



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TiO₂ DOLGULU CAM VE KARBON ELYAF TAKVİYELİ
KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN VE
KRİYOJENİK KESİCİ TAKIMLAR İLE FREZELENMESİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Muhammed TAKA

**Ağustos-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TiO₂ DOLGULU CAM VE KARBON ELYAF TAKVİYELİ
KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN VE
KRİYOJENİK KESİCİ TAKIMLAR İLE FREZELENMESİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Muhammed TAKA

**Danışman
Doç. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ**

Diğer Jüri Yeleri

Prof. Dr. Hakan DİLİPAK Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

**Ağustos-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammed TAKA tarafından hazırlanan “TiO₂ Dolgulu Cam Ve Karbon Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin ve Kriyojenik Kesici Takımlar İle Frezelenmesinin Araştırılması” adlı tez çalışması 20/08/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Hakan DİLİPAK

.....

Danışman

Doç. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

.....

Üye

Prof. Dr. Yahya Hışman ÇELİK

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

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 beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Muhammed TAKA
Tarih: 20/08/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TiO₂ DOLGULU CAM VE KARBON ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN VE KRIYOJENİK KESİCİ TAKIMLAR İLE FREZELENMESİNİN ARAŞTIRILMASI

Muhammed TAKA

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

2025, 78 Sayfa

Bu çalışmada, dolgusuz ve nano titanyum dioksit (TiO₂) dolgulu karbon ve cam elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri incelenmiş olup kriyojenikli kesici takım ve TiO₂ dolgusunun frezeleme sonuçları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Dolgulu kompozitlerde TiO₂ Ağırlıkça (%1) olarak ilave edilmiş olup tüm kompozitler el yatırma yöntemiyle üretilmiştir. Kompozitlerin çekme, eğme ve basma mekanik testleri yapıldıktan sonra çekme testi sonrası kopma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri incelenmiştir. Ayrıca kompozitler kriyojenikli ve kriyojeniksiz kesici takımlarla farklı kesme parametrelerinde frezelenerek kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülükleri ve talaş morfolojileri incelenmiştir. Her iki elyaf tipi için TiO₂ dolgu parçacık ilavesinin kompozitlerin çekme, basma ve eğme dayanımlarını geliştirdiği belirlenmiştir. TiO₂ dolgusu kompozitlerin çekme dayanımında %8 ile %12 arasında bir artış sağlamıştır. %1 oranında nano TiO₂ dolgusu cam elyaf takviyeli kompozitlerde (CETK) eğilme dayanımı 429 MPa'a, karbon elyaf takviyeli kompozitlerde (KETK) ise 632 MPa'a çıkarmıştır. TiO₂ dolgusu KETK'lerde basma mukavemetinde %5 oranında CETK'lerde ise yaklaşık %7 katkı sağlamıştır. SEM ile incelenen TiO₂ dolgulu kompozitin kırılma yüzeyinde, elyafların belirli bir bölgede yoğunlaştığı ve toplu elyaf demetleri halinde koptuğu görülmüştür. CETK ve KETK'lerin frezelenmesinde ilerleme oranı artışı kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerlerinin artmasına neden olurken, kesme hızının artışı ise kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerlerinin azalmasını sağlamıştır. Ayrıca TiO₂ dolgusu kompozitlerin frezelenmesinde kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerlerini düşürmüştür. Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlem, hem CETK hem de KETK'lerde kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri üzerinde düşürücü bir etki yapmıştır. TiO₂ dolgulu CETK ve KETK'lerin frezelenme sonrası talaşların SEM'leri incelendiğinde elyaf parçacıklarının boylarının daha kısa olduğu ve daha homojen bir yapıda olduğu tespit edilmiştir. Kriyojenikli kesici takım ile frezelenen CETK ve KETK'lerin talaş morfoloji incelendiğinde küçük elyaf parçacıkların ve öbeklenmiş elyaf demetlerin bir arada olduğu bir talaş yapısı gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: TiO₂, Cam elyaf, Karbon elyaf, Kompozit, Mekanik özellikler, Kriyojenik işlem, Frezeleme.

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF TiO₂ FILLED GLASS AND CARBON FIBER REINFORCED COMPOSITES AND THEIR MILLING WITH CRYOGENIC CUTTING TOOLS

Muhammed TAKA

Batman University Graduate Education Institute

Mechanical Engineering Department of Science

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ

2025, 78 Pages

In this study, the mechanical properties of unfilled and nano titanium dioxide (TiO₂) filled carbon and glass fiber reinforced composites were investigated and the effect of cryogenic cutting tool and TiO₂ filler on milling results was investigated. TiO₂ was added as 1% by weight in filled composites and all composites were produced by hand lay-up method. After conducting tensile, flexural, and compressive mechanical tests on the composites, scanning electron microscope (SEM) images of the fracture surfaces were examined after the tensile tests. Furthermore, the composites were milled using cryogenic and non-cryogenic cutting tools under different cutting parameters to investigate cutting forces, surface roughness, and chip morphology. For both fiber types, the addition of TiO₂ filler particles was found to improve the tensile, compressive, and flexural strengths of the composites. The TiO₂ filler provided an 8% to 12% increase in the tensile strength of the composites. 1% nano TiO₂ filler increased the flexural strength of glass fiber reinforced composites (GFRC) to 429 MPa and carbon fiber reinforced composites (CFRC) to 632 MPa. The TiO₂ filler contributed 5% to the compressive strength of CFRCs and approximately 7% to GFRCs. On the fracture surface of the TiO₂-filled composite examined by SEM, it was observed that the fibers were concentrated in a certain region and broke as bulk fiber bundles. While the increase in feed rate in milling of GFRC and CFRC caused the cutting forces and surface roughness values to increase, the increase in cutting speed caused the cutting forces and surface roughness values to decrease. Furthermore, TiO₂ filler reduced the cutting forces and surface roughness values in the milling of composites. The cryogenic treatment applied to the cutting tools had a reducing effect on the cutting forces and surface roughness values in both GFRC and CFRC. When the SEM images of the chips after milling of TiO₂ filled GFRC and CFRC were examined, it was determined that the fiber particles were shorter in length and had a more homogeneous structure. When the chip morphology of GFRC and CFRC milled with cryogenic cutting tool was examined, a chip structure with small fiber particles and clustered fiber bundles was observed.

Keywords: TiO₂, Glass fiber, Carbon fiber, Composite, Mechanical properties, Cryogenic Treatment, Milling

ÖN SÖZ

TiO₂ dolgulu cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinin ve kriyojenik kesici takımlar ile frezelenmesinin araştırılması” isimli tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm kompozitlerin yüksek özellikleri ve kompozitlerin kullanım alanlarından oluşmaktadır. İkinci bölüm dolgulu ve dolgusuz kompozitlerin mekanik özelliklerini ve işlenebilirliğini inceleyen bilimsel çalışmaları kapsamaktadır. Üçüncü bölüm kompozitlerin tanımlanması, yapıları, kategorize edilmesi, imalat yöntemlerinden ve frezeleme çeşitlerinden bahsedilmiştir. Dördüncü bölüm kompozit numunelerin hazırlanmasına ve kompozitlere uygulanan mekanik testlere ve frezeleme deneylerinde kullanılan deney cihazlarına yer verilmiştir. Beşinci bölüm eğilme, çekme, basma ve frezeleme deneylerinin değerlendirilmesi yapılmış, kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri, kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin ve talaş morfolojisinin değerlendirilmesine yer verilmiştir. Altıncı bölümde yapılan tüm testlerden elde edilen en önemli sonuçlara ve bundan sonra yapılacak çalışmalarla ilgili önerilere yer verilmiştir.

Bu çalışmamda, benden desteğini ve yardımını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Hüseyin GÜRBÜZ’e teşekkür ederim. Deney çalışmalarında bilgi ve tecrübeleri ile yardımcı olan sayın Doç. Dr. Şehmus BADAY ve Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Emin DEMİR’e teşekkürlerimi sunarım.

Muhammed TAKA

BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. GENEL BİLGİLER.....	12
3.1. Kompozit Malzeme Tanımı ve Yapısı	12
3.2. Kompozit Malzemelerin Genel Sınıflandırması	14
3.2.1. Takviye elemanlarına göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması	14
Ana Sınıflar:.....	14
3.2.2. Sandviç yapılı kompozitler	15
3.2.3. Parçacık takviyeli kompozitler	16
3.2.4. Tabakalı (lamine) kompozitler.....	16
3.2.5. Lif (elyaf) takviyeli kompozitler.....	17
3.3. Cam Elyaf (Cam Lifi)	17
3.4. Karbon Elyaf	19
3.4.1. Karbon elyafın yapısı	20
3.4.2. Aramid elyaf	22
3.5. Matris Tipine Göre Kompozitler	23
3.5.1. Polimer matrisli kompozitler	23
3.6. Polimer Matrisli Kompozit Üretim Yöntemleri.....	30
3.6.1. Elle serme ve vakum torbalama.....	30
3.6.2. Vakum torbalama yöntemi.....	31
3.6.3. Reçine transfer kalıplama (RTM)	33
3.6.4. Pultrüzyon.....	33
3.6.5. Filament sarma (Elyaf sarma yöntemi).....	34
3.7. Frezeleme	35
3.7.1. Frezeleme türleri	36
3.7.1.1. Yüzey frezeleme	36
3.7.1.2. Çevresel frezeleme.....	37
3.7.1.3. Parmak frezeleme	37
3.7.1.4. Açısal frezeleme	38
3.8. Kompozit Malzemelerde Frezeleme	38
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	39

4.1. Takviye Malzemeleri	39
4.2. Kompozit Plakaların Üretilmesi	40
4.3. Çekme Testi	41
4.4. Basma Testi.....	42
4.5. Eğilme Testi	43
4.6. Frezeleme Deneyleri İçin Kullanılan Kesici Takımlar ve Takım Tutucu	44
4.7. Kesici Takımlara Kriyojenik İşlem Uygulanması	45
4.8. Freze Deneylerinde Kullanılan Kesme Parametreleri ve CNC Tezgahı.....	46
4.9. Frezeleme Deneylerinde Kesme Kuvvetlerinin Ölçümü	47
4.10. Frezeleme Sonrası Yüzey Pürüzlülük Ölçümü	48
4.11. SEM Cihazı.....	49
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	51
5.1. Mekanik testler	51
5.1.1. Çekme test sonuçları	51
5.1.2. Kırılma yüzey morfolojisi.....	53
5.1.3. Eğilme test sonuçları.....	54
5.1.4. Basma test sonuçları	56
5.2. Frezeleme Sonuçları	57
5.2.1. Kesme kuvvetleri	57
5.2.2 Yüzey pürüzlülüğü.....	61
5.2.3 Talaş morfoloji SEM görüntüleri.....	66
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	69
6.1. Sonuçlar	69
6.2. Öneriler	70
KAYNAKLAR	72

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. Cam Elyafın Özellikleri (Strong, 2008)	18
Çizelge 3.2. Cam Elyaf Türleri, Özellikleri ve Kullanım Alanları (Mallick, 2007; ASTM, 2005; Callister, 2013; Bunsell, 2018).	18
Çizelge 3.3. Cam Elyafın Avantajları ve Dezavantajları (Mallick, 2007).	19
Çizelge 3.4. Karbon Elyafın Özellikleri	20
Çizelge 3.5. Karbon Elyaf Kullanım Alanları	21
Çizelge 3.6. Karbon Elyafın Avantaj ve Dezavantajları	21
Çizelge 3.7. Aramid liflere ait belli fiziksel ve kimyasal özellikler	22
Çizelge 3.8. Aramid elyafın avantajları ve dezavantajları.....	23
Çizelge 3.9. Termoset ve termoplastik matris karşılaştırması.....	25
Çizelge 3.10. Tabakalı (lamine) kompozitlerin uygulama alanları	28
Çizelge 3. 11. Tabakalı kompozitlerin avantaj ve dezavantajları.....	29
Çizelge 3.12. Sandviç kompozitlerin Uygulama Alanları.....	29
Çizelge 3.13. Reçine transfer kalıplamaya ait avantajlar ve dezavantajlar	33
Çizelge 3.14. Pultrüzyon yöntemine avantajlar ve dezavantajlar.....	33
Çizelge 3.15. Filament sarma yöntemine ait avantajlar ve dezavantajlar	34
Çizelge 3.16. Frezeleme İşleminin Temel Bileşenleri.....	35
Çizelge 4.1. Karbon ve Cam elyaf özellikleri.....	39
Çizelge 4.2. Titanyum dioksit (TiO ₂) özellikleri	39
Çizelge 4.3. Frezelemede kullanılan kesme parametreleri	47
Çizelge 4.4. CNN Freze Tezgahının özellikleri	47

