaşmadan önce sertleşebileceğinden, düşük sıcaklıkta kürlenene sertleştiricilerin mevcudiyetinde problemlere neden olabilir (Norwood, 1994). Epoksi reçineler, genellikle katalizörler, sertleştiriciler veya aktivatörler olarak adlandırılan bir kürlenme maddesi aracılığıyla kürlenir ve şartlara rağmen ayırım gözetilmeksizin kullanılsa da aralarında farklılıklar vardır. Bazı sertleştirme maddeleri katalitik etki yoluyla çalışır,

diğerleri ise reçine ile reaksiyona girer ve reçine zincirine emilir. Kürleme sırasında epoksi reçineler üç temel reaksiyona girebilir. Bunlar;

1. Epoksi grupları düzenlenir ve kendi aralarında bağlantılar oluşturur.
2. Aromatik ve alifatik hidroksil grupları, epoksi gruplarıyla tepkimeye girer.
3. Kürleme işlemi ile çeşitli radikal gruplar aracılığıyla çapraz bağlanma meydana gelir (Norwood, 1994).

Tablo 3.1’de fiber takviyeli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan polyester, vinilester ve epoksi polimerlerine ait bazı özellikler verilmiştir. Ancak polimerlerin kimyasal bileşimine ve kürleme sırasındaki koşullara bağlı olarak kesin özellikler elde edilmektedir (Nijssen, 2015).

Tablo 3.1. Yaygın kullanılan bazı polimer reçinelerin özellikleri (Nijssen, 2015)

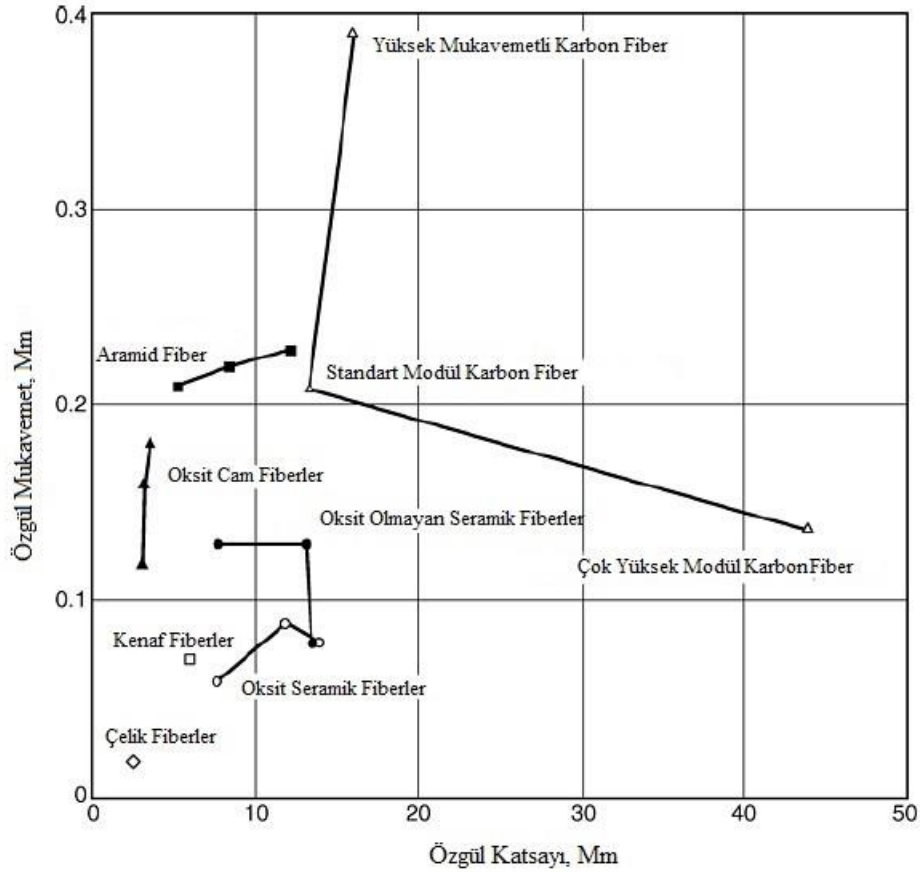
<i>Özellik</i>	<i>Polyester</i>	<i>Vinilester</i>	<i>Epoksi</i>
Sertlik (GPa)	2,4-4,6	3-3,5	3.5
Maksimum Mukavemet (MPa)	40-85	50-80	60-80
Maksimum Gerinim (MPa)	1,2-4,5	5	3-5
Yoğunluk (kg/m ³)	1150-1250	1150-1250	1150-1200
Kürleme büzülmesi (%)	6-8	5-7	<2

3.2. Polimer Matrisli Kompozitlerde Kullanılan Fiberler

Fiber malzemeler, özellikle PMK’ların önemli bir bileşenidir. Takviye edildikleri matris malzemesine yüksek mukavemet ve sertlik kazandırır ve ayrıca düşük dielektrik sabiti, yüksek sıcaklık direnci veya yüksek sürünme direnci gibi özellikler katarlar. Tasarım gereksinimlerine bağlı olarak, yüksek kullanım değerine sahip ticari bir kompozit parça üretmek için uygun bir fiber takviyesi seçmek gerekir. Fiberin maliyeti yüksek görünse bile makul bir maliyetle belirli veya jenerik bir uygulama için istenen özellik değerlerine ulaşılabilir (Wallenberger, 2001). Kompozit içerisindeki fiber takviye elemanları yük taşıyıcı faz görevi görürken, polimer matris malzemesi ise yükleri liflere dağıtarak, onları çevresel hasarlardan korur.

FTP kompozitler, yapısal morfoloji, kimyasal bileşim ve ticari işleve göre kategorize edilebilirler. Kenaf ve jüt gibi doğal fiberler, bitkilerden elde edilir ve sadece PMK’larda kullanılırlar. Oksit cam fiberleri bir oksit karışımından elde edilir ve amorfudur. Temel olarak termoplastik ve termoset PMK’ları güçlendirmek için tercih edilirler. Aramid fiberler kristal polimer liflerdir. Karbon fiberler ise sıralı düzlemsel yapılara

dayanmaktadır. Aramid, cam ve karbon fiberler genellikle PMK'ları güçlendirmede oldukça önemli bir yere sahiptir. Seramik lifler polikristaldır. Oksit seramik (alüminyum oksit) lifleri ve oksit olmayan seramik (silisyum karbür) lifler, SMK ve MMK'ları güçlendirmek için kullanılsalar dahi dolgu maddesi olarak PMK'larda da kullanılmaktadır (Wallenberger, 2001). PMK'larda kullanılan önemli fiberlerin özgül katsayıya karşılık gelen özgül mukavemetleri Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Bazı takviye elemanlarının spesifik özellikleri (Wallenberger, 2001)

3.3. Aramid Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler

Aramid fiberler, 1970'lerin başında tanıtılmıştır. Yüksek mukavemet ve modüle sahip malzemelerdir. Özellikle metal malzemelerden daha üstün olan mukavemet-ağırlık oranları sayesinde arzu edilirler. Birçok aramid fiber türü bulunmaktadır. Ancak en yaygın kullanılan iki tanesinin ticari ismi Kevlar ve Nomex'tir (Callister ve Rethwisch, 2018).

Mekanik olarak, aramid fiberler, diğer polimerik fiber malzemelerinden daha yüksek olan uzunlamasına çekme mukavemetine ve çekme modülüne sahiptir. Bununla

birlikte, basma dayanımları nispeten zayıftırlar. Aramid fiberler özellikle darbe direnci, tokluğu ve yorulmaya karşı direnci ile bilinirler. -200°C ile 200°C sıcaklıkları arasında yüksek mekanik özelliklerini korurlar. Kimyasal olarak bozunmaya karşı hassastırlar. Özellikle güçlü asitler ve bazlar tarafından bozunurlar, ancak diğer çözücüler ve kimyasallarda nispeten inertsırlar (Callister ve Rethwisch, 2018).

Aramid fiberler, polimer matrislerde takviye elemanı olarak kullanılırlar. Yaygın kullanıldığı polimer matrisler malzemeleri epoksiler ve polyesterlerdir. Aramid fiber takviyeli kompozitlerin tipik uygulamaları kurşungeçirmez yelekler ve zırhlar gibi balistik ürünlerdir. Ayrıca lastikler, halatlar, spor malzemeleri, basınçlı kaplar, otomotiv fren ve debriyaj balatalarında da aramid fiberler kullanılmaktadır (Callister ve Rethwisch, 2018).

3.4. Karbon Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler

Karbon fiberler, gelişmiş polimer matrisli kompozitlerde en yaygın olarak kullanılan yüksek performanslı fiber malzemedir. Bunun başlıca nedenleri;

1. Yüksek spesifik modüle ve spesifik dayanıma sahip olmaları,
2. Yüksek sıcaklıklarda yüksek çekme modülünü ve yüksek mukavemetini korumaları,
3. Oda sıcaklığında, nemden, çeşitli çözücülerden, asitlerden ve bazlardan etkilenmemeleri,
4. Çeşitli fiziksel ve mekanik özellikler sergilemeleri,
5. Nispeten ucuz olmalarıdır (Callister ve Rethwisch, 2018).

Karbon fiberlerin elyaf çapları, 4 ile 10 μm arasında değişmektedir. Sürekli ve kırılmış formlarda bulunmaktadır. Karbon takviyeli polimer kompozitler, spor ve eğlence ekipmanlarında, roket motor kasalarında, basınçlı kaplarda, askeri ve ticari uçaklarda ve helikopterlerde yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Callister ve Rethwisch, 2018).

3.5. Cam Fiber Takviyeli Polimer Kompozitler

Cam fiber takviyeli polimer (CFTP) kompozitler, polimer matris malzemesi içerisinde yer alan sürekli veya süreksiz cam fiber takviye elemanlarından oluşur. CFTP kompozitler çok büyük miktarlarda üretilirler.

Fiberlerde en çok çekilen camın bileşimi E-cam olarak anılır. Cam fiberlerin elyaf çapları, 3 ile 20 μm arasında değişmektedir. Cam fiberlerin takviye elemanı olarak popüler olmalarının nedenleri;

1. Erimiş halden kolayca yüksek mukavemetli fiberlere çekilmeleri,
2. Kolayca temin edilebilmeleri,
3. Farklı üretim teknikleri kullanılarak ekonomik olarak üretilibilmeleri,
4. Fiberlerin nispeten güçlü olmaları ve polimer bir matris içine gömüldüğünde, çok yüksek bir özgül mukavemete sahip olmaları,
5. Çeşitli polimerlerle birleştğinde, kompoziti çeşitli aşındırıcı ortamlarda faydalı kılan kimyasal bir eylemsizliğe sahip olmalarıdır (Callister ve Rethwisch, 2018).

Cam fiberlerin yüzey özellikleri oldukça önemlidir. Çok küçük yüzey hataları çekme özelliklerini olumsuz şekilde etkileyebilmektedir. Yüzey hataları, yüzeyin sert bir malzeme ile ovulması veya aşındırılmasıyla ortaya çıkabilir. Ayrıca kısa bir süreliğine normal atmosfere maruz kalan cam fiber yüzeyleri, matrise bağlanmayı engelleyen zayıflamış bir yüzey tabakasına sahip olabilirler. Yeni çekilmiş fiberler, normalde çekme sırasında fiber yüzeyini hasardan ve istenmeyen çevresel etkileşimlerden korumak için ince bir madde tabakası ile kaplanır. Bu tabaka, kompozit imalatından önce çıkarılır. Fiber ile matris arasında kimyasal bir bağ oluşturan bir birleştirme maddesi ile değiştirilir (Callister ve Rethwisch, 2018).

Cam fiber malzemeler, yüksek mukavemet değerine sahip olmalarına rağmen, çok sert değildirler. Uçak ve köprü yapısal elemanları gibi bazı uygulamalarda gerekli olan rijitliği göstermezler. Çoğu cam fiber malzemenin servis sıcaklığı 200°C 'nin altındadır. Yüksek sıcaklıklarda, polimer akmaya veya bozulmaya başlar. Servis sıcaklıkları, fiberler için yüksek saflıkta kaynaşmış silika ve poliimid reçineler gibi yüksek sıcaklıklı polimerler kullanılarak yaklaşık 300°C 'ye kadar uzatılabilir. Her ne kadar bu ve benzeri dezavantajları olsa bile özellikle kolay temin edilmeleri ve ekonomik olmaları nedeniyle otomotiv ve deniz gövdeleri, plastik borular, saklama kapları ve endüstriyel zemin kaplamaları gibi farklı alanlarda kullanılmakta ve kullanıldığı alanlarda ürünün ağırlığını azaltmaktadır (Callister ve Rethwisch, 2018).

Cam, karbon ve aramid fiber takviyeli polimer kompozitlerin boyuna ve enine yönlerdeki bazı özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Boyuna ve enine yönlerde sürekli ve hizalanmış cam, karbon ve aramid fiber takviyeli polimer kompozitlerin özellikleri (Callister ve Rethwisch, 2018)

<i>Özellik</i>	<i>Cam (E-Cam)</i>	<i>Karbon (Yüksek Mukavemetli)</i>	<i>Aramid (Kevlar 49)</i>
<i>Özgül Ağırlık</i>	2,1	1,6	1,4
<i>Çekme Katsayısı</i>			
Boyuna [GPa (10 ⁶ psi)]	45 (6,5)	145 (21)	76 (11)
Enine [GPa (10 ⁶ psi)]	12 (1,8)	10 (1,5)	5,5 (0,8)
<i>Çekme Dayanımı</i>			
Boyuna [MPa (ksi)]	1020 (150)	1240 (180)	1380 (200)
Enine [MPa (ksi)]	40 (5,8)	41 (6)	30 (4,3)
<i>Nihai Çekme Gerilmesi</i>			
Boyuna [MPa (ksi)]	2,3	0,9	1,8
Enine [MPa (ksi)]	0,4	0,4	0,5
Tüm durumlarda, fiber hacim oranı 0,60'tır.			

Tablo 3.2’de verilen özellikler üretim yöntemine, ilave edilen nanopartiküllere ve ortama bağlı olarak değişebilir. Reis ve ark. (2018), CFTP kompozitleri alkali ve asit çözeltilerinin yanı sıra damıtılmış suya daldırmışlardır. CFTP kompozitlerin çözeltide kalma süresi, çözelti sıcaklığı ve çözelti konsantrasyonu gibi değişkenlere bağlı çekme ve darbe dayanımları üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çözeltinin cinsinden ziyade çözeltide kalma süresi ve çözelti sıcaklığının mekanik özellikler üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu, çözeltide kalma süresi ve çözelti sıcaklığı arttıkça darbe dayanımının azaldığını ifade etmişlerdir. Buna ilaveten alkali çözeltinin asit çözeltisinden daha agresif olduğunu ve bu durumun da alkali çözeltide muamele edilmiş CFTP kompozitin darbe dayanımını kısmen olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir. Veerakumar ve ark. (2021), fonksiyonelleştirilmiş ve fonksiyonelleştirilmemiş grafen nanoplateletlerin ve cam fiberlerin, CFTP kompozitlerinin gerilme mukavemeti ve kırılma tokluğu üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Fonksiyonelleştirilmiş fiber üzerine fonksiyonelleştirilmiş grafen nanoplateletlerin eklenmesiyle elde edilen kompozitlerin fonksiyonelleştirilmemiş kompozitlere kıyasla güçlü fiber/matris arayüz bağları sayesinde daha yüksek gerilme mukavemeti ve kırılma tokluğu sağladığını belirtmişlerdir. Dhilipkumar ve Rajesh (2023), CFTP kompozitlerde, birleştirme bağlantılarının kesme ve dinamik davranış üzerine birlikte kürlenme, birlikte yapıştırma (önceden kürlenmiş laminantların kürlenmemiş laminantla birleştirilmesi) ve ikinci yapıştırma (önceden kürlenmiş laminantların yapıştırıcı ile birleştirilmesi) gibi imalat yönteminin ve cam fiber pim hacim

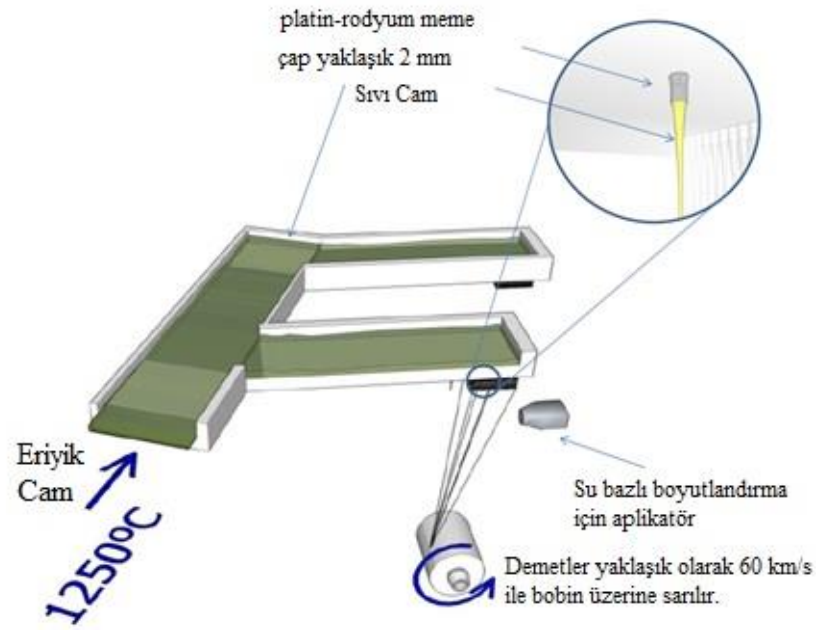
fraksiyonunun etkilerini incelemişlerdir. Kompozit bağlantıların kesme mukavemetinin imalat tekniklerine yoğun bir şekilde bağlı olduğunu ve kesme mukavemetine etkilerinin en yüksek birlikte kurlmeden en düşük ise ikincil yapıştırımdan elde edildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca cam fiber pimlerin birlikte kurlmede %2, birlikte yapıştırımda %0,5 hacim fraksiyonuna bağlı olarak en iyi elde edildiğini, ikincil yapıştırımda ise pim hacim fraksiyonun önemli olduğunu, ancak farklı hacim fraksiyonlarında benzer sonuçların elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Cam fiber pimlerin yapışkan tabakada dışsal bir çatlak köprüleme bölgesi oluşturduğunu ve bu nedenle birleştirilen parçalar arasında arayüzeyi geliştirdiğini belirtmişlerdir.

3.5.1. Cam fiberler ve üretimi

Cam fiberler, en önemli ve en ekonomik endüstriyel malzemeler arasındadır. Sınırsız tedarikte bulunan ham maddelerden kolayca üretilebilirler. Neredeyse tüm cam fiberler, silika (SiO_2) içeren bileşimlerden türetilmektedir. Cam amorf bir malzemedir ve bu nedenle çizildiğinde mikroyapıda tercih edilen bir yönelim geliştirmez. Bu nedenle izotropik olarak kabul edilir. Şeffaflık, kimyasal saldırılara karşı direnç, sertlik ve kararlılık gibi özellikler gösterirler. Düşük maliyeti, yüksek çekme mukavemeti, yüksek darbe direnci ve iyi kimyasal kararlılığı nedeniyle kimya endüstrisi boruları ve denizcilik uygulamaları gibi korozyon direncinin önemli olduğu yerlerde ve yapısal kompozitlerin, baskılı devre kartlarının ve çok çeşitli özel amaçlı ürünlerin imalatında kullanılmaktadır (Wallenberger, 2001; Sheikh-Ahmad, 2009).

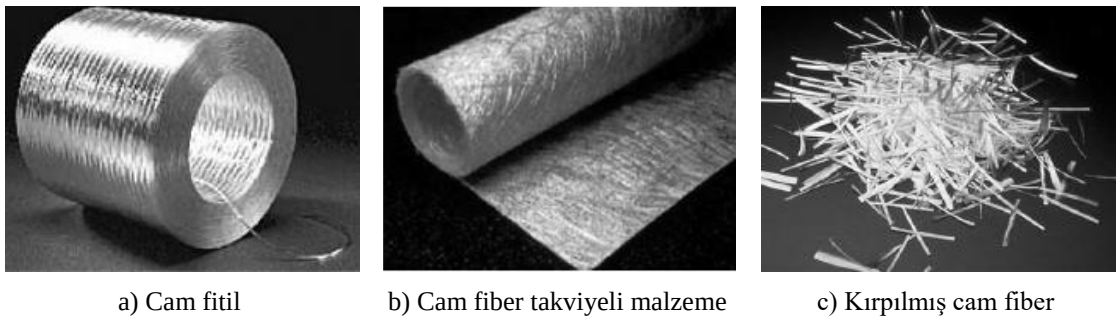
Çok farklı cam fiber türü olmasına rağmen E-cam (elektrik), S-2 cam (yüksek mukavemet) ve kuvars, kompozitlerde en yaygın kullanılanlarıdır. E-cam mükemmel elektriksel özellik ve dayanıklılık sunan genel amaçlı en yaygın kullanılan ve en ucuz olanıdır. 500 ksi (3,5 GPa) çekme mukavemeti ve 10,0 msi (70 GPa) modüle sahiptir. 650 ksi (4,5 GPa) çekme mukavemetine ve 12,6 msi (87 GPa) modüle sahip olan S-cam daha pahalıdır, ancak E-camdan %40 daha güçlüdür ve yüksek sıcaklıklarda mukavemetinin daha büyük bir yüzdesini korur. Kuvars ise oldukça pahalı bir ultra saf silika camdır ve esas olarak zorlu elektrik uygulamalarında kullanılır. Yüksek mukavemetli cam fiberler 1930'larda geliştirilmiş olup, günümüzde dünya çapında yapısal kompozit takviye pazarının büyük bir çoğunluğunu temsil etmektedir (Sheikh-Ahmad, 2009; Campbell, 2010).

Cam fiber oluşumunda, erimiş cam, filamanlar oluşturmak için tabanında her biri 0,793 ile 3,175 mm çapında çok sayıda (200 ile 8000) delik içeren elektrikle ısıtılan bir platin-rodyum alaşımlı burç veya püskürtme memesinden akar veya ön ocaktan ekstrüde edilir. Hala oldukça viskoz olmasına rağmen, elde edilen fiberler sabit hızla istenilen boyuta getirmek ve amorf bir yapı elde etmek için su veya hava spreyi ile soğutulur ve katılaştırılır (Şekil 3.2). Tipik olarak fiber çapları 3 ile 20 μm arasında değişmektedir. Bireysel filamentler, mekanik sarıcılar tarafından tüplere veya şekillendirici paketlere sarılan çok filamentli şeritler halinde birleştirilir (Wallenberger, 2001).



Şekil 3.2. Cam fiber üretimi (Nijssen, 2015)

Fiberlerin yüzeylerini korumak ve polimer matrise bağlanmalarını güçlendirmek için fiberlere koruyucu bir kaplama veya boyut uygulanır. Fiberler, lif adı verilen paralelleştirilmiş bir düzenekte toplanır (Sheikh-Ahmad, 2009). Farklı formlarda üretilmiş cam fiberler Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Farklı formlarda üretilen cam fiberler (Campbell, 2010)

4. FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİTLERDE İŞLEME YÖNTEMLERİ

4.1. Kompozit Malzemeler İçin Geleneksel Olmayan İşleme Yöntemleri

Yüksek performanslı kompozitlere olan talep arttıkça, modern gelişmiş kompozit yapılara daha güçlü, daha sert ve daha mukavemetli takviye malzemeleri ilave edilmektedir. Bu durum, kompozitlerin ikincil işlenmesini giderek daha zor hale getirmektedir. Kompozitlerin geleneksel olarak işlenmesi, düşük termal iletkenlik, ısıl hassasiyet ve yüksek aşındırıcılığa ilaveten heterojen ve anizotropik özellikler nedeniyle problemlidir. Elmas kesici takımlarla bu malzemeler işlense bile problemlerin üstesinden gelinmeyebilir. Bu nedenle, iş parçasındaki mekanik ve termal hasarları, ısı oluşumunu ve takım aşınmasını azaltmak için çalışma koşullarını, takım malzemesi ve geometrisini optimize etmek gerekmektedir. Ayrıca geleneksel olmayan işleme yöntemleri de işlenmesi zor kompozitlerde geçerli ve ekonomik yöntem olabilir. Geleneksel olmayan işleme yöntemleri arasında su jeti, aşındırıcı su jeti, aşındırıcı süspansiyon jeti, lazer ve lazer destekli işleme, ultrasonik işleme ve elektro erozyonla işleme bulunur. Bu geniş proses yelpazesi arasında literatürde sadece aşındırıcı su jeti, lazer ve elektro erozyonla işleme FTP kompozitlerin işlenmesinde büyük ilgi görmüştür (Sheikh-Ahmad, 2009).

Geleneksel olmayan işleme, geleneksel işlemeye göre belli başlı avantajlar sunmaktadır. Bunlar arasında ince panellerin aşındırıcı su jeti ile işlenmesi durumunda olduğu gibi yüksek üretim hızları, daha fazla esneklik ve karmaşık konturlar ve şekiller üretme yeteneği bulunmaktadır. Ayrıca, bu işlemler geleneksel işlemler anlamında herhangi bir kesici alet gerektirmez. Lazer kesim ve elektro erozyonla işleme, kesme kuvveti oluşturmaz ve bu nedenle malzemede mekanik bozulmalar ve hasarlar meydana gelmez veya meydana gelen hasar minimumdur. Aramid FTP'ler gibi bazı kompozit malzemeler için lazer ışını ile geleneksel olmayan işleme, temiz kesim kenarları üretmek için en etkili yöntem olabilir. Ancak geleneksel olmayan işlemenin de sınırlamaları bulunmaktadır. İş parçasına temas eden su jeti basıncı deformasyona neden olur. Ayrıca jet basıncındaki değişiklikler kesim kerfinde dalgalanmalara neden olabilir. Lazer kesim ve elektro erozyonla işlemede, malzeme kaldırma için öncelikle ısıyı kullanır. Isı, kesilen malzemenin mikroyapısında ve özelliklerinde istenmeyen değişikliklere neden olabilir. Bunlara ilaveten geleneksel olmayan işleme süreçleri nispeten yenidir ve bunların FTP'lere uygulanmasına ilişkin bilgi birikimi geliştirilme aşamasındadır (Sheikh-Ahmad, 2009).

4.1.1. Aşındırıcı su jeti ile işleme yöntemi

Yüksek hızlı su jetleri 1970'lerin başından beri oluklu mukavva, kâğıt, kumaş, köpük, kauçuk, ahşap ve granit gibi çeşitli malzemelerin kesilmesinde kullanılmaktadır. İlk olarak 1980'lerin sonlarında tanıtılan bu teknoloji, daha sert ve daha egzotik malzemelerin makul hızlarda verimli bir şekilde işlenmesini sağlar. Günümüzde aşındırıcı su jetleri ile seramikler, metal alaşımları ve kompozitler gibi çeşitli mühendislik malzemeleri kesilmektedir. Diğer geleneksel ve geleneksel olmayan işleme süreçlerine göre tercih edilmesini sağlayan birçok belirgin avantajı vardır. Önemli bir ısı hasarı veya bozulma olmadan hemen hemen her malzemeyi kesebilir. Kesme kuvvetleri oldukça küçüktür ve kesici takım kullanılmasını gerektirmez. CNC takım tezgâhı kapasitesi ve özelliklerine bağlı olarak, iki boyutlu konturlar ve hatta karmaşık üç boyutlu şekiller kesilebilir. Ayrıca çevre dostu malzeme kaldırma işlemlerinden biri olarak bilinir. Çünkü geleneksel işlemeye kıyasla kesme sıvısı gerektirmez ve duman veya zararlı atık üretmez. Kullanılan su ve aşındırıcılar geri dönüştürülebileceği gibi doğal olarak ta atılabilir. Bununla birlikte, aşındırıcı su jeti ile kesmenin bazı sınırlamaları vardır. İlk yatırım ve işletme maliyeti yüksektir. Yüksek hızlarda hareket eden su jeti, elektrikli deşarj işleme ve lazer kesim gibi diğer geleneksel olmayan işleme süreçlerinden daha yüksek gürültü çıkarır. Modern bir üretim süreci olan bu işleme, tam potansiyelinden yararlanılabilmesi için henüz yeterince geliştirilmemiştir (Sheikh-Ahmad, 2009).

Aşındırıcı su jeti ile işleme, partikül darbe erozyonu ile gerçekleşir. Yüksek hızlı su jetinin momentum enerjisi ile hızlandırılan aşındırıcı parçacıklar iş parçasının yüzeyine çarpar ve ardından mikro kesme, sürme deformasyonu ve mikro kırılma gibi mekanizmalardan bir veya daha fazlası ile malzemeyi yüzeyden uzaklaştırır. Ancak çarpan parçacığın şekli, çarpma açısı ve hedef malzemenin özellikleri uzaklaştırılan malzeme miktarını etkiler. Mikro kesme ve deformasyon, sünek malzemeler ve sık çarpma açıları ile ilişkilidir. Mikro kırılma veya mikro çatlama, parçacıkların geniş açılarla hedef malzemesine çarpmasıyla meydana gelir. Çarpan parçacıklar kerften aşağıya doğru inerken enerji kaybeder. Bu yüzden kesimin derinliklerinde malzeme kaldırma daha az verimli olur ve oluşan kerf incilir. Bu durum kerfin üst bölgesinde yüzey pürüzlülüğü ve alt bölgede dalgalanmaya sebebiyet verir. Kerf koniğine etkileyen işlem parametreleri;

1. Hidrolik basınç,
2. Aşındırıcı akış hızı,

3. Aşındırıcı parçacık boyutu,
4. Uzaklık mesafesi veya odaklanma,
5. Eğim açısı,
6. Hareket hızıdır (Sheikh-Ahmad, 2009; Dahiya ve ark., 2022).

Yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olan en önemli parametre aşındırıcı parçacık boyutudur. Bunu hidrolik basınç ve ardından hareket hızı takip eder. Dalgalanma üzerinde etkili olan en önemli parametre öncelikle mesafe ve ardından hızdır. Kerf koniği ise hidrolik basınç, aşındırıcı parçacık boyutu ve hareket hızının birleşiminden etkilenir. Artan aşındırıcı partikül boyutu, azalan hidrolik basınç ve artan hareket hızı, kerf koniğini artırır. Bunlar aşındırıcı parçacıkların kinetik enerjisini ve dolayısıyla kesme verimlerini azaltır. Aşındırıcı su jeti ile kesiminin optimize edilmesi için minimum kerf dalgalanmasına ve konikliğine karşılık gelen kesme koşullarının belirlenmesi gereklidir (Sheikh-Ahmad, 2009).

Dahiya ve ark. (2022), kompozitlerin su jeti ile işlenmesi üzerine bir derleme çalışması yapmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda;

1. Kompozitlerin işlenmesi ve şekillendirilmesinin imalat mühendisleri için her zaman zorlu görev olduğunu, fiber oryantasyonu, heterojen ve anizotropik yapı, üstün mekanik özellikler, yüksek kesme sıcaklığı, matris çatlaması, yüksek kesme kuvveti ve aşırı takım aşınması nedeniyle kompozit malzemelerde konvansiyonel işleme ile yüzeye zarar vermeden delik açma ve delmenin çok zor olduğunu,
2. Su jeti ile kompozitlerin işlenmesinin endüstrilerde kullanılan en ekonomik, uygun ve pratik işleme süreci olduğunu,
3. Hibrit kompozitlerin yaklaşık %29'unun, karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin yaklaşık %27'sinin, CFTP kompozitlerin yaklaşık %19'unun, metal matrisli kompozitlerin yaklaşık %18'inin ve seramik matrisli kompozitlerin ise yaklaşık %7'sinin su jeti ile işlendiğini,
4. Su jeti üzerine yapılan araştırma çalışmaların yaklaşık %40'ının yüzey pürüzlülüğü ve %35'inin ise kerf geometrisi ile ilgili olduğunu, ancak deformasyon, talaş kaldırma oranı ve meme aşınması gibi çalışmaların sırasıyla %15, %9 ve %1 gibi çok az oranlarda yapıldığını,
5. Optimizasyon ve çoklu optimizasyon tekniklerini içeren az sayıda çalışmanın olduğunu ve bu bağlamda deformasyon, fiber çekmesi ve meme aşınması gibi

hataların süreç parametrelerini optimize ederek arıza mekanizmasını ele alacak daha fazla su jeti ile ilgili çalışmanın yapılması gerektiğini,

6. Su jeti ile yapılan işlemlerde, kullanılmış suyun geri dönüşümü, bertarafı ve kullanımdan sonra talaşların ve aşındırıcı parçacıkların geri kazanılması gibi konuların özellikle ele alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

4.1.2. Lazer ile işleme yöntemi

FTP kompozitlerin lazer ile işlenmesi, geleneksel işleme süreçlerine göre birçok avantaj sunar. Lazerle işlemede, takım ve iş parçası arasında temas olmaz ve dolayısıyla kesme kuvveti, takım aşınması ve mekanik yükleme nedeniyle parçada bozulma meydana gelmez. Lazer işleme termal bir işlem olup, iş malzemesinin mekanik özelliğinden ve sertliğinden etkilenmez. Bu yüzden farklı ve zıt mekanik özelliklere sahip heterojen malzemelerin kesilmesi için uygun bir işleme yöntemidir (Sheikh-Ahmad, 2009).