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Uçak motorunda kompozit malzemeler (Yudar, 2023).....	13
Şekil 3.2. Kompozit malzemelerin katkı şekillerine göre isimlendirilmesi (Yudar, 2023)	13
Şekil 3.3. Hibrit kompozit plaka (Tepehan ve Sülü, 2022).	13
Şekil 3.4. Kompozit malzemelerin matris malzemeye ve takviye elemanına göre sınıflandırılması (İmak, 2015)	14
Şekil 3.5. Takviye Elemanlarına Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması (Yastımoğlu ve Özkan, 2017).....	15
Şekil 3.6. Cam Elyaf (İnce, 2019).	19
Şekil 3.7. Karbon Elyaf (Ertan vd., 2019)	22
Şekil 3.8. Aramid Elyaf (Korkut ve Gören, 2022)	23
Şekil 3.9. Matris malzeme türleri (Türkmen, 2012)	24
Şekil 3.10. Termoplastik matris türleri(Türkmen, 2012).....	25
Şekil 3.11. Termoset matris türleri (Türkmen, 2012).....	25
Şekil 3.12. Elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit (Gökçe vd., 2020)	27
Şekil 3.13. Elle yatırma yöntemi üretim süreci şeması (Dinkci, 2020).	31
Şekil 3.14. Vakum Torbalama Yönteminin şematik gösterimi (Turgut vd., 2007).....	32
Şekil 3.15. Vakum Destekli Reçine Transfer yöntemiyle vakumlama işlemi genel görünümü (Dinkci, 2020)	32
Şekil 3.16. Filament Sarma Yöntemi(Türkmen, 2012)	34
Şekil 3.17. Dikey freze tezgahı (Şirin ve Şirin, 2020).....	36
Şekil 3.18. Alın frezeleme (Şirin ve Şirin, 2020)	36
Şekil 4.1. a) TiO ₂ dolgu parçacığı, b) karbon elyaf kumaş ve c) cam elyaf kumaş	39
Şekil 4.2. a) Epoksi Reçine, b) Hassas Terazî ve c) Ultrasonik Karıştırıcı	40
Şekil 4.3. a) Cam Kumaş, b) Karbon Kumaş, c) Cam Kumaşa Reçine Sürme İşlemi, d) Karbon Kumaşa Reçine Sürme İşlemi, e) ve f) Numunelerin Kesim İşlemi.....	41
Şekil 4.4. a) Çekme Cihazı, b) Cam Çekme Numunesi , c) Karbon Çekme Numunesi.	42
Şekil 4.5. Kompozitlerin Basma Deneyleri	43
Şekil 4.6. a) Eğilme Cihazı, b) Cam Eğilme Numunesi, c) Karbon Eğilme Numunesi.	44
Şekil 4.7. Kesici takım ucunun şekli ve geometrik ölçüleri	45
Şekil 4.8. Deneylerde kullanılan kesici takım tutucu	45
Şekil 4.9. Kriyojenik ısıtma işlemin kesici takımlara uygulanması	46
Şekil 4.10. CNN Frezeleme tezgahı	47
Şekil 4.11. İş parçasının dinamometreye bağlanma şekli.....	48
Şekil 4.12. Yüzey Pürüzlülük cihazı ve ölçümü.....	49
Şekil 4.13. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) cihazı görüntüsü.....	49
Şekil 4.14. Quanta 650 Field Emission SEM cihazı görüntüsü.....	50
Şekil 5.1. Nano TiO ₂ dolgusunun cam ve karbon kompozitlerin çekme dayanımı üzerindeki etkisi	52
Şekil 5.2. a) C0, b) C1, c) K0 ve d) K1 numunelerin kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri.....	54
Şekil 5.3. Nano TiO ₂ dolgusunun cam ve karbon kompozitlerin eğilme gerilmesi üzerindeki etkisi	55
Şekil 5.4. Nano TiO ₂ dolgusunun cam ve karbon kompozitlerin basma üzerindeki etkisi	56

Şekil 5.5. CETK’lerde a) $V = 50$ m/dak, b) $V = 75$ m/dak ,c) $V = 100$ m/dak ve d) $V = 125$ m/dak kesme hızlarında ilerleme oranlarının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi...	58
Şekil 5.6. CETK’lerde a) $f_z = 0,01$ mm/diş, b) $f_z = 0,015$ mm/diş, c) $f_z = 0,02$ mm/diş ve d) $f_z = 0,025$ mm/diş ilerleme oranlarında kesme hızlarının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi	59
Şekil 5.7. KETK’lerde a) $V = 50$ m/dak, b) $V = 75$ m/dak, c) $V = 100$ m/dak ve d) $V = 125$ m/dak kesme hızlarında ilerleme oranlarının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi... 60	60
Şekil 5.8. KETK’lerde a) $f_z = 0,01$ mm/diş, b) $f_z = 0,015$ mm/diş, c) $f_z = 0,02$ mm/diş ve d) $f_z = 0,025$ mm/diş ilerleme oranlarında kesme hızlarının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi	61
Şekil 5.9. CETK’lerde a) $V = 50$ m/dak, b) $V = 75$ m/dak, c) $V = 100$ m/dak ve d) $V = 125$ m/dak kesme hızlarında ilerleme oranlarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi 62	62
Şekil 5.10. CETK’lerde a) $f_z = 0,01$ mm/diş, b) $f_z = 0,015$ mm/diş, c) $f_z = 0,02$ mm/diş ve d) $f_z = 0,025$ mm/diş ilerleme oranlarında kesme hızlarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi	63
Şekil 5.11. KETK’lerde a) $V = 50$ m/dak, b) $V = 75$ m/dak, c) $V = 100$ m/dak ve d) $V = 125$ m/dak kesme hızlarında ilerleme oranlarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi 64	64
Şekil 5.12. KETK’lerde a) $f_z = 0,01$ mm/diş, b) $f_z = 0,015$ mm/diş, c) $f_z = 0,02$ mm/diş ve d) $f_z = 0,025$ mm/diş ilerleme oranlarında kesme hızlarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi	65
Şekil 5.13. CETK’lerin $V = 125$ m/dak, $f_z = 0,025$ mm/diş ve $a_p = 1$ mm kesme parametreleri ile işlenmesi sonucu oluşan a) COKL, b) C1KL, c) COKS ve d) C1KS talaşlarının SEM görüntüleri.....	67
Şekil 5.14. KETK’lerin $V = 125$ m/dak, $f_z = 0,025$ mm/diş ve $a_p = 1$ mm kesme parametreleri ile işlenmesi sonucu oluşan a) K0KL, b) K1KL, c) K0KS ve d) K1KS talaşlarının SEM görüntüleri.....	68

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

TiO₂	: Titanyum dioksit
ZrO₂	: Zirkonyum dioksit
SiC	: Silisyum Karbür
Al₂O₃	: Alümina
CaCO₃	: Kireçtaşı
AR	: Alkali dirençli
PAN	: poliakrilonitril
UV	: Ultraviole
Vc	: Kesme hızı, m/dk
fz	: İlerleme, mm/diş
ap	: Kesme derinliği mm
ae	: Kesme genişliği, mm
Ti	: Titanyum
Al₂O₃	: Alümina
Gr	: Grafit
AlN	: Alüminyum Nitrür
f	: Hacim fraksiyonu
ρ	: Teorik Yoğunluk
WC-Co	: Tungsten Karbür-Kobalt
Ra	: Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü, μm
GPa	: Gigapascal

KISALTMALAR

AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
ANOVA	: Varyans analizi
BUE	: Yığıntı talaş
CETK	: Cam elyaf takviyeli polimer
KETK	: Karbon elyaf takviyeli polimer
MAK	: Malzeme aşınma kaybı
PA	: Poliamid
PEEK	: Poli-eter-eter-keton
PE	: Polietilen
PMK	: Polimer Matrisli Kompozit
PP	: Polipropilen
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
RSM	: Yüzey yanıt yöntemi
RTM	: Reçine transfer kalıplama
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SMK	: Seramik Matrisli Kompozit
TiAlN	: Titanyum Alüminyum Nitrür kaplama
TiN	: Titanyum Nitrür
YSA	: Yapay sinir ağı

1. GİRİŞ

Günümüz mühendislik uygulamalarında, geleneksel malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri birçok durumda yetersiz kalmaktadır. Artan performans talepleri, hafiflik, dayanıklılık, yüksek mukavemet ve korozyon direnci gibi özelliklerin bir arada bulunması ihtiyacını doğurmuştur. Bu bağlamda, farklı özelliklere sahip en az iki malzemenin bir araya getirilerek tek bir malzeme formu oluşturulmasıyla elde edilen kompozit malzemeler, modern malzeme teknolojisinin en önemli yapı taşlarından biri haline gelmiştir (Callister ve Rethwisch, 2018). Kompozit malzemeler, kendi başlarına yeterli olmayan iki veya daha fazla fazın makroskobik düzeyde birleştirilmesi ile oluşur. Bu yapının temel bileşenleri genellikle matris ve takviye malzemesidir. Matris, kompozitin şekillenmesini ve yük transferini sağlayan sürekli fazdır. Takviye fazı ise genellikle lif (elyaf) veya parçacık formunda olup kompozitin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirir (Mallick, 2007). Bu sayede, ortaya çıkan kompozit yapı hem yüksek dayanım hem de düşük yoğunluk gibi avantajları aynı anda sunar.

Kompozit malzemeler genel olarak; lif takviyeli kompozitler, parçacık takviyeli kompozitler, tabakalı (lamine) kompozitler ve sandviç yapılar olmak üzere sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma, takviye elemanının geometrisine ve malzeme içindeki dağılımına göre yapılmaktadır (Hull ve Clyne, 1996). Özellikle lif takviyeli polimer matrisli kompozitler, yüksek özgül mukavemetleri, kolay şekillendirilebilmeleri ve korozyona dirençli yapıları sayesinde birçok endüstriyel alanda ön plana çıkmaktadır (Strong, 2008). Takviye lifleri, kompozitlerin performansını belirleyen en kritik bileşenlerden biridir. Bu lifler arasında cam elyaf, karbon elyaf, aramid (Kevlar) elyaf ve son yıllarda giderek daha fazla ilgi gören doğal lifler (keten, jüt, kenevir vb.) yer almaktadır. Cam elyaf, düşük maliyetli ve iyi mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle yaygın kullanılırken; karbon elyaf, yüksek çekme mukavemeti ve rijitliği ile ileri teknoloji uygulamalarında tercih edilmektedir (Gibson, 2016). Aramid lifler, darbe dayanımı açısından öne çıkarken; doğal lifler, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Bledzki ve Gassan, 1999).

Kompozit malzemelerin üretim teknikleri de nihai performans üzerinde doğrudan etkilidir. El yatırması, reçine transfer kalıplama, filament sarma, vakum infüzyon,

pultrüzyon gibi farklı yöntemler, kullanım alanı ve üretim maliyeti göz önüne alınarak seçilir (Strong, 2008). Her üretim tekniği, lif yerleşimi, reçine dağılımı, gözeneklilik oranı gibi parametreleri etkileyerek kompozitin yapısal bütünlüğünü şekillendirir. Sonuç olarak, kompozit malzemeler; hafiflik, yüksek dayanım, kimyasal direnç ve tasarım esnekliği gibi birçok avantajı bir arada sunarak mühendislik uygulamalarında vazgeçilmez bir yer edinmiştir. Kriyojenik işlem günümüzde hem kesici takımlara hem de iş parçalarına uygulanan yenilikçi bir yöntemdir. Bu yöntem sayesinde hem kesici takımın tokluğunu ve sertliğini arttırarak takım ömrünün iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Hem de iş parçalarının işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvvetleri vb. deneysel sonuçlar üzerinde olumlu etkileri bulunmaktadır.

Yapılan bu tez çalışmasında ağırlıkça %1 Titanium Dioxide (TiO_2) dolgusu kullanılarak üretilen iki farklı elyaf (karbon ve cam) takviyeli kompozitlerin mekanik özellikleri ve farklı kesme parametrelerde kompozitlerin frezelenmesinde kriyojenikli kesici takım ve TiO_2 dolgusunun frezeleme sonuçları üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

İki veya daha fazla malzemenin makro olarak birleşerek oluşturduğu kompozit malzemeler sahip oldukları üstün avantajlar sayesinde her geçen gün kullanım alanı artmaktadır. Kompozit malzemeleri daha da iyileştirmek ve kullanım alanını yaygınlaştırmak için sürekli çalışmalar yapılmaktadır. Kompozit malzemelerin frezeleme ve mekanik performanslarını arttırmak için çeşitli dolgu malzemeleri kullanılmıştır. Aşağıda farklı dolgu malzemeleriyle cam ve karbon elyaf ile takviye edilmiş kompozit malzemelerin frezeleme ve mekanik özelliklerini arttırmak için yapılmış bazı deneysel çalışmalar verilmiştir. Ayrıca kesici takımlara uygulanan kriyojenik ısıtma işleminin deneysel sonuçlar üzerindeki etkisi ile ilgili araştırmalar sunulmuştur.

Gara vd. (2017), çok yönlü karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin frezeleme işlemi sonucunda oluşan kesme kuvvetlerini araştırmışlardır. Deneyler sonucunda diş başına ilerleme hızının kesme kuvvetleri üzerinde en yüksek etkiye sahip olduğu ve kompozit plakaya en az hasar veren kesici takımın, diş sayısını fazla olduğu kesici takım olduğu görmüşlerdir. Ayrıca elde ettikleri sonuçlar ışığında kesme hızının artmasıyla kesme sıcaklığının arttığını ve dolayısıyla iş parçası malzemesinin zayıflamasına bağlı olarak kesme kuvvetinde azalma olduğunu bildirmişlerdir.

Gara ve Tsoumarev (2016), karbon elyaf takviyeli kompozit (KETK) malzemelerin işlenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne olan etkilerini araştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda eksenel yönlü yüzey pürüzlülüğünün sadece kesme koşullarına bağlı olmadığını aynı zamanda takım geometrisine bağlı olduğunu, zıt yönlü frezelemede eksenel olan pürüzlülüğün aynı yönlü frezelemedeki pürüzlülüğünden düşük olduğu tespit etmişlerdir. Bunlarla birlikte diş başına ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili kesme parametresi olduğunu gözlemlemişlerdir.

Ali vd. (2013), cam elyaf takviyeli kompozit (CETK) malzemelerin delik delinmesinde matkap ve frezeleme yöntemi ile delme işlemleri üzerinde karşılaştırmalı bir çalışma yapmışlardır. Yapılan deneylerin sonucunda delik kalitesi ve yüzey pürüzlülük açısından yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme hızında frezeleme işleminin delme işlemine göre daha uygun olduğu tespit etmişlerdir.

Işık ve Demirci (2014), CETK malzemelerin frezelemede kesme parametrelerinin yüzey kalitesini araştırmışlardır. Yapılan deneylerin sonucunda takım çapı arttıkça yüzey pürüzlülüğü değerlerinin azaldığı ve tüm çap değerlerinde ilerleme hızlarının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün bir miktar azaldığı belirtmişlerdir. Ayrıca daha iyi yüzey pürüzlülüğü değerlerinin sağlanması için daha büyük takım çapları, daha düşük kesme hızları ve daha düşük ilerleme hızlarının seçilmesi gerektiği bildirmişlerdir.

Erkan ve Işık (2009), CETK malzemelerin işlenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne olan etkilerini incelemişlerdir. İlerleme miktarının artmasına bağlı olarak yüzey kalitesinde bozulmalar ve yüzey pürüzlülüğünde artış meydana geldiğini görmüşlerdir. Sonuç olarak en iyi yüzey kalitesine maksimum kesme hızında ve minimum ilerleme değerlerinde 4 ağızlı karbür parmak frezede ulaşıldığı tespit etmişlerdir. Deneylerden elde edilen verilere göre kullanılan bütün kesici takımlarda çok az miktarda da olsa takım aşınması olduğu gözlemlenmiştir.

Ahmad vd. (2012), KETK malzemelerin frezede işlenmesinde kesme parametrelerinin işleme kalitesine olan etkilerini araştırmışlardır. Yapılan deneylerin sonucunda ilerleme hızının artması ve devir sayısının azalmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca ilerleme hızının artması ve kesme hızının azalmasıyla ortalama delaminasyon derinliğinin arttığını görmüşlerdir.

Kiliçkap vd. (2013), KETK'nin frezelemesi ile ilgili bir deneysel çalışma yapmışlardır. Deneylerde, KETK'nin frezelenmesi için dikkate alınan parametreler, kesme hızı, ilerleme hızı ve parmak frezenin kanal sayısı dikkate alınmıştır. Elde ettikleri sonuçlardan yüzey pürüzlülüğünün ve kesme kuvvetlerinin kesme parametrelerinden ve parmak frezenin kanal sayısından etkilendiğini görmüşlerdir. En iyi işleme koşulları, düşük ilerleme hızı ve dört kanallı parmak freze ile işlemede olduğunu tespit etmişlerdir.

Takmaz vd. (2016), KETK malzemenin frezelenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin istatistiksel olarak incelenmesi üzerine bir araştırma yapmışlardır. Yapılan çalışmada cam elyaf takviyeli polimer kompozit malzeme, farklı kesme parametreleri (ağız sayısı, kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği) ile frezelenen iş parçalarını yüzey pürüzlülük değerleri ölçmüşlerdir. Elde edilen verilere, varyans analizi (ANOVA) uygulanarak, yüzey pürüzlülüğüne etki eden kesme parametrelerinin etki oranları istatistiksel olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak yüzey pürüzlülüğünü en fazla etkileyen parametre % 44,79 etki oranı ile kesici takım ağız sayısı olduğunu görmüşlerdir.

Onu % 11,25 etki oranı ile kesme hızı ve % 5,00 etki oranı ile kesme derinliği takip ettiğini görmüşlerdir.

Bilge ve Motorcu (2018), laminant kompozitin cep frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal tamlığın değerlendirilmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, laminat kompozitler üzerine cep işlemede kontrol faktörlerinin (takım yolu stratejisi, takım tipi ve malzemesi, kesme hızı, ilerleme miktarı, kesici takımın yana kayma mesafesi) yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal tamlık üzerindeki ana etkileri, % katkıları ve optimum değerleri Taguchi Metodu, ana etki grafikleri, Varyans analizi ve Gri İlişkisel Analiz yöntemi kullanılarak belirlemişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametreler sırasıyla kesici takım geometri ve malzemesi (% 70,90), kesme hızı (%9,40) ve yana kayma mesafesi (%8,20) olduğunu görmüşlerdir. Aynı şekilde, boyutsal tamlık üzerinde de kesici takım tipi ve malzemesinin (%99,35) anlamlı bir etkisi gözlemlenmiş iken diğer parametrelerin toplam etkisi % 1'in altında kaldığını görmüşlerdir.

Wang vd. (2015), KETK'nin frezelenmesi için pürüzlülük modelleme analizi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada, pürüzlülük ve frezeleme parametreleri arasındaki ilişkiyi yüzey yanıt yöntemiyle geliştirmişlerdir ve KETK'nin frezelenmesi için bir pürüzlülük modelini önermişlerdir. Modellerin varyans analizi ile yeterli olduğunu bulmuşlardır. Sonuç, ilerleme hızındaki ve radyal kesme derinliğindeki artışın pürüzlülüğü artırdığını gözlemlemişlerdir. Mil hızı, KETK kompozitlerinin frezelenmesinde pürüzlülük üzerinde genel bir eğilim gösterdiğini görmüşlerdir.

Özkan vd. (2014), KETK 'lerin TiAlN ve TiN kaplamalı karbür kesici takımlarla frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerini etkileyen işleme parametrelerinin incelenmesi üzerine bir araştırma yapmışlardır. Yapılan araştırmada, KETK numuneler farklı kesme hızları ve ilerleme oranlarında frezelemişlerdir. KETK numunelerin frezelenmesi, fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemi ile TiAlN (Titanyum Alüminyum Nitrür kaplama) ve TiN (Titanyum Nitrür) kaplamalı karbür kesici takımları kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Frezeleme parametrelerinin işlenmiş numunelerin yüzey pürüzlülüğü ve oluşan kesme kuvvetleri üzerindeki etkisini değerlendirmişlerdir. Yapılan testler sonucunda, TiAlN kaplamalı kesici takımlarla elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları daha düşük tespit etmişlerdir.

Ceritbinmez vd. (2021), nanopartikül katkı maddesinin CETK yapılarda kanal frezeleme üzerine bir araştırma yapmışlardır. Kompozit tabakalara farklı kesme hızı ve ilerleme oranı parametreleri ile kanallar açmışlardır. Kompozit tabakaların yüzey

pürüzlülüğü ve kanal boyutunu incelemişler ayrıca kesme işleminde kullanılan kesici takımların aşınmalarını belirlemişlerdir. Lamine cam elyaf kompozit malzemelere nanopartiküllerin eklenmesinin malzemenin mukavemetinde etkili bir rol oynadığı ve kesici takım aşınmasına neden olduğunu gözlemlemişlerdir.

Jenarthanan vd. (2017), CETK malzemelerin frezelemesi sırasında delaminasyon faktörünün modellenmesi ve tahmininde yüzey yanıt yöntemi (YYM) ile yapay sinir ağı (YSA) arasındaki karşılaştırmalı analizi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu hedefe ulaşmak amacıyla, farklı işleme parametreleri yani ilerleme hızı, kesme hızı, kesme derinliği ve elyaf yönelim açısı ile elmas uçlarla frezeleme deneyi gerçekleştirmişlerdir. Frezeleme deneyleri ile ilgili olarak, ilerleme hızının delaminasyon faktörünü etkileyen baskın parametre olduğu, bunu elyaf yöneliminin izlediğini gözlemlemişlerdir. Karşılaştırma sonuçları, modellerin YSA'nın RSM'den daha iyi performans gösterdiği delaminasyon faktörünün doğru tahminini sağladığını görmüşlerdir.

Erkan vd. (2013), YSA kullanılarak cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin frezelemesinde hasar faktörünün tahmini üzerine bir çalışma yapmışlardır. Yapılan çalışmada, işlenmiş yüzeylerdeki hasarları deneysel olarak en aza indirmek için bir CETK kompozit malzeme, farklı kesme parametresi kombinasyonlarında iki, üç ve dört kanallı uç frezeleri kullanarak frezelemişlerdir. Deneysel sonuçlar, hasar faktörünün artan kesme hızı ve ilerleme oranıyla arttığını, diğer yandan hasar faktörünün artan kesme derinliği ve kanal sayısı ile azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, varyans analizi (ANOVA) sonuçları, CETK kompozitlerin uç frezelemesinde hasar faktörünü etkileyen en etkili parametrenin ilerleme oranı olduğunu açıkça ortaya koyduğunu görmüşlerdir.