Lazerle kesmenin avantajları arasında karmaşık profilli şekilleri kolaylıkla kesmek, yüksek işleme hızı ve ince çentik genişliği gelirken, dezavantajları arasında ısı tesiri altındaki bölgenin oluşumu nedeniyle malzemenin mukavemetinde azalma, kerf koniği oluşumu ve artan iş parçası malzeme kalınlığına bağlı kesme veriminde düşüş gelir. Optimum kesme performansı için proses parametrelerinin doğru seçimi ile bu dezavantajlarda görülen problemlerin çoğu etkin bir şekilde azaltılır. Ancak lazerle işlenen kompozit malzemelerde karşılaşılan önemli bir sorun kimyasal bozulmanın meydana gelmesidir. Grafit/epoksi, aramid/epoksi ve cam/epoksinin lazerle kesilmesi esnasında çevreye yayılan dumanın fiber malzeme tozları, yüksek konsantrasyonlarda CO, CO₂ ve düşük moleküler organik bileşikler içerdiği kütle spektrometresi ve gaz kromatografisi analizleriyle ortaya çıkartılmıştır. Ayrıca, aramid/epoksinin lazerle kesilmesi esnasında büyük miktarda hidrojen siyanür açığa çıktığı ve bunun da önemli bir sağlık riski oluşturabileceği belirtilmiştir (Sheikh-Ahmad, 2009).

Termal işleme yöntemi olan lazer işlemede, malzeme eritilerek veya buharlaştırılarak ortamdaki uzaklaştırılır. Lazer ışını iş parçası yüzeyine çarptığında, ısının bir kısmı malzeme tarafından emilir ve ardından malzemenin daha derinlerine iletilir. Isının emme ve daha derine iletilme performansı malzemenin termal özelliklerine ve etkileşim süresine bağlı olarak değişir. Polimer matris malzemelerinin ve fiber takviye elemanlarının termal özelliklerindeki kontrast nedeniyle, her bir FTP kompozit

malzemenin lazer kesime tepkisi karakteristik olarak farklılık gösterir. Örneğin karbon fiberler yüksek buharlaşma sıcaklığı ve yüksek termal iletkenliğe sahip olduklarından lazerle işlenmesi oldukça zordur. Öte yandan, aramid FTP'ler, termal özelliklerinin polimer matrisinkilere benzerliği nedeniyle lazerle kesimi kolaydır. Lazer ile işlemede kesme üzerinde etkili olan parametreler arasında;

1. Güç,
2. Hareket hızı,
3. Yardımcı gaz basıncı,
4. İş parçası malzeme bileşimi ve mimarisi gelir (Sheikh-Ahmad, 2009).

Lazer ışını gücündeki artış ve hareket hızındaki azalmayla hem kerf koniği hem de ısı tesiri altındaki bölge boyutu artar. Ayrıca lazerle fiberleri dik kesilen malzemelerdeki ısı tesiri altındaki bölgenin boyutu, fiberleri paralel kesilen malzemelerden daha büyüktür. Bu, karbon fiberlerin mükemmel termal iletkenliği nedeniyle özellikle karbon FTP'ler için geçerlidir. Yardımcı gaz basıncındaki bir artış, genellikle yardımcı gazın verimli bir şekilde soğutulmasının bir sonucu olarak ısı tesiri altındaki bölge boyutunun azalmasına yardımcı olur (Sheikh-Ahmad, 2009).

Solati ve ark. (2019a), lazerle delinmiş CFTP kompozitlerin hem yüzey kalitesi hem de mekanik özelliklerini içeren bir çalışma yapmışlardır. Lazer gücü, kesme hızı ve gaz basıncının ısıdan etkilenen bölge ve dayanma mukavemeti üzerine etkilerini hem deneysel olarak araştırmışlar hem de yapay sinir ağları ile modellemişlerdir. Artan lazer gücü ile ısıdan etkilenen bölge boyutunun arttığını, artan kesme hızı ve gaz basıncı ile azaldığını belirtmişlerdir. Isıdan etkilenen bölge büyüklüğü arttıkça kompozitin dayanma mukavemetinin de azaldığını vurgulamışlardır. Solati ve ark. (2019b), lazerle delinmiş CFTP kompozitlerde minimum yüzey pürüzlülüğü, ısıdan etkilenen bölge, koniklik açısı ve maksimum çekme dayanımı elde etmek için lazer yoğunluğu, kesme hızı ve gaz basıncı gibi farklı lazer delme/kesme parametrelerini tam faktöriyel deney tasarımı ile incelemişlerdir. Ayrıca maksimum çekme dayanımı, minimum ısıdan etkilenen bölge, yüzey pürüzlülüğü ve koniklik açısını elde etmek için sonuçlar üzerinde çoklu yanıt optimizasyonu uygulamışlardır. Yüzey pürüzlülüğü ve ısıdan etkilenen bölge üzerinde en etkili parametrelerin lazer yoğunluğu ve kesme hızı olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca koniklik açısının doğrudan lazer yoğunluğu tarafından kontrol edilebileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca yüksek lazer yoğunluğu ve düşük kesme hızının yüzey pürüzlülüğü, ısıdan etkilenen bölge ve çekme dayanımı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip

olduğunu, yüksek lazer yoğunluğunun koniklik açısının azaltılmasında etkili olduğunu vurgulamışlar ve artan gaz basıncının ısıdan etkilenen bölgenin hafif artmasına sebebiyet verdiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, optimum lazer delme parametrelerinin, geleneksel delme ile karşılaştırıldığında, delinmiş CFTP kompozitlerin daha yüksek çekme dayanımı ve daha düşük yüzey pürüzlülüğü sağlayabileceğini ifade etmişlerdir.

4.1.3. Elektro erozyon ile işleme yöntemi

Lazer ile işlemede olduğu gibi elektro erozyon ile işleme de bir termal işlemdir. Bu işlem, elektriksel olarak iletken malzemelerin kıvılcım deşarjı kullanılarak termal bir şekilde aşındırılması prensibine dayanır. İş parçasındaki mikro boyuttaki parçalar, kıvılcım deşarjı sayesinde lokal olarak ısınarak erir veya buharlaşır. Kıvılcım erozyonunun meydana geleceği alanı elektrotun şekli ile belirlenir. Elektro erozyon ile işlemede malzemenin sertliği önemli değildir. Önemli olan iş parçasının elektriksel iletkenliğinin $100 \Omega \text{ cm}$ 'den düşük olmasıdır. Bu yüzden metal malzemelere ilaveten karbon FTP'ler, belirli karbürlerin intermetalik bileşikler, boridler, nitrürler, bunları içeren kompozitler ve diğer iletken olmayan seramikler elektro erozyon ile işlenebilir. Bu işleme yönteminin avantajları arasında ince yüzey kalitesi, yüksek kesme doğruluğu, oldukça kırılğan iş parçalarının hasar görmeden işlenebilme yeteneği yer alır. Öte yandan, elektro erozyon ile işleme yalnızca çok düşük talaş kaldırma oranları sağlar ve diğer termal işlemlere benzer şekilde, kesim yüzeyinde yeniden döküm katmanı ve ısı tesiri altındaki bölge oluşturur. Elektro erozyon işlemede ortaya çıkan ısı tesiri altındaki bölge, lazer işlemede üretilenden oldukça küçüktür. Elektro erozyon ile işlemeyi etkileyen işlem parametreleri arasında;

1. DC güç kaynağı polaritesi,
2. Akım,
3. Boşluk voltajı,
4. Darbe süresi gelir (Sheikh-Ahmad, 2009).

Boşluk voltajı, akım ve darbe süresi artırılarak elde edilen enerji girişindeki artışla talaş kaldırma oranı arttırılabilir. Ayrıca erimiş malzemenin kerf yüzeyinde katılaşmasından kaynaklı yeniden döküm tabakası oluşur. Darbe akımındaki artışla yeniden döküm tabakasının kalınlığı artar. Elektro erozyon ile işlemede matris ile takviye fiberi arasındaki termal uyumsuzluktan kaynaklı deformasyon oluşur. Özellikle oluşan

deformasyon, fiber uçlarının işlenmiş yüzeye dik olduğu yerlerde daha belirgindir. Darbe akımı ve darbe süresindeki artış, deformasyonu artırır (Sheikh-Ahmad, 2009).

4.2. Kompozit Malzemeler İçin Geleneksel İşleme Yöntemleri

Kompozitleri oluşturan fazlar ve özellikleri işleme süreci üzerinde büyük etkiye sahiptir. Hem sert hem de aşındırıcı fiber takviye fazının yumuşak matris fazı ile birleşmesi sonucu elde edilen kompozitler, anizotropik ve aşındırıcı özelliklere sahip olması nedeniyle işlenmesi karmaşıktır ve kesme koşullarının doğru seçimi zordur. Kesme esnasında kompozitlerde çok az plastik deformasyon oluşur. Kırılma direnci, çeliklerinkinden on ile yüz kat daha düşüktür. İşlenmiş ürünlerin kalitesi, takviyelere, kullanılan matris malzemelerine, takviye malzemeleri ile matris arasındaki bağ kuvvetine, örgü tipine, işleme yöntemlerine, işlem parametrelerine bağlıdır (Tsao, 2012).

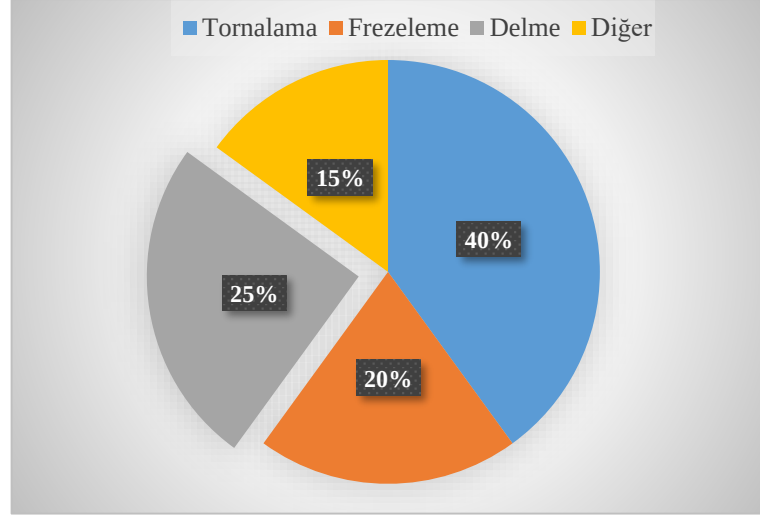
Kompozitlerin ana avantajlarından biri, tasarım gereksinimlerine uygun olarak bir yapıdaki yakın ağ şeklidir. Bu nedenle, yüksek verimlilik ve düşük maliyet elde etmek için kompozitlerin işlenmesi için özel teknikler kullanılmak zorundadır. Mekanik parçaların veya yapıların perçinlemesi ve sabitlenmesi gerektiğinden dolayı delme işlemi kompozitlerin ikincil işlenmesinde en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir. İşleme süresinin %40'ını oluşturur (Tsao, 2012).

Kompozit yüzeyindeki delikler freze ve matkap tezgâhları kullanılarak talaşlı imalat yöntemleri ile açılabilirdiği gibi zımbalar kullanılarak kesme şeklinde de gerçekleştirilebilir. Delme işlemi, parça imalatı ve montaj gibi farklı üretim aşamaları için vazgeçilmezdir. Kötü işlenmiş kalite, zayıf montaj toleransına ve uzun vadeli yapısal performans bozulmasına neden olacaktır.

4.2.1. Kompozit malzemelerde talaş kaldırma yöntemiyle delme

Kompozitler farklı uygulama alanlarında kullanıldığından, üretimlerinden sonra farklı işleme operasyonlarına tabi tutulabilirler. Somun-cıvata ve vida yardımı ile mekanik birleştirme, kalite kontrol sırasında muayenesi ve onarımı daha kolay olan geçici birleştirmeler olduğu için kompozitlerin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür işlemler için delme işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Delme işlemi, iş parçası yüzeyinde yuvarlak delikler oluşturmak veya mevcut delikleri arzu edilen boyutlara getirmek için matkap adı verilen çok dişli kesici takımlarla talaş kaldırma

işlemini içeren bir yöntemidir. Bu işlemde, kesici matkap uçları kendi eksenini etrafında dönerek ve belirli ilerleme hızlarında ilerleyerek kompozit malzeme yüzeyinde delik oluşumunu sağlar (Kannan ve ark., 2021). Delme işlemi farklı takım tezgâhları kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.1’de farklı takım tezgâhlarıyla gerçekleştirilen delme işlemlerinin talaş kaldırma sürelerine oranları verilmiştir.



Şekil 4.1. Delme işlemlerinin talaş kaldırma sürelerine oranı (Tonshoff ve ark., 1994)

Kısa ve derin delik açma işlemleri birbirinden farklı işlemlerdir. Derin delik açma, uzmanlık gerektiren bir yöntemdir ve bu işlemde çapın birçok katı derinliğe sahip deliklerin açılması gerekebilir. Bazen çapın 150 katına kadar derin delikler açılabilir. İşlemin kontrolü ve talaşın boşaltılması delik derinleştikçe zorlaşır. Yüzey ve delik kalitesi, derin delik delme işleminde daha büyük bir öneme sahip iken, daha ekonomik bir işlem için daha yüksek talaş debilerinde çalışmak kısa deliklerde daha önemlidir. Kısa delik delme işlemi ile derin delik delme işlemi arasındaki fark talaş boşaltma, kalite ve talaş debisi ile ilgili parametrelerdir. Delik boyu, delik çapının 10 katından daha büyük olanlar uzun delik, 4–10 katı arasında olanlar normal delik, 3 ve daha düşük katı olanlar ise kısa deliklerdir (Yıldız, 2015).

Delme işleminde etkili olan parametreler;

1. Kesme hızı,
2. İlerleme hızı,
3. İş parçası malzemesi,
4. Takım malzemesi
5. Takım geometrisi,
6. Kesme sıvısı ve benzeridir.

Kesme hızı ve ilerleme hızı delik delme işleminin gerçekleştirilmesinde etkili olan en önemli kesme parametreleridir. Çevresel hızdan yararlanılarak belirlenen kesme hızı, kesici takımın çapı ve takımın dönme devri bilindiği takdirde Denklem 4.1'deki gibi hesaplanabilir.

$$V = (\pi \cdot d \cdot n) / 1000 \quad (4.1)$$

Burada;

V: kesme hızı,

d: kesici takımın çapı,

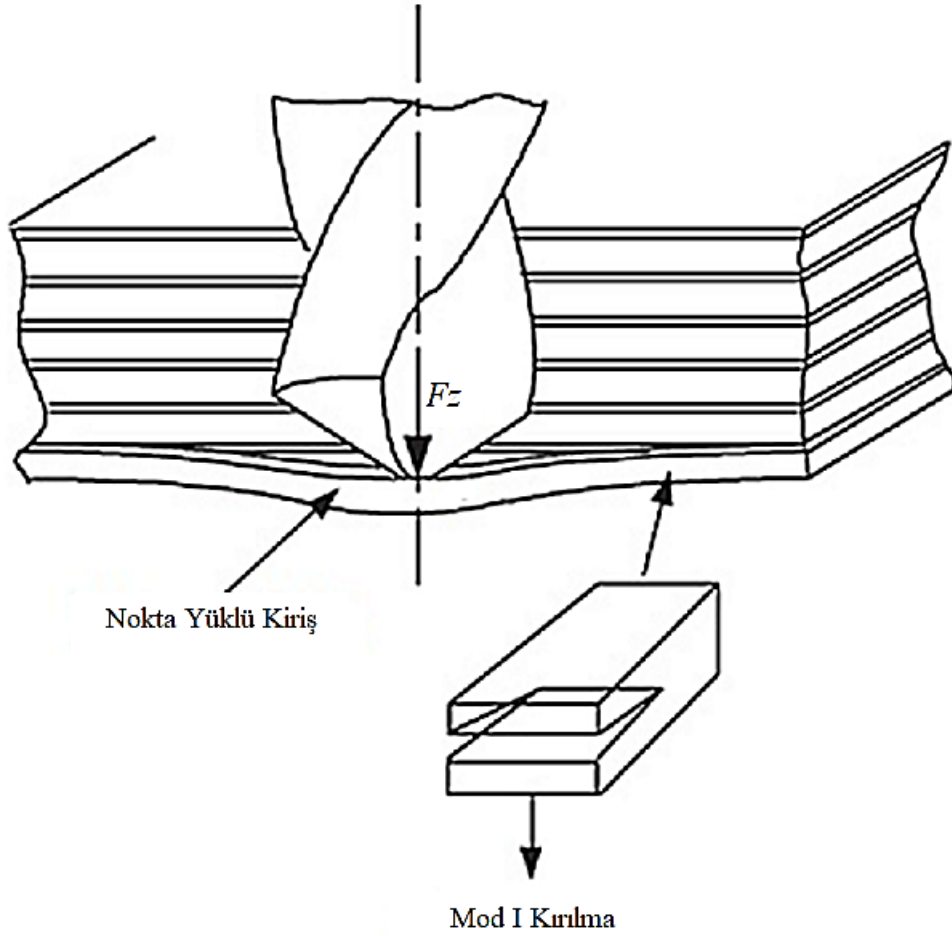
n: dönme devridir.

Birim zamanda alınan yol olarak tanımlanan dakikadaki ilerleme hızı (u), iş parçasının takıma göre veya takımın iş parçasına göre ilerlemesi ve aynı zamanda tezgâhın veya tablanın ilerleme hızı olarak da ifade edilebilir. İlerleme hızını hesaplamak için kullanılan bir büyüklük ifadesi olan devir başına ilerleme hızı (f) takım veya iş parçasının bir devirdeki ilerlemesi olarak ifade edilir ve Denklem 4.2'deki eşitlik ile hesaplanır (Yıldız, 2015).

$$f = u / n \quad (4.2)$$

Kesme hızı ve ilerlemeye ilaveten kesici takımın malzemesi ve geometrisi, kesme koşulları, kesme sıvısının kullanımı ve özellikleri, iş parçası malzemesi gibi pek çok faktör delmeye etki eden parametrelerdir.

Kompozit laminantların delinmesinde, matkap çıkış düzlemine yaklaştıkça, kesilmemiş kalınlık üzerindeki itme kuvvetine bağlı olarak alttaki laminant, deliğin etrafındaki tabakalar arası bağdan ayrılabilir. Bir noktadaki kuvvet yükü, tabakalar arası bağ gücünü aştığı zaman deformasyon meydana gelir. Şekil 4.2'de, tabakalı kompozit laminantların delinmesinde oluşan delme modeli gösterilmiştir (Tsao, 2012).



Şekil 4.2. Kompozit malzemelerde matkapla delmenin şematik gösterimi (Tsao, 2012)

Deformasyon yayılmasında, dX mesafesince matkap hareket ederek plakayı yönlendirir ve tabakalar arası çatlağı ilerletir. Matkap hareketi esnasında itme kuvveti (Fz) de tabakaların ayrılmasında önemli bir etken olduğundan dolayı yapılan işle ilişkilidir. Bu yüzden enerji dengesi eşitliği Denklem 4.3'teki gibi hesaplanır (Tsao, 2012).

$$G_{IC}dA = FzdX - dU \quad (4.3)$$

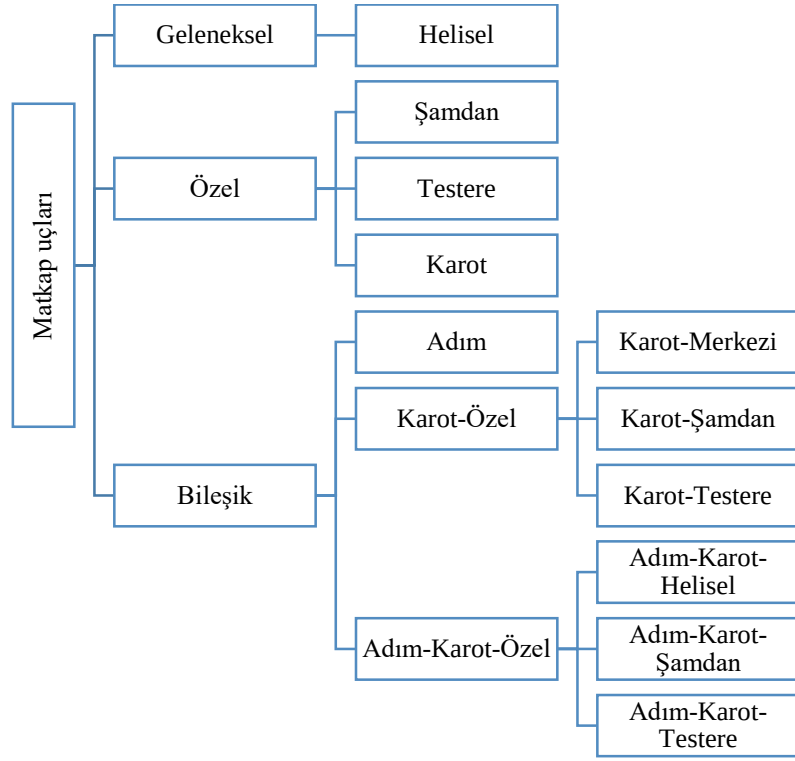
Burada;

dU : sonsuz küçük gerinim enerjisi,

dA : delaminasyon çatlağı alanındaki artış,

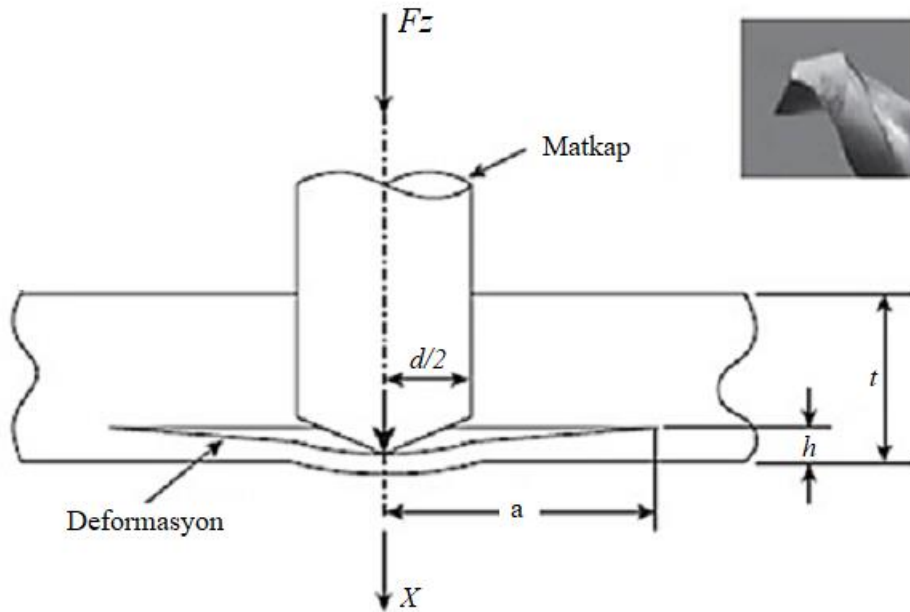
G_{IC} : Mod I'de birim alan başına kritik çatlak yayılma enerjisidir.

Delme işlemi farklı matkaplar kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.3'te, delme işlemlerinde kullanılan matkaplar verilmiştir (Tsao, 2012).



Şekil 4.3. Matkap uçlarının sınıflandırılması (Tsao, 2012)

Helisel matkap; endüstriyel uygulamada delik açmak için en yaygın olarak kullanılmaktadır. Dönen matkabın keski kenarı bu takımda önemli bir rol oynar. Matkap ucunun keski kenarı, delinen kompozitlerde çıkış düzlemine yaklaşırken kesilmemiş kalınlığı (son laminant) merkeze iter. Şekil 4.4'te, helisel matkap ve sebep olduğu deformasyon gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Deformasyon analizi için dairesel plaka modeli (helisel matkap) (Tsao, 2012)

Şekil 4.4'te, F_z : itme kuvveti, X : yer değiştirme, t : malzeme kalınlığı, h : takım altındaki kesilmemiş derinlik ve a deformasyon yarıçapıdır. Şekil 4.4'teki laminantın izotropik davranışı ve saf bükülmesi varsayıldığında, çatlak yayılmasının başlangıcındaki itme kuvveti Denklem 4.4 ve Denklem 4.6 arasında verilen eşitliklerle hesaplanabilir.

$$F_z = \pi \sqrt{32 G_{IC} M} \quad (4.4)$$

$$M = \frac{E h^3}{12(1-\nu^2)} \quad (4.5)$$

$$F_z = \pi \left[\frac{8 G_{IC} E h^3}{3(1-\nu^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.6)$$

Burada;

M : fiber takviyeli kompozitin birim genişliği başına rijitliği,

E : elastik modül,

ν : Poisson oranıdır (Tsao, 2012).

Delme esnasında meydana gelen deformasyonu önlemek için itme kuvvetinin düşük olması lazım. İtme kuvveti, ilerleme hızı ile doğrudan ilişkili olduğundan dolayı itme kuvvetinin düşük elde edilmesi için ilerleme hızının düşük seviyede tutulması gerekmektedir. İtme kuvveti, malzeme özelliklerinin ve kesilmemiş kalınlığın bir fonksiyonu olan değeri aşmamalıdır. Ancak kalın malzemelerin delinmesindeki strateji, başlangıçta pratik olarak izin verilen en hızlı şekilde malzemeyi delmek ve takım çıkışa yaklaştıkça ilerleme hızını kademeli olarak azaltmaktır (Tsao, 2012).

Testere matkaplar; helisel matkaplarla karşılaştırıldığında, testere matkaplar, matkap geometrisi ve üretimi açısından daha karmaşıktır. Testere matkaplar, aslında delme sırasında eşit aralıklı ayrı bir yüklemeye sahiptir. Bu matkaplarla delinen kompozit laminantlarda daha iyi işleme kalitesi elde edilebilir. Bunun temel nedeni, delme için testere matkabının çevresel itme dağılımını kullanmasıdır. Ancak testere matkabının kesici kenarları çok keskin olduğu için kompozitleri delmede hızlı aşınmaya eğilimlidir.

Şamdan matkaplar; bir helezon matkap ve bir testere matkabı olarak kabul edilebilir. Bu matkaplar kompozitlerin delinmesi için yaygın olarak tercih edilirler.

Karot matkaplar; sınırlı kalınlığa sahip içi boş bir taşlama matkabı olan karot matkaplar, diğer döner matkapla karşılaştırıldığında çok daha küçük bir itme kuvveti oluşturur ve çok daha iyi delik kalitesi sağlar. Genel olarak karotlu matkap, inşaat mühendisliği yapılarında, mücevherlerde ve camda olduğu gibi sert, kırılğan malzemeleri delmek için kullanılır (Tsao, 2012).

4.2.2. Kompozit malzemelerde zımbalama yöntemiyle delme

Pratikte, delik açmak için kullanılan ana yöntem delmedir. Parçalanma, deformasyon, kenar ufalanması, fiberde kopma, çatlak oluşumu ve aşırı takım aşınması gibi delme kaynaklı hasarlar yapısal bütünlüğü etkileyebilir. Bu yüzden, kompozit malzemelerin mukavemet özelliklerinden ödün vermeden bağlantı elemanlarının bütünlüğünü sağlamak için kaliteli delikler üretmeye yönelik yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır.

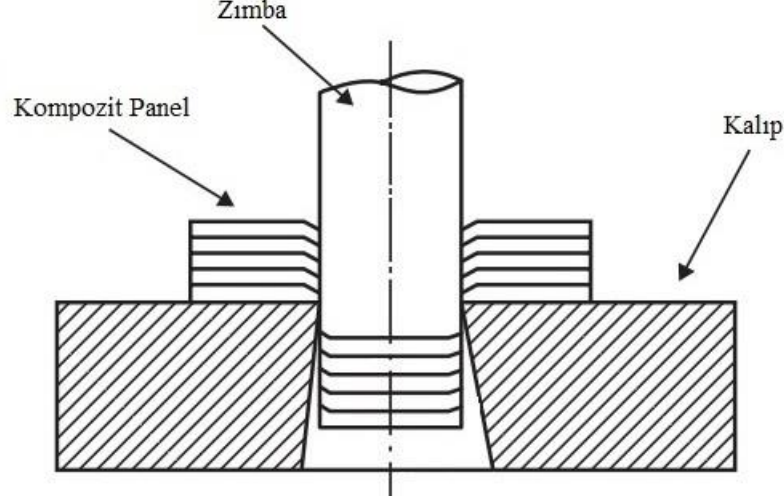
Zımbalama ile delme, özellikle metal üzerinde delik açmak için kullanılan ve zımba ve kalıp (matris) arasında kesme yoluyla gerçekleşen bir geleneksel talaşsız işleme yöntemidir. Zımbalama işlemleri ile sac malzemeler üzerinde karmaşık profiller ve yüksek hassasiyetli delikler açılabilmektedir. Ancak kompozitler konusunda bu teknoloji henüz çok yeni ve bu konuda yayınlanmış sadece birkaç çalışma vardır ve yapılan pratik çalışma miktarı nispeten yetersizdir (A. B. Abdullah ve ark., 2019).

Kompozitlerin zımba ile delinmesi, diğer malzemelerin delinmesinin aynısıdır. Zımbalama, malzemeyi kalıbın kenarına göre kesmeye neden olacak şekilde bastırır. Bu durum matkapla delmeye göre kuvvetlerin daha yüksek oluşmasına neden olur. Bu da yapının bütünlüğünü etkileyerek deformasyonun farklı formlarda oluşmasını tetikler. Ancak kompozit malzemeler kırılğan olduğu için delik kesme mekanizması metal malzemelerinkinden farklıdır. Kompozitlerin zımba ile delinmesini etkileyen çeşitli parametreler vardır. Bunlar:

1. Kesme boşluğu,
2. Takım geometrisi,
3. Hız veya strok hızı,
4. Ham tutucu kuvveti,
5. Malzeme kalınlığı,
6. Boşluk düzeni,
7. Malzeme tipi,
8. Zımba-kalıp hizalaması,
9. Sürtünmedir.

İnce CFTP kompozit laminantlar üzerinde delinmiş deliklere kıyasla, zımbalanmış deliklerin kalitesi (delme faktörü, taşıma gücü) üzerinde proses parametrelerinin (zımba-kalıp boşluğu) etkisinin araştırılması sonucunda; zımba-kalıp

boşluğu azaldığında zımbalama kuvvetinin arttığı, ayrıca zımba-kalıp boşluğu arttırıldığında ise bu kuvvetin azalıp deformasyon faktörünün arttığı tespit edilmiştir. Zımba ile delmenin ana avantajlarından biri, soyulma kenarı oluşturmaması, diğer önemli avantajı ise işlemin daha hızlı olmasıdır. Kompozit panellerde zımbalamanın temel şematik gösterimi Şekil 4.5'te gösterilmiştir (M. S. Abdullah ve ark., 2019).



Şekil 4.5. Kompozit panel için zımbalama işleminin şematik görüntüsü (A. B. Abdullah ve ark., 2019)

Kompozit malzemelerde kalıp boşluğu eşitliği Denklem 4.7'deki gibi hesaplanır.

$$c/t = K\sqrt{S} \quad (4.7)$$

Denklem özellikle metaller için geliştirilmiş olsa da sınırlı kaynaklar nedeniyle kalıp boşluğu bu denkleme göre ayarlanabilmektedir.