Jenarthanan vd. (2016), çoklu regresyon analizi ve YSA kullanılarak CETK kompozitlerin frezelemesinde kesme kuvvetinin modellenmesi üzerine bir araştırma yapmışlardır. Yapılan çalışmada, 15°, 60° ve 105° elyaf açılı bir CETK kompozit malzemeler, işlenmiş yüzeylerdeki kesme kuvvetlerini deneysel olarak en aza indirmek için 25°, 35° ve 45° helis açılı karbür uç frezeler kullanılarak farklı kesme parametresi kombinasyonlarında frezeleme yapmışlardır. Deneysel sonuçlar, kesme kuvvetinin artan elyaf yönelimi ve ilerleme hızıyla arttığını; diğer yandan, kesme kuvvetinin artan kesme hızı ve uç freze kesicinin helis açısıyla azaldığını görmüşlerdir. Ayrıca, varyans analizi (ANOVA) sonuçları, freze kesicinin helis açısının, CETK kompozitlerin uç frezelemesinde kesme kuvvetini etkileyen en etkili parametre olduğunu açıkça ortaya koyduğunu gözlemlemişlerdir.

Yağmur vd. (2020), KETK malzemelerin frezelenmesinde delaminasyon ve kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi ve matematiksel modellenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, KETK malzemelerin işlenmesinde yaşanan güçlükleri ve özellikle de katmanlı/laminer yapıdaki levhalarda katman kalkması (delaminasyon) problemini bertaraf edebilecek özgün PCD kesici takım tasarımı yapmışlardır. Bu takımlar ile karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin frezelenmesinde meydana gelen delaminasyon ve kesme kuvvetlerini araştırmışlardır. Kesme parametreleri olarak 350, 400 ve 450 m/dak kesme hızı ve 1270 mm/dak sabit ilerleme miktarını seçmişlerdir. Deneyler sonucunda en iyi performansı tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen ve 1 numara ile kodlanan kesici takımın gösterdiğini görmüşlerdir. Artan kesme hızının hasarı ve kesme kuvvetlerini olumlu yönde etkilediğini görmüşlerdir. Ayrıca regresyon analizi sonrasında elde edilen ANOVA istatistiklerine göre hasar ve kesme kuvvetleri açısından etkili olan parametreler tespit etmişlerdir.

Samtaş ve Korucu (2019), kriyojenik işlem görmüş 5754 alüminyum alaşımının frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü için kesme parametrelerinin optimizasyonu üzerine deney yapmışlardır. Deneylerde Taguchi L9 ortogonal dizini ile üç farklı kesici uç (Al_2O_3 -TiCN-TiN kaplamalı, TiAlN kaplamalı Nano, TiB_2 kaplamalı), kesme hızı (310, 450, 600 m/dak), ilerleme oranı (0,15- 0,25- 0,35 mm/diş) ve üç farklı kesme derinliğini (0,5 – 1 – 1,5 mm) kullanmışlardır. Deneyler sonucunda elde ettikleri değerler, sinyal-gürültü oranı (S/N), varyans analizi (ANOVA), üç boyutlu grafikler ve regresyon metodunu kullanarak değerlendirmişlerdir. Taguchi analizi sonucu minimum yüzey pürüzlülüğü için elde ettikleri optimum kesme şartları; Al_2O_3 – TiCN – TiN kaplamalı kesici uç, 1 mm kesme derinliği, 600 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/diş ilerleme oranını bulmuşlardır. Bu kesme şartları için yüzey pürüzlülük değerleri hesaplamalarda 0,47 μm , doğrulama deneylerinde 0,32 μm olarak ölçmüşlerdir.

Çiçek vd. (2012), AISI d2 soğuk iş takım çeliğinin delinmesinde derin kriyojenik işlemin takım ömrü üzerindeki etkilerinin araştırılması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada, AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin delinmesinde, M35 HSS matkaplara uygulanan derin kriyojenik işlemin (-196 °C) takım ömrü, takım aşınması, mikro yapı ve mikro sertlik üzerine etkilerini araştırmışlardır. Delme deneylerini üç farklı kesme hızı (20, 25 ve 30 m/dak), sabit ilerleme (0,1 mm/dev) ve sabit delme derinliğinde (7 mm) gerçekleştirmişlerdir. Kriyojenik işlem uyguladıkları takımlar, takım aşınması ve takım ömrü bakımından konvansiyonel işlem uygulanan takımlara göre daha iyi sonuçlar verdiğini görmüşlerdir. Takım ömrü deneyleri, kriyojenik işlem uygulanmış takımlarla %

33-62 oranında ömür artışı elde edildiğini görmüşlerdir. Takımlarda genel olarak yığıntı talaş (BUE) oluşumunu, dış köşe kenar ve yanak aşınmasının etkin olduğunu belirlemişlerdir. Genel olarak kriyojenik işlemin takım aşınması ve takım ömrü üzerinde olumlu etkilere sahip olduğunu görmüşlerdir.

Bayraktar (2021), kesici takım ve iş parçasına uygulanan kriyojenik işlemin kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrüne etkisinin araştırılması üzerine bir çalışma yapmıştır. Yaptığı çalışmada, silindirik iş parçasına ve kesici takım malzemesine uygulanan derin kriyojenik işlemin; yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü ve kesme sıcaklığı parametrelerine etkisini incelemiştir. Bu kapsamda araştırmacı, iş parçası malzemesi olarak Sleipner soğuk iş takım çeliğini, kesici takım olarak ise PVD kaplı karbür takımlarını kullanmıştır. Hem iş parçasına hem de kesici takım malzemesine -196 °C sıcaklıkta derin kriyojenik işlem uygulamıştır. Ayrıca araştırmacı, kriyojenik işleme tabi tutulan numunelere 200 °C'de 2 saat süreyle temperleme işlemi uygulamıştır. Yaptığı çalışmada, üç farklı kesme hızı (40, 60, 80 m/dak), üç farklı ilerleme hızı (0,04; 0,06; 0,08 mm/dev) ve sabit 1 mm kesme derinliği olmak üzere farklı kesme parametreleri belirlemiştir. Araştırmacı, iki farklı iş parçası ve iki farklı kesici takım kombinasyonu ile toplam 36 adet kesme deneyi gerçekleştirmiştir. Deney sonuçlarını inceleyen araştırmacı, kriyojenik işlem uygulanan kesici takımların yüzey pürüzlülüğünde, işlem görmeyenlere kıyasla %20,7 oranında daha iyi sonuçlar verdiğini görmüştür. Kesme sırasında ölçülen sıcaklık değerlerinin ise %1,13 oranında daha düşük olduğunu tespit etmiştir. Bununla birlikte, kriyojenik işlemin takım ömrünü %33 oranında artırdığı sonucuna ulaşmıştır.

Gürbüz ve Baday (2021), kriyojenik işlem görmüş ve kriyojenik işlem görmemiş kesici takımlarla Inconel 718 iş parçasının frezelenmesi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmada, kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş kesici takımlarla Inconel 718'in frezelenmesinde ilerleme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, titreşim, takım aşınması, sertlik ve abrasif aşınma parametrelerini incelemişlerdir. Sabit 0,2 mm kesme derinliği ve farklı kesme hızları (35 - 55 m/dak) ile ilerleme hızları (0,02 - 0,04 mm/diş) kullanmışlardır. Kriyojenik işlemlili takımlarla daha düşük ilerleme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü, titreşim ve aşınma değerleri elde etmişlerdir. İlerleme ve kesme hızı arttıkça yüzey kalitesi ve titreşimde bozulma olduğunu gözlemlemişlerdir. Titreşim ile yüzey pürüzlülüğü arasında pozitif ilişki, abrasif aşınma ile sertlik arasında ise ters orantı tespit etmişlerdir.

Özbek ve Özbek (2007), kriyojenik işlem uygulanmış tungsten karbür takımların frezeleme işlemlerindeki performansı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, orta

karbonlu çeliğin yüksek hızlı frezelenmesi sırasında kriyojenikli ve kriyojeniksiz tungsten karbür takım uçlarının performanslarını araştırmışlardır. Kuru kesme koşullarına ek olarak, soğutma sıvısını kullanarak yaptıkları işlemlerini de test etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar, kriyojenikli kesici takım uçlarının, kriyojeniksiz kesici takımlara kıyasla daha yüksek takım aşınma direnci sergilediğini görmüşlerdir. Ayrıca, kesme sırasında uyguladıkları soğutma sıvısının, kriyojenik işlem görmüş takımlarda aşınmayı daha da azaltmaya yardımcı olduğunu belirlemişlerdir. Bunun yanında, kriyojenikli kesici takımların, belirli kesme koşulları altında en iyi performansı ortaya koyduğunu tespit etmişlerdir.

Yong vd. (2007), kriyojenikli karbür takımların frezeleme işlemlerindeki performansı üzerine bir çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada, orta karbonlu çeliğin yüksek hızlı frezelenmesi sırasında kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş tungsten karbür takım uçlarının performans farklılıklarını incelemişlerdir. Araştırma kapsamında, sadece kuru kesme değil, aynı zamanda soğutma sıvısı altında işlemeyi de test etmişlerdir. Elde ettikleri bulgular, kriyojenik işlem görmüş takımların, kriyojeniksiz kesici takımlara kıyasla daha yüksek takım aşınma direnci sergilediğini görmüşlerdir. Ayrıca, soğutma sıvısı uygulanmasının kriyojenik işlem görmüş takımlardaki aşınmayı daha da azalttığını gözlemlemişlerdir. Çalışma sonucunda, kriyojenik işlem görmüş tungsten karbür takımların belirli kesme parametreleri altında en iyi performansı gösterdiğini belirlemişlerdir.

Devi vd. (2023), kriyojenik işlem görmüş kesici takımların Custom 450 paslanmaz çeliğin frezelenmesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, kriyojenik işlem uygulanmış kesici uçların takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü ve kesme performansı açısından avantaj sağladığını görmüşlerdir. Elde ettikleri bulgulara göre, kriyojenik işlem hem kesici takım aşınmasını azaltmakta hem de iş parçasında daha düzgün yüzeyler elde edilmesini sağlamamışlardır. Yaptıkları araştırmada ayrıca farklı kesme parametreleri altında takım davranışlarını karşılaştırmışlar ve kriyojenik işlem uygulanmış takımların özellikle zorlu işleme koşullarında daha stabil performans gösterdiğini görmüşlerdir (Devi vd., 2023).

Babu vd. (2024), TiAlSiN kaplı tungsten karbür frezeleme takımlarına uygulanan sığ ve derin kriyojenik işlemlerin takım performansına etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma kapsamında, kriyojenik işlem türlerinin takım aşınması, kesme kuvveti ve yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini karşılaştırmışlardır. Elde ettikleri bulgulara göre, derin kriyojenik işlem uygulanmış takımlar, hem takım ömrü hem de yüzey pürüzlülüğü

açısından daha iyi performans sergilediğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca bu işlem türünün, takımın termal ve mekanik stabilitesini arttırdığını ve daha zorlu kesme koşullarında dahi etkili sonuçlar alınmasını sağladığını görmüşlerdir.

Liu vd. (2020), GH536 süperalaşımının frezelenmesinde kriyojenik işlem uygulanmış WC-Co (tungsten karbür-kobalt) kesici takımların performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında takım aşınması, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü gibi temel işleme parametrelerini değerlendirmişlerdir. Elde ettikleri bulgular, -180 °C’de uygulanan derin kriyojenik işlemin, WC-Co takımların performansını anlamlı şekilde iyileştirdiğini görmüşlerdir. Derin kriyojenik işlemin, kesici takımın mikro sertliğini %5,2 ile %7,4 oranında arttırdığını, kesme kuvvetlerini ise normal koşullarda %1,5 – %4, agresif kesme koşullarında ise % 4,2 – %12 oranında azalttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, derin kriyojenik işlem uygulanmış takımların aşınma direncinin daha yüksek olduğunu, buna karşılık konvansiyonel takımlarda kesici kenar kırılmaları meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Yüzey kalitesi açısından da kriyojenik işlemlenmiş takımların, yüzey pürüzlülüğü değerlerinde (R_a ve R_z) %5 ila %70 arasında iyileşme sağladığını görmüşlerdir.

Varghese vd. (2019), kriyojenik işlem görmüş tungsten karbür-kobalt (WC-Co) uçlar kullanılarak maraging çeliğinin frezelenmesi üzerine deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, -195,8 °C sıcaklıkta 24 saat boyunca derin kriyojenik işlem uygulanmış WC-Co uçların, kuru, ıslak ve kriyojenik kesme koşulları altında frezeleme performanslarını incelemişlerdir. Elde ettikleri bulgularda, kriyojenik işlem uygulanmış takımların, kriyojeniksiz kesici takımlara kıyasla daha düşük kesme kuvvetleri, daha iyi yüzey kalitesi ve daha uzun takım ömrü sunduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, kriyojenik işlem görmüş uçların takım ömründe %24’e varan artış sağladığını ve aynı zamanda yüzey kalitesinde anlamlı düzeyde iyileşme elde edildiğini görmüşlerdir.

Güven vd. (2022), CETK %2 oranında Al_2O_3 (alüminyum oksit) ve TiO_2 (Titanyum Dioksit) nanopartikül katkısının mekanik özellikler ve burkulma davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Vakum destekli reçine infüzyon yöntemiyle ürettikleri kompozitlerde, her iki nanopartikül katkısının çekme, basma, eğilme, darbe ve burkulma dayanımlarını artırdığını görmüşlerdir. Özellikle %2 Al_2O_3 katkılı kompozitlerin, %2 TiO_2 katkılılara göre daha fazla iyileşme sağladığını tespit etmişlerdir. Buldukları sonuçlarla, nanopartikül katkılarının CETK’lerin mekanik performansını önemli ölçüde geliştirdiğini göstermişlerdir.

Kuram (2016), Ti6Al4V alaşımı üzerinde gerçekleştirdiği mikro frezeleme çalışmasında, talaş kaldırma yolunun takım aşınması, kesme kuvvetleri ve parça kalitesi üzerindeki etkilerini incelemiştir. alışmasında, "suyolu" ve "adım destekli takım yolu" stratejilerini karşılaştırmış; her iki yöntemde de abrasif aşınma gzlemlemişken, adım destekli stratejide takım aşınmasının daha yüksek olduğunu görmüştür. Ancak bu yöntemin, daha düşük kesme kuvvetlerini, azalan apak oluşumunu ve %9,02 ile daha düşük cidar kalınlık hatasını sağladığını gözlemlemiştir. Buna karşılık su yolu stratejisinde kalınlık hatasının %19,69'a ulaştığını görmüştür. Elde ettiği bulgularda, talaş kaldırma yolunun mikro ölçekte işleme kalitesine ve takım performansına doğrudan etki ettiğini görmüştür (Kuram, 2016).

İ vd. (2019), kevlar fiber takviyeli epoksi kompozitlerin frezeleme sürecinde kesme parametrelerinin optimizasyonunu araştırmışlardır. Araştırmalarında faktöriyel tasarım ve hedef programlama tekniklerini kullanarak, yüzey pürüzlülüğü ve işleme süresi gibi performans çıktılarının iyileştirilmesini hedeflemişlerdir. Elde ettikleri deneysel bulgularda, özellikle ilerleme hızı ve kesme derinliği gibi parametrelerin yüzey kalitesi üzerinde anlamlı etkiler oluşturduğunu gözlemlemişlerdir. Bu kapsamda yaptıkları optimizasyon sayesinde işleme sürecinde hem kalite hem de verimlilik yönünden önemli kazanımlar elde edildiğini görmüşlerdir (İ vd., 2019).

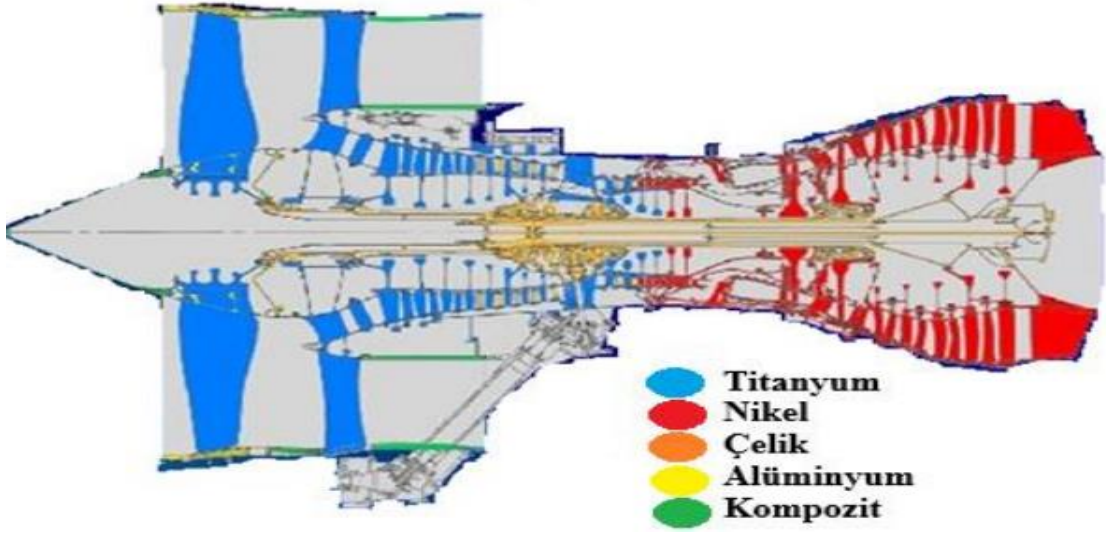
3. GENEL BİLGİLER

3.1. Kompozit Malzeme Tanımı ve Yapısı

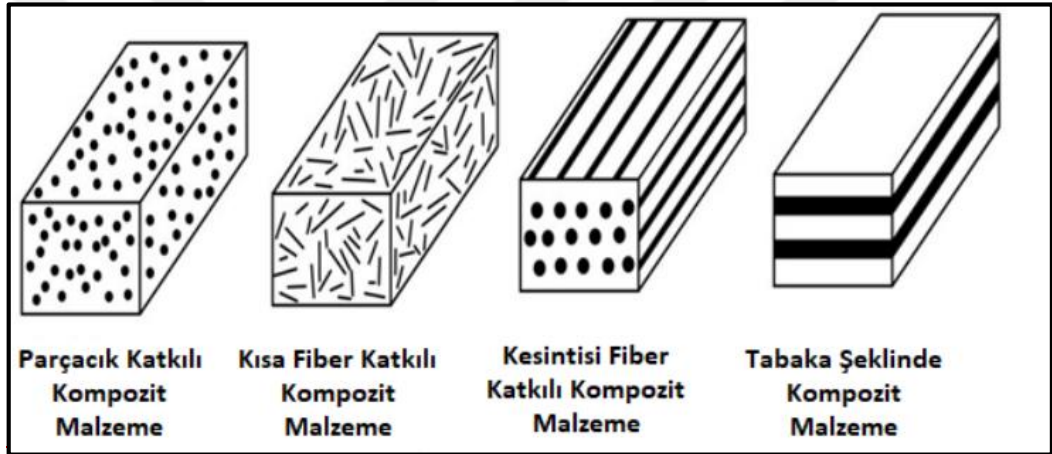
Kompozit malzeme, farklı fiziksel ve/veya kimyasal özelliklere sahip en az iki malzemenin makroskopik ölçeğe bir araya getirilmesiyle oluşan, bileşenlerin tek başlarına sağlayamayacağı özellikleri birlikte sunabilen çok fazlı bir malzeme sistemidir. Bu malzemeler, genellikle biri sürekli (matris) diğeri süreksiz (takviye) olmak üzere iki temel fazdan oluşur. Matris, takviye fazını bir arada tutarak dış yüklemeler karşısında yükü aktarır; takviye fazı ise kompozite yüksek mekanik dayanım, rijitlik ve darbe direnci gibi özellikler kazandırır (Callister ve Rethwisch, 2018).

Kompozitlerin temel amacı, farklı malzemelerin üstün özelliklerini bir araya getirerek, geleneksel metalik veya seramik malzemelerin sınırlamalarını aşmaktır. Örneğin; metal malzemeler yüksek dayanım sağlarken, ağırlık açısından dezavantajlıdır. Buna karşın kompozit malzemeler, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, korozyon direnci, tasarım esnekliği ve düşük yoğunluk gibi avantajları sayesinde havacılık, otomotiv, savunma sanayi, spor ekipmanları, denizcilik ve medikal cihazlar gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Mallick, 2007).

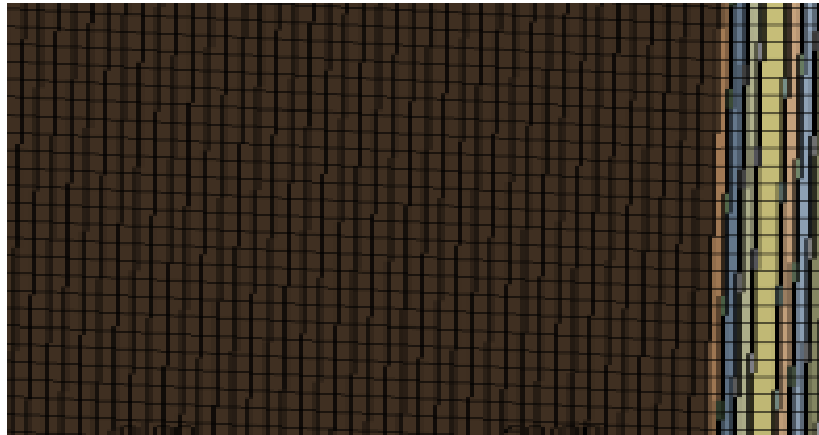
Kompozit malzemelerin yapısal özellikleri, yalnızca bileşenlerin kimyasal ve fiziksel niteliklerine değil, aynı zamanda takviye elemanının şekli, yönelimi, hacim oranı ve matris ile takviye arasındaki bağ kalitesine de bağlıdır. Bu faktörlerin uygun şekilde kombinasyonu, kompozit malzemelere geleneksel malzemelere kıyasla çok daha üstün özellikler kazandırır. Sonuç olarak, kompozitler yüksek mukavemet/ağırlık oranı, mükemmel korozyon dayanımı, termal kararlılık ve tasarım esnekliği gibi avantajlar sunarak mühendislik uygulamalarında geniş kullanım alanı bulur (Gibson, 2016). Aşağıda Şekil 3.1’de uçak motorunda kompozit malzeme kullanım yeri, Şekil 3.2’de kompozit malzelerin katkı şekillerine göre isimlendirilmesi ve Şekil 3.3’te hibrit kompozit plaka şekli verilmiştir.



Şekil 3.1. Uçak motorunda kompozit malzemeler (Yudar, 2023)



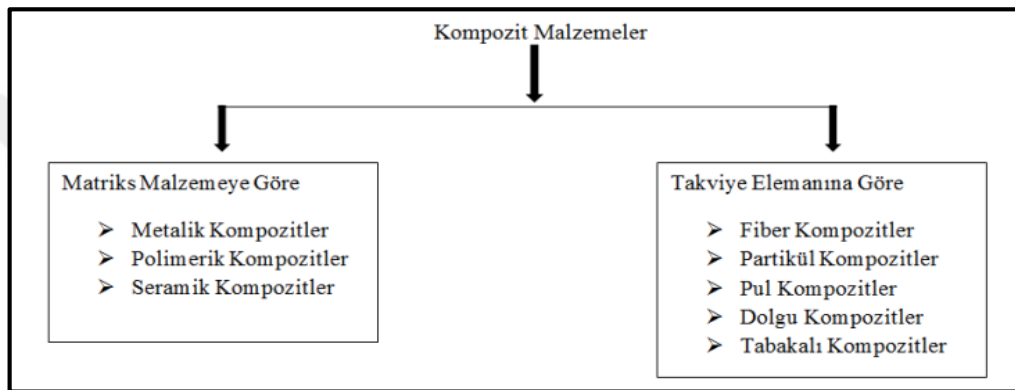
Şekil 3.2. Kompozit malzemelerin katkı şekillerine göre isimlendirilmesi (Yudar, 2023)



Şekil 3.3. Hibrit kompozit plaka (Tepehan ve Sülü, 2022).