Burada;

c : tek taraflı kalıp boşluğu,

t : malzeme kalınlığı,

S : malzeme kesme mukavemeti

K : 0,008–0.01 olan boşluk katsayısıdır.

Kesme mukavemeti, $S = 0,7 \times \text{çekme gerilmesi } (\sigma_c)$ kullanılarak tahmin edilebilmektedir (A. B., Abdullah ve ark., 2019).

Ceritbinmez ve Yapıcı (2021), vakum infüzyon yöntemi ile ağırlıkça %0,1 çok duvarlı karbon nanotüp katkılı ve katkısız CFTP kompozit tabakalar üretmişlerdir. Bu malzemelerin delinmesini geleneksel talaşlı delme işleminden farklı olarak zımbalama ile gerçekleştirmişlerdir. Kompozitlerin zımbalanması için özel tasarlanmış 90°, 30°, 15°, V, C profil zımbalar ve 0,05; 0,01 ve 0,16 mm boşluk değerlerine sahip kalıplar (matrisler)

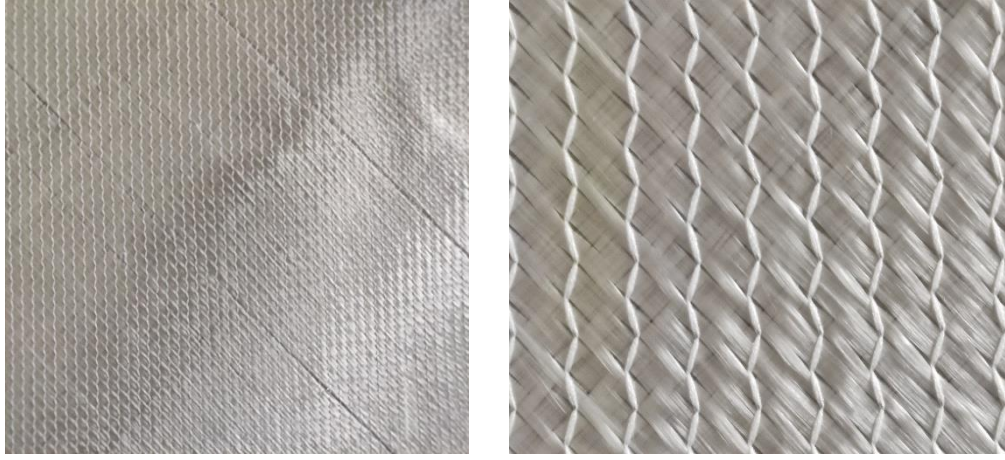
kullanmışlardır. Farklı kesme profillerine sahip zımbalama işlemlerinde kuvvetleri, delik çapını, deformasyonu ve çapağı analiz etmişlerdir. 90° zımba profili ile yaptığı zımbalama deneylerinde en yüksek kuvvet değerlerini elde etmişlerdir, en düşük ise 30° zımba profilinde gözlemlenmiştir. Boşluk açısı arttıkça kuvvetin azaldığını ve deformasyonun arttığını, C profili ile yapılan zımbalamada delik çap sapmasının daha düşük olduğunu, 0,05 mm kalıp boşluğu ile yapılan zımbalamada çapak oluşumunun olmadığını, karbon nanotüp katkılı kompozit malzemelerin kesme yüzeyinin daha temiz ve malzeme mukavemetinin daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Ceritbinmez ve ark. (2022), karbon nanotüp katkılı ve katkısız CFTP kompozit malzemelerin su jeti, lazer kesme, orbital delme ve zımbalama ile delinmesinde, delme yöntemlerinin delik kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Orbital delme yöntemi ile delik giriş ve çıkış boyutlarının eşit ve istenilen boyutta elde edildiğini, parmak frezenin yanal ve yüzey frezelemesi sayesinde kerf oluşumunun önlendiğini ifade etmişlerdir. Orbital delme ve zımbalama yöntemleri ile elde edilen delik halkalarında yüzey sertliğinde değişim gözlemlenmediğini, ancak lazer ışınının ısı etkisiyle lazer kesim ile elde edilen delik halkalarında epoksi sertleşmesi meydana getirdiğini, su jeti yönteminde ise su basıncı ve kinetik enerjinin etkisiyle matris-fiber bütünlüğünün bozulduğunu, deformasyon oluştuğunu, dolayısıyla malzeme kalınlığında bir artış oluştuğunu ve yüzey sertliğinin azaldığını gözlemlenmiştir. Karbon nanotüp katkı maddesinin CFTP kompozitlerin yüzey sertliğini arttırdığını, kesim sonrası ölçümlerde sertliği ve dayanıklılığı koruduğunu belirlemişlerdir. Hiçbir yöntemde parçalanma ve çapaklanma gözlemlenmediğini, ancak lazer kesimde termal etkilerden dolayı deliğin iç kısımlarında fiber karbonlaşmalarının oluştuğunu, ayrıca su jeti ve lazer kesimde delik giriş ve çıkışında V konikliğinin oluştuğunu, zımbalama işleminde ise zımba önce malzemeyi delip ardından malzemeyi kesmeye başladığı için zımba ile kalıp arasında makaslamaların meydana geldiğini ve malzemenin kırılarak delik giriş ve çıkışında Λ konikliğinin oluştuğunu belirtmişlerdir.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Cam Fiber Takviyeli Polimer (CFTP) Kompozit Malzemenin Üretimi

Cam fiber takviyeli polimer (CFTP) kompozit malzemenin üretilmesi için alansal ağırlığı 600 gr/m^2 , dokuma tipi biaxial ve çözgü/atkı açısı $EC \pm 45^\circ$ olan cam fiber tercih edilmiştir. Çözgü/atkı açısı mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahip olsa da CFTP kompozitlerin delme performansları araştırılacağı için çözgü/atkı açısından ziyade fiberin kolay temin edilebilmesi ve düşük maliyetli olması göz önünde bulundurulmuştur. Temin edilen cam fiber kumaşa ait görüntüler Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Ticari olarak temin edilen cam fiber malzeme

CFTP kompozitlerin üretiminde matris malzemesi olarak Polives 701 vinilester reçine, mek peroksit sertleştirici ve kobalt hızlandırıcı kullanılmıştır. Matris malzemesi olarak Polives 701 vinilester reçinenin tercih edilme sebebi, mükemmel kimyasal dayanım ve mekanik özellikler sunması, üstün hidrolitik dayanıma sahip olması ve gıda temasına uygun olmasıdır. Matris malzemesi olarak kullanılan ve Şekil 5.2’de görüntüsü verilen reçine malzemesinin bazı özellikleri Tablo 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.2. Ticari olarak temin edilen vinilester, sertleştirici ve hızlandırıcı

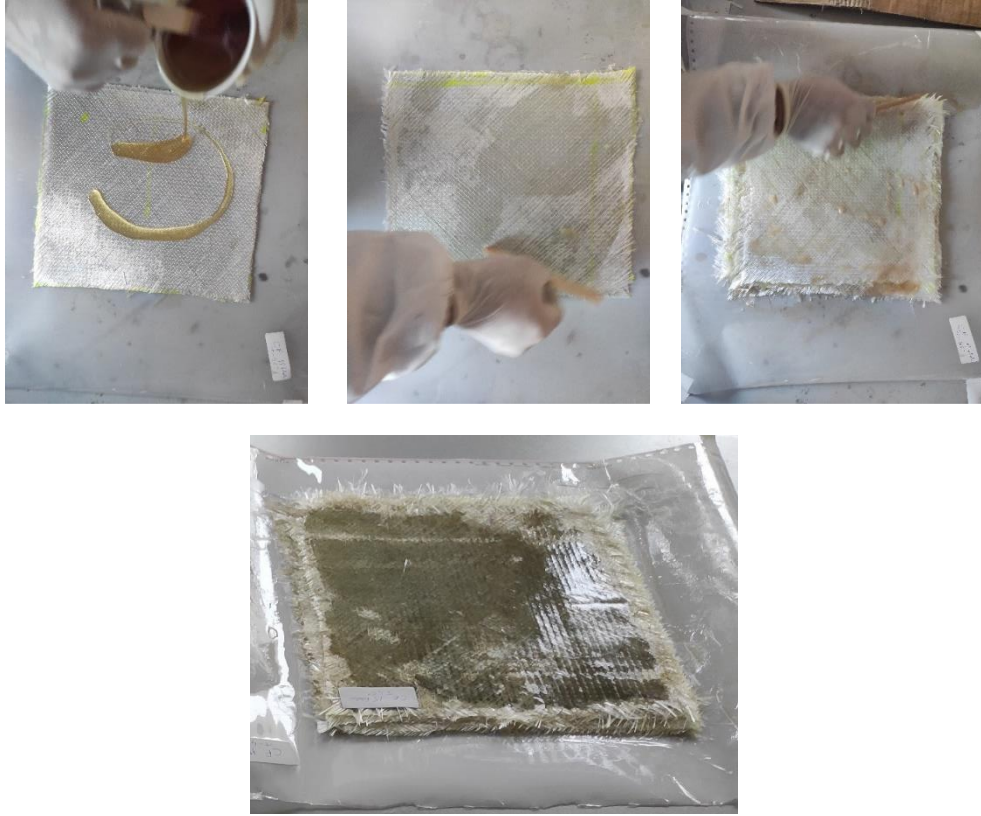
Tablo 5.1. Polives 701 vinilester reçineye ait bazı özellikler

<i>Özellik</i>	<i>Birim</i>	<i>Değer</i>
Yoğunluk	g/cm ³	1,044
Çekme dayanımı	MPa	80
Kopma uzaması	%	5
Eğilme dayanımı	MPa	160
Barcol sertliği	Barcol	35
Hacimsel çekme	%	7,7
Jel süresi	dakika	20-25
Polimer oranı	%	41-43
Viskozite	cps	400-500

CFTP kompozitlerin üretilmesi için ticari olarak temin edilen cam fiber dokuma kumaşlar 300 mm × 300 mm boyutlarında kesilmiştir. Daha sonra ISOLAB Laborgerate GmbH marka hassas terazide matris malzemeleri tartılmış ve ayrı ayrı kaplara konulmuştur. Kaptaki matris malzemesine ağırlıkça %1 sertleştirici ve %0,1 hızlandırıcı eklenerek bir çubuk yardımıyla karıştırılmıştır. Matris malzemesinin hassas terazide tartım görüntü Şekil 5.3'te verilmiştir.

**Şekil 5.3.** Matris malzemesinin hassas terazide tartılması

Hazırlanan matris malzemesi, 300 mm × 300 mm boyutlarında kesilmiş dokuma formu cam fibere el yatırma yöntemiyle ilave edilerek 5 tabakadan oluşan CFTP kompozit malzeme üretilmiştir. Şekil 5.4'te elle yatırma yöntemiyle üretilen CFTP kompozit malzemenin üretim aşamaları verilmiştir.



Şekil 5.4. CFTP kompozitlerin üretim aşamaları

El yatırma yöntemi ile üretilen CFTP kompozitler oda sıcaklığında 24 saat bekletilerek doğal kürlenmesi sağlanmıştır. Ayrıca doğal kürlenmiş CFTP kompozitler Ref-San Marka fırında 75 °C sıcaklıkta 60 dakika bekletilerek üretim süreci tamamlanmıştır (Şekil 5.5).

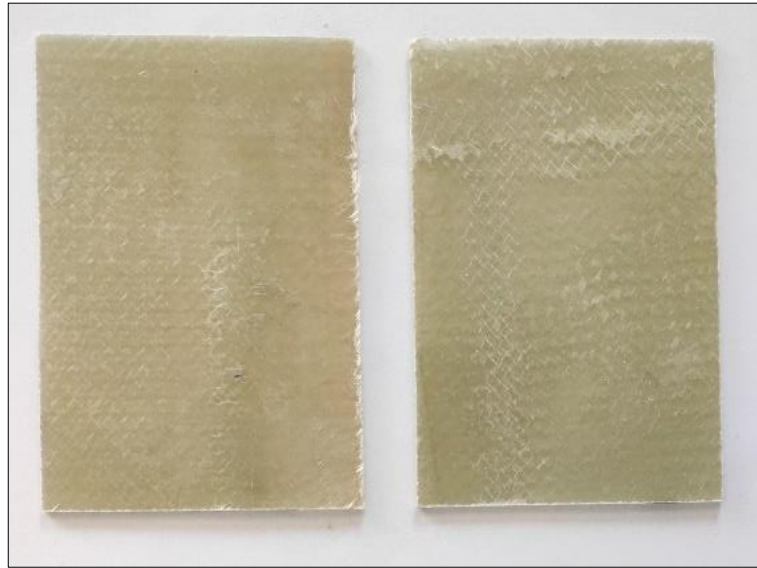


Şekil 5.5. Üretilen kompozit malzemenin fırınlanması

Üretilen CFTP kompozitler, çekme (25 mm × 250 mm), eğilme (10 mm × 250 mm) ve delme (100 mm × 150 mm) numuneleri elde edilecek şekilde uygun ölçülerde kesilmiştir. Kesilen numunelere ait görüntüler Şekil 5.6'da verilmiştir.



a) Çekme ve eğilme numuneleri



b) Delme numuneleri

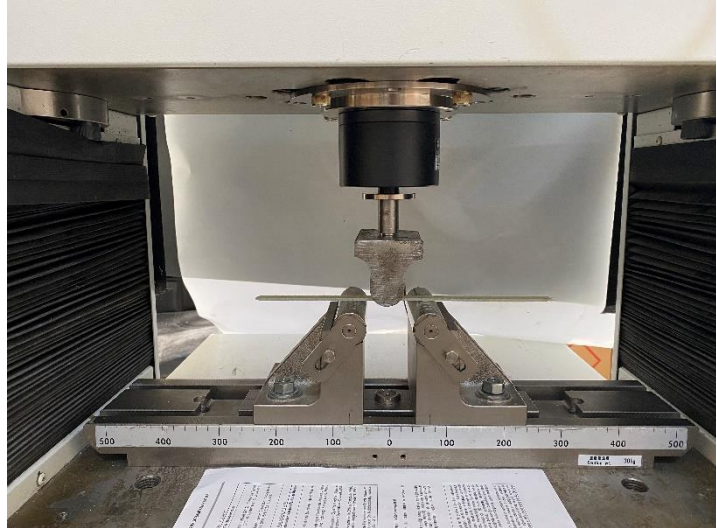
Şekil 5.6. Deneyler için kesilen CFTP kompozit numuneler

5.2. Çekme ve Eğilme Dayanımlarının Belirlenmesi

Üretilen CFTP kompozitlerin çekme ve eğilme dayanımlarının belirlenmesi için Shimadzu marka universal çekme test cihazı kullanılmıştır. Deneyler 1 mm/dak test hızında gerçekleştirilmiş olup çekme deneyi 250 kN, eğilme deneyi ise 5 kN yük hücre kapasitelerinde yapılmıştır. Çekme ve eğilme deney düzeneğine ait görüntüler Şekil 5.7'de verilmiştir.



a) Çekme deney düzeneği



b) Eğilme deney düzeneği

Şekil 5.7. Çekme ve eğilme deney düzeneği

Çekme ve eğilme deneylerinde cihaza bağlı bilgisayar aracılığıyla deney esnasındaki kuvvetler kaydedilmiştir. Çekme gerilmesi için Denklem 5.1 ve Denklem 5.2 ve eğilme mukavemeti için Denklem 5.3'teki eşitlikler kullanılarak çekme gerilmesi ve eğilme mukavemeti grafikleri oluşturulmuştur. Hesaplamaların yapılması ve grafiklerin oluşturulmasında Excell programından faydalanılmıştır.

$$\sigma_{\zeta} = \frac{F_{\zeta}}{A} \quad (5.1)$$

$$\% \text{ uzama} = \frac{l-l_0}{l_0} \quad (5.2)$$

$$\sigma_e = \frac{3 \times F_e \times L}{2 \times b \times t^2} \quad (5.3)$$

Burada;

- σ_{ζ} : Çekme gerilmesi (MPa),
- F_{ζ} : Çekme testinde uygulanan yük (N),
- F_e : Eğilme testinde uygulanan yük (N),
- A : Numunenin kesit alanı (mm²),
- l : Numunenin son boyu (mm),
- l_0 : Numunenin ilk boyu (mm),
- σ_e : Eğilme gerilmesi (MPa),
- L : Destek aralık açıklığı (mm),
- b : Numune genişliği (mm),
- t : Malzeme (numune) kalınlığı (mm)'dir.

5.3. Delme Deneyinde Kullanılan Kesici Takımlar

Delme deneyleri, matkapla ve zımbayla delme olarak gerçekleştirildiği için delme yöntemine bağlı olarak kesici takımlar kullanılmıştır.

Matkapla delme için silindirik saplı 118° uç açısına sahip 8 mm çapındaki HSS-R DIN 338 matkaplar kullanılmıştır. Kullanılan bu matkaplar ticari olarak temin edilmiştir (Şekil 5.8).

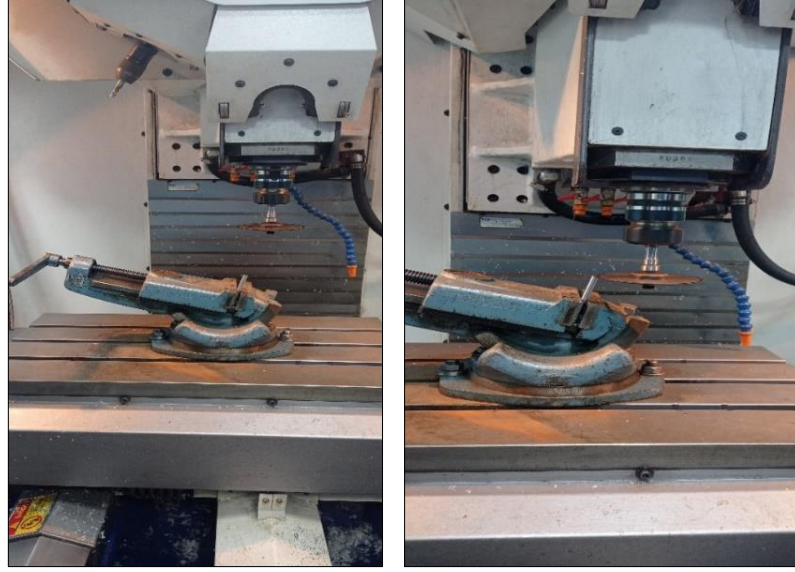


Şekil 5.8. Silindirik saplı HSS-R, DIN 338 matkap ucu

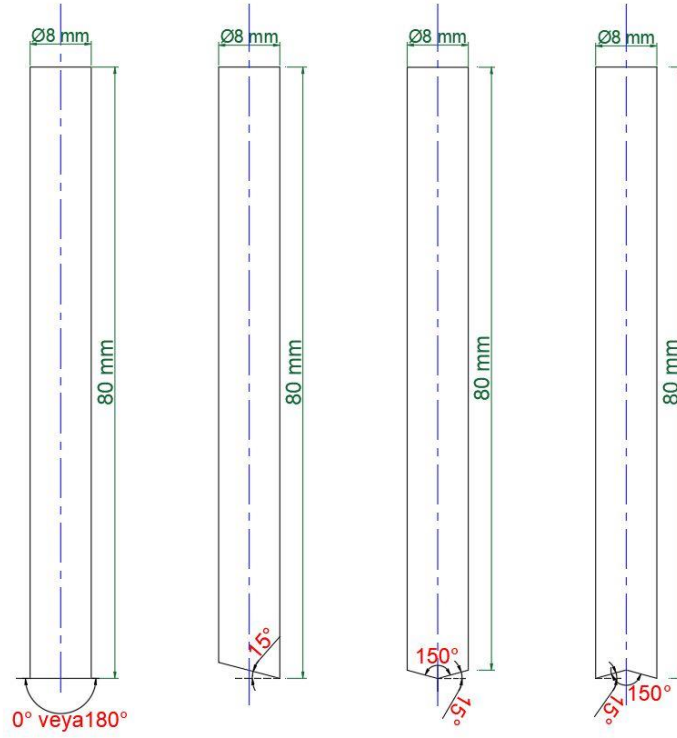
Zımba ile delme için ise 8 mm çapında piston çeliği tedarik edilmiş olup, 80 mm uzunluğunda olacak şekilde dört adet kesilmiştir. Kesme işlemleri torna tezgâhında yapılmıştır. Daha sonra bu zımbalar Tongtai Topper TMV-610A marka CNC freze tezgâhına bağlanarak farklı uç açılarında işlenmiştir. Kullanılan zımbalar ve bu zımbaların imalat aşamaları Şekil 5.9-5.12’de gösterilmiştir.



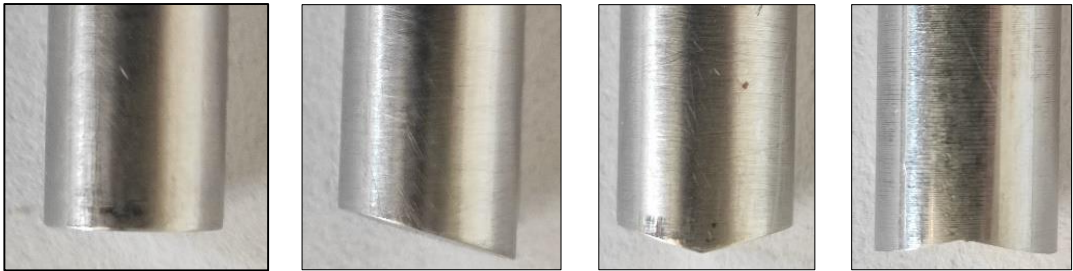
Şekil 5.9. Zımba olarak kullanılacak pistonların torna tezgâhında istenilen ölçüde kesilmesi



Şekil 5.10. CNC freze tezgâhında zımba uçlarının istenilen ölçülere getirilmesi



Şekil 5.11. Deneylerde kullanılan zımbaların şematik gösterimi



a) Düz Zımba

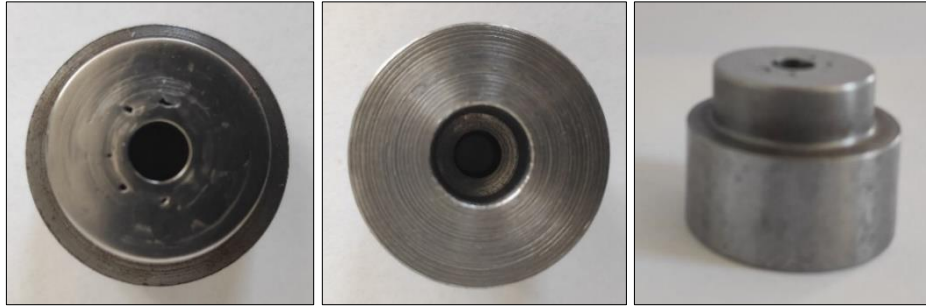
b) 15° \ açılı zımba

c) 15° V açılı zımba

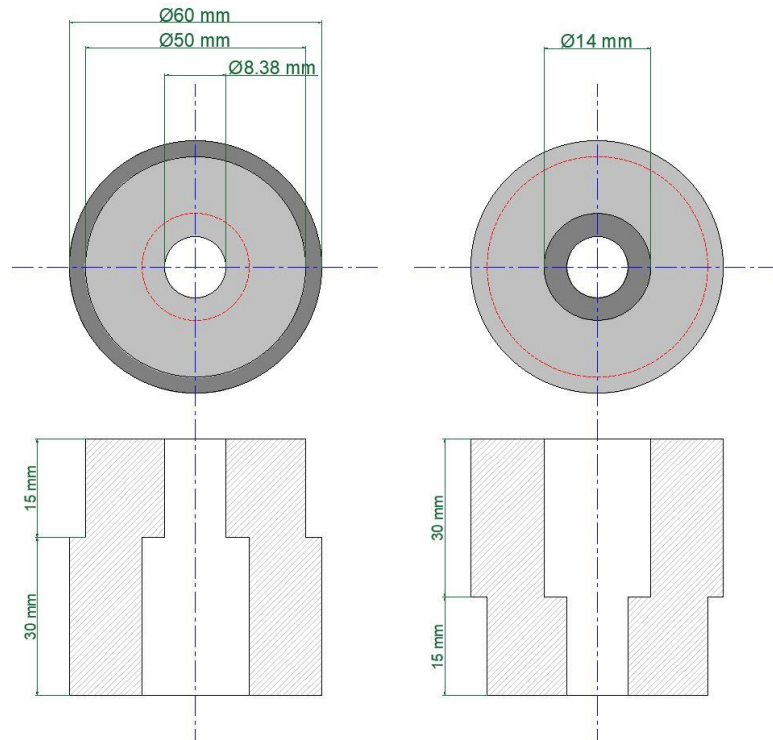
d) 15° ^ açılı zımba

Şekil 5.12. Deneylerde kullanılan zımba cinsleri

Deneylerde kullanılacak zimbaların imalat süreci tamamlandıktan sonra dişi kalıbın üretimine başlanmıştır. Kalıp Ç1020 çeliğinden imal edilmiştir. Ancak Ç1020 çeliğinin merkezine kademeli delik delinmiştir. Kademeli deliğin büyük çaplı kısmına; basma, çekme, titreşim ve aşınma gibi yüklemelere direnç gösteren ve içerisinde %1 oranında karbon ve %1,5 oranında krom elementi içeren DIN 100Cr6 çeliğinden yapılmış 8 mm iç çapına sahip rulman çeliği, bilyeleri dağıtıldıktan sonra kaynak edilerek sabitlenmiştir. Üretilen dişi kalıbın görüntüsü Şekil 5.13'te, şematik gösterimi ise Şekil 5.14'te verilmiştir.



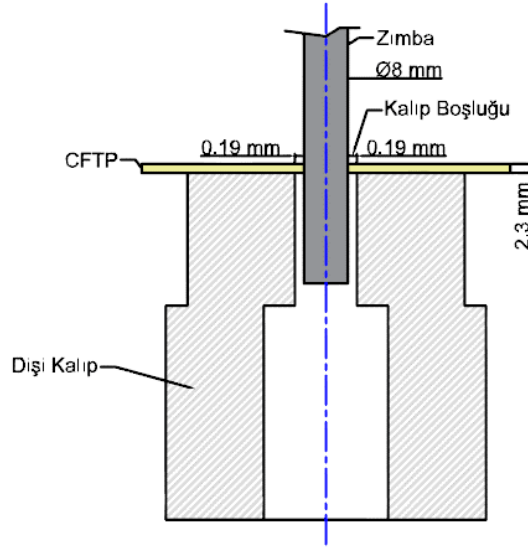
Şekil 5.13. Deneylerde kullanılan dişi kalıp



Şekil 5.14. Deneylerde kullanılan dişi kalıbın şematik gösterimi

Dişi kalıp şematik gösteriminde verilen delik ölçüsü, Denklem 4.7'de verilen formüle göre kalıp boşluğu hesaplanarak oluşturulmuştur. CFTP kompozit malzemenin

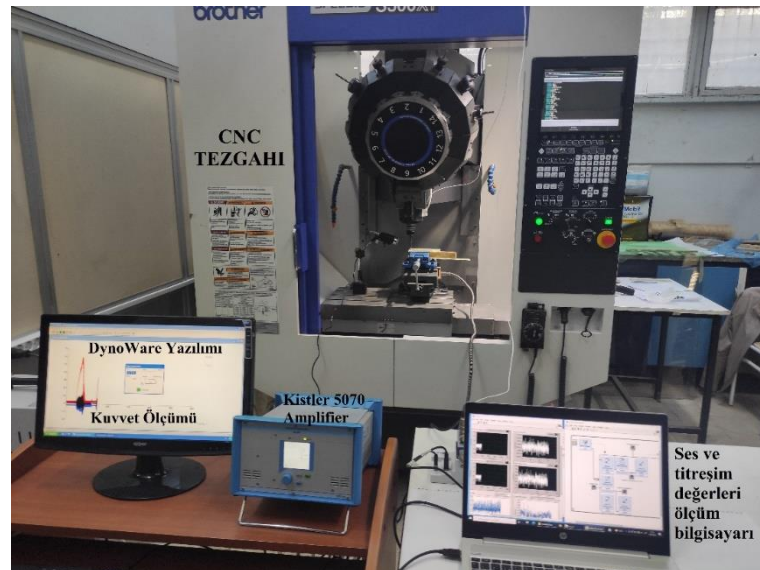
kalınlığı $t=2,3$ mm, çekme dayanımı $\sigma_c=156$ MPa'dır. Kesme mukavemeti $S = 0,7 \times \sigma_c$ kullanılarak tahmin edilmiş olup, tahmin edilen kesme mukavemeti 109,2 MPa'dır. Boşluk katsayısı $K=0,008$ alınıp, değerler Denklem 4.7'de yerine yazıldığında tek taraflı kalıp boşluğu $c=0,19$ mm bulunmuştur. Hazırlanan zımba ile delme düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 5.15'te verilmiştir.



Şekil 5.15. Zımba ile delmenin şematik gösterimi

5.4. Delme İşlemlerinin Gerçekleştirildiği CNC Tezgâhı

Delme deneyleri, Şekil 5.16'da fotoğraf resmi verilen Brother Speedio S500X1 CNC tezgâhında gerçekleştirilmiştir. CNC tezgâhının bilgisayar ile bağlantısı yapılp yönetim yazılımına kesici takım ucunun izleyeceği yol ve kesme parametrelerine ait G kodları girilmiş ve delme deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.16. Delme deneylerinin yapıldığı Brother Speedio S500X1 CNC tezgâhı

5.5. Delme Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

Delme işlemi, CNC tezgâhında hem matkap kullanılarak hem de zımba kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney parametreleri literatür araştırmalarında kullanılan parametreler ve ön deney çalışmaları göz önünde bulundurularak belirlenmiştir.

Matkap ile gerçekleştirilen delme işleminde, kesme hızı ve ilerleme hızı, zımba ile gerçekleştirilen delme işleminde ise zımba cinsi ve ilerleme hızı değiştirilmiştir. Matkap ile delme için belirlenen deney parametreleri Tablo 5.2’de verilmiştir. Matkap ile gerçekleştirilecek delme işleminde her parametreden ikişer adet deney yapılmıştır.

Tablo 5.2. Matkap ile delmede kullanılan deney parametreleri

<i>Deney İşlemi</i>	<i>Dönme Devri (dev/dak)</i>	<i>Kesme Hızı (m/dak)</i>	<i>İlerleme Hızı (mm/dev)</i>
1	250	6,25	0,025
2	500	12,5	0,025
3	1000	25	0,025
4	2000	50	0,025
5	4000	100	0,025
6	8000	200	0,025
7	250	6,25	0,05
8	500	12,5	0,05
9	1000	25	0,05
10	2000	50	0,05
11	4000	100	0,05
12	8000	200	0,05
13	250	6,25	0,1
14	500	12,5	0,1
15	1000	25	0,1
16	2000	50	0,1
17	4000	100	0,1
18	8000	200	0,1
19	250	6,25	0,2
20	500	12,5	0,2
21	1000	25	0,2
22	2000	50	0,2
23	4000	100	0,2
24	8000	200	0,2

Zımba ile gerçekleştirilen delme işleminde dört farklı zımba cinsi kullanılmış ve her zımba için 3 farklı ilerlemede ikişer adet delik delinmiştir. Zımba ile delme için belirlenen deney parametreleri Tablo 5.3’te verilmiştir.

Tablo 5.3. Zımba ile delmede kullanılan deney parametreleri

<i>Deney İşlemi</i>	<i>Zımba Uç Açısı (°)</i>	<i>Zımba Cinsi</i>	<i>İlerleme Hızı (mm/dak)</i>
1	0	Düz	250
2	0	Düz	500
3	0	Düz	1000
4	75	15° \ Açılı	250
5	75	15° \ Açılı	500
6	75	15° \ Açılı	1000
7	150	15° ∨ Açılı	250
8	150	15° ∨ Açılı	500
9	150	15° ∨ Açılı	1000
10	-150	15° ∧ Açılı	250
11	-150	15° ∧ Açılı	500
12	-150	15° ∧ Açılı	1000

5.6. Deneylerde Meydana Gelen Kesme Kuvvetlerinin Ölçümü

Yapılan delme deneyleri esnasındaki kesme kuvvetlerinin belirlenmesi için x, y ve z düzlemlerinden kuvvet ölçebilen bir dinamometre kullanılmıştır. Dinamometre Kistler marka olup 9257B modeldir. Kistler marka dinamometreden gelen sinyaller, yine Kistler marka bir amplifier ile bilgisayara aktarılmıştır. Bilgisayara aktarılan veriler Kistler DynoWare 2825D-03 yazılımı ile ölçülmüş ve grafik haline getirilmiştir. Delme deneylerinde kullanılan dinamometre ve amplifierin görüntüsü Şekil 5.17’de gösterilmiştir.



a) Dinamometre



b) Amplifier

Şekil 5.17. Deneylerde kullanılan Kistler marka dinamometre ve amplifier

5.7. Deneylerde Meydana Gelen Ses ve Titreşimlerin Ölçülmesi

Yapılan delme deneylerinde, ses ve titreşimin ölçülebilmesi için 4 kanallı, ses ve titreşim giriş modülüne sahip National Instruments NI 9234 ivmeölçer kullanılmıştır. Ölçümler, cihaza ait yazılım kullanılarak bilgisayara aktarılmış ve raporlanmıştır. Daha sonra elde edilen veriler grafik haline getirilmiştir. Şekil 5.18’de National Instruments NI 9234 ivmeölçer modülü gösterilmiştir.



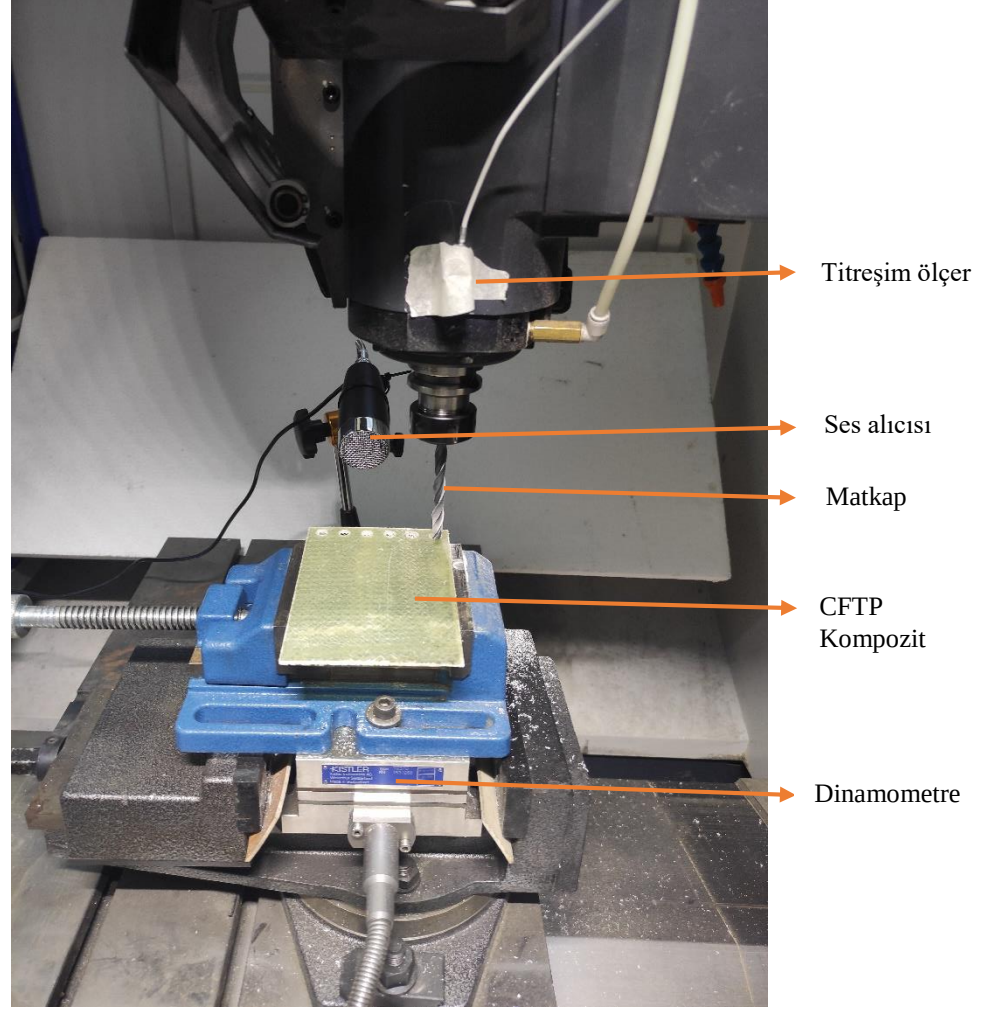
Şekil 5.18. Deneylerde kullanılan NI 9234 ivmeölçer modülü

5.8. Delme Sonucu Oluşan Deformasyonun Ölçülmesi

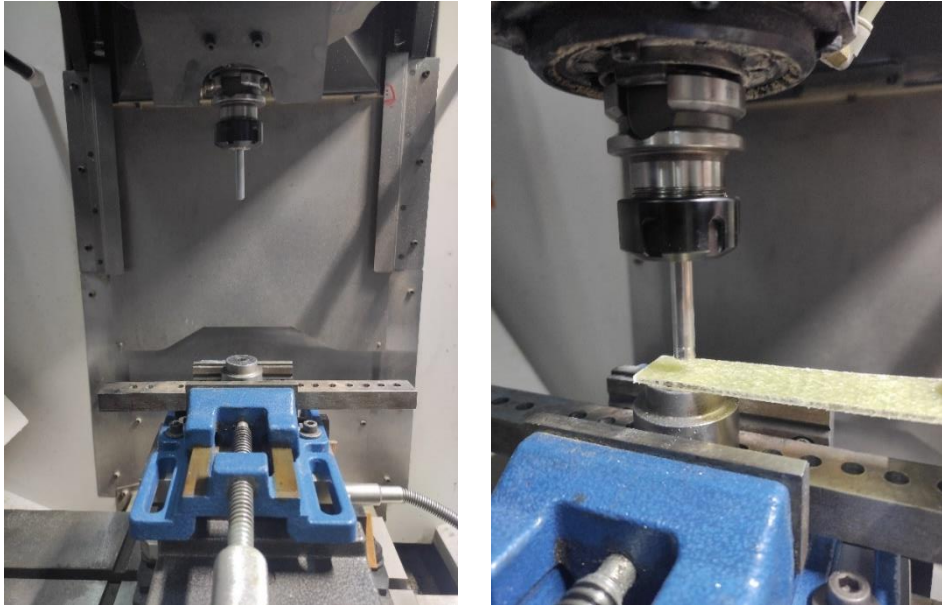
CFTP kompozitlerin matkap ve zımba ile yapılan delme işlemlerinden sonra, delik giriş ve çıkışlarında meydana gelen deformasyon görüntülerini almak için optik bir mikroskop kullanılmıştır (Şekil 5.19). Optik mikroskop görüntüleri bilgisayara aktarılarak deformasyon bölgesindeki maksimum çap belirlenmiştir (Şekil 5.20). Deformasyon faktörü (F_d) Denklem 5.4'te verildiği gibi, deformasyon çapının (D_m), nominal çapa (D_n) bölünmesiyle hesaplanmıştır (Davim ve ark., 2004; Arul ve ark., 2006; Hansda ve Banerjee, 2014; Kumar ve ark., 2016; Yazman, 2021; John ve ark., 2022).



Şekil 5.19. Deformasyon görüntülerinin mikroskopla çekilerek bilgisayara aktarılması



Şekil 5.21. CFTP kompozitin matkapla delinmesi



Şekil 5.22. CFTP kompozitin zımba ile delinmesi

5.10. Sembolik Regresyon Yöntemiyle Analiz

Sembolik regresyon yöntemi, denklem üretmek dahil farklı amaçlar için kullanılan ve genetik ifade programlama (GEP) ile analiz edilen bir yöntemdir (Ferreira, 2001). GEP işleminde matematiksel fonksiyonlar kromozom olarak tanımlanmaktadır. GEP ağacı matematiksel fonksiyonların bütünü olarak değerlendirilir. Fonksiyon kümesi en iyi modeli elde edebilmek için uygun şekilde seçilmiş temel matematik (+, -, ×, log, karekök vb.) işlemlerinden veya fonksiyonlarından oluşur (Çelik ve Fidan, 2022).

CFTP kompozitlerin matkap ve zımba ile delinmesi sonucu elde edilen verilerin bağımsız değişkenler (delme parametreleri) ile bağımlı değişken (kesme kuvveti ve deformasyon faktörü) arasındaki ilişkiyi gösteren GEP ağacı ve performansının incelenmesi Heuristic and Evolutionary Algorithms Laboratory (HEAL) tarafından geliştirilen HeuristicLab programı ile gerçekleştirilmiştir. Matkap ve zımba ile delme deneylerinde kesme kuvvetleri ve deformasyon faktörlerinin tahmini için toplam deney sonucunun %70'i eğitim işleminde, %30'u da test işleminde kullanılmıştır. Eğitimin aşamasında veriler rasgele karıştırılmıştır. Böylece eğitimin daha başarılı olması hedeflenmiştir. Genetik ifade ağaçlarının oluşturulması için kullanılan işlem ve fonksiyonlar Tablo 5.4'te verilmiştir. Tablo 5.4'deki parametreler kullanılarak genetik ağacının en iyi performansa ulaşması için sembolik regresyon yöntemi ile çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda, eğitim aşamasında R^2 performans değerinin minimum 0,90 olması ve minimum düğüm sayısına sahip GEP ağacının elde edilmesi hedeflenmiştir.

Tablo 5.4. Genetik ifade ağacına ilişkin parametre tanımları

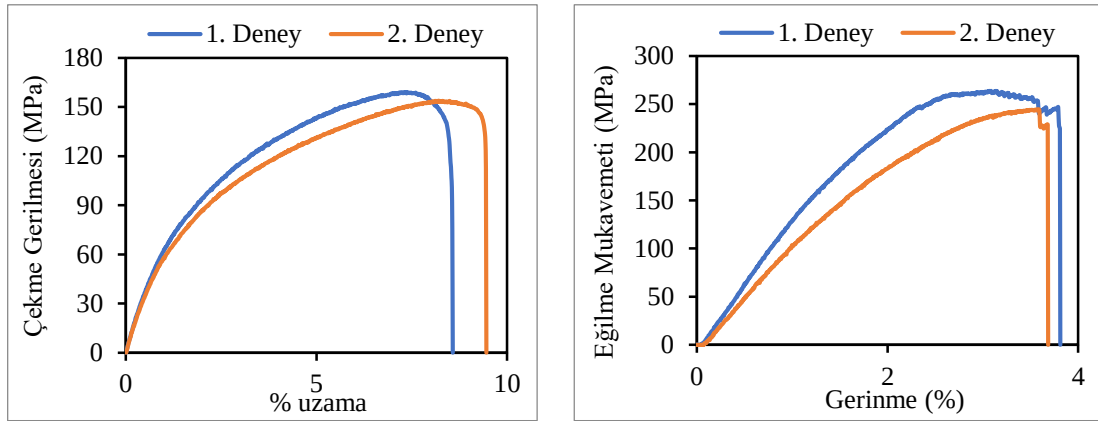
Parametre Tanımı	Parametreler
Fonksiyon Kümesi	+, -, ×, /, x^2 log, exp
Nesil Sayısı	200
Popülasyon Sayısı	1000
Genetik İfade Ağacı Derinliği (Max)	12
Genetik İfade Ağacı Eleman Sayısı (Max)	15
Mutasyon Olasılığı	0,15

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE BULGULAR

6.1. CFTP Kompozitin Çekme ve Eğilme Test Sonuçları

Çekme testi için $25 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$, eğilme testi için $10 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ 2'şer adet üretilen CFTP kompozitlerin çekme ve eğilme dayanımları 1 mm/dak test hızında, çekme deneyi 250 kN , eğilme deneyi ise 5 kN yük hücre kapasitelerinde Shimadzu marka universal çekme test cihazı ile yapılmıştır.

Şekil 6.1'de CFTP kompozit malzemenin çekme ve eğilme dayanımları grafik halinde verilmiştir.



Şekil 6.1. CFTP kompozit malzemeye ait çekme ve eğilme dayanım grafikleri

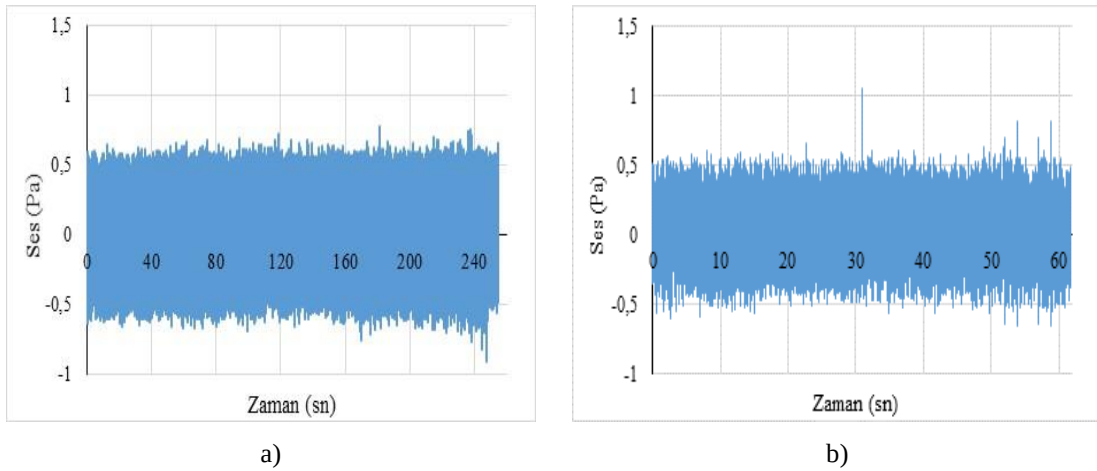
Yapılan çekme testinde kompozit malzemenin çekme dayanımı $156,43 \pm 3,6 \text{ MPa}$ ve %uzaması $9,01 \pm 0,62$ olarak tespit edilmiştir. Tek yönlü (0°) kumaşlardan elde edilen çekme mukavemeti daha yüksekken, $\pm 45^\circ$ oryantasyon açısına sahip kumaşlardan elde edilen çekme mukavemeti daha düşük olmaktadır. Bu yüzden üretilen CFTP kompozitin çekme gerilmesi düşük gibi görülse de bu durum kompozitin $\pm 45^\circ$ oryantasyon açısına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Naresh ve ark. (2018), farklı kombinasyonlarda ve oryantasyon açısına sahip olan cam fiber/epoksi kompozitlere yaptıkları çekme testlerinde, en yüksek çekme mukavemetini tek yönlü (0°) kumaştan $557,8 \pm 22,7 \text{ MPa}$ olarak elde etmişlerdir. $\pm 45^\circ$ oryantasyon açısına sahip olan altı katmanlı kompozitte ise çekme mukavemetinin $95,76 \pm 10,8 \text{ MPa}$ olduğunu gözlemlemişlerdir. $\pm 45^\circ$ oryantasyon açısına sahip kompozitlerin daha düşük çekme dayanımına sahip olması, fiberlerin çekme doğrultusunda yükleri taşınamamasından ve 45° 'lik kayma gerilmesi oluşturmasından kaynaklanmaktadır.

Yapılan eğilme testinde, kompozit malzemenin eğilme dayanımı $254,02 \pm 13,52 \text{ MPa}$ ve %gerinimi $3,75 \pm 0,09$ olarak tespit edilmiştir. $\pm 45^\circ$ oryantasyon açısına sahip

olan CFTP’lerde eğilme mukavemeti tek yönlü kumaştan daha düşük olmaktadır. Naresh ve ark (2017), tek yönlü cam fiber/epoksi kompozitte eğilme mukavemetini $929 \pm 33,8$ MPa bulurlarken, $\pm 45^\circ$ oryantasyon açısına sahip cam fiber/epoksi kompozitte bu değeri $184,8 \pm 9,45$ MPa bulmuşlardır. Ayrıca gerinim değerlerine bakıldığında ise $\pm 45^\circ$ oryantasyon açısına sahip kompozitin çalışmamıza benzer bir değer ($3,1 \pm 0,3$) ile tek yönlü diğer kompozitlere oranla daha yüksek gerinim değeri elde etmişlerdir.

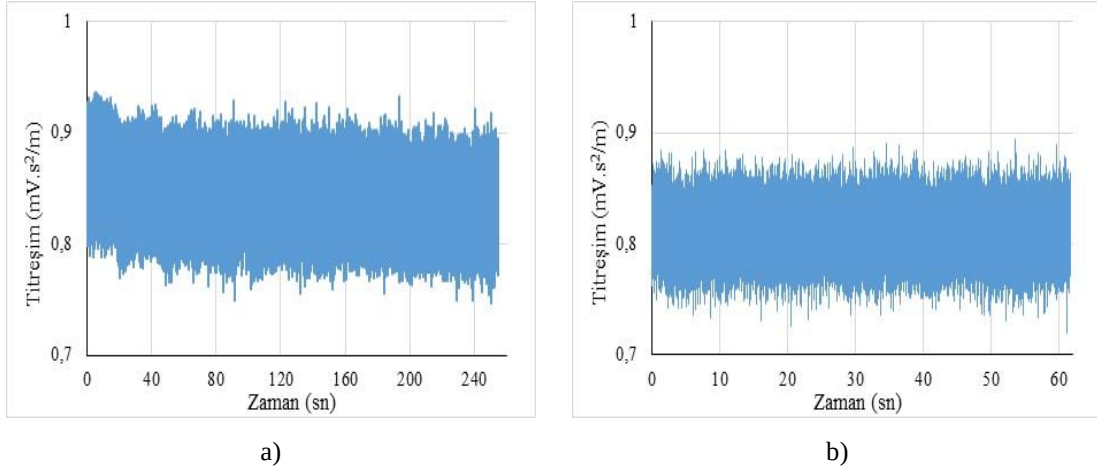
6.2. Ses ve Titreşim Sonuçları

Matkapla delme deneyleri esnasında ortamdaki ses ve kesme parametrelerine bağlı fener mili değerlerindeki titreşim değişiminin tespiti için ivmeölçer kullanılmıştır. Ses alıcısı ve titreşim ölçerden gelen sinyaller ivmeölçer aracılığıyla bilgisayara aktarılmış ses ve titreşim ölçümleri değerlendirilmiştir. İlerleme hızının 0,025 mm/dev ve 0,2 mm/dev olduğu durumlarda ivmeölçer ile elde edilen ses seviyesi Şekil 6.2’de, titreşim genliği ise Şekil 6.3’te verilmiştir. Her bir ilerleme hızında tüm kesme hızlarıyla deneyler yapılmıştır.



Şekil 6.2. İlerleme hızına bağlı ses ölçüm grafikleri, a) 0,025 mm/dev ve b) 0,2 mm/dev

Şekil 6.2’deki grafikler incelendiğinde, 0,025 mm/dev ve 0,2 mm/dev ilerleme hızlarında elde edilen ses ölçüm verilerinin birbirine yakın çıktığı (-0,5 Pa ile +0,5 Pa aralığında), ancak 0,2 mm/dev ilerleme hızındaki ses ölçümlerinin ihmal edilebilecek bir miktarda daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Delme esnasında zamana bağlı ses değişimi incelendiğinde, kesme hızının ses değişimine bir etkisinin olmadığı ancak zaman içerisinde ses değişiminde ani piklerin olduğu görülmüştür. Oluşan ani pikler, deney esnasında çevresel faktörlerden kaynaklanan piklerdir.



Şekil 6.3. İlerleme hızına bağlı titreşim genliği grafikleri, a) 0,025 mm/dev ve b) 0,2 mm/dev

Şekil 6.3'teki grafik incelendiğinde, elde edilen titreşim genliği ölçüm verilerinin 0,76 mV.s²/m ile 0,91 mV.s²/m aralığında değiştiği görülmektedir. Her iki ilerleme hızında da kayda değer bir fark oluşmadığı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla hem kesme hem de ilerleme hızlarının CFTP kompozit malzemelerin matkapla delinmesi sırasında oluşan ses ve titreşim genlikleri üzerinde ciddi bir etkiye sahip olmadığı belirlenmiştir.

6.3. Kesme Kuvveti Sonuçları ve Sembolik Regresyon Analizleri

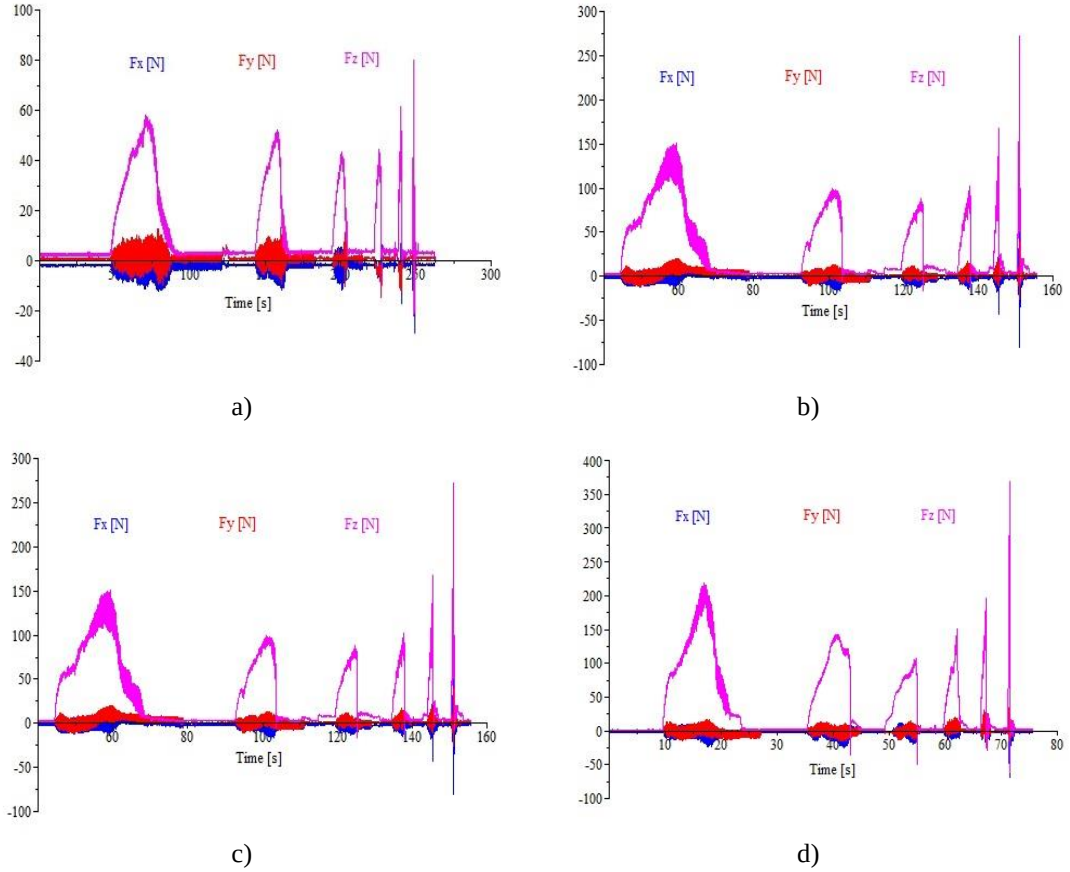
CFTP kompozit malzemenin matkap ve zımba ile delme deneylerinde elde edilen kuvvetler bilgisayara aktarılmış ve Kistler Dynoware programıyla F_x (x yönündeki), F_y (y yönündeki) ve F_z (z yönündeki) doğrultusundaki maksimum kuvvetler belirlenmiştir. Kesme kuvvetleri (F) Denklem 6.1'de verilen formülle hesaplanmıştır.

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (6.1)$$

Delme yöntemine bağlı olarak delme parametrelerinin kesme kuvvetine etkileri alt başlıklarda grafikler halinde sunulmuştur. Ayrıca delme parametrelerine (bağımsız değişken) ve delme deneyleri esnasında oluşan ve Denklem 6.1 ile hesaplanan kesme kuvvetine (bağımlı değişken) ait veriler HeuristicLab programında sembolik regresyon yöntemi ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen istatistiksel veriler ve matematiksel ifadeler de bu alt başlıklarda verilmiştir.

6.3.1. Matkapla delmede oluşan kesme kuvveti ve analizi

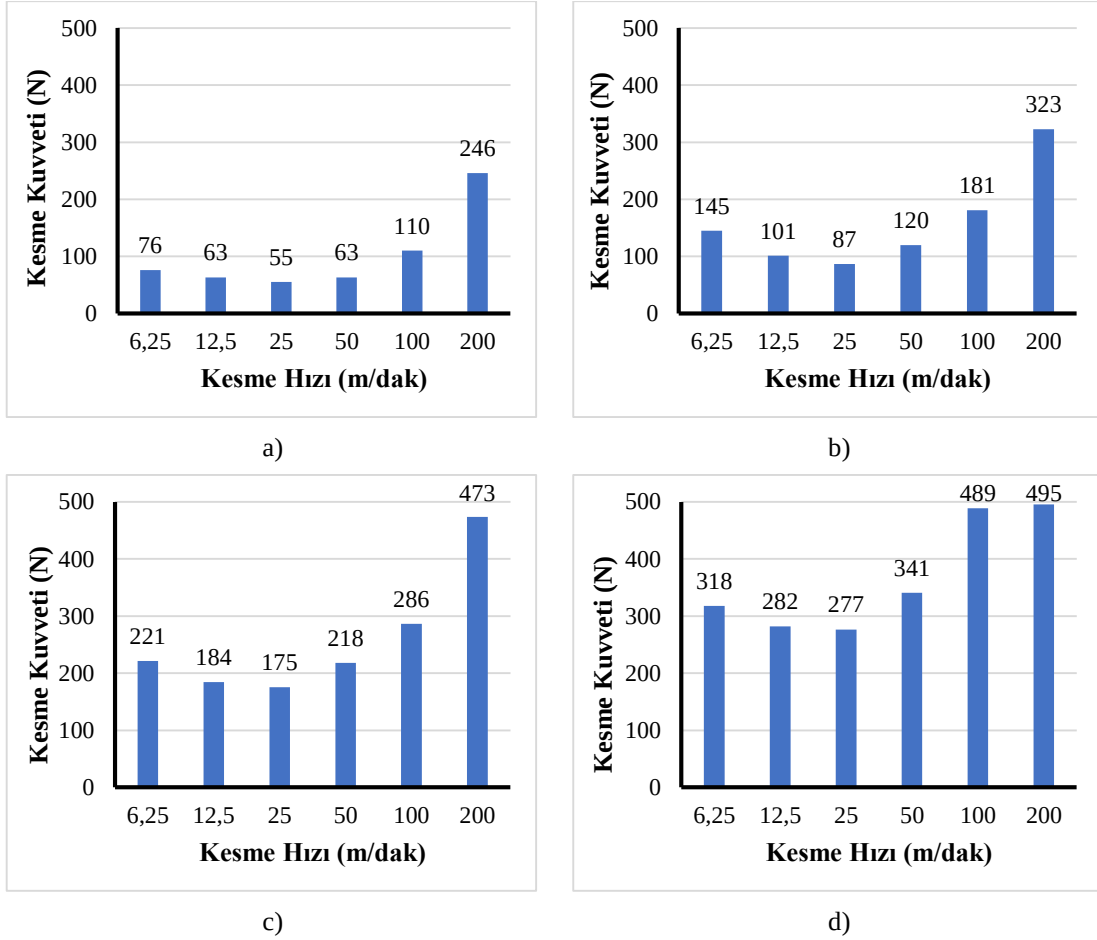
Matkapla delmede oluşan ve Kistler Dynoware programından alınan kesme parametrelerine bağlı F_x , F_y ve F_z yönündeki kuvvetler Şekil 6.4'te gösterilmiştir.



Şekil 6.4. Matkapla delmede, kesme parametrelerine bağlı F_x , F_y ve F_z kuvvetleri
a) 0,025 mm/dev, b) 0,5 mm/dev, c) 0,1 mm/dev ve d) 0,2 mm/dev

Şekil 6.4'te görüldüğü gibi her bir grafikte F_x , F_y ve F_z olmak üzere 3 adet kuvvet vardır. F_x ve F_y kuvvetleri, F_z kuvvetinin yanında oldukça düşük kalmaktadır. z doğrultusundaki F_z kuvveti, ilerleme doğrultusundaki itme kuvvetidir. Her bir grafikte F_z kuvvetinin yaptığı 6 pik vardır. Bu pikler sırasıyla 6,25 m/dak, 12,5 m/dak, 25 m/dak, 50 m/dak, 100 m/dak ve 200 m/dak kesme hızlarıyla yapılan delme deneylerinden elde edilmiştir. Kesme ve ilerleme hızlarına bağlı olarak kuvvetler değişiklik göstermiştir.

Bu çalışmada, itme kuvvetinden kısmen daha yüksek elde edilen, bütün kuvvetlerin bileşkesi olan ve formülü Denklem 6.1'de verilen kesme kuvveti üzerinden analizler yapılmıştır. CFTP kompozitlerin farklı ilerleme hızlarında, kesme hızının kesme kuvvetine etkisini gösteren grafikler Şekil 6.5'te verilmiştir.

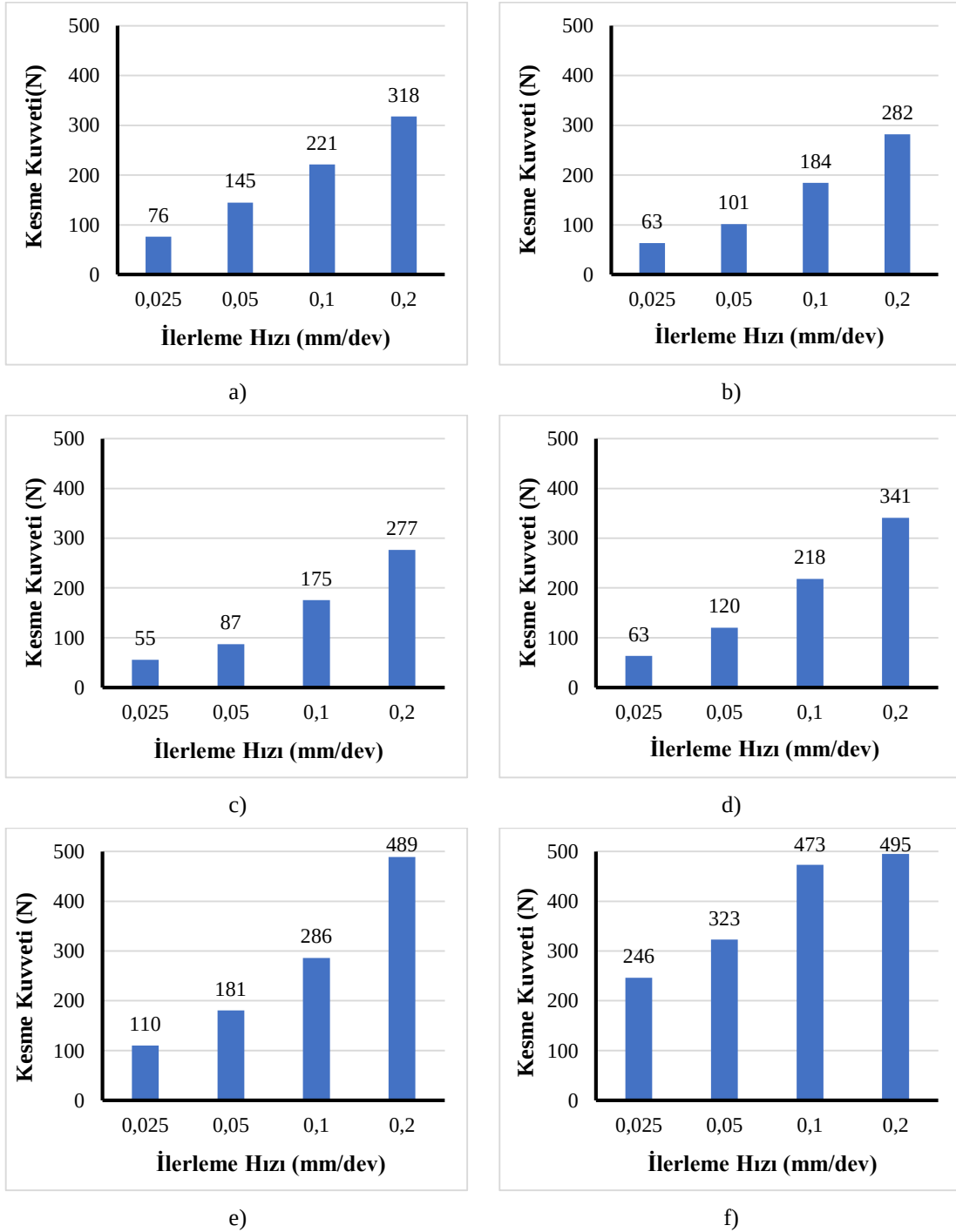


Şekil 6.5. Matkapla delmede, kesme hızına bağlı kesme kuvveti grafikleri
a) 0,025 mm/dev, b) 0,5 mm/dev, c) 0,1 mm/dev ve d) 0,2 mm/dev

Şekil 6.5’te, bütün ilerleme hızlarında kesme hızı 6,25 m/dak’dan 25 m/dak’ya kadar artırıldığında kesme kuvvetinin sürekli düştüğü gözlenmiştir. Kesme hızı 50 m/dak’dan 200 m/dak’ya kadar artırıldığında ise kesme kuvvetlerinin yükselmeye başladığı görülmektedir. 50 m/dak kesme hızına kadar kesme kuvvetleri arasındaki fark düşükken, 100 m/dak ve 200 m/dak kesme hızlarında kesme kuvvetleri arasındaki fark belirgin bir şekilde artmıştır. En düşük kesme kuvvetlerinin elde edildiği 25 m/dak kesme hızları için 0,025 mm/dev, 0,05 mm/dev, 0,1 mm/dev ve 0,2 mm/dev ilerleme hızlarında elde edilen kesme kuvvetleri sırasıyla 55 N, 87 N, 175 N ve 277N’dur. Erturk ve ark. (2021), 1000 dev/dak, 2000 dev/dak, 3000 dev/dak dönme devirleri ile yaptıkları deneylerde dönme devrinin dolayısıyla kesme hızının artmasıyla itme kuvveti üzerinde kayda değer bir değişikliğin olmadığını ifade etmişlerdir. Arul ve ark. (2006), 9,43 m/dak, 18,85 m/dak, 23,56 m/dak ve 30,16 m/dak kesme hızları ile yaptıkları deneylerde, elde ettiğimiz sonuçlara benzer şekilde kesme hızı arttıkça kesme kuvvetinin önce düşmeye başladığını daha sonra artan kesme hızıyla yükseldiğini belirtmişlerdir. Yazman (2021),

20 m/dak, 40 m/dak, 60 m/dak ve 80 m/dak kesme hızlarında, Palanikumar (2011) ise 1000 dev/dak, 1500 dev/dak, 2000 dev/dak ve 2500 dev/dak dönme devirlerinde yaptıkları deneyler sonucu artan kesme hızı veya dönme devriyle kesme kuvvetinin sürekli düştüğünü belirtmişlerdir.