3.2. Kompozit Malzemelerin Genel Sınıflandırması

Kompozit malzemeler, kullanım alanlarına ve performans gereksinimlerine göre farklı takviye elemanları ve matris fazlarıyla özelleştirilebilir. Bu nedenle hem takviye geometrisi hem de matris türü, kompozitlerin sınıflandırılmasında temel kriterlerdir. Bu iki sınıflandırma yöntemi, mühendislik uygulamalarında malzeme seçimini kolaylaştıran temel bir çerçeve sunar. Kompozit malzemelerin matris malzemeye ve takviye elemanına göre sınıflandırılması Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Kompozit malzemelerin matris malzemeye ve takviye elemanına göre sınıflandırılması (İmak, 2015)

3.2.1. Takviye elemanlarına göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması

Kompozit malzemelerde takviye elemanı, kompozitin mekanik özelliklerini belirleyen en önemli bileşendir. Bu elemanlar şekillerine, boyutlarına ve dağılım türlerine göre sınıflandırılırlar. Aşağıda Şekil 3.5'te takviye elemanlarına göre kompozit malzemelerin sınıflandırılması verilmiştir.

Ana Sınıflar:

- A) Yapısal (sandviç) kompozitler
- B) Parçacık takviyeli kompozitler
- C) Tabakalı (lamine) kompozitler
- D) Lif takviyeli kompozitler



Şekil 3.5. Takviye Elemanlarına Göre Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması (Yastımoğlu ve Özkan, 2017)

3.2.2. Sandviç yapılı kompozitler

Sandviç yapılı kompozit malzemeler, iki adet ince ve yüksek dayanımlı yüzey tabakası ile bu tabakalar arasında yer alan kalın, hafif ve düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemeden oluşur. Bu özgün yapı sayesinde, sandviç paneller yüksek eğilme rijitliğini düşük ağırlıkla birleştirebilme özelliğine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle özellikle havacılık, denizcilik, otomotiv ve inşaat gibi alanlarda yapısal verimlilik sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Zenkert, 1995). Sandviç yapılı kompozitlerde dış yüzeyler, yapının yük taşıyan ve dış çevresel etkilere karşı koruma sağlayan katmanlarıdır. Bu yüzey tabakaları genellikle KETK, CETK veya alüminyum alaşımları gibi yüksek dayanımlı ve rijit malzemelerden üretilir.

Sandviç yapının ortasında yer alan çekirdek malzemesi ise yapıya kalınlık kazandırarak özellikle eğilme rijitliği üzerinde belirleyici rol oynar. Bu çekirdek, çoğunlukla düşük yoğunluklu fakat yapısal taşıma kapasitesi yüksek malzemelerden oluşur. Yaygın çekirdek türleri arasında polimer köpükler, bal peteği yapılar ve balsa ağacı gibi doğal malzemeler bulunmaktadır (Bitzer, 1997). Sandviç yapılar, mekanik olarak klasik kiriş teorisine uygun davranış sergiler. Bu yapılarda, dış yüzey tabakaları esas olarak eksenel çekme ve basınç gerilmelerini taşır. Çekirdek malzemesi ise bu iki yüzey arasında mesafe oluşturarak kesme (makaslama) gerilmelerine karşı görev yapar. Aynı zamanda bu mesafe artışı, yapının atalet momentini büyütür ve böylece eğilme rijitliğinde belirgin bir artış sağlar. Bu yapı prensibi sayesinde, minimum ağırlıkla maksimum yapısal verim elde edilebilmektedir (Gibson ve Ashby, 1999).

3.2.3. Parçacık takviyeli kompozitler

Parçacık takviyeli kompozitler, genellikle seramik veya metal oksit gibi mikro ya da nano boyutta parçacıkların, bir matris fazı içerisinde homojen veya izotropik (yönsüz) şekilde dağıtılmasıyla oluşturulan iki fazlı malzemelerdir. Bu tür kompozitlerde parçacıklar, yük taşıma kapasitesinden ziyade, genellikle matrisin sertliğini, aşınma direncini, termal iletkenliğini veya elektriksel özelliklerini iyileştirme amacıyla kullanılır. Matris fazı çoğunlukla metal, seramik ya da polimer kökenli olabilir. Parçacıkların boyutu, hacim oranı ve dağılım karakteristiği, kompozit malzemenin nihai performansında belirleyici rol oynar (Callister ve Rethwisch, 2014). Parçacık takviyeli kompozitler, temel olarak iki ana bileşenden oluşur: matris fazı ve parçacık takviye malzemesi. Matris fazı, parçacıkları bir arada tutan ve dış yükleri parçacıklara aktaran sürekli fazdır. Bu faz genellikle polimer, metal veya seramik esaslı olabilir. Matrisin mekanik dayanımı ve sünekliği, kompozitin işlenebilirliğini ve darbe dayanımını doğrudan etkiler. Takviye malzemesi olarak kullanılan parçacıklar ise tipik olarak seramik (örneğin Al_2O_3 , SiC), metalik (örneğin W, Mo), karbon temelli (örneğin karbon siyahı, grafen) ya da nano-boyutlu (örneğin CNT – karbon nanotüpler, nanokil) olabilir. Bu parçacıklar, matrisin sertliğini, aşınma direncini, termal iletkenliğini veya elektriksel iletkenliğini iyileştirmek amacıyla kullanılır (Chawla, 2012).

3.2.4. Tabakalı (lamine) kompozitler

Tabakalı (lamine) kompozit malzemeler, farklı yönlerde yerleştirilmiş lif takviyeli katmanların (laminaların) ardışık olarak üst üste dizilmesiyle oluşturulan çok katmanlı yapılardır. Her bir lamina, belirli bir lif yönelimine ve matris yapısına sahiptir. Bu lif yönelimi, tabakanın belirli yönlerde yüksek dayanım ve sertlik göstermesini sağlar. Katmanların farklı açılarda (örneğin 0° , $\pm 45^\circ$, 90°) yerleştirilmesiyle elde edilen yapı, tüm sistemin çok yönlü (anizotropik) yükler altında mekanik olarak dayanıklı olmasını sağlar. Bu yapılandırma sayesinde, kompozit malzeme hem çekme hem de eğilme gibi farklı yükleme durumlarında üstün performans sergileyebilir (Gibson, 2016).

3.2.5. Lif (elyaf) takviyeli kompozitler

Lif takviyeli kompozitler, sürekli veya kısa (kesikli) liflerin bir matris malzemesi içerisinde dağılmasıyla oluşturulan, gelişmiş mekanik özelliklere sahip malzeme sistemleridir. Bu tür kompozitlerde, lifler esas olarak yük taşıma görevini üstlenirken; matris fazı, lifleri sabit tutar, çevresel koşullara karşı koruma sağlar ve dış yükler altında oluşan gerilmeleri liflere aktarır. Bu yapı sayesinde, malzemenin mukavemet, rijitlik, darbe dayanımı gibi özellikleri önemli ölçüde artırılabilir (Mallick, 2007). Lif takviyesi olarak genellikle sentetik lifler (karbon, cam, aramid – Kevlar gibi) kullanılmakta olup, son yıllarda çevresel kaygılar nedeniyle doğal liflere (keten, jüt, kenevir vb.) yönelim artmaktadır. Bağlayıcı matris malzemesi olarak ise polimer esaslı reçineler (örneğin epoksi, polyester, vinil ester), metal matrisler (örneğin alüminyum, titanyum) ve seramik matrisler (örneğin SiC, Al_2O_3) tercih edilmektedir. Matris türü, kompozit sistemin kullanım alanını, işlem sıcaklığını ve mekanik performansını doğrudan etkiler.

3.3. Cam Elyaf (Cam Lifi)

Cam elyaf, silis (SiO_2) esaslı camların eritilerek çok ince lifler hâlinde çekilmesiyle elde edilen bir takviye malzemesidir. Polimer matrisli kompozit sistemlerde en yaygın kullanılan takviyelerden biridir. Cam elyaf, yüksek çekme mukavemeti, iyi kimyasal direnç, düşük yoğunluk ve özellikle düşük maliyeti sayesinde geniş bir uygulama alanına sahiptir. Ayrıca elektriksel yalıtıcılığı ve korozyona karşı dayanıklılığı sayesinde denizcilik, otomotiv, rüzgar türbinleri ve yapı sektöründe yaygın olarak tercih edilmektedir. Ticari cam elyaf türleri arasında E-cam (elektriksel yalıtıcılık için), S-cam (yüksek mukavemet için) ve C-cam (kimyasal dayanım için) gibi çeşitler bulunmaktadır. Bu lifler, genellikle epoksi, polyester veya vinil ester gibi termoset reçinelerle birlikte kullanılarak dayanıklı kompozit yapılar oluşturur (Mallick, 2007).

Cam elyaf üretimi, yüksek performanslı takviye malzemelerinin elde edilmesi amacıyla birkaç kritik aşamadan oluşur. İlk olarak, cam hammaddeleri olarak silika (SiO_2), alümina (Al_2O_3), kireçtaşı ($CaCO_3$), boraks ve diğer bazı mineraller belirli oranlarda karıştırılır. Bu karışım, 1300–1600 °C arasında yüksek sıcaklıklarda ergitilerek homojen bir sıvı cam elde edilir. Ergitilen cam, özel olarak tasarlanmış ve çok sayıda küçük delikli memelerden geçirilir. Bu işlem sırasında cam sıvısı, çok ince ve sürekli

lifler hâline çekilir. Elde edilen lifler, üretim sürecinde liflerin birbirine yapışmasını engelleyen ve matris malzeme ile lifler arasındaki bağlanmayı güçlendiren kimyasal bir kaplama ile yüzey işlemi görür. Son aşamada, yüzey işlemi uygulanmış lifler iplik veya keçe formunda toplanarak, daha sonraki kompozit üretim süreçlerine uygun hale getirilir (Hull & Clyne, 1996). Cam elyafın bazı fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Cam Elyafın Özellikleri (Strong, 2008)

Özellik	Açıklama
Yoğunluk	~2.5 g/cm ³
Çekme mukavemeti	2000–3500 MPa
Elastik modül	70–80 GPa
Korozyon direnci	Yüksek – kimyasal ortamlara dayanıklı
Elektriksel özellik	İyi yalıtkan
Termal genleşme	Düşük
Maliyet	Karbon ve aramid elyaflara göre daha ucuz

Endüstride yaygın bir şekilde kullanılan cam elyaf türlerine ait özellikler ve kullanım alanlarına ilişkin bilgiler Çizelge 3.2 ’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Cam Elyaf Türleri, Özellikleri ve Kullanım Alanları (Mallick, 2007; ASTM, 2005; Callister, 2013; Bunsell, 2018)

Cam Elyaf Türü	Özellikleri	Kullanım Alanları
E-Cam Elyafı	Elektriksel yalıtkan, iyi mekanik özellikli	Elektrik izolasyonu, FRP, otomotiv, inşaat
S-Cam Elyafı	Yüksek çekme dayanımı, yüksek sıcaklık dayanımı	Havacılık, askeri uygulamalar, yüksek performanslı kompozitler
C-Cam Elyafı	Kimyasal dayanımı yüksek	Kimya endüstrisi, depolama tankları
AR-Cam Elyafı	Alkaliye dayanıklı (özellikle çimento içinde)	Beton takviyesi, inşaat sektöründe
ECR-Cam Elyafı	Borsuz E-cam alternatifi, kimyasallara dayanıklı	Elektrik, çevre dostu uygulamalar
D-Cam Elyafı	Düşük dielektrik sabiti, yüksek frekans için uygun	Antenler, radarlar, mikrodalga sistemleri