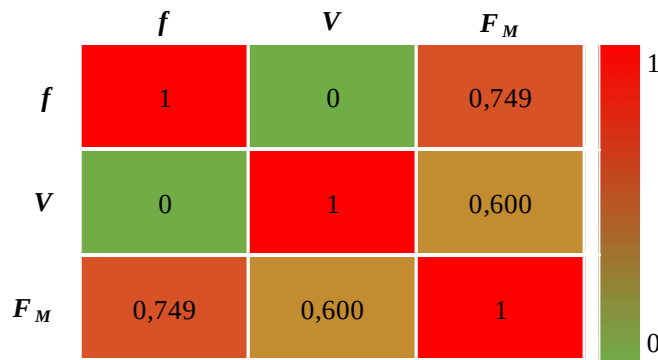
Şekil 6.6'da, 6,25; 12,5; 25; 50; 100 ve 200 m/dak kesme hızları için ilerleme hızına bağlı kesme kuvveti değişim grafikleri gösterilmektedir.



Şekil 6.6. Matkapla delmede, ilerleme hızına bağlı kesme kuvveti grafikleri
a) 6,25 m/dak, b) 12,5 m/dak, c) 25 m/dak, d) 50 m/dak, e) 100 m/dak ve f) 200 m/dak

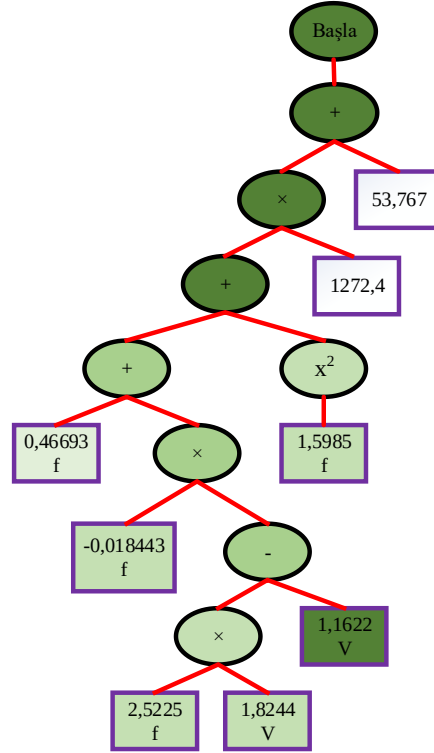
Bütün kesme hızı parametrelerinde, ilerleme hızı artışına bağlı olarak kesme kuvvetlerinin arttığı görülmüştür. 6,25 m/dak kesme hızında, ilerleme hızı 0,025 mm/dev'den 0,2 mm/dev'e yükseltildiğinde kesme kuvvetinin 76 N'dan 318 N'a çıkarak %418 arttığı belirlenmiştir. Bütün kesme parametreleri göz önünde bulundurulduğunda, en düşük ve en yüksek kesme kuvvetleri sırasıyla 25 m/dak kesme hızı - 0,025 mm/dev ilerleme hızı için 55 N ve 200 m/dak kesme hızı - 0,2 mm/dev ilerleme hızı için 495 N elde edilmiştir. Erturk ve ark. (2021), Arul ve ark. (2006), John ve ark. (2022), Yazman (2021) ve Palanikumar (2011), artan ilerleme hızıyla kesme kuvvetlerinin arttığını belirtmişlerdir. Gemi ve ark. (2019), ilerleme hızı arttıkça kesme kuvvetinin arttığını, bunun nedeninin ise artan kesilmemiş talaş kalınlığı ve kesme alanıyla ilgili olduğunu belirtmişlerdir. Davim ve ark. (2004), artan ilerleme hızının kesme kuvvetini önemli ölçüde arttırdığı, ilerleme hızının kesme kuvveti üzerinde büyük etkiye sahip bir parametre olduğunu belirtmişlerdir.

CFTP kompozitlerin delinmesinde, devir başına ilerleme hızı (f) ve kesme hızı (V) bağımsız değişkenlerinin (delme parametrelerinin) kesme kuvveti (F) olan bağımlı değişken üzerine etkilerini sembolik regresyon yöntemi ile analiz edebilmek için deneysel sonuçlardan elde edilen veriler HeuristicLab Optimizer 3.3.16.17186 programındaki genetik programlama – sembolik regresyon veri analiz bölümüne yüklenmiştir. Öncelikle verilerin uygun olup olmadığı kontrol edilmiş ve ardından korelasyon matrisi oluşturulmuştur (Şekil 6.7). Korelasyon matrisi, veri seti üzerindeki birden fazla değişkenin birbiri üzerindeki etkisini incelemek için kullanılmaktadır. Veri setindeki değerler 1'e yakınsa güçlü bir doğrusal orantı, -1'e yakınsa güçlü bir ters orantıdan söz etmek mümkündür. Ancak veri setindeki değerler 0'a yakınsa veriler arasında lineer bir ilişki bulunmamaktadır (Steiger, 1980). Şekil 6.7, matkapla delmede oluşan kesme kuvveti (F_M) üzerine f ilerleme hızı ve V kesme hızının önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. En kuvvetli ilişki f ile F_M arasında olup değeri 0,749'dur.



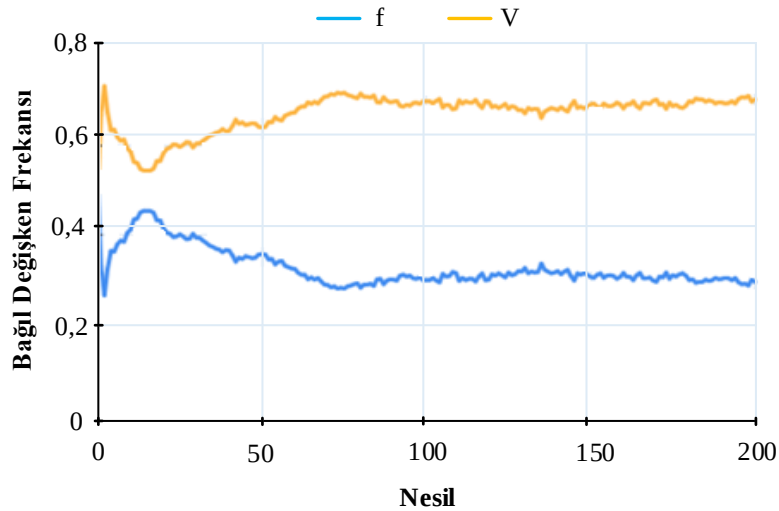
Şekil 6.7. F_M için elde edilen değişkenler arası korelasyon matrisi

F_M üzerine f ve V 'nin etkisini görebilmek ve GEP ağacını üretmek için veriler sistemde analiz edilmiş ve önerilen GEP ağacı Şekil 6.8'deki gibi elde edilmiştir. GEP ağacında düğümler çeşitli matematiksel işlemler kullanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 6.8. F_M için tahmini önerilen GEP ağacı

Şekil 6.8'de, sabit ve katsayı değerleri mor, düğümler arası bağlantılar ise kırmızı renkte gösterilmiştir. GEP ağacında 8 adet terminal (mor), 8 adet düğüm (siyah) bulunmaktadır. Bu ağacın değişkenleri, sabitler, çarpma, çıkartma, toplama ve x^2 işlemlerinden oluştuğu görülmektedir. Fonksiyonlara geçirilen f ve V bağımsız değişken parametrelerinin nesiller boyunca değişim grafiği Şekil 6.9'da verilmiştir.



Şekil 6.9. F_M için nesiller boyunca etki değerlerinin değişim frekansı

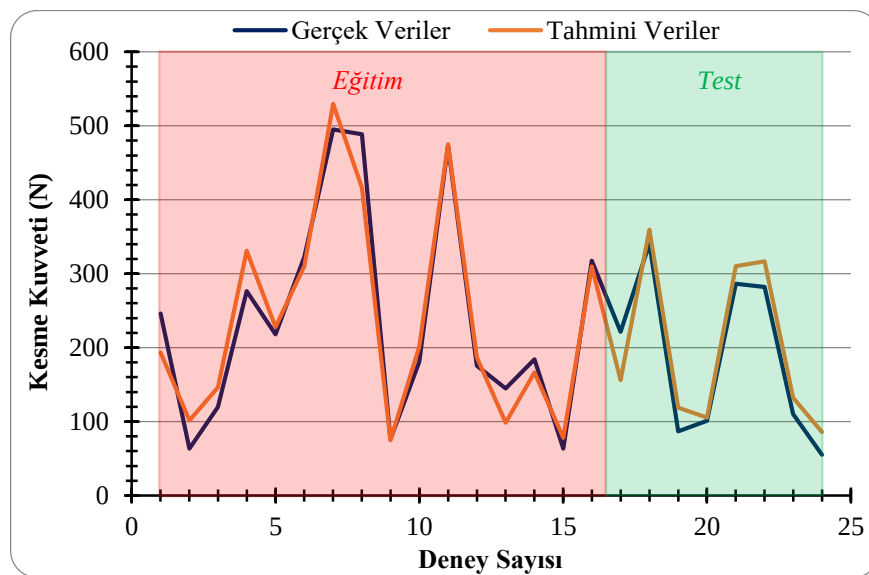
Şekil 6.9'daki bağımsız değişkenlerin değerleri yaklaşık olarak 80. nesilden sonra çok fazla değişime uğramamıştır. Bu durumda yaklaşık 80. nesilden sonra en iyi genetik ifadenin yaklaşık olarak çözüldüğü söylenebilir.

Matkapla delmede oluşan kesme kuvveti (F_M) çıktısı üzerine öncelikle f ilerleme hızının ve ardından V kesme hızının etkili olduğu belirlenmiştir. Önerilen GEP ağacı için eğitim aşamasında $R^2 = 0,94$, test aşamasında $R^2 = 0,91$ olarak hesaplanmıştır. Bu doğrultuda GEP ağacını veren eşitlik, Denklem 6.2'deki gibi elde edilmiştir.

$$F_M = \left(\left((c_0 \times f + c_1 \times f \times (c_2 \times f \times c_3 \times V - c_4 \times V)) + (c_5 \times f)^2 \right) \times c_6 + c_7 \right) \quad (6.2)$$

Denklem 6.2'de gösterilen katsayılar sırasıyla $c_0 = 0,46693$, $c_1 = -0,018443$, $c_2 = 2,5225$, $c_3 = 1,8244$, $c_4 = 1,1622$, $c_5 = 1,5985$, $c_6 = 1272,4$ ve $c_7 = 53,767$ olarak hesaplanmıştır.

F_M matkapla delmede oluşan kesme kuvveti için sembolik regresyon yöntemi ile elde edilen denkleme ilişkin eğitim/test aşamasında gerçek ve tahmin edilen verileri çizgisel olarak gösteren grafik Şekil 6.10'da sunulmuştur. Şekil 6.10'da, kırmızı ve yeşil renge boyanmış iki farklı bölge görülmektedir. Kırmızı bölge eğitim aşamasını ve yeşil bölge ise test aşamasını göstermektedir. Eğitim ve test aşamasındaki lacivert çizgi deney verileridir, turuncu renkli çizgi ise genetik ifade tahmin verileridir. Genetik ifade ağacından elde edilen denklem ile hesaplanan tahmini değerler, gerçek değerlere yakın olarak elde edilmiştir.

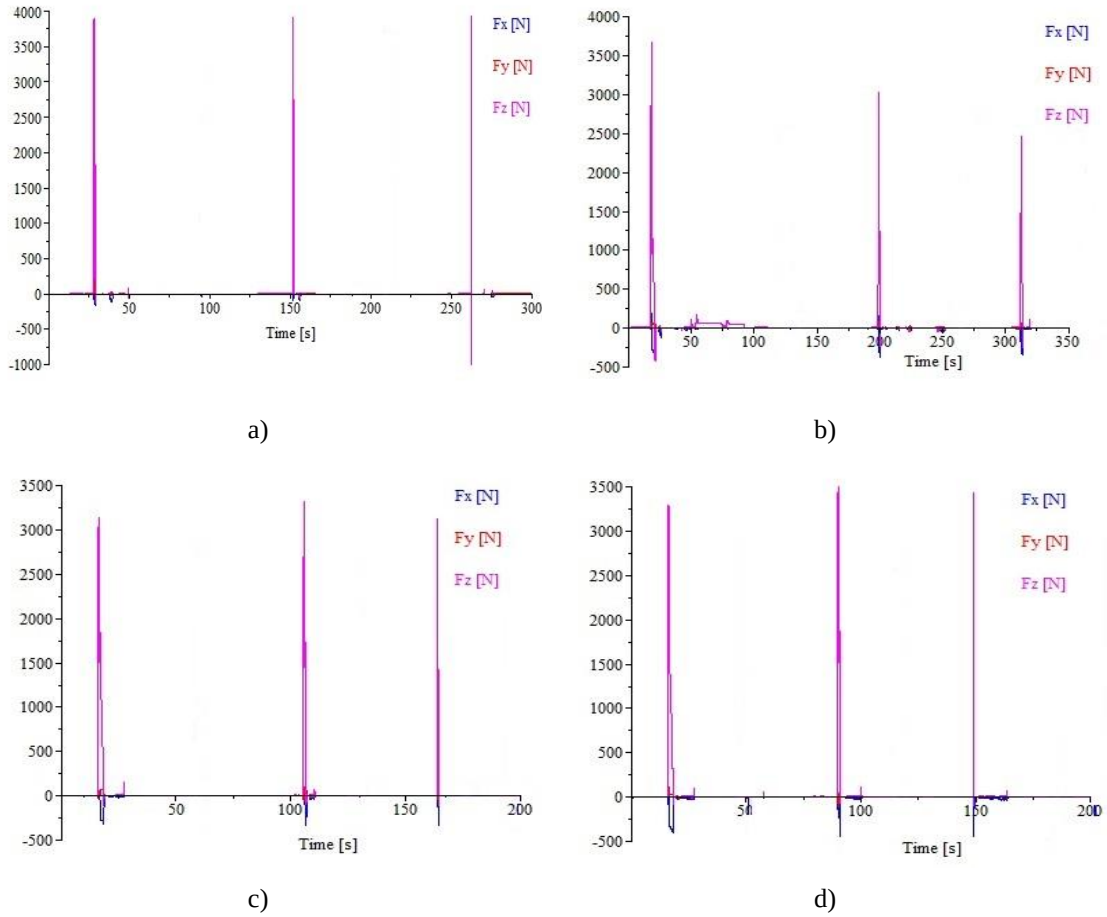


Şekil 6.10. F_M için eğitim ve test aşamasında önerilen GEP ağacına ilişkin gerçek ve tahmini veriler

CFTP kompozit malzemelerin matkapla delinmesinde; F_M matkapla delmede oluşan kesme kuvveti, sembolik regresyon yöntemi ile kolaylıkla analiz edilmiştir. Analizler sonucunda eğitim aşamasında $R^2 = 0,94$, test aşamasında $R^2 = 0,91$ ile matematiksel ifadeyi veren eşitlik elde edilmiştir.

6.3.2. Zımba ile delmede oluşan kesme kuvveti ve analizi

Matkapla delmede olduğu gibi zımba ile delmede de oluşan ve Kistler Dynoware programından alınan kesme parametrelerine bağlı F_x , F_y ve F_z yönündeki kuvvetler Şekil 6.11’de gösterilmiştir.

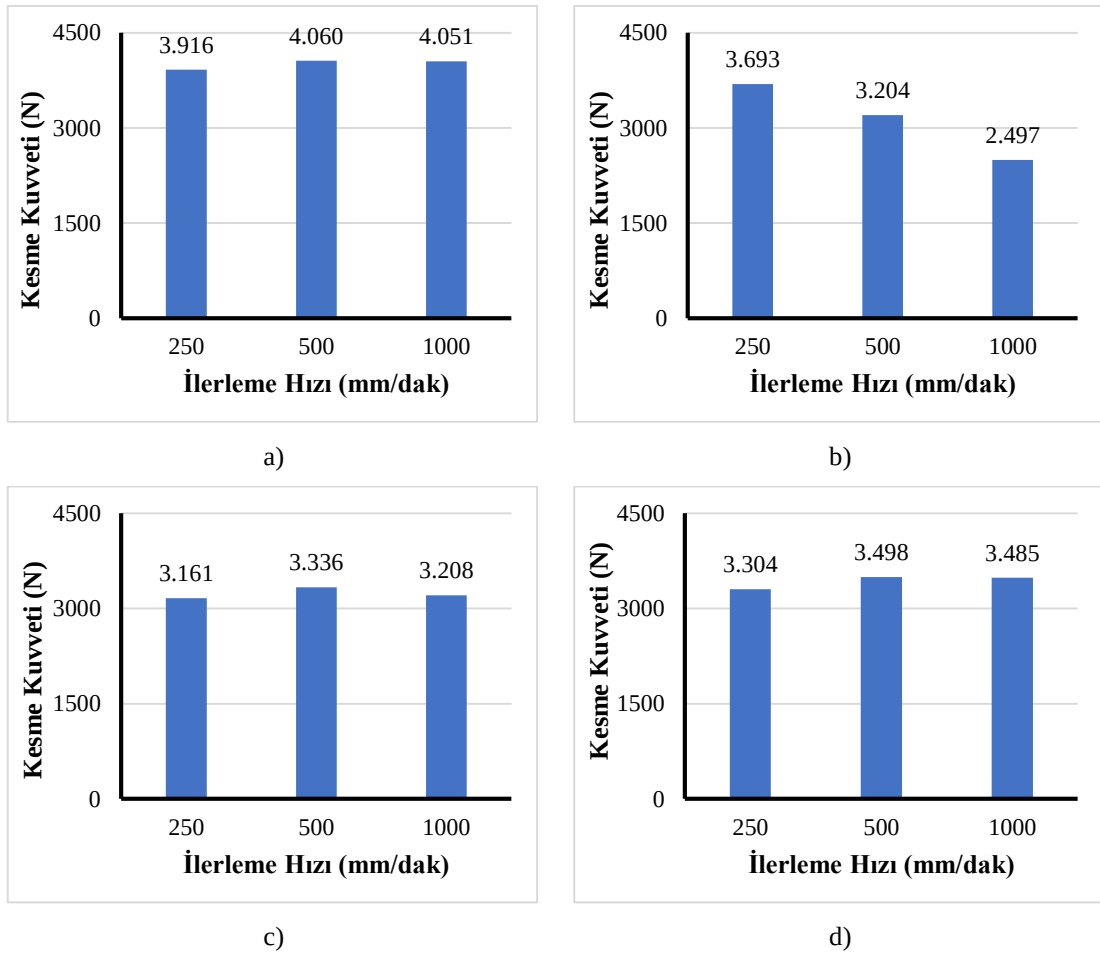


Şekil 6.11. Zımba ile delmede; 250, 500 ve 1000 mm/dak ilerleme hızlarındaki F_x , F_y ve F_z kuvvetleri
a) düz zımba, b) $15^\circ \setminus$ açılı zımba, c) $15^\circ \vee$ açılı zımba ve d) $15^\circ \wedge$ açılı zımba

Şekil 6.11’de görüldüğü gibi her bir grafikte F_x , F_y ve F_z olmak üzere 3 adet kuvvet vardır. Bunlardan F_x ve F_y kuvvetleri oldukça küçük elde edilirken, F_z kuvveti matkapla delmeden kat kat daha yüksek elde edilmiştir. Bunun nedeni zımba ile delmede zımbanın eksenel hareket yapmaması yani sabit olmasıdır. Bu yüzden en önemli kuvvet

F_z kuvvetidir. Her bir grafikte F_z kuvvetinin yaptığı 3 pik vardır. Bu pikler sırasıyla 250 mm/dak, 500 mm/dak ve 1000 mm/dak ilerleme hızlarıyla yapılan delme deneylerinden elde edilmiştir. Zımba cinsine ve ilerleme hızına bağlı olarak kuvvetler değişmiştir. Zımba ile delmede F_x , F_y ve F_z kuvvetleri matkapla delmede olduğu gibi Denklem 6.1 ile hesaplanarak kesme kuvvetleri bulunmuştur.

Şekil 6.12’de, düz zımba, $15^\circ \setminus$ açılı zımba, $15^\circ \vee$ açılı zımba ve $15^\circ \wedge$ açılı zımba ile delinen CFTP kompozitin ilerleme hızına bağlı kesme kuvveti grafikleri verilmiştir.

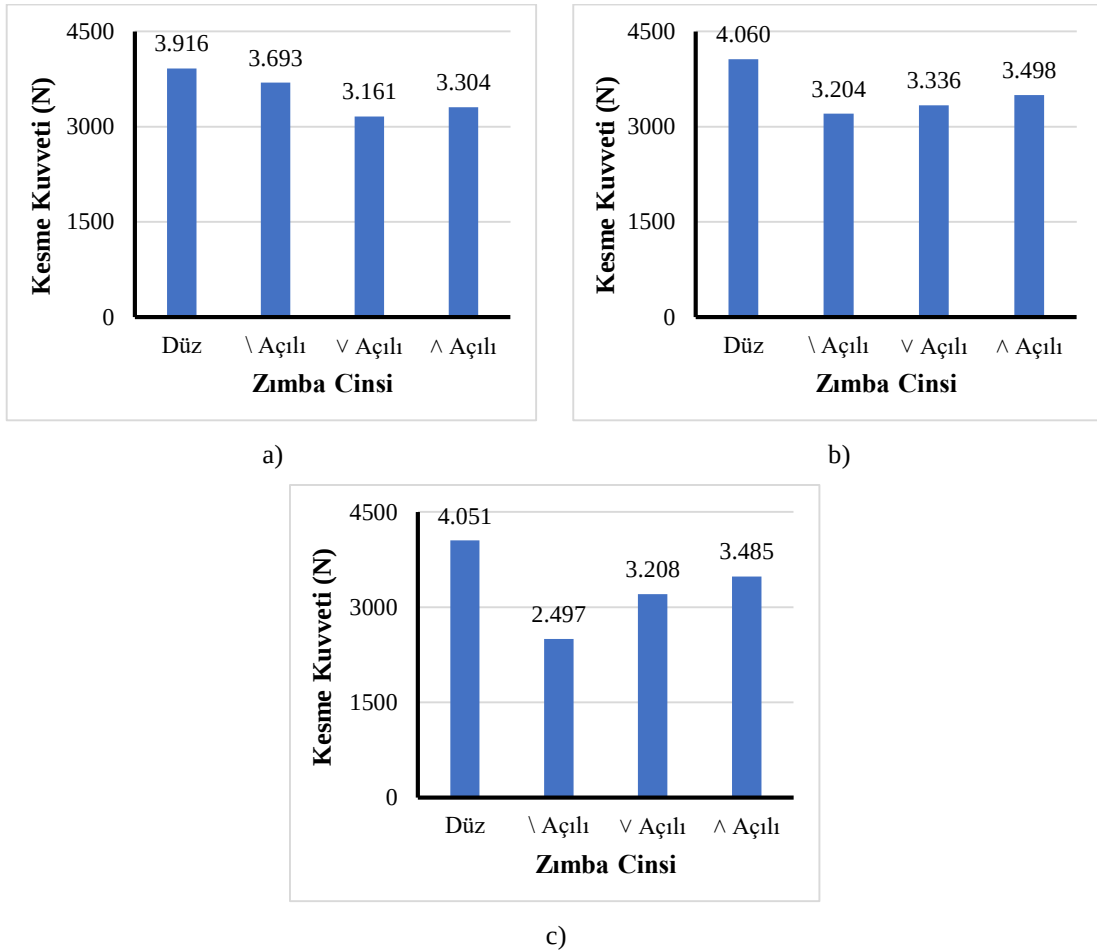


Şekil 6.12. Zımba ile delmede, ilerleme hızına bağlı kesme kuvveti grafikleri
a) Düz zımba, b) $15^\circ \setminus$ açılı zımba, c) $15^\circ \vee$ açılı zımba ve d) $15^\circ \wedge$ açılı zımba

Düz zımba ile delinmede, artan ilerleme hızlarında kesme kuvvetinin önce arttığı daha sonra düştüğü belirlenmiştir. En düşük ve en yüksek ilerleme hızlarındaki kuvvetler 3916 N ve 4051 N olarak ölçülmüştür. Artan ilerleme hızının kesme kuvvetini kayda değer oranda etkilemediği görülmektedir. $15^\circ \setminus$ açılı zımba ile delme işleminde ise kesme kuvvetinin düz zımbanın aksine ilerleme hızı arttıkça düştüğü açıkça görülmektedir. Bu zımba tipinde ilerleme hızı, kesme kuvveti üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur.

Artan ilerleme hızı kesme kuvvetini yaklaşık %32,38 oranında düşürmüştür. $15^\circ \vee$ açılı zımba ile delme işleminde düz açılı zımbaya benzer şekilde artan ilerleme hızıyla kesme kuvveti önce artmış, daha sonra düşmüştür. Ancak kuvvetlerin düz zımbadan daha düşük olduğu görülmüştür. $15^\circ \wedge$ açılı zımba ile delinen numunelerde de düz ve $15^\circ \vee$ açılı zımbaya benzer kesme kuvveti eğilim grafiği elde edilmiştir. En düşük kuvvet, $15^\circ \setminus$ açılı zımba ile 1000 mm/dak ilerleme hızında 2497 N ve en yüksek kuvvet ise düz açılı zımbada ile 500 mm/dak ilerleme hızında 4060 N olarak tespit edilmiştir.

Şekil 6.13'te, 250 mm/dak, 500 mm/dak ve 1000 mm/dak ilerleme hızlarıyla delinen CFTP kompozitlerde, zımba cinsinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisini gösteren grafikler verilmiştir.

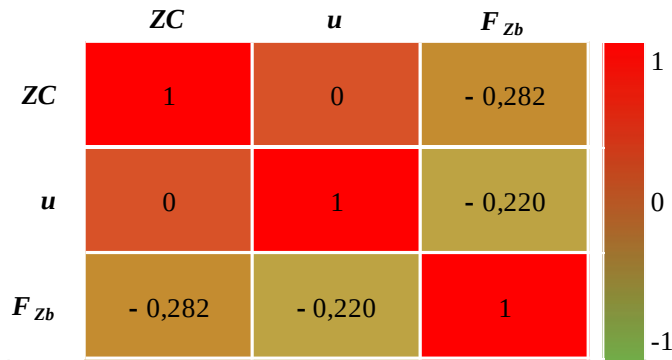


Şekil 6.13. Zımba cinsine bağlı kesme kuvveti grafikleri
a) 250 mm/dak, b) 500 mm/dak ve c) 1000 mm/dak

250 mm/dak ilerleme hızı için en yüksek kesme kuvveti düz zımba ile yapılan delmede 3916 N, en düşük kesme kuvveti ise $15^\circ \vee$ açılı zımba tipinde 3161 N olarak elde edilmiştir. 500 mm/dak ilerleme hızı için elde edilen en yüksek kesme kuvveti düz zımba

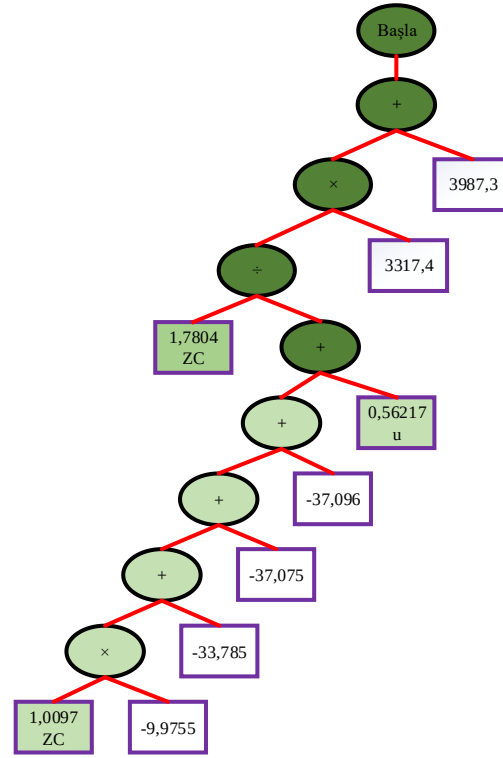
ile yapılan delmede 4060 N, en düşük kesme kuvveti ise 15° \ açılı zımba ile yapılan delmede 3204 N olmuştur. 1000 mm/dak ilerleme hızında ise en yüksek ve en düşük kesme kuvvetleri 500 mm/dak ilerleme hızında olduğu gibi sırasıyla düz zımba ve 15° \ açılı zımba ile yapılan delme deneylerinden elde edilmiştir. Elde edilen en yüksek ve en düşük kesme kuvvetleri 4051 N ve 2497 N'dur. Grafikler genel olarak değerlendirildiğinde kesme kuvveti üzerinde zımba cinsinin ilerleme hızından daha etkili olduğu belirlenmiştir. 15° \ açılı zımba cinsinde kesme kuvvetinin düşük çıkmasının nedeni, kesme sırasında kompozite temas eden yüzey alanının diğer zımba cinslerinden daha az olması olarak açıklanabilir. Literatür de çalışmamıza benzer bir çalışma yapan Ceritbinmez ve Yapıcı (2021), CFTP kompozitlerin 90° , 30° , 15° , V, C profilli zımbalar ile delinmesinde en yüksek ve en düşük kesme kuvvetlerinin 90° ve 30° açılı zımba cinslerinden elde edildiğini belirtmişlerdir.

CFTP kompozitlerde, zımba ile delmede oluşan kesme kuvveti (F_{zb}) bağımlı değişkeni üzerine dakikadaki ilerleme hızı (u) ve zımba cinsi (ZC) bağımsız değişkenlerinin etkileri sembolik regresyon yöntemi ile analiz edilmiştir. ZC zımba cinsi ve u ilerleme hızı bağımsız değişkenlerinin F_{zb} zımba ile delmede oluşan kesme kuvveti bağımlı değişkenine ait korelasyon matrisi Şekil 6.14'teki gibi elde edilmiştir.



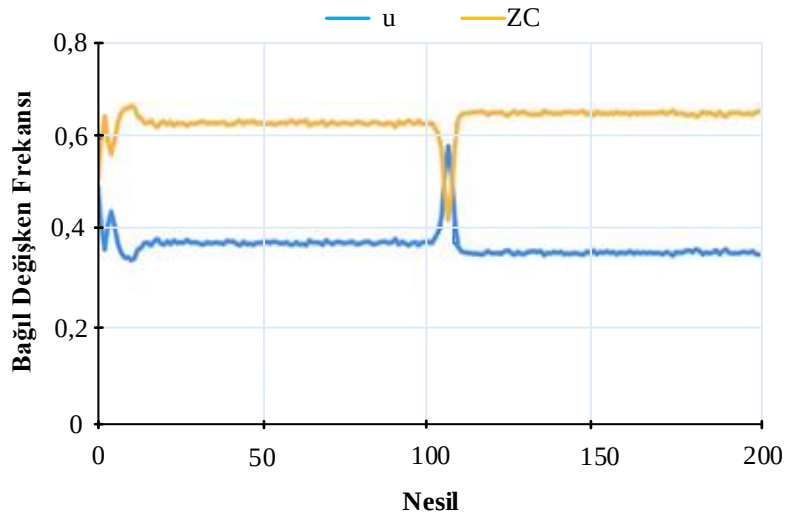
Şekil 6.14. F_{zb} için elde edilen değişkenler arası korelasyon matrisi

Şekil 6.14'te verilen korelasyon matris tablosu incelenecek olursa, F_{zb} zımba ile delmede oluşan kesme kuvveti üzerine ZC zımba cinsi ve u ilerleme hızının önemli etkisinin olduğu ve değerlerin işaretine bakıldığında bu etkinin ters orantı şeklinde olduğu görülmektedir. Korelasyon matrisindeki veriler birbirine yakın olsa da en kuvvetli ters orantı ilişkisi ZC zımba cinsi ve F_{zb} zımba ile delmede oluşan kesme kuvveti arasında olmuştur. Elde edilen değer $-0,282$ 'dir. F_{zb} zımba ile delmede oluşan kesme kuvveti için önerilen GEP ağacı Şekil 6.15'teki gibi elde edilmiştir.



Şekil 6.15. F_{zb} tahmini için önerilen GEP ağacı

Şekil 6.15'teki GEP ağacında 9 adet terminal, 8 adet düğüm bulunmaktadır. Bu ağacın değişkenleri, sabitler, çarpma, bölme, çıkartma ve toplama işlemlerinden oluştuğu görülmektedir. F_{zb} zımba ile delmede oluşan kesme kuvveti için fonksiyonlara geçirilen ZC zımba cinsi ve u ilerleme hızı bağımsız değişken parametrelerinin nesiller boyunca değişim grafiği Şekil 6.16'da verilmiştir.



Şekil 6.16. F_{zb} için nesiller boyunca etki değerlerinin değişim frekansı

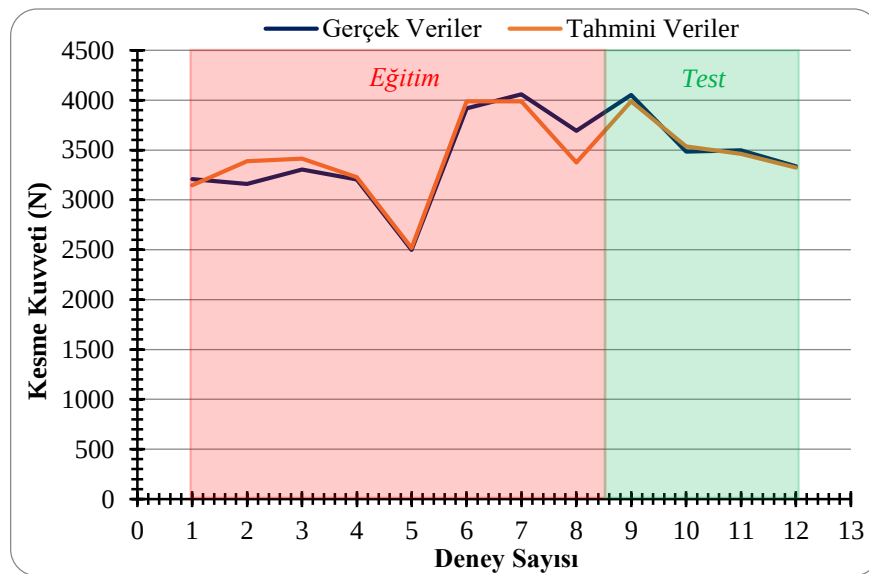
Şekil 6.16'daki bağımsız değişkenlerin değerleri yaklaşık olarak 15. nesilden sonra 100. nesile kadar sabit gitmiştir. Ancak tüm analiz işlemlerinde nesil sayısı 200 seçildiği için 100. nesilden sonra yaklaşık 110. nesile kadar değişim gözlemlenmiş ancak daha sonra tekrar yaklaşık olarak sabit kalmıştır. Bu durum en iyi genetik ifadenin yaklaşık olarak çözüldüğü anlamına gelmektedir.

F_{Zb} zımba ile delmede oluşan kesme kuvveti, öncelikle ZC zımba cinsinden ve ardından u mm/dak cinsinden ilerleme hızından etkilenmiştir. F_{Zb} 'de, önerilen GEP ağacı için eğitim aşamasında $R^2 = 0,90$, test aşamasında $R^2 = 0,98$ olarak hesaplanmıştır. Bu doğrultuda GEP ağacını veren eşitlik, Denklem 6.3'teki gibi elde edilmiştir.

$$F_{Zb} = \left(\frac{c_0 \times ZC}{\left(\left(\left(\left(c_1 \times ZC \times c_2 + c_3 \right) + c_4 \right) + c_5 \right) + c_6 \times u \right)} \times c_7 + c_8 \right) \quad (6.3)$$

Denklem 6.3'te gösterilen katsayılar sırasıyla $c_0 = 1,7804$, $c_1 = 1,0097$, $c_2 = -9,9755$, $c_3 = -33,785$, $c_4 = -37,075$, $c_5 = -37,096$, $c_6 = 0,56217$, $c_7 = 3317,4$ ve $c_8 = 3987,3$ olarak hesaplanmıştır.

F_{Zb} zımba ile delmede oluşan kesme kuvveti için sembolik regresyon yöntemi ile elde edilen denkleme ilişkin eğitim/test aşamasında gerçek ve tahmin edilen verileri çizgisel olarak gösteren grafik Şekil 6.17'de sunulmuştur. Genetik ifade ağacından elde edilen denklem ile hesaplanan tahmini değerler, gerçek değerlere yakın olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.17. F_{Zb} için eğitim ve test aşamasında önerilen GEP ağacına ilişkin gerçek ve tahmini veriler

CFTP kompozit malzemelerin zımba ile delinmesinde; F_{Zb} zımba ile delmede oluşan kesme kuvveti, sembolik regresyon yöntemi ile kolaylıkla analiz edilmiştir. Analizler sonucunda eğitim aşamasında $R^2 = 0,90$, test aşamasında $R^2 = 0,98$ ile matematiksel ifadeyi veren eşitlik elde edilmiştir.

6.4. Deformasyon Faktörü Sonuçları ve Sembolik Regresyon Analizleri

Deformasyon faktörü, delme kaynaklı deformasyonun değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılır ve hasarlı bölgenin maksimum çapının nominal delik çapına oranı olarak hesaplanır.

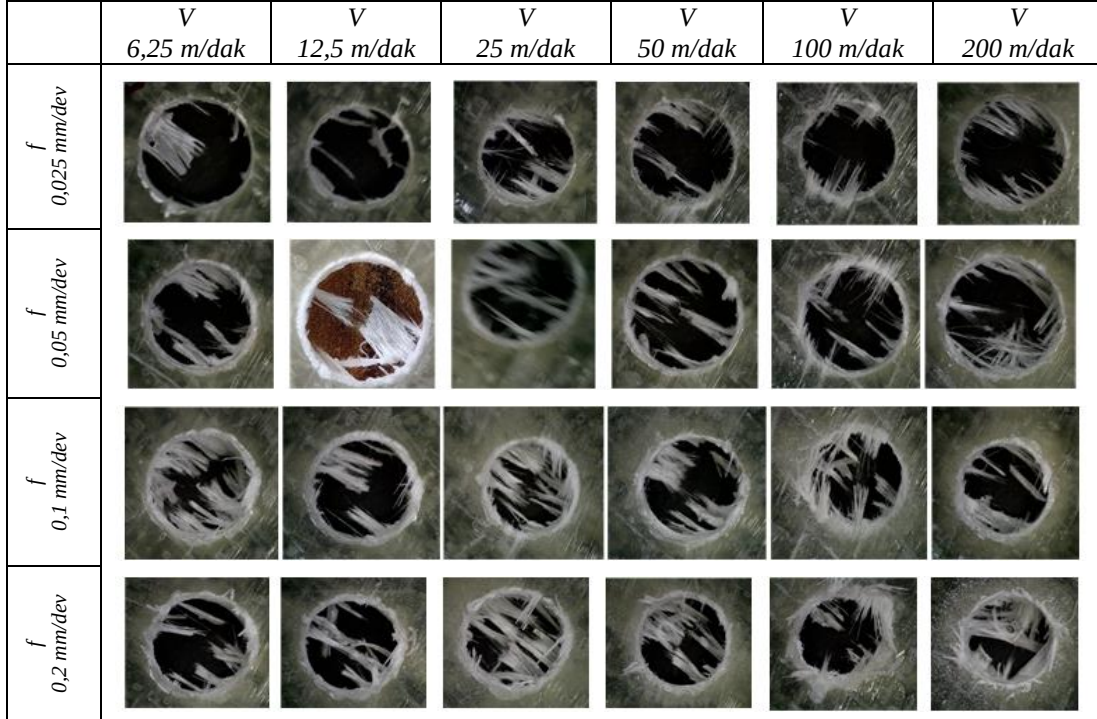
Deformasyon oluşumunda kesici takımın geometrisi, kompozit malzemenin fiber dizilimi, kesme hızı ve ilerleme hızı önemli role sahiptir. CFTP kompozit malzemelerin delinmesinde, soyulma ve itme olmak üzere iki çeşit deformasyon meydana gelmektedir. Delme işleminde kullanılan kesici takım ucu iş parçasına temas ettiğinde takımın kesici kenarı tabakayı sıyrır. Sıyrılan malzeme oluk boyunca çekilir ve yukarı doğru kıvrılır, üst tabaka soyulur ve soyulma deformasyonuna neden olur. Özellikle matkap ile delme işleminde, çıkışta kesilmemiş katmanlar, kesici takımın uyguladığı sıkıştırma kuvveti nedeniyle elastik olarak bükülür. Matkap çıkışa yaklaştığında, kesilmemiş katmanlar üzerindeki basıncın azalması nedeniyle eğilmeye karşı direnç azalır. Daha sonra, eğilme gerilimi arttıkça, katmanların tabakalar arası mukavemeti zayıflar, bu nedenle deliğin çevresinde çatlaklar oluşur. Delme noktası aşağı doğru daha fazla bastırıldığında, çatlağın yayılmasına neden olur ve katmanların eğilme rijitliği zayıflar. Bunun sonucu olarak, tabakalar arası bağlanma hatası oluşarak, itme deformasyonuna neden olur (Kumar ve ark., 2016).

Kompozit malzemelerin delme işlemlerinde, hem delik girişinde (peel-up) hem delik çıkışında (push-out) deformasyon meydana gelir. Araştırmalarda push-out (delik çıkış) deformasyonunun peel-up (delik giriş)'ten daha fazla olduğu bildirilmiştir (Gemi ve ark., 2019; Gemi ve ark., 2020a; Gemi ve ark., 2020b).

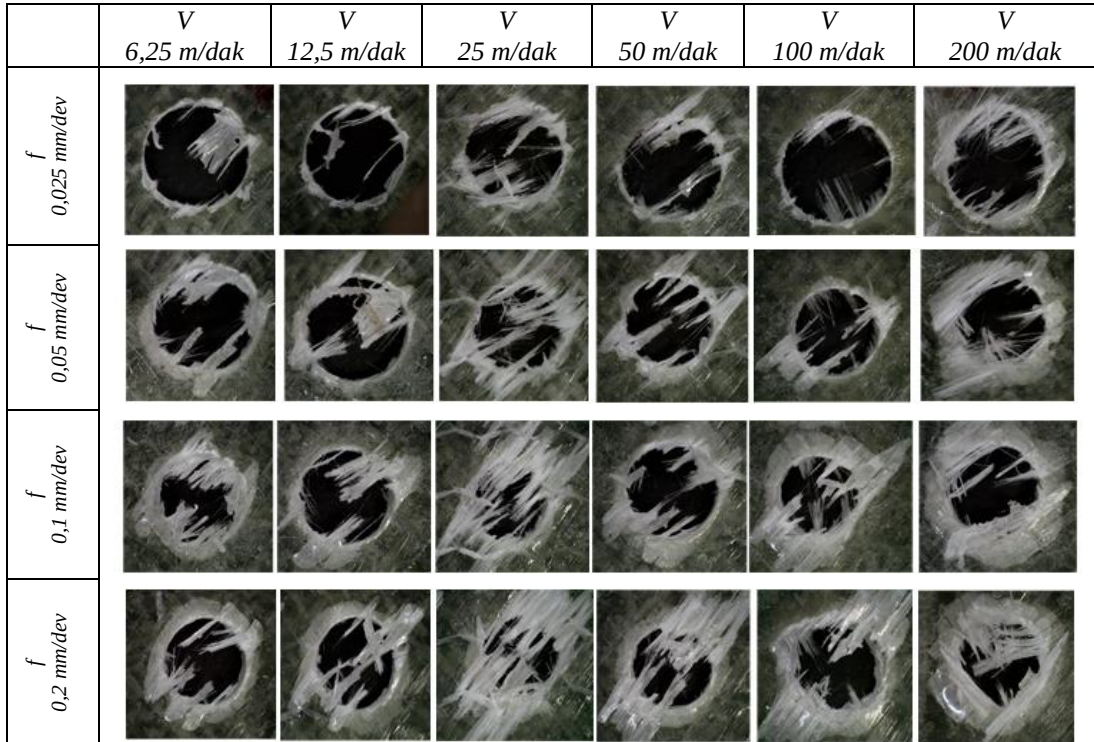
Bu çalışmada, CFTP kompozit malzemenin matkap ve zımba ile delinmesinde hem delik girişinde hem de delik çıkışında meydana gelen deformasyon faktörleri belirlenmiştir. Matkap ile delme işleminde kesme hızı ve ilerleme hızı parametrelerinin, zımba ile delmede ise ilerleme hızı ve zımba cinsi parametrelerinin delik giriş ve çıkışındaki deformasyon faktörüne etkileri incelenerek analiz edilmiştir.

6.4.1. Matkapla delmede oluşan deformasyon faktörü ve analizi

Farklı kesme hızı ve ilerleme hızlarında matkapla delme sonucu elde edilen delik giriş ve çıkış deformasyon görüntüleri sırasıyla Şekil 6.18 ve Şekil 6.19’da verilmiştir.



Şekil 6.18. Matkapla farklı kesme hızı ve ilerleme hızı parametrelerinde delinen kompozitin delik girişinde meydana gelen deformasyon görüntüleri

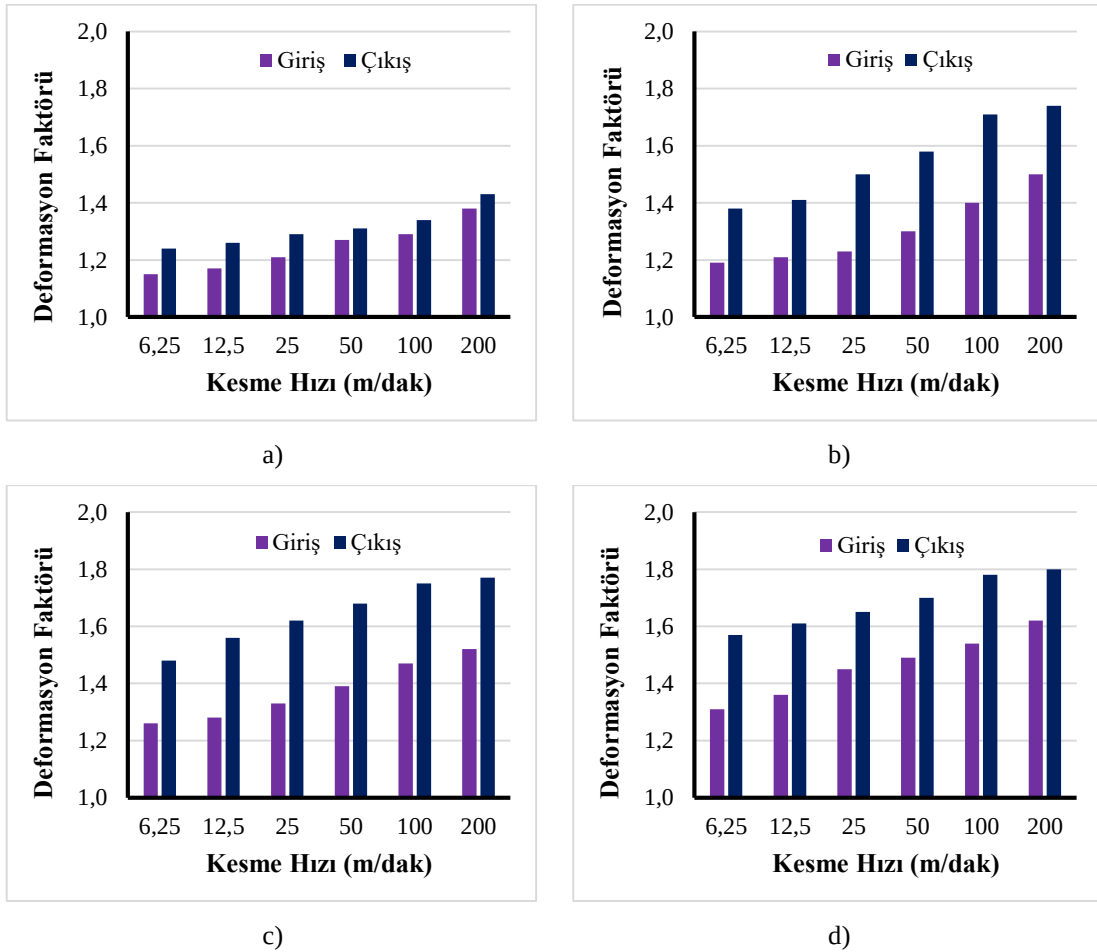


Şekil 6.19. Matkapla farklı kesme hızı ve ilerleme hızı parametrelerinde delinen kompozitin delik çıkışında meydana gelen deformasyon görüntüleri

Şekil 6.18’de verilen delik giriş görüntüleri incelendiğinde ilerleme ve kesme hızının artışına bağlı olarak deformasyon faktörünün arttığı belirgin bir şekilde görülmektedir.

Delik girişinde olduğu gibi Şekil 6.19’daki delik çıkışındaki deformasyon, artan kesme hızı ve ilerleme hızı ile artmıştır. Ancak delik çıkışında oluşan deformasyon, delik girişinde oluşan deformasyondan daha yüksek elde edilmiştir. Düşük ilerleme hızlarında meydana gelen deformasyonlar sıyrılma şeklinde iken, yüksek ilerleme hızlarında ise hem sıyrılma hem de tabakalar arası ayrılma olarak gözlenmiştir. Tabaka ayrılmasının nedeninin yüksek ilerleme hızlarında kesici takımın CFTP kompozit malzemeyi henüz kesmeye fırsat bulmadan malzemeyi itmesi sonucunda olduğu düşünülmektedir.

Şekil 6.20’de; 0,025, 0,05, 0,1 ve 0,2 mm/dev ilerleme hızları ile delinen CFTP kompozitlerde, kesme hızına bağlı deformasyon faktörü değişimini gösteren grafikler verilmiştir.



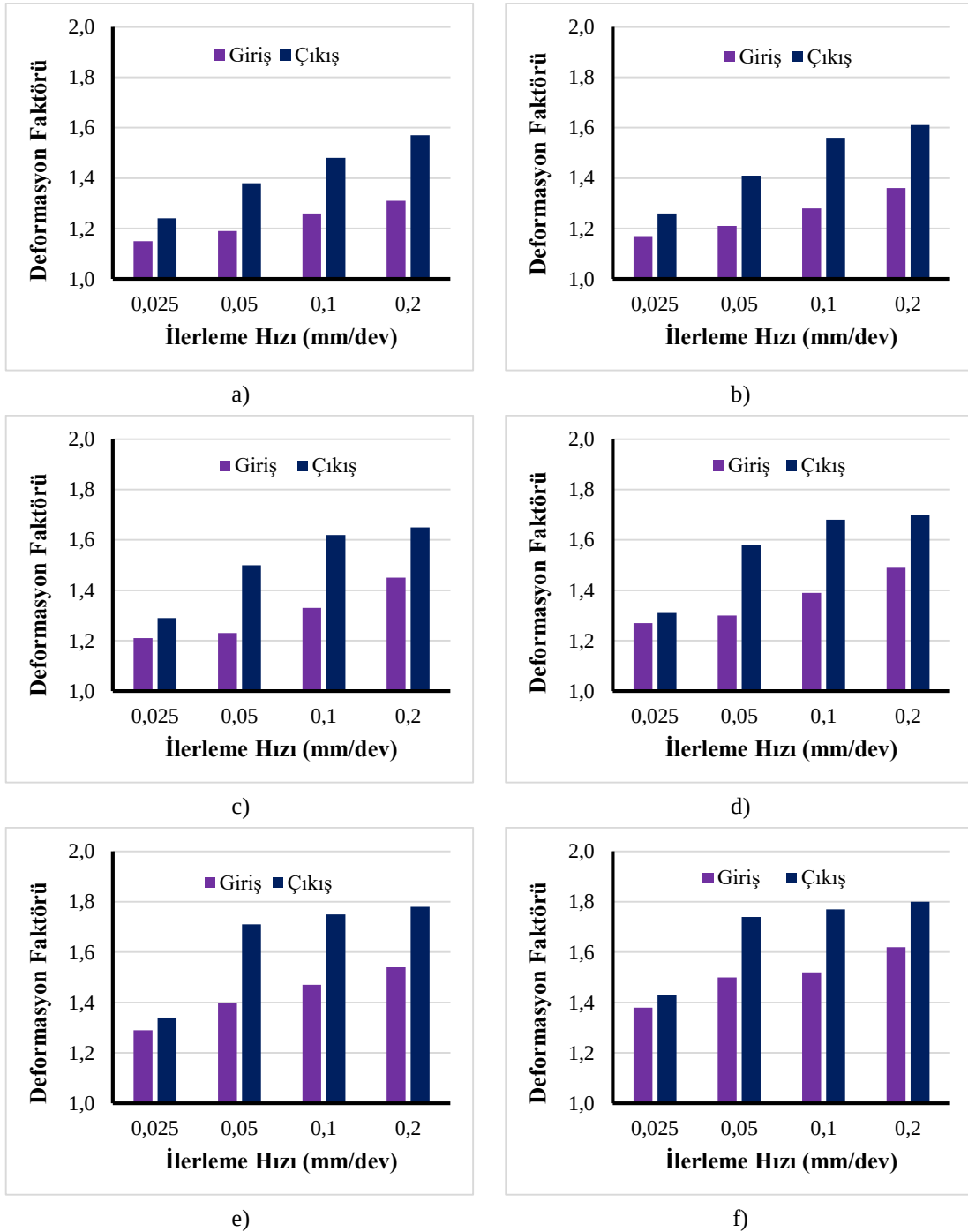
Şekil 6.20. Matkapla delmede, kesme hızına bağlı deformasyon faktörü grafikleri
a) 0,025 mm/dev, b) 0,05 mm/dev, c) 0,1 mm/dev ve d) 0,2 mm/dev

Grafikler incelendiğinde, bütün ilerleme hızı parametreleri için artan kesme hızına bağlı olarak hem delik girişindeki hem de delik çıkışındaki deformasyon faktörünün arttığı gözlenmiştir. Ayrıca bütün ilerleme hızı ve kesme hızı parametreleri için delik girişinde oluşan deformasyonunun delik çıkışında oluşan deformasyondan daha az olduğu görülmüştür. Delik girişindeki deformasyon faktörü, 0,025 mm/dev ilerleme hızı için en düşük ve en yüksek 6,25 ve 200 m/dak kesme hızlarında sırasıyla 1,15 ve 1,38 olarak ölçülmüştür. Yazman (2021), artan kesme hızı ile deformasyon faktörünün önce arttığını ve daha sonra azalmaya başladığını belirtmiştir. Davim ve ark. (2004), kesme hızı ve ilerleme hızı arttıkça deformasyon faktörünün arttığını, her ikisinin birlikte arttırılması halinde ise deformasyon faktörünün çok daha fazla olduğunu belirtmiştir. Kumar ve ark. (2016) ise kesme hızı arttıkça deformasyon faktörünün azaldığını, ilerleme hızı arttıkça deformasyon faktörünün arttığını ifade etmişlerdir. Yapılan literatür çalışmalarında (Gemi ve ark., 2020a; Gemi ve ark., 2020b) deformasyon faktöründeki artışın kesme kuvvetindeki artışa ve bunun sonucunda eğilme deformasyonuna bağlı olduğu ifade edilmiştir.

Şekil 6.21’de; 6,25, 12,5 25, 50, 100 ve 200 m/dak kesme hızları ile delinen CFTP kompozitlerin ilerleme hızına bağlı deformasyon faktörü grafikleri verilmiştir.

Şekil 6.21’deki grafikler incelendiğinde; sabit kesme hızında, artan ilerleme hızına bağlı olarak deformasyon faktörünün hem delik girişinde hem de delik çıkışında arttığı gözlenmiştir. Delik girişinde oluşan en düşük deformasyon faktörü, 0,025 mm/dev ilerleme hızı ve 6,25 m/dak kesme hızında 1,15 ve delik girişinde oluşan en yüksek deformasyon faktörü ise 0,2 mm/dev ilerleme hızı ve 200 m/dak kesme hızında 1,62 olarak ölçülmüştür. Delik girişinde oluşan en düşük ve en yüksek deformasyon faktörleri arasındaki farkın %41 olduğu belirlenmiştir. Delik girişinde en düşük ve en yüksek deformasyon faktörü değerlerinin elde edildiği kesme hızı ve ilerleme hızı parametrelerinde olduğu gibi delik çıkışında da en düşük ve en yüksek deformasyon faktörü değerleri aynı parametrelerden elde edilmiştir. Bu değerler 1,24 ve 1,80 olarak ölçülmüştür. Delik çıkışında oluşan deformasyon faktörü değerindeki artış oranı %45’tir. Kalita ve ark. (2022), Singaravel ve ark. (2021), Kannan ve ark. (2021) yaptığımız çalışmayla uyumlu olarak artan ilerleme hızlarında deformasyon faktörünün arttığını bildirmişlerdir. Sahami ve Heidary (2020) ilerleme hızının deformasyon faktörü üzerinde en büyük etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Kilickap (2010) deformasyon faktörünün minimum seviyede elde edilmesi için ilerleme hızının en düşük seviyede tutulması

gerektiğini vurgulamıştır. Yazman (2021) ilerleme hızının deformasyon faktörü üzerinde kesme hızından daha büyük bir etkiye sahip olduğunu ifade etmiştir.

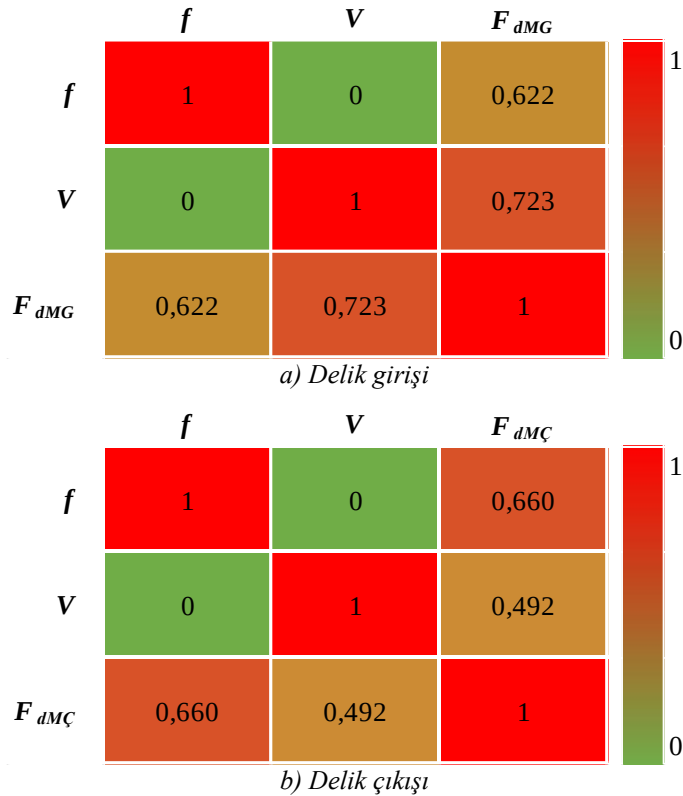


Şekil 6.21. Matkapla delmede, ilerleme hızına bağlı deformasyon faktörü grafikleri
a) 6,25 m/dak, b) 12,5 m/dak, c) 25 m/dak, d) 50 m/dak, e) 100 m/dak ve f) 200 m/dak

Matkapla delmede oluşan deformasyon faktörü (F_{dM}) bağımlı değişkeni üzerine f ilerleme hızı ve V kesme hızı bağımsız değişkenlerinin etkilerini sembolik regresyon yöntemi ile analiz edebilmek için deneysel sonuçlardan elde edilen veriler HEAL

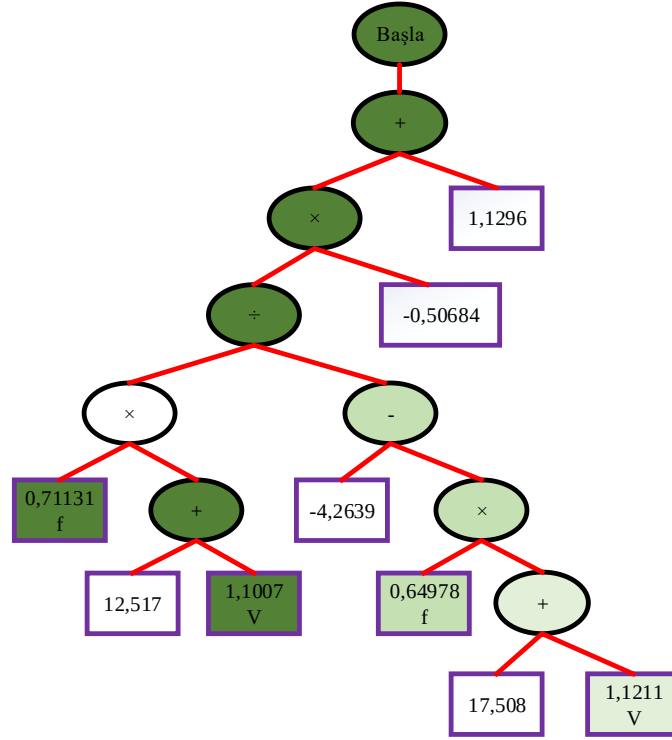
programına yüklenmiş ve analiz edilmiştir. Bağımsız değişkenlere bağlı olarak matkapla delmede delik girişindeki deformasyon faktörü (F_{dMG}) ve matkapla delmede delik çıkışındaki deformasyon faktörü ($F_{dMÇ}$) verilerine ait korelasyon matrisleri elde edilmiştir ve elde edilen korelasyon matrisleri Şekil 6.22’de verilmiştir.

Şekil 6.22’de verilen korelasyon matris tablosu incelenecek olursa, F_{dMG} ve $F_{dMÇ}$ üzerine f ilerleme hızı ve V kesme hızının önemli bir etkisinin olduğu görülmektedir. Delik girişi için f ilerleme hızı ve V kesme hızının F_{dMG} matkapla delmede delik girişindeki deformasyon faktörü ile ilişkisi birbirine yakın olsa da en kuvvetli ilişki V kesme hızı ve F_{dMG} matkapla delmede delik girişindeki deformasyon faktörü arasında olup, değeri 0,723’tür. Ancak delik çıkışı için en kuvvetli ilişki f ilerleme hızı ve $F_{dMÇ}$ matkapla delmede delik çıkışındaki deformasyon faktörü arasında olmuştur. Bu bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki ilişki değeri 0,660’tır. Korelasyon matrisinden anlaşıldığı üzere delik girişindeki deformasyon faktörü en fazla kesme hızından, delik çıkışındaki deformasyon faktörü ise en fazla ilerleme hızından etkilenmiştir.