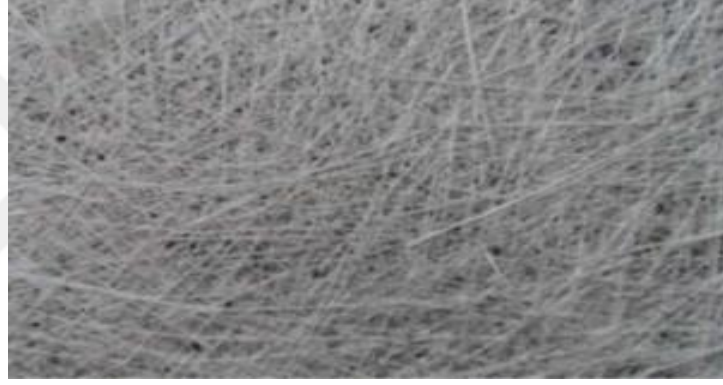
E-cam elyafı, kompozit endüstrisinde en yaygın kullanılan cam elyaf türüdür ve düşük maliyeti ile dengeli mekanik performans sunar. Bu özellikleri sayesinde otomotiv, inşaat ve tüketici ürünleri gibi geniş uygulama alanlarında tercih edilmektedir. S-cam elyafı ise yüksek mukavemet ve dayanım gerektiren kritik uygulamalar için geliştirilmiş olup, yüksek maliyeti nedeniyle özellikle havacılık ve savunma sanayinde yaygın olarak kullanılır. Alkali dirençli (AR) cam elyafları, yüksek oranda zirkonyum oksit (ZrO₂) içermeleri nedeniyle alkalilere karşı üstün direnç gösterirler; bu nedenle özellikle çimento

esaslı kompozitlerde tercih edilirler. Ayrıca, borsuz yapıya sahip olan ECR-cam elyafları çevre dostu ürünler olarak geliştirilmiş ve sürdürülebilirlik odaklı uygulamalarda önemli bir yere sahiptir (Mallick, 2007; ASTM, 2005; Callister, 2013; Bunsell, 2018). Cam elyaflar avantaj ve dezavantajları Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Cam Elyafın Avantajları ve Dezavantajları (Mallick, 2007)

Avantajları	Dezavantajları
Düşük maliyetlidir	Kırılgandır, darbe dayanımı düşüktür
Yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahiptir	Yoğunluğu karbon elyafa göre daha yüksektir
Korozyona ve neme karşı dirençlidir	Sıcaklık dayanımı sınırlıdır
Elektriksel olarak yalıtım sağlar	Uzun süreli yorulma dayanımı düşüktür

Aşağıda cam elyafa ait bir görsel Şekil 3.6'da sunulmuştur.



Şekil 3.6. Cam Elyaf (İnce, 2019).

3.4. Karbon Elyaf

Karbon elyaf, yüksek sıcaklıklarda karbonlaştırılmış organik polimerlerden (çoğunlukla poliakrilonitril – PAN) elde edilen, %90'dan fazla karbon içeriğine sahip kristalin yapılı ince liflerdir. Bu lifler, yüksek çekme mukavemeti, düşük yoğunluk ve üstün termal stabilite gibi özellikleri sayesinde havacılık, otomotiv, spor ekipmanları ve savunma sanayisi gibi yüksek performans gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Karbon elyafın yapısal özellikleri, liflerin üretim sürecinde uygulanan ısıtma işlemlerin sıcaklığı ve süresi ile doğrudan ilişkilidir (Mallick, 2007). Karbon elyaf, enerjiyi iyi iletmesi nedeniyle geliştirilmiş, %90'dan fazlası karbon atomlarından oluşan, yüksek mukavemetli, hafif, esnek ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı lifsel bir malzemedir.

Genellikle polimer matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanılır. Elektriksel ve ısı iletkenliği oldukça yüksektir. Karbon elyaf, özellikle havacılık, savunma, otomotiv, spor malzemeleri ve tıbbi cihazlar gibi ileri mühendislik uygulamalarında yaygın biçimde tercih edilmektedir. Üretim süreci karmaşık ve enerji yoğun olmasına rağmen, sunduğu üstün performans nedeniyle endüstride önemli bir yere sahiptir (Morgan, 2005; ASM Handbook, Vol. 21; Donnet et al., 1998).

3.4.1. Karbon elyafın yapısı

Karbon elyaf, grafitik yapıya (grafen tabakalarının düzenli veya düzensiz istiflenişı) sahip olup, lif boyunca uzanan karbon atomlarının bu düzenlenişı mekanik ve fiziksel özelliklerini belirler. İki temel yapı mevcuttur: turbostratik yapı ve grafitik yapı. Turbostratik yapı, düzensiz istiflenmiş grafen tabakalarından oluşur ve genellikle düşük modüllü poliakrilonitril (PAN) esaslı karbon liflerde görülür. Grafitik yapı ise yüksek sıcaklıkta oluşan, düzenli tabakalar içeren yapıdır ve yüksek modüllü zift esaslı liflerde yaygındır. Bu yapısal farklılıklar karbon lifin esneklik modülü ve kırılma dayanımını doğrudan etkiler (Donnet, Bansal, & Wang, 1998). Karbon elyafa ait bazı fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Karbon Elyafın Özellikleri

Özellik	Değerler (yaklaşık)
Yoğunluk	1,75–1,95 g/cm ³
Çekme mukavemeti	3,0–7,0 GPa
Elastik modül	200–800 GPa (lif türüne bağı)
Uzama	%0,5–2,0
Termal iletkenlik	10–1000 W/m·K
Elektrik iletkenliği	Yüksek (metal benzeri)

Bu karbon elyafın temel özellikleri, üretimde kullanılan öncül malzeme türüne ve uygulanan ısı işlem sıcaklığına bağı olarak değışiklik göstermektedir. Yoğunluğu yaklaşık 1,75–1,95 g/cm³ arasında değışirken, çekme mukavemeti 3,0 – 7,0 GPa, elastik modülü ise lif türüne bağı olarak 200–800 GPa aralığındadır. Uzama oranı %0,5 – 2,0 arasında olup, termal iletkenliği 10 ila 1000 W/m·K gibi geniş bir yelpazede değışmektedir. Elektrik iletkenliği ise yüksek olup metal benzeri özellikler taşır. Bu varyasyonlar, karbon elyafın performansını uygulama alanlarına göre optimize etmeye olanak sağlar (Morgan, 2005). Karbon elyafı kompozitler birçok endüstriyel ve

mühendislik alanından kullanılmaktadır. Kullanım alanlarına ait örnekler Çizelge 3.5’te verilmiştir. KETK’ler, yüksek mukavemet/ağırlık oranları ve üstün dayanımları sayesinde birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Havacılık sektöründe uçak gövdeleri, kanatlar ve içyapı panellerinde tercih edilirken, otomotivde şasi takviyesi, kaporta parçaları ve motor sporlarında kullanılmaktadır. Uzay uygulamalarında roket ve uydu yapılarında önemli rol oynar.

Çizelge 3.5. Karbon Elyaf Kullanım Alanları

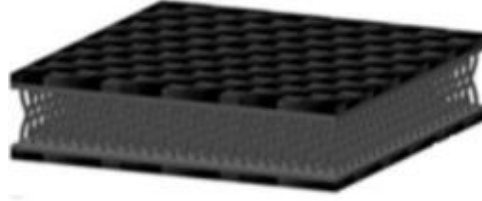
Sektör	Uygulama Alanı
Havacılık	Uçak gövdeleri, kanatlar, içyapı panelleri
Otomotiv	Şasi takviyesi, kaporta parçaları, motor sporları
Uzay	Raket parçaları, uydu yapıları
Spor	Bisiklet, tenis raketi, kayak, golf sopası
İnşaat	Beton donatıları (KETK), yapı güçlendirme (karbon lifli plakalar)
Tıp	Protez parçaları, cerrahi alet gövdeleri

Spor ekipmanlarında ise bisiklet, tenis raketi, kayak ve golf sopası gibi ürünlerde yaygın kullanım alanı bulmaktadır. İnşaat sektöründe karbon lifli polimerler beton donatılarında ve yapı güçlendirme amaçlı karbon lifli plakalar olarak kullanılmaktadır. Tıp alanında ise protez parçaları ve cerrahi alet gövdeleri gibi hassas uygulamalarda karbon elyaf kompozitler tercih edilmektedir (Gay, Hoa, ve Tsai, 2003). Çeşitli uygulamalarda kullanılan karbon elyafli kompozitlere ait olumlu ve olumsuz özellikler Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Karbon Elyafın Avantaj ve Dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
Çok yüksek çekme ve eğilme mukavemetine sahiptir	Maliyeti yüksektir (cam elyafa kıyasla daha pahalıdır)
Düşük yoğunluğu sayesinde hafiftir	Kırılgan yapısı nedeniyle ani darbelerde çatlama riski taşır
Yüksek elastik modülü ile rijitliği yüksektir	Elektrik iletkenidir, bu nedenle bazı uygulamalarda güvenlik açısından dezavantaj olabilir
Korozyona ve kimyasallara karşı çok dayanıklıdır	Üretim ve işleme süreçleri daha karmaşık ve maliyetlidir
Boyutsal kararlılığı yüksektir (sıcaklık değişimlerinden daha az etkilenir)	Geri dönüşümü ve çevresel sürdürülebilirliği cam elyafa göre daha sınırlıdır

Aşağıda örnek bir karbon elyaf görseli Şekil Şekil 3.7’de sunulmuştur.



Şekil 3.7. Karbon Elyaf (Ertan vd., 2019)

3.4.2. Aramid elyaf

Aramid lifleri, "aromatik" ve "poliamid" kelimelerinin birleşiminden türemiş, yüksek performanslı sentetik organik liflerdir. Moleküler yapıları, aromatik halkalar içeren poliamid zincirlerinden oluşur. Bu yapı, aramid liflerine yüksek sıcaklık dayanımı, darbe direnci ve çekme mukavemeti gibi üstün mekanik özellikler kazandırır (Brown, 2002). Aramid elyaf, aromatik halkalı poliamid zincirlerinden oluşan yüksek performanslı sentetik liflerdir. Polimer zincirlerinin düzenli, doğrusal ve kristal yapısı, aramid liflerine üstün mekanik ve ısı özellikler kazandırır. Bu lifler, amid gruplarının (-CO-NH-) aromatik halkalarla bağlanması sayesinde yüksek çekme dayanımı, rijitlik ve ısıya karşı direnç gösterir (Mallick, 2007). Aramid liflere ait belli fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 3.7 'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Aramid liflere ait belli fiziksel ve kimyasal özellikler

Özellik	Değer / Açıklama
Kimyasal yapı	Aromatik poliamid zincirleri
Çekme mukavemeti	2,8 – 4,1 GPa
Elastik modül	~70 – 130 GPa
Yoğunluk	~1,44 g/cm ³ (Kevlar 49)
Isıya dayanım	>500°C'de karbonlaşır (erimez)
Yanmazlık	Alev almaz, erimez
Elektriksel özellik	Dielektrik (yalıtkan)

Aramid lifleri, aromatik poliamid zincirlerinden oluşan yapısıyla yüksek çekme mukavemeti (2,8–4,1 GPa) ve elastik modül (~70–130 GPa) değerlerine sahiptir. Kevlar 49 gibi aramid türlerinin yoğunluğu yaklaşık 1,44 g/cm³'tür. Aramidler 500°C'nin üzerinde karbonlaşarak erimezler ve yanmaz özellik gösterirler. Elektriksel olarak ise dielektrik (yalıtkan) karaktere sahiptirler, bu da onları elektrik izolasyon uygulamalarında da kullanılabilir kılar (Chawla, 2012).

Aramid elyaflara ait belli başlıca avantaj ve dezavantajlar Çizelge 3.8'de sunulmuştur.

Çizelge 3.8. Aramid elyafın avantajları ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
Yüksek çekme mukavemeti / ağırlık oranı	UV ışınlarına karşı hassastır (bozulabilir)
Yüksek sıcaklık ve alev dayanımı (özellikle meta-aramidler)	Asit ortamlarına karşı dayanıksızdır
Darbe dayanımı çok yüksektir (kurşun geçirmezlikte kullanılır)	İşlenmesi zordur; kesme/delme için özel takımlar gerekir
Yorulma direnci ve aşınma direnci çok iyidir	Su emme eğilimi vardır (özellikle Twaron gibi bazı türlerde)

Aramid elyaflar, yüksek çekme mukavemeti/ağırlık oranı, üstün darbe dayanımı ve iyi yorulma ile aşınma direnci gibi avantajlarıyla bilinir. Özellikle meta-aramidler yüksek sıcaklık ve alev dayanımı sağlar, bu da onları koruyucu giysiler ve zırh uygulamalarında tercih edilen bir malzeme yapar. Ancak, aramid liflerin UV ışınlarına karşı hassas olması, asidik ortamlarda dayanıklılıklarının düşük olması ve su emme eğilimleri bazı dezavantajlar olarak öne çıkar. Ayrıca, işlenmelerinin zor olması nedeniyle kesme veya delme işlemlerinde özel kesici takımlar gerektirirler (Mallick, 2007). Dokuma ve kırılmış aramid elyafa ait örnek görsel Şekil 3.8’de verilmiştir.



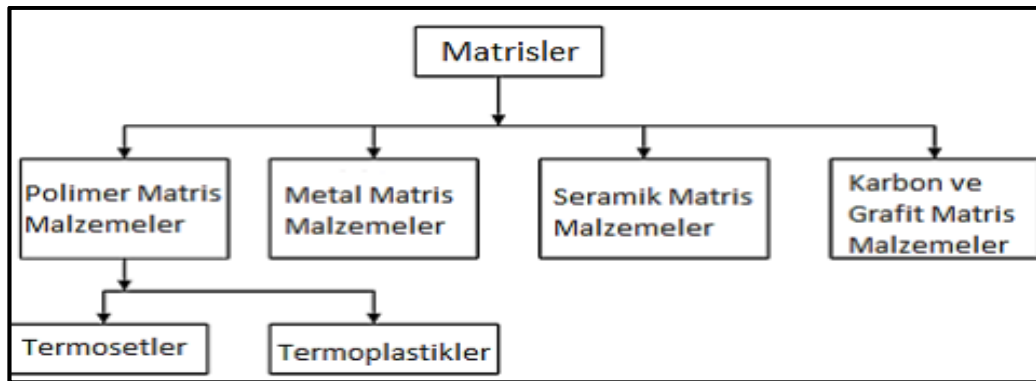
Şekil 3.8. Aramid Elyaf (Korkut ve Gören, 2022)

3.5. Matris Tipine Göre Kompozitler

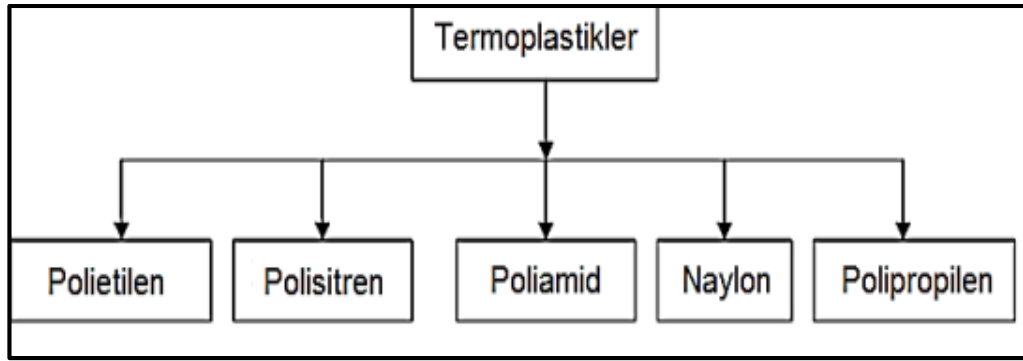
3.5.1. Polimer matrisli kompozitler

Polimer matrisli kompozitler, en yaygın kullanılan kompozit malzeme türüdür. Bu kompozitlerde polimer esaslı matris, genellikle lif takviyeli olarak kullanılır ve yapıya mekanik dayanım, şekillendirilebilirlik, hafiflik ve kimyasal direnç kazandırır. Polimer matrisli kompozitler, cam, karbon, aramid gibi liflerle takviye edilen polimer esaslı reçinelerden oluşur. Hafiflik ve yüksek mukavemet oranı gerektiren uygulamalarda tercih

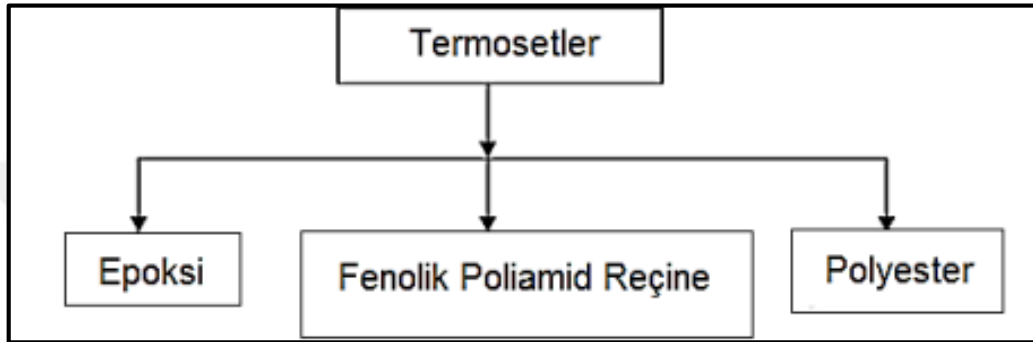
edilirler ve mühendislik alanında en çok kullanılan kompozit türlerindendir (Mallick, 2007). Polimer matrisli kompozitler, matris ve takviye türüne göre sınıflandırılır. Matris türüne göre termoset ve termoplastik esaslı kompozitler olmak üzere iki alt gruba ayrılırlar. Termoset polimerler, kürlenme (sertleşme) işlemi sonrası tekrar şekillendirilemezler. Bu polimerler, yüksek mekanik dayanım, ısıya dayanıklılık ve kimyasal direnç gibi üstün özelliklere sahiptir (Gibson, 2016). Termoset polimer matrisler, ısı ve/veya kimyasal reaksiyon yoluyla kürlenir, bir kez sertleştikten sonra tekrar yumuşamayan ve şekil değişikliği yapılamayan polimerlerdir. Bu özellik, onları kompozit malzemeler için ideal kılar. Kürlenme sürecinde oluşan çapraz bağlar, yapının yüksek sıcaklık ve kimyasal dayanımını artırır (Callister ve Rethwisch, 2020). Termoplastik polimer matrisler, ısıtıldıklarında yumuşayan, soğutulduklarında ise yeniden sertleşen ve bu işlemi tekrar tekrar bozulmadan gerçekleştirebilen polimer türleridir. Bu özellikleri sayesinde geri dönüştürülebilir ve yeniden şekillendirilebilirler. Termoplastikler, moleküler yapılarında çapraz bağ içermeyen, lineer veya hafif dallanmış zincirlerden oluşur (Callister, 2020). Termoplastik polimerler, ısıtıldıklarında yumuşayan ve soğutulduklarında yeniden sertleşen yapıları sayesinde şekillendirilebilirlik özelliklerini korurlar. Bu özellikleri, onların tekrar tekrar işlenebilmesini ve geri dönüştürülebilmesini mümkün kılar. Ayrıca, yüksek darbe dayanımı ve hızlı üretim süreleri gibi avantajlar da sunarlar (Callister ve Rethwisch, 2018). Aşağıda Şekil 3.9’da matris malzeme türleri, Şekil 3.10’da termoplastik matris türleri ve şekil 3.11’de termoset matris türleri verilmiştir.



Şekil 3.9. Matris malzeme türleri (Türkmen, 2012)



Şekil 3.10. Termoplastik matris türleri(Türkmen, 2012).



Şekil 3.11. Termoset matris türleri (Türkmen, 2012)

Termoset ve termoplastik matris karşılaştırması aşağıda yer alan Çizelge 3.9. 'da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Termoset ve termoplastik matris karşılaştırması

Özellik	Termoset Polimerler	Termoplastik Polimerler
Yeniden şekillendirme	Mümkün değil	Mümkün
Geri dönüşüm	Zor	Kolay
Darbe dayanımı	Düşük	Yüksek
İşlenebilirlik	Kısıtlı	Kolay
Isıl kararlılık	Yüksek	Orta - Yüksek (türe bağlı)

Termoset ve termoplastik polimerler, sahip oldukları farklı özelliklerle kompozit uygulamalarında farklı avantajlar sunar. Termoset polimerler, kütleme sonrası kimyasal olarak sabitlenir ve bir daha şekillendirilemez. Bu yapı, yüksek ısıl kararlılık sağlar ancak geri dönüşüm ve işlenebilirlik açısından sınırlıdır. Ayrıca darbe dayanımları düşüktür. Buna karşın termoplastik polimerler, ısı ile tekrar tekrar şekillendirilebilir ve bu sayede geri dönüşüme uygundurlar. Darbe dayanımları yüksektir, işlenmeleri kolaydır ve bazı türleri orta ila yüksek ısıl kararlılık gösterebilir. Bu farklar, uygulama alanlarının seçiminde belirleyici rol oynar (Callister, 2020; Strong, 2006).

Polimer matrisli kompozitler, takviye türüne göre sınıflandırıldığında dört temel alt gruba ayrılır: elyaf takviyeli, parçacık takviyeli, tabakalı (lamine) kompozitler ve yapısal (sandviç) kompozitler. Her bir takviye türü, malzemenin mekanik performansı, rijitliği, darbe dayanımı ve uygulama alanları üzerinde doğrudan etkilidir (Bowler vd., 2012; Strong, 2008). Elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitler, yüksek dayanımlı liflerin (örneğin cam, karbon veya aramid) polimer esaslı bir matris içerisinde dağılmasıyla oluşturulan çok fazlı malzemelerdir. Bu yapı içerisinde lifler, mekanik yükleri taşıma görevini üstlenirken; matris fazı, lifleri bir arada tutar, çevresel etkilerden korur ve uygulanan yükün liflere düzgün bir şekilde iletilmesini sağlar. Elyaf takviyesi, kompozit malzemelere yüksek mukavemet, rijitlik ve hafiflik gibi üstün özellikler kazandırır (Mallick, 2007). Kompozit malzemeler üç temel bileşenden oluşur: matris fazı, takviye fazı ve ara yüzey (interphase). Matris fazı genellikle bir polimerdir ve lifleri bir arada tutarak yük aktarımını sağlar. Aynı zamanda takviye fazını dış etkenlerden (örneğin korozyon, nem, UV ışınımı) korur. Matrisler, termoset reçineler (epoksi, polyester, vinil ester) ve termoplastik reçineler (polipropilen (PP), poliamid (PA), poli-eter-eter-keton (PEEK), polietilen (PE)) olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Bu faz, kompozitin mekanik özelliklerini doğrudan etkileyen önemli bir unsurdur (Strong, 2008). Takviye fazı (lifler), kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirleyen temel bileşendir. Lifler, matris içerisinde genellikle yönlendirilmiş ya da rastgele dağılmış kısa veya uzun formlarda bulunur. Takviye malzemesi olarak yaygın şekilde sentetik lifler (cam, karbon, aramid), doğal lifler (keten, jüt, kenevir