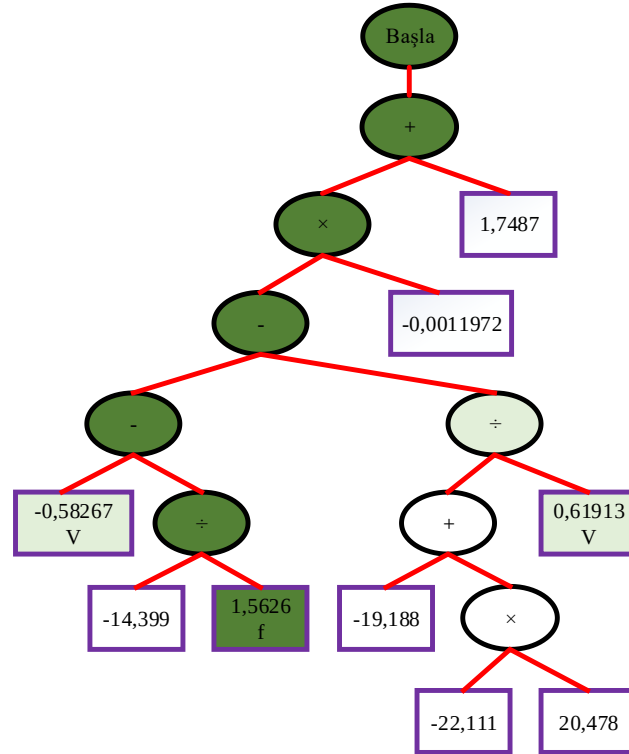


Şekil 6.22. F_{dM} için elde edilen değişkenler arası korelasyon matrisleri

Matkapla delmede, delik giriş ve çıkışındaki deformasyon faktörleri için GEP ağaçları üretilmiş ve önerilen GEP ağaçları Şekil 6.23 ve Şekil 6.24’te verilmiştir.



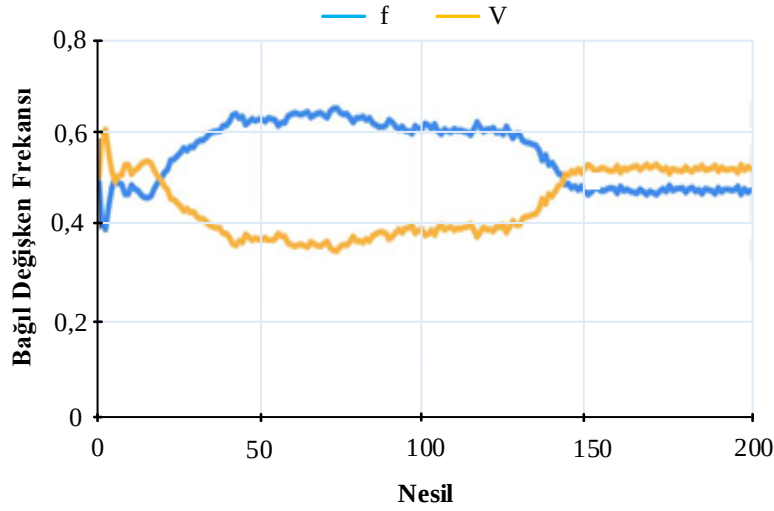
Şekil 6.23. F_{dMG} tahmini için önerilen GEP ağacı



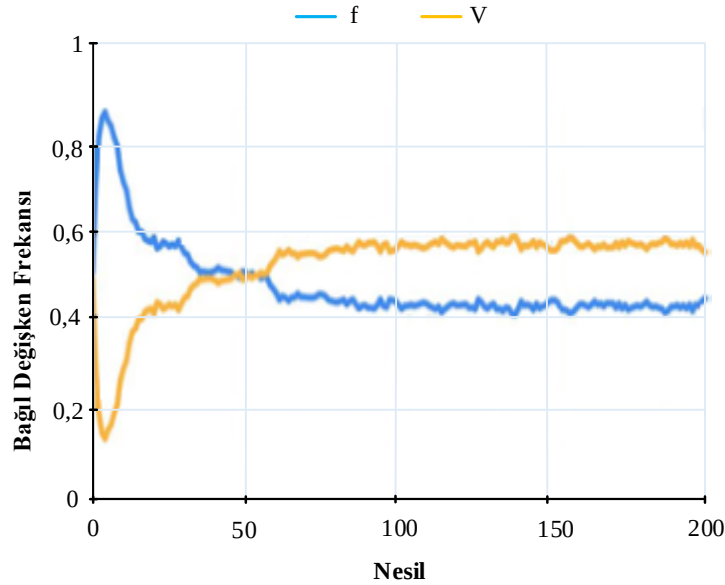
Şekil 6.24. $F_{dMÇ}$ tahmini için önerilen GEP ağacı

Şekil 6.23 ve 6.24'teki F_{dMG} matkapla delmede delik girişindeki deformasyon faktörü ve $F_{dMÇ}$ matkapla delmede delik çıkışındaki deformasyon faktörü için oluşturulan GEP ağaçlarında 9'ar adet terminal ve 8'er adet düğüm bulunduğu ve benzer

matematiksel işlemleri içerdiği görülmektedir. Matkapla delmede delik girişindeki ve çıkışındaki deformasyon faktörleri (F_{dMG} ve $F_{dMÇ}$) için GEP ağaçlarındaki fonksiyonlara geçirilen f ilerleme hızı ve V kesme hızı bağımsız değişken parametrelerinin nesiller boyunca değişim grafikleri Şekil 6.25 ve Şekil 6.26’da verilmiştir.



Şekil 6.25. F_{dMG} için nesiller boyunca etki değerlerinin değişim frekansı



Şekil 6.26. $F_{dMÇ}$ için nesiller boyunca etki değerlerinin değişim frekansı

Şekil 6.25’te, F_{dMG} için bağımsız değişkenler yaklaşık 50. nesile kadar ani değişiklikler sergilemiştir. Bağımsız değişkenler 50. nesilden 125. nesile kadar kısmen de olsa değişiklikler sergilemeye devam etmiş ve 125. nesilden sonra tekrar ani değişiklikler göstermiştir. Yaklaşık olarak 150. nesilden sonra bağımsız değişkenlerde değişim olmamıştır ve en iyi genetik denklem yaklaşık olarak elde edilmiştir.

Şekil 6.26’da, $F_{dMÇ}$ için bağımsız değişkenler yaklaşık 60. nesile kadar ani değişiklikler sergilemiştir. Bağımsız değişkenler 60. nesilden 100. nesile kadar kısmen de olsa değişiklikler sergilemeye devam etmiştir. Yaklaşık 100. nesilden sonra bağımsız değişkenlerde büyük bir değişim olmamıştır ve en iyi genetik ifade yaklaşık olarak çözülmüştür.

F_{dMG} , öncelikle V kesme hızından ve ardından f ilerleme hızından etkilenmiştir. F_{dMG} ’de, önerilen GEP ağacı için eğitim aşamasında $R^2 = 0,99$ ve test aşamasında $R^2 = 0,99$ olarak hesaplanmıştır. F_{dMG} matkapla delmede delik girişindeki deformasyon faktörü eşitliğini, Denklem 6.4’teki gibi elde edilmiştir.

$$F_{dMG} = \left(\frac{c_0 \times f \times (c_1 + c_2 \times V}{(c_3 - c_4 \times f \times (c_5 + c_6 \times V))} \times c_7 + c_8 \right) \quad (6.4)$$

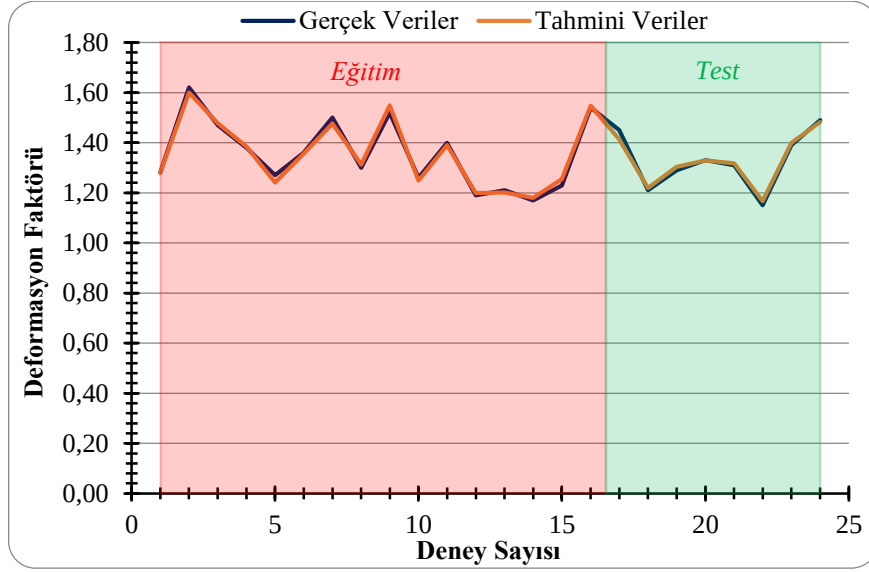
Denklem 6.4’te gösterilen katsayılar sırasıyla $c_0 = 0,71131$, $c_1 = 12,517$, $c_2 = 1,1007$, $c_3 = -4,2639$, $c_4 = 0,64978$, $c_5 = 17,508$, $c_6 = 1,1211$, $c_7 = -0,50684$ ve $c_8 = 1,1296$ olarak hesaplanmıştır.

$F_{dMÇ}$ matkapla delmede delik çıkışındaki deformasyon faktörü, öncelikle f ilerleme hızından ve ardından V kesme hızından etkilenmiştir. $F_{dMÇ}$ ’de, önerilen GEP ağacı için eğitim aşamasında $R^2 = 0,98$, test aşamasında $R^2 = 0,92$ olarak hesaplanmıştır. $F_{dMÇ}$ eşitliği, Denklem 6.5’teki gibi elde edilmiştir.

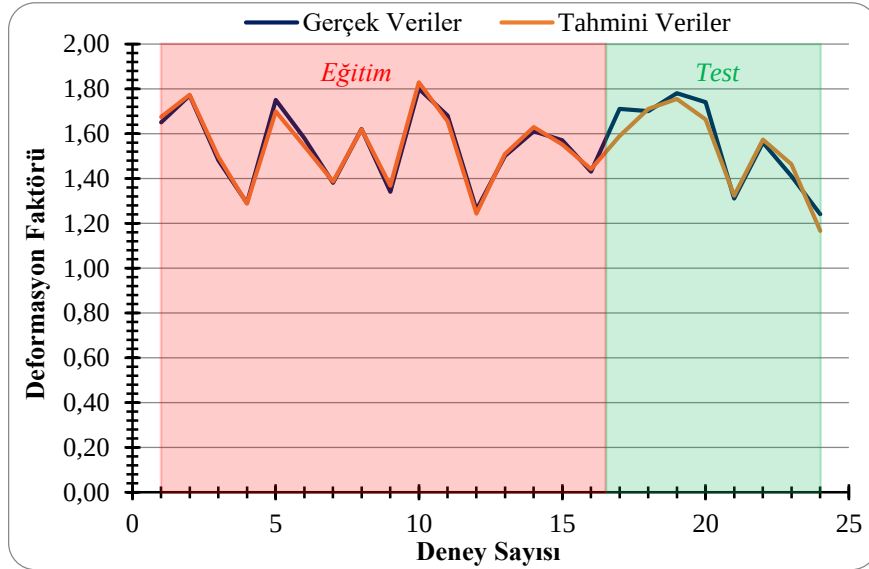
$$F_{dMÇ} = \left(\left(\left(c_0 \times V - \frac{c_1}{c_2 \times f} \right) - \frac{(c_3 + c_4 \times c_5)}{c_6 \times V} \right) \times c_7 + c_8 \right) \quad (6.5)$$

Denklem 6.5’te gösterilen katsayılar sırasıyla $c_0 = -0,58267$, $c_1 = -14,399$, $c_2 = 1,5626$, $c_3 = -19,188$, $c_4 = -22,111$, $c_5 = 20,478$, $c_6 = 0,61913$, $c_7 = -0,0011972$ ve $c_8 = 1,7487$ olarak hesaplanmıştır.

Matkapla delmede delik girişindeki ve çıkışındaki deformasyon faktörleri (F_{dMG} ve $F_{dMÇ}$) için sembolik regresyon yöntemi ile elde edilen denklemlere ilişkin eğitim/test aşamasında gerçek ve tahmin edilen verileri çizgisel olarak gösteren grafikler Şekil 6.27 ve Şekil 6.28’de sunulmuştur. Şekil 6.27 ve 6.28’de, eğitim ve test aşamasındaki lacivert çizgiler deney verilerini, turuncu renkli çizgiler ise geliştirilen genetik ifade tahmin verilerini göstermektedir. Genetik ifade ağacından elde edilen ve denklem ile hesaplanan tahmini değerlerinin gerçek değerlere yakın olduğunu görülmektedir.



Şekil 6.27. F_{dMG} için eğitim ve test aşamasında önerilen GEP ağacına ilişkin gerçek ve tahmini veriler

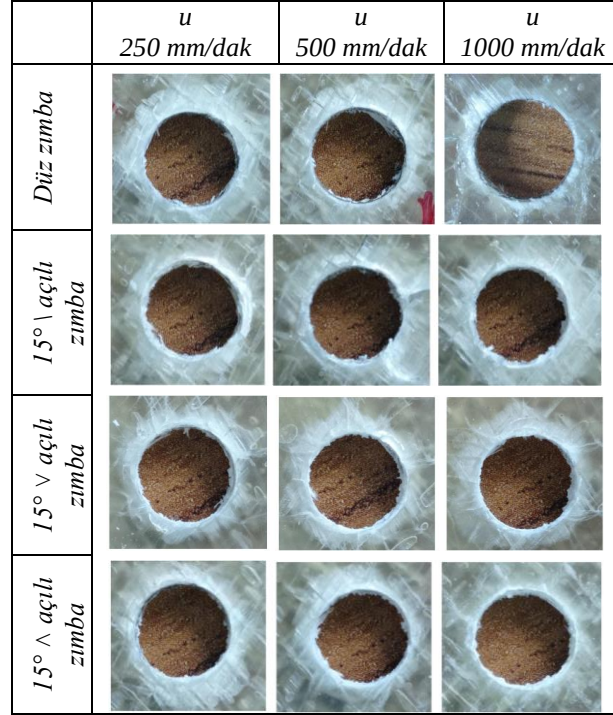


Şekil 6.28. $F_{dMÇ}$ için eğitim ve test aşamasında önerilen GEP ağacına ilişkin gerçek ve tahmini veriler

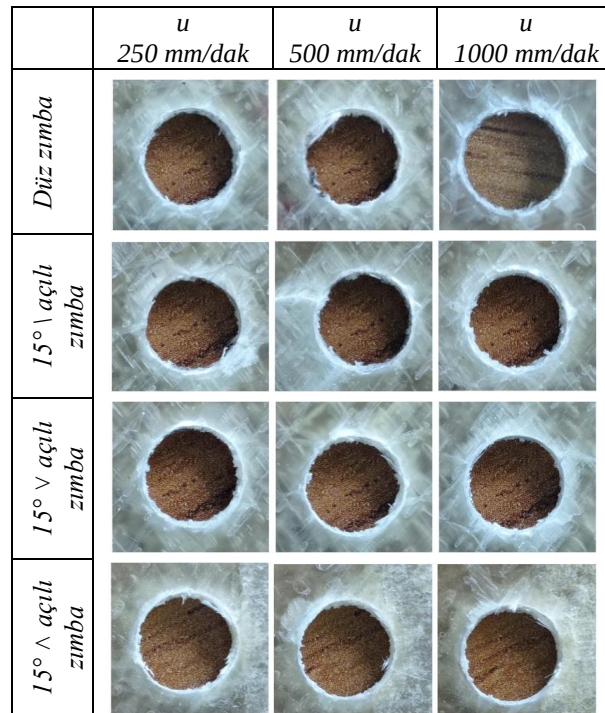
CFTP kompozit malzemelerin matkapla delinmesinde; delik girişindeki ve çıkışındaki deformasyon faktörleri, sembolik regresyon yöntemi ile kolaylıkla analiz edilmiştir. Analizler sonucunda F_{dMG} matkapla delmede delik girişindeki deformasyon faktörü için eğitim aşamasında $R^2 = 0,99$, test aşamasında $R^2 = 0,99$ ve $F_{dMÇ}$ matkapla delmede delik çıkışındaki deformasyon faktörü için eğitim aşamasında $R^2 = 0,98$, test aşamasında $R^2 = 0,92$ ile matematiksel ifadeyi veren eşitlikler elde edilmiştir.

6.4.2. Zımba ile delmede oluşan deformasyon faktörü ve analizi

CFTP kompozit malzemenin farklı zımba cinsleri ve ilerleme hızlarında delinmesi sonucu delik giriş ve çıkışlarında meydana gelen deformasyon görüntüleri sırasıyla Şekil 6.29 ve Şekil 6.30'da gösterilmiştir.



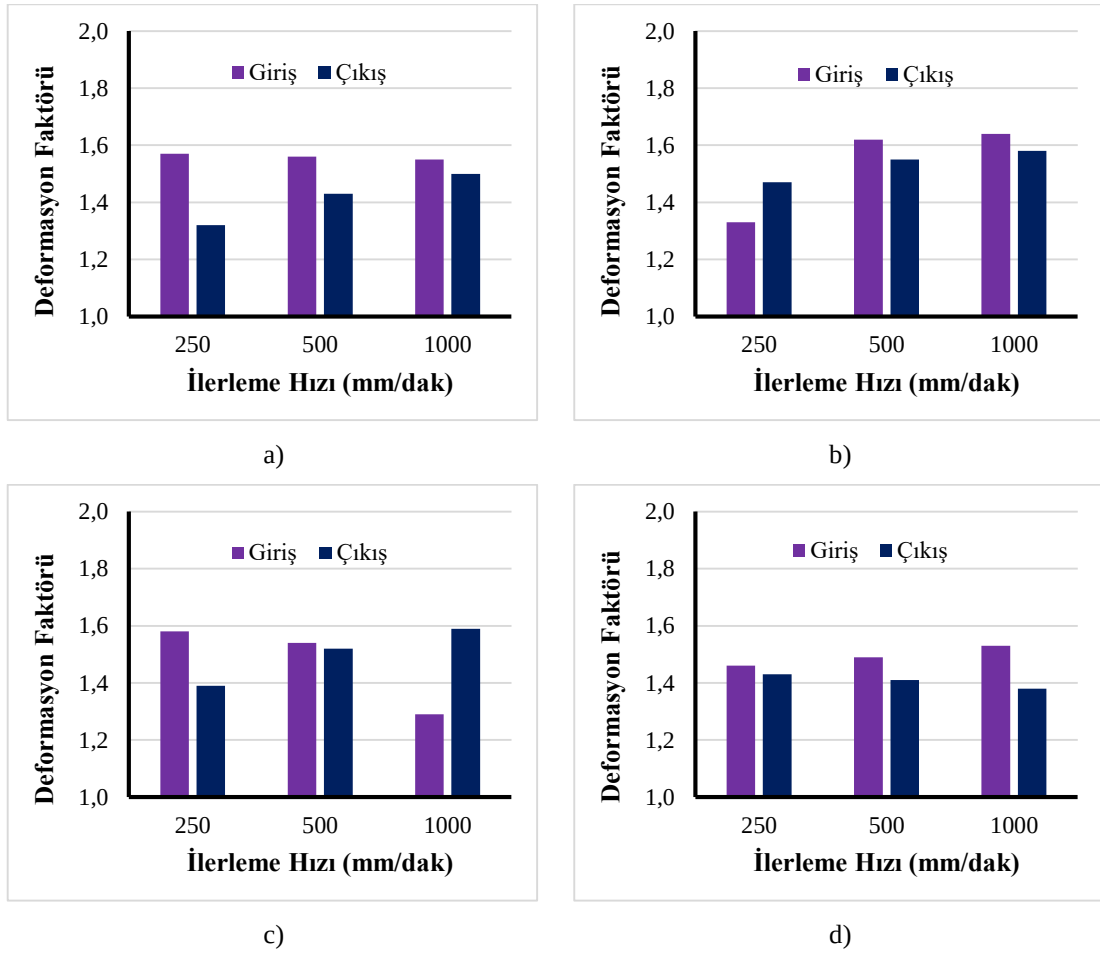
Şekil 6.29. Farklı uç açısına sahip zımba ve ilerleme hızı parametrelerinde delinen kompozitin delik girişinde meydana gelen deformasyon görüntüleri



Şekil 6.30. Farklı uç açısına sahip zımba ve ilerleme hızı parametrelerinde delinen kompozitin delik çıkışında meydana gelen deformasyon görüntüleri

Deformasyon görüntüleri, zımba cinsinin ve ilerleme hızının deformasyon faktörü üzerinde önemli etkilerinin olduğunu göstermektedir. Zımba ile delmeyi matkapla delmeden ayıran önemli husus, zımba ile delmede sıyrılmanın meydana gelmemesi ve deformasyonun tabakalar arası ayrılma biçiminde olması olarak ifade edilebilir.

CFTP kompozitin farklı cins zımbalar ile delinmesinde, ilerleme hızına bağlı deformasyon faktörü grafikleri Şekil 6.31’de verilmiştir.



Şekil 6.31. Zımba ile delmede, ilerleme hızına bağlı deformasyon faktörü grafikleri

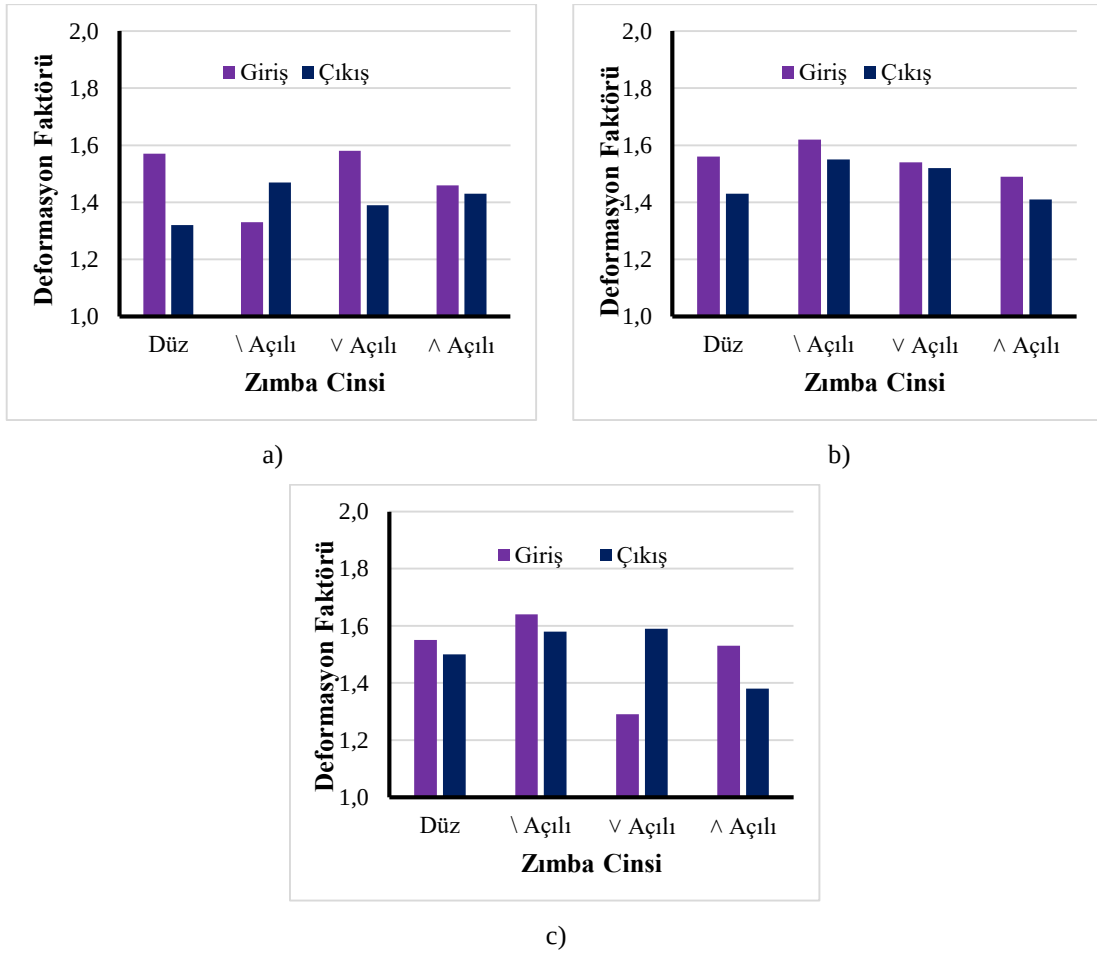
a) Düz zımba, b) 15° \ açılı zımba, c) 15° ∨ açılı zımba ve d) 15° ^ açılı zımba

Şekil 6.31a incelendiğinde; düz zımba tipinde, delik girişindeki deformasyon faktörünün delik çıkışındaki deformasyon faktöründen daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Artan ilerleme hızına bağlı olarak ise deformasyon faktörünün delik girişlerinde düştüğü ve delik çıkışlarında ise arttığı görülmektedir. Delik girişlerinde artan ilerleme hızına bağlı olarak meydana gelen düşüşün çok az olduğu, ancak delik çıkışında ise belirgin bir artışın olduğu gözlenmiştir. Şekil 6.31b’de ise 15° \ açılı zımba ile delmede hem delik girişinde hem de çıkışında artan ilerleme hızına bağlı olarak deformasyon faktörünün arttığı görülmüştür. 250 mm/dak ilerleme hızında delik girişindeki

deformasyon faktörünü delik çıkışıındaki deformasyon faktöründen az iken, 500 mm/dak ve 1000 mm/dak ilerleme hızlarında ise tam tersi olmuştur. Şekil 6.31c’de, $15^\circ \vee$ açılı zımba tipi ile yapılan delme işleminde; delik girişindeki deformasyon faktörü, ilerleme hızına bağlı olarak düşmüştür. Deformasyon faktöründeki düşüş, ilerleme hızının 250 mm/dak’dan 500 mm/dak’ya çıkmasıyla az, 500 mm/dak’dan 1000 mm/dak’ya çıkmasıyla bariz bir şekilde olmuştur. Delik çıkışında ise ilerleme hızının artmasıyla deformasyon faktörü artmıştır. Şekil 6.31d’de, $15^\circ \wedge$ açılı zımba tipi ile yapılan delme işleminde; artan ilerleme hızı ile delik girişindeki deformasyon faktörü artmış, delik çıkışıındaki deformasyon faktörü ise azalmıştır. Bütün zımba tipleri birlikte değerlendirildiğinde; delik girişinde meydana gelen en düşük deformasyon faktörü, $15^\circ \vee$ açılı zımba ile 1000 mm/dak ilerleme hızında 1,29 olarak elde edilirken, en yüksek deformasyon faktörü ise $15^\circ \setminus$ açılı zımbada 1000 mm/dak ilerleme hızında 1,64 olarak elde edilmiştir. Delik çıkışlarında meydana gelen en düşük deformasyon faktörü düz zımba ile 250 mm/dak ilerleme hızında yapılan delme işleminde 1,32 olarak elde edilirken, en yüksek deformasyon faktörü ise $15^\circ \vee$ açılı zımbada 1000 mm/dak ilerleme hızında 1,59 olarak elde edilmiştir.

CFTP kompozitin farklı ilerleme hızlarında delinmesinde, zımba cinsine bağlı deformasyon faktörü grafikleri Şekil 6.32’de verilmiştir.

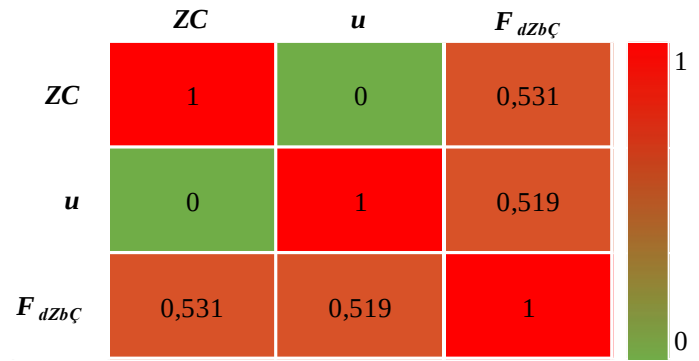
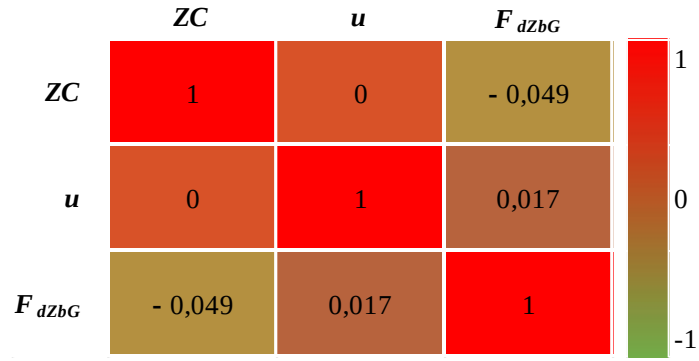
Şekil 6.32’deki grafikler incelendiğinde; 250 mm/dak ilerleme hızında, delik girişlerinde meydana gelen en düşük ve en yüksek deformasyon faktörü sırasıyla 1,33 ile $15^\circ \setminus$ açılı zımbada ve 1,58 ile $15^\circ \vee$ açılı zımbada, delik çıkışlarında meydana gelen en düşük ve en yüksek deformasyon faktörü ise sırasıyla 1,32 ile düz zımbada ve 1,47 ile $15^\circ \setminus$ açılı zımba oluşmuştur. 500 mm/dak ilerleme hızında, delik girişlerinde meydana gelen en düşük ve en yüksek deformasyon faktörü sırasıyla 1,49 ile $15^\circ \wedge$ açılı zımbada ve 1,62 ile $15^\circ \setminus$ açılı zımbada, delik çıkışlarında meydana gelen en düşük ve en yüksek deformasyon faktörü ise sırasıyla 1,41 ile $15^\circ \wedge$ açılı zımbada ve 1,55 ile $15^\circ \setminus$ açılı zımbada görülmüştür. 1000 mm/dak ilerleme hızında, delik girişlerinde meydana gelen en düşük ve en yüksek deformasyon faktörü sırasıyla 1,29 ile $15^\circ \vee$ açılı zımbada ve 1,64 ile $15^\circ \setminus$ açılı zımbada, delik çıkışlarında meydana gelen en düşük ve en yüksek deformasyon faktörü ise sırasıyla 1,38 ile $15^\circ \wedge$ açılı zımbada ve 1,59 ile $15^\circ \vee$ açılı zımbada oluşmuştur.



Şekil 6.32. Zimba cinsine bağlı deformasyon faktörü grafikleri
a) 250 mm/dak, b) 500 mm/dak ve c) 1000 mm/dak

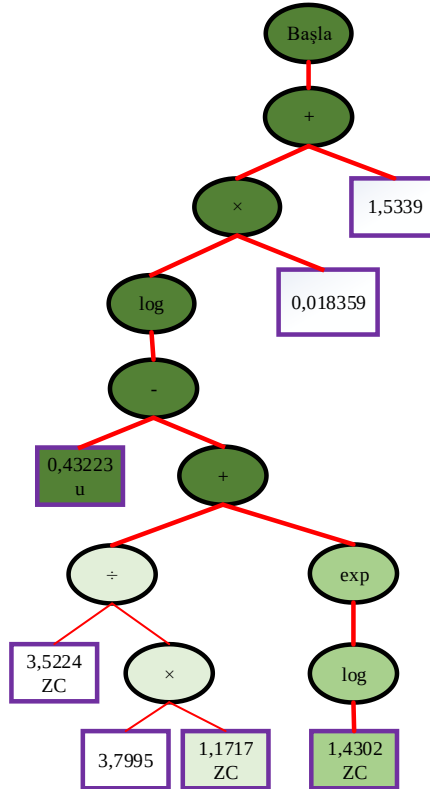
Zimba ile delmede oluşan deformasyon faktörü (F_{dzb}) bağımlı değişkeni üzerine ZC zimba cinsi ve u ilerleme hızı bağımsız değişkenlerinin etkilerini sembolik regresyon yöntemi ile analiz edebilmek için deneysel sonuçlardan elde edilen veriler programa yüklenmiş ve analiz edilmiştir. Bağımsız değişkenlere bağlı olarak zimba ile delmede delik girişindeki deformasyon faktörü (F_{dzbG}) ve zimba ile delmede delik çıkışındaki deformasyon faktörü ($F_{dzbÇ}$) verilerine ait korelasyon matrisleri elde edilmiştir ve elde edilen korelasyon matrisleri Şekil 6.33'te verilmiştir.

Şekil 6.33'te verilen korelasyon matris tablosu incelenecek olursa, zimba ile delmede delik girişindeki ve çıkışındaki deformasyon faktörleri (F_{dzbG} ve $F_{dzbÇ}$) üzerine ZC zimba cinsi ve u ilerleme hızının etkisinin olduğu görülmektedir. Delik girişi ve çıkışı için ZC zimba cinsi ve u ilerleme hızının zimba ile delmede delik girişindeki ve çıkışındaki deformasyon faktörleri (F_{dzbG} ve $F_{dzbÇ}$) ile ilişkisi birbirine yakın olsa da her ikisinde de en kuvvetli ilişki ZC zimba cinsi ile olmuştur. F_{dzbG} 'de korelasyon matrisindeki değerler 0'a yakınken, $F_{dzbÇ}$ 'de değerler 1'e doğru yaklaşmaya çalışmıştır.

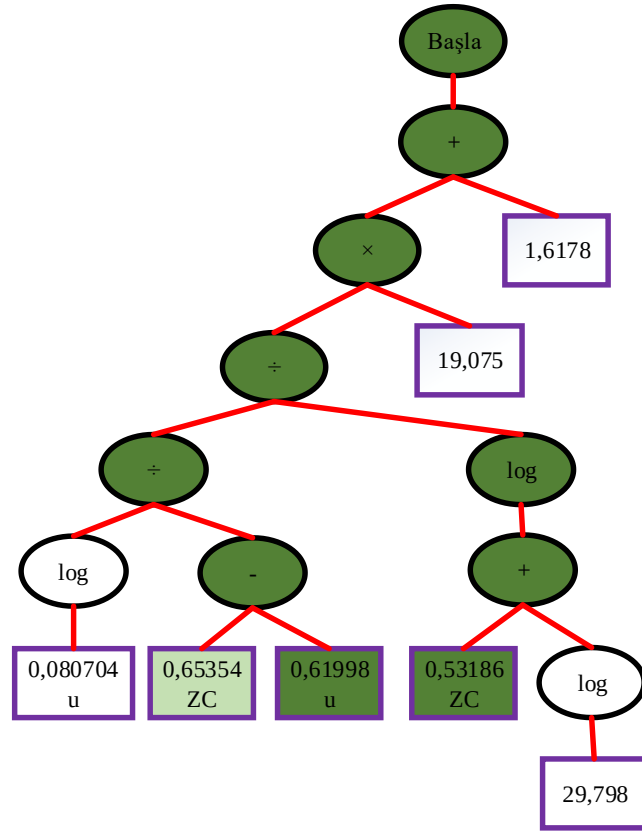


Şekil 6.33. F_{dzb} için elde edilen değişkenler arası korelasyon matrisleri

Zimba ile delmede, delik giriş ve çıkışındaki deformasyon faktörleri için GEP ağaçları üretilmiş ve önerilen GEP ağaçları Şekil 6.34 ve Şekil 6.35'te verilmiştir.

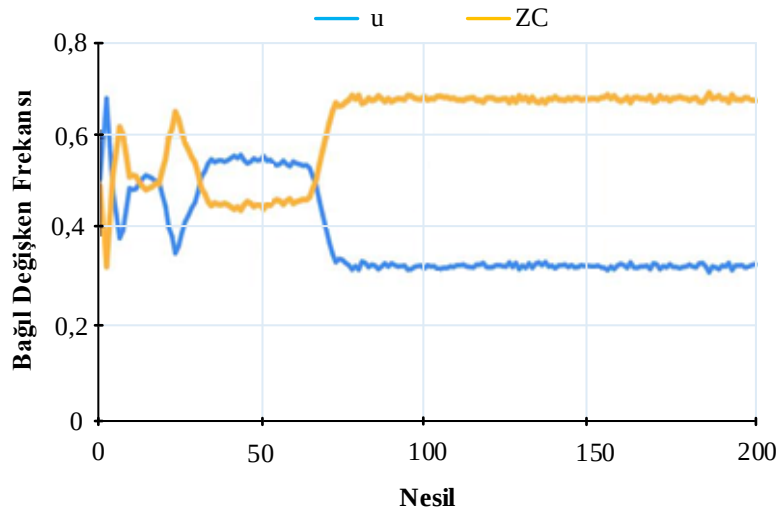


Şekil 6.34. F_{dzbG} tahmini için önerilen GEP ağacı

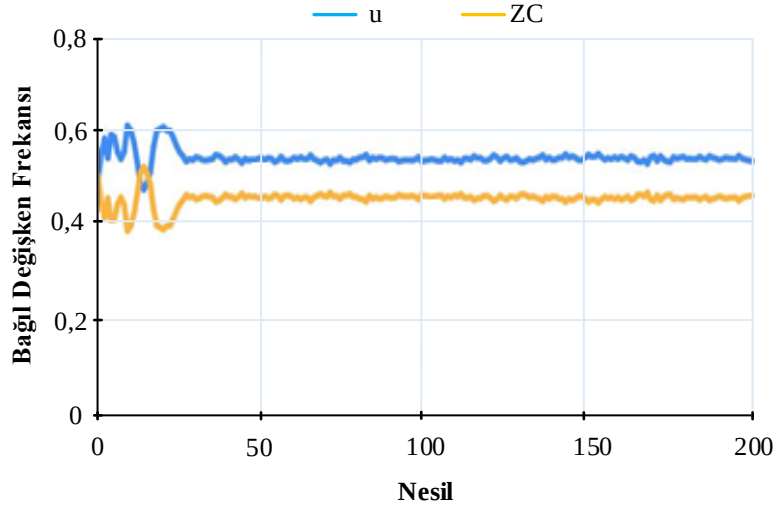


Şekil 6.35. $F_{dzb\check{C}}$ tahmini için önerilen GEP ağacı

Şekil 6.34 ve 6.35'teki zımba ile delmede delik girişindeki ve çıkışındaki deformasyon faktörleri (F_{dzbG} ve $F_{dzb\check{C}}$) için oluşturulan GEP ağaçlarında 7'şer adet terminal ve 9'ar adet düğüm bulunmaktadır. Her iki GEP ağacı logaritmik fonksiyonlar içerip benzer matematiksel işlemlerden geçmiştir. F_{dzbG} ve $F_{dzb\check{C}}$ için GEP ağaçlarındaki fonksiyonlara geçirilen ZC zımba cinsi ve u ilerleme hızı parametrelerinin nesiller boyunca değişim grafikleri Şekil 6.36 ve Şekil 6.37'de verilmiştir.



Şekil 6.36. F_{dzbG} için nesiller boyunca etki değerlerinin değişim frekansı



Şekil 6.37. $F_{dzbÇ}$ için nesiller boyunca etki değerlerinin değişim frekansı

Şekil 6.36’da, F_{dzbG} zımba ile delmede delik girişindeki deformasyon faktörü için bağımsız değişkenler yaklaşık 75. nesile kadar ani değişiklikler sergilemiştir ve bu nesilden sonra bağımsız değişkenlerde değişim olmamıştır ve en iyi genetik ifade yaklaşık olarak çözülmüştür.

Şekil 6.37’de, $F_{dzbÇ}$ zımba ile delmede delik çıkışındaki deformasyon faktörü için bağımsız değişkenler yaklaşık 30. nesile kadar ani değişiklikler sergilemiştir ve bu nesilden sonra bağımsız değişkenlerde değişim olmamıştır. En iyi genetik ifade yaklaşık 30. nesilde çözülmüştür.

F_{dzbG} zımba ile delmede delik girişindeki deformasyon faktörü öncelikle ZC zımba cinsinden ve ardından u ilerleme hızından etkilenmiştir. F_{dzbG} ’de, önerilen GEP ağacı için eğitim aşamasında $R^2 = 0,97$ ve test aşamasında $R^2 = 0,90$ olarak hesaplanmıştır. F_{dzbG} zımba ile delmede delik girişindeki deformasyon faktörü eşitliği, Denklem 6.6’daki gibi elde edilmiştir.

$$F_{dzbG} = \left(\log \left(\left(c_0 \times u - \left(\frac{c_1 \times ZC}{c_2 \times c_3 \times ZC} + \exp(\log(c_4 \times ZC)) \right) \right) \right) \times c_5 + c_6 \right) \quad (6.6)$$

Denklem 6.6’da gösterilen katsayılar sırasıyla $c_0 = 0,43223$, $c_1 = 3,5224$, $c_2 = 3,7995$, $c_3 = 1,1717$, $c_4 = 1,4302$, $c_5 = 0,018359$ ve $c_6 = 1,5339$ olarak hesaplanmıştır.

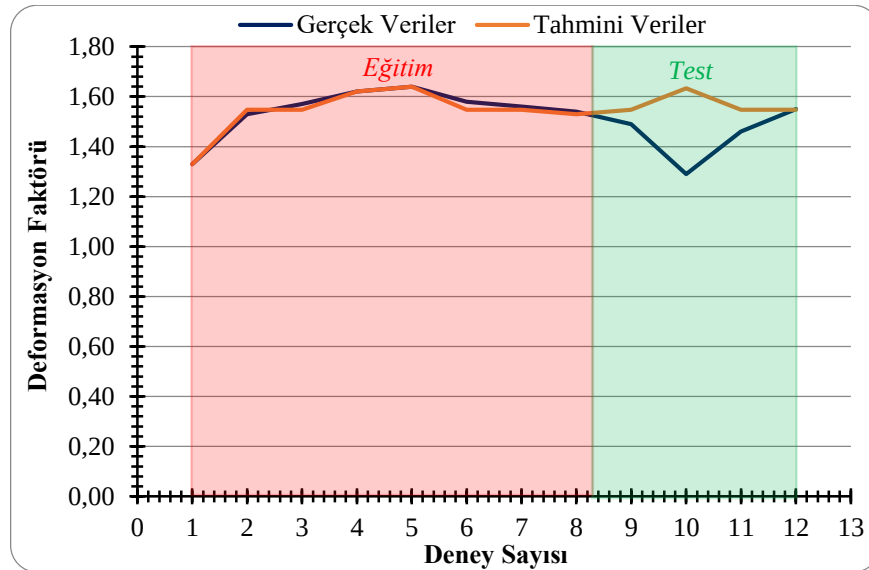
$F_{dzbÇ}$ zımba ile delmede delik çıkışındaki deformasyon faktörü, F_{dzbG} ’de olduğu gibi öncelikle ZC zımba cinsinden ve ardından u ilerleme hızından etkilenmiştir. $F_{dzbÇ}$ ’de

önerilen GEP ağacı için eğitim aşamasında $R^2 = 0,94$, test aşamasında $R^2 = 0,98$ olarak hesaplanmıştır. $F_{dzB\zeta}$ zımba ile delmede delik çıkışındaki deformasyon faktörü eşitliği, Denklem 6.7'deki gibi elde edilmiştir.

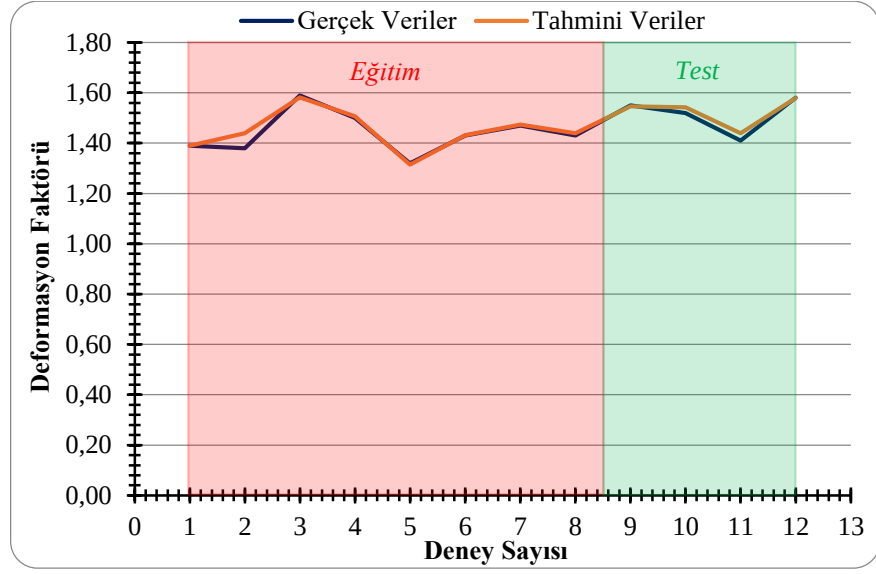
$$F_{dzB\zeta} = \left(\frac{\frac{\log(c_0 \times u)}{(c_1 \times ZC - c_2 \times u)}}{\log((c_3 \times ZC + \log(c_4)))} \times c_5 + c_6 \right) \quad (6.7)$$

Denklem 6.7'de gösterilen katsayılar sırasıyla $c_0 = 0,080704$, $c_1 = 0,65354$, $c_2 = 0,61998$, $c_3 = 0,53186$, $c_4 = 29,798$, $c_5 = 19,075$ ve $c_6 = 1,6178$ olarak hesaplanmıştır.

Zımba ile delmede delik girişindeki ve çıkışındaki deformasyon faktörleri (F_{dzBG} ve $F_{dzB\zeta}$) için sembolik regresyon yöntemi ile elde edilen denklemlere ilişkin eğitim/test aşamasında gerçek ve tahmin edilen verileri çizgisel olarak gösteren grafikler sırasıyla Şekil 6.38 ve Şekil 6.39'da sunulmuştur. Şekil 6.38'de; test edilen 10. deneydeki tahmini veri, gerçek veriden yüksek çıksa da genel olarak diğer verilerin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu durum eğitim aşamasındaki R^2 'nin 0,97 ve test aşamasındaki R^2 'nin 0,90 çıkmasıyla açıklanabilir. Şekil 39'da, gerçek ve tahmini veriler birbirine oldukça yakın çıkmıştır, ancak eğitim aşamasında 2. deneydeki tahmini veri kısmen gerçek veriden yüksek çıkmıştır. Bu durum da eğitim aşamasındaki R^2 'nin 0,94 ve test aşamasındaki R^2 'nin 0,98 çıkmasıyla açıklanabilir. Sonuç olarak zımba ile delmede, deformasyon faktörleri kolaylıkla sembolik regresyon yöntemiyle analiz edilmiştir.



Şekil 6.38. F_{dzBG} için eğitim ve test aşamasında önerilen GEP ağacına ilişkin gerçek ve tahmini veriler



Şekil 6.39. $F_{dzb\zeta}$ için eğitim ve test aşamasında önerilen GEP ağacına ilişkin gerçek ve tahmini veriler

7. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, CFTP kompozit malzeme; hem farklı kesme hızı ve ilerleme hızı parametrelerinde matkapla hem de farklı ilerleme hızı ve zımba cinsi parametrelerinde zımba ile delinmiştir. Delme yönteminin ve parametrelerinin kesme kuvveti ve deformasyon faktörü üzerine etkileri deneysel olarak araştırılmış ve sembolik regresyon yöntemi ile analiz edilmiştir. Çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- ✓ Matkapla delmede, kesme hızının belirli bir seviyeye kadar artması, kesme kuvvetini düşürmüştür, belirli bir kesme hızı seviyesinden sonra artan kesme hızı kesme kuvvetini arttırmaya başlamıştır. Artan ilerleme hızı, kesme kuvvetinin artmasına neden olmuştur. Matkapla delmede oluşan kesme kuvveti üzerinde en önemli parametrenin ilerleme hızı ve ardından kesme hızı olduğu analiz edilmiştir.
- ✓ Zımba ile delmede hem zımba cinsi hem de ilerleme hızı kesme kuvvetleri üzerinde etkili olmuştur. Düz zımbada, ilerleme hızı arttıkça kesme kuvveti önce artmış daha sonra düşmüştür. $15^\circ \setminus$ açılı zımba ile delme işleminde ise kesme kuvveti düz zımbanın aksine ilerleme hızı arttıkça düşmüştür. Bu zımba tipinde ilerleme hızı kesme kuvveti üzerinde önemli bir etkiye sahip olmuştur. $15^\circ \vee$ açılı zımba ile delme işleminde düz açılı zımbaya benzer şekilde artan ilerleme hızı kesme kuvvetini önce artırmış daha sonra düşürmüştür. $15^\circ \wedge$ açılı zımba ile delmede ise düz ve $15^\circ \vee$ açılı zımbaya benzer kesme kuvveti eğilim grafiği elde edilmiştir. Zımba ile delmede oluşan kesme kuvveti üzerine en önemli parametrenin zımba cinsi ve ardından ilerleme hızı olduğu analiz edilmiştir.
- ✓ Matkapla delmede, ilerleme hızı ve kesme hızının artışına bağlı olarak hem delik girişindeki hem de delik çıkışındaki deformasyon faktörü artmıştır. Delik çıkışındaki deformasyon faktörü delik girişindeki deformasyon faktöründen daha yüksek elde edilmiştir. Matkapla delmede, delik girişindeki deformasyon faktörü üzerine ilerleme hızı ve kesme hızının ilişkisi birbirine yakın olsa da delik girişindeki deformasyon faktörü üzerine etki eden en önemli parametrenin kesme hızı olduğu, delik çıkışındaki deformasyon faktörü üzerine etki eden en önemli parametrenin ise ilerleme hızı olduğu analiz edilmiştir.
- ✓ Zımba ile delmede, ilerleme hızının artması bazı zımba tiplerinde deformasyon faktörünü arttırırken bazılarında ise azaltmıştır.

- ✓ Düz zımba ile yapılan delmede, delik girişindeki deformasyon faktörü, delik çıkışındaki deformasyon faktöründen daha yüksek elde edilmiştir. Artan ilerleme hızına bağlı olarak deformasyon faktörü delik girişlerinde düşmüş ve delik çıkışlarında ise artmıştır. $15^\circ \setminus$ açılı zımba ile delmede hem delik girişinde hem de çıkışında artan ilerleme hızına bağlı olarak deformasyon faktörü artmıştır. $15^\circ \vee$ açılı zımba ile yapılan delme işleminde, artan ilerleme hızıyla delik girişindeki deformasyon faktörü düşmüş, delik çıkışındaki deformasyon faktörü ise artmıştır. $15^\circ \wedge$ açılı zımba ile yapılan delme işleminde ise artan ilerleme hızıyla delik girişindeki deformasyon faktörü artmış, delik çıkışındaki deformasyon faktörü ise düşmüştür. Zımba ile delmede, delik giriş ve çıkışındaki deformasyon faktörü üzerine en önemli parametrenin zımba cinsi olduğu analiz edilmiştir.

7.1. Öneriler

CFTP kompozit malzemelerin matkapla delinmesinde, düşük kesme kuvveti ve düşük deformasyon faktörü değerleri elde etmek için kesme hızı ve ilerleme hızlarının düşük tutulması gerekmektedir. Daha düşük kesme hızı ve ilerleme hızlarında yapılacak delme işlemlerinde daha kaliteli delikler elde edilebilir. Ayrıca matkap cinsi ve geometrisinin de delik kalitesi üzerinde etkisi göz önünde bulundurularak delme deneyleri yapılabilir. Böylece kesme hızı ve ilerleme hızı parametrelerine ilaveten kesici takım malzemesi ve geometrisi gibi parametreler de analizlere dahil edilerek matematiksel ifadeler oluşturulabilir.

CFTP kompozit malzemelerin zımba ile delinmesinde, düşük kesme kuvveti ve düşük deformasyon faktörü değerleri elde etmede zımba cinsi önemli bir parametre olduğu için farklı uç açılarıyla yeni araştırmalar yapılmalı ve yapılan araştırmalarda kalıp boşluğu, kalıp tasarımı gibi faktörler de göz önünde bulundurularak literatüre daha fazla çalışma kazandırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- Abdullah, A. B., Chan, H. Y., Zain, M. S. M., Ishak, N. and Samad, Z., 2019, Precision punching: A new method in hole-making on composite panels, In *Hole-Making and Drilling Technology for Composites* (pp. 115-133), Woodhead Publishing.
- Abdullah, M. S., Abdullah, A. B. and Samad, Z., 2019, Review of hole-making technology for composites, In *Hole-Making and Drilling Technology for Composites* (pp. 1-15), Woodhead Publishing.
- Anonim, 2022, <https://boardinginfo.com/kompozit-malzemeler-ticari-havacilik-sektorunu-nasil-degistirdi/#:~:text=Boeing%20787%2C%20a%C4%9F%C4%B1rl%C4%B1k%20olarak%20%25%2050,kullan%C4%B1larak%20sadece%20a%C4%9F%C4%B1rl%C4%B1ktan%20tasarruf%20edilmez> [Ziyaret Tarihi: 21.03.2022].
- Arul, S., Vijayaraghavan, L., Malhotra, S. K. and Krishnamurthy, R., 2006, Influence of tool material on dynamics of drilling of GFRP composites, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29 (7), 655-662. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-2581-5>
- Callister, W. D. and Rethwisch, D. G., 2018, Materials science and engineering: an introduction, 9th Edition, New York: Wiley, 990 pages.
- Campbell, F. C., 2010, Structural composite materials, ASM international, Materials Park, Ohio 44073-0002, 629 pages.
- Ceritbinmez, F. and Yapıcı, A., 2021, An investigation of punching the MWCNTs doped composite plates by using different cutting profiles, *Tehnički vjesnik*, 28(2), 385-390. <https://doi.org/10.17559/TV-20191026222142>
- Ceritbinmez, F., Özkan, V., Saracoglu, G. and Yapici, A., 2022, MWCNTs doped GFRPs drilling: crosscheck among holes obtained by alternative manufacturing methods, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118, 33-41. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07181-5>
- Çelik, Y. H. and Fidan, Ş., 2022, Analysis of cutting parameters on tool wear in turning of Ti-6Al-4V alloy by multiple linear regression and genetic expression programming methods, *Measurement*, 200, 111638. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111638>
- Dahiya, A. K., Bhuyan, B. K. and Kumar, S., 2022, Perspective study of abrasive water jet machining of composites - a review, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 36 (1), 213-224. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-1220-x>
- Davim, J. P., Reis, P. and Antonio, C. C., 2004, Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up, *Composites Science and Technology*, 64 (2), 289-297. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00253-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00253-7)

- Dhilipkumar, T. and Rajesh, M., 2023, Influence of manufacturing process and GFRP pin loading on shear and dynamic behaviour of composite joints, *The Journal of Adhesion*, 99 (4), 538-557. <https://doi.org/10.1080/00218464.2022.2025782>
- Ekici, E. ve Işık, B., 2009, Cam elyaf takviyeli polimer kompozit malzemenin delinmesi esnasında oluşan yüzey hasarının deneysel olarak incelenmesi, 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, 13-15 Mayıs, Karabük, Türkiye.
- Erturk, A. T., Vatansever, F., Yazar, E. and Guven, E. A., 2021, Effects of cutting temperature and process optimization in drilling of GFRP composites, *Journal of Composite Materials*, 55 (2), 235-249. <https://doi.org/10.1177/0021998320947143>
- Ferreira, C., 2001, Gene expression programming: A new adaptive algorithm for solving problems, *arXiv preprint cs/0102027*.
- Gemi, L., Morkavuk, S., Köklü, U. and Gemi, D. S., 2019, An experimental study on the effects of various drill types on drilling performance of GFRP composite pipes and damage formation, *Composites Part B: Engineering*, 172, 186-194. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.023>
- Gemi, L., Köklü, U., Yazman, Ş. and Morkavuk, S., 2020a, The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-1 mechanical characterization and drilling tests, *Composites Part B: Engineering*, 186, 107787. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107787>
- Gemi, L., Morkavuk, S., Köklü, U. and Yazman, Ş., 2020b, The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-2 damage analysis and surface quality, *Composite Structures*, 235, 111737. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111737>
- Hansda, S. and Banerjee, S., 2014, Optimizing multi characteristics in drilling of GFRP composite using utility concept with Taguchi's approach, *Procedia materials science*, 6, 1476-1488. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.127>
- John, K. M., Kumaran, S. T., Kurniawan, R. and Ahmed, F., 2022, Evaluation of thrust force and delamination in drilling of CFRP by using active spring restoring backup force, *Materials Today: Proceedings*, 49, 269-274. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.033>
- Kalita, K., Ghadai, R. K. and Bansod, A., 2022, Sensitivity analysis of GFRP composite drilling parameters and genetic algorithm-based optimisation, *International Journal of Applied Metaheuristic Computing*, 13 (1), 1–17. <https://doi.org/10.4018/IJAMC.290539>
- Kannan, M., Sharma, V. and Kumar, M., 2021, Experimental investigations on drilling of GFRP composite using solid and hollow drill point geometry, *In International Conference on Engineering, Construction, Renewable Energy, and Advanced Materials, 1ST ICECREAM – 015*, Jakarta.

- Karaca, F., 2016, Cam elyaf takviyeli plastik kompozitlerde delme parametrelerinin deformasyon faktörüne etkisinin araştırılması, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28 (2), 23-27.
- Kilickap, E., 2010, Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite, *Expert Systems with Applications*, 37 (8), 6116–6122. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.02.023>
- Kubher, S., Gururaja, S. and Zitoune, R., 2022, Coupled thermo-mechanical modeling of drilling of multi-directional polymer matrix composite laminates. *Composites Part A*, 156, 106802. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.106802>
- Kumar, D., Singh, K. K. and Zitoune, R., 2016, Experimental investigation of delamination and surface roughness in the drilling of GFRP composite material with different drills, *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 2 (2), 47-56. <https://doi.org/10.1080/20550340.2016.1187434>
- Mathew, J., Ramakrishnan, N. and Naik, N. K., 1999, Investigations into the effect of geometry of a trepanning tool on thrust and torque during drilling of GFRP composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 91 (1-3), 1-11. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00416-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00416-6)
- Miracle, D. B. and Donaldson, S. L., 2001, Introduction to composites, *Composites, ASM handbook*, 21, pp. 39-65. Materials Park, OH: ASM international.
- Mohan, N. S. and Kulkarni, S. M., 2018, Influence of drilling parameters on torque during drilling of GFRP composites using response surface methodology, *In Journal of Physics: Conference Series*, 953 (1), 012031, IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/953/1/012031>
- Naresh, K., Krishnapillai, S. and Velmurugan, R., 2018, Experimental and theoretical investigation of a unidirectional glass/epoxy composites under tensile and impact loading, *Materials Today: Proceedings*, 5 (11), 25174-25184.
- Naresh, K., Krishnapillai, S. and Velmurugan, R., 2017, Effect of fiber orientation on carbon/epoxy and glass/epoxy composites subjected to shear and bending, *In Solid State Phenomena*, 267, 103-108. Trans Tech Publications Ltd.
- Nijssen, R.P.L., 2015, Composite materials: an introduction, A VKCN publication, Netherlands: Inholland University of Applied Sciences, 150 pages.
- Norwood, L. S., 1994, Fiber reinforced polymers, In *Handbook of polymer composites for engineers* (pp. 3-69), Woodhead Publishing, Published in association with the British Plastics Federation, Cambridge England.
- Ogawa, K., Aoyama, E., Inoue, H., Hirogaki, T., Nobe, H., Kitahara, Y., Katayama, T and Gunjima, M., 1997, Investigation on cutting mechanism in small diameter drilling for GFRP (thrust force and surface roughness at drilled hole wall), *Composite Structures*, 38 (1-4), 343-350. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(97\)00069-X](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(97)00069-X)

- Palanikumar, K., 2011, Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites, *Measurement*, 44 (10), 2138–2148.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.07.023>
- Pereszalai, C., Geier, N., Poór, D. I., Balázs, B. Z. and Póka, G., 2021, Drilling fibre reinforced polymer composites (CFRP and GFRP): An analysis of the cutting force of the tilted helical milling process, *Composite Structures*, 262, 113646.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113646>
- Prasad, K. S. and Chaitanya, G., 2019, Analysis of delamination in drilling of GFRP composites using Taguchi Technique, *Materials Today: Proceedings*, 18, 3252–3261. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.201>
- Prasanth, I. S. N. V. R., Ravishankar, D. V. and Hussain, M. M., 2022, Influence of milling process parameters and significance of tools to improve the surface quality of GFRP composites, *Machining Science and Technology*, 26 (1), 120–136.
<https://doi.org/10.1080/10910344.2021.1998830>
- Ramkumar, J., Malhotra, S. K. and Krishnamurthy, R., 2004, Effect of workpiece vibration on drilling of GFRP laminates, *Journal of Materials Processing Technology*, 152 (3), 329–332. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00622-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00622-8)
- Reis, P. N. B., Neto, M. A. and Amaro, A. M., 2018, Effect of the extreme conditions on the tensile impact strength of GFRP composites, *Composite Structures*, 188, 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.001>
- Sahami, M. and Heidary, H., 2020, Parametric study on drilling of GFRP composite pipe produced by filament winding process in different backup condition, *Composite Structures*, 234, 111661. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111661>
- Sheikh-Ahmad, J. Y., 2009, Machining of polymer composites, New York: Springer, 321 pages. DOI:10.1007/978-0-387-68619-6
- Singaravel, B., Radhika, M., Asif, M. M. and Reddy, K. P., 2021, Analysis of hole quality errors in drilling of GFRP composite, *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1057 (1) 012069, IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1057/1/012069>
- Solati, A., Hamed, M. and Safarabadi, M., 2019a, Combined GA-ANN approach for prediction of HAZ and bearing strength in laser drilling of GFRP composite, *Optics and Laser Technology*, 113, 104–115.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.12.016>
- Solati, A., Hamed, M. and Safarabadi, M., 2019b, Comprehensive investigation of surface quality and mechanical properties in CO₂ laser drilling of GFRP composites, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102 (1), 791–808. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3164-6>

- Steiger, J. H., 1980, Tests for comparing elements of a correlation matrix, *Psychological bulletin*, 87 (2), 245.
- Tonshoff, H. L., Spintig, W., König, W., Neises, A., 1994, Machining of holes developments in drilling technology, *Annals of the CIRP*, 43, 551-560.
- Tsao, C. C., 2012, Drilling processes for composites, In *Machining technology for composite materials: Principles and practice*, (pp. 17-64), Woodhead Publishing.
- Veerakumar, V. G. S., Shanmugavel, B. P. and Harish, S., 2021, On the influence of the functionalization of graphene nanoplatelets and glass fiber on the mechanical properties of GFRP composites, *Applied Composite Materials*, 28 (4), 1127-1152. <https://doi.org/10.1007/s10443-021-09908-9>
- Wallenberger, F. T. 2001, Introduction to reinforcing fibers, *Composites, ASM handbook*, 21, pp. 70-80. Materials Park, OH: ASM international.
- Yazman, Ş., 2021, The effects of back-up on drilling machinability of filament wound GFRP composite pipes: Mechanical characterization and drilling tests, *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 1535-1552. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.054>
- Yıldız, H., 2015, Ti-6AL-4V alaşımlarının delinmesinde kesme parametrelerinin delik üzerine ve kesici takıma etkisinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Batman.
- Younossi, O., Kennedy, M. and Graser, J. C., 2001, Military airframe costs: The effects of advanced materials and manufacturing processes, Rand Corp Santa Monica Ca, 166 pages.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : İsmail IŞIK
Uyruğu : T.C.

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Üniversite	: Gazi Üniversitesi, Ankara	2001
Üniversite	: Batman Üniversitesi, Batman	2021
Yüksek Lisans	: Batman Üniversitesi, Batman	
Doktora	:	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
-----	-------	--------

UZMANLIK ALANI : Konstrüksiyon ve İmalat

YABANCI DİLLER : İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR

Işık, İ., Çelik, Y.H., 2023, Cam fiber takviyeli polimer (CFTP) kompozitlerin delinmesinde kesme hızının kesme kuvveti ve deformasyon faktörü üzerine etkisi, *2nd International Conference on Innovative Academic Studies-ICIAS 2023*, pp. 87-91, January 28-31, Konya-Türkiye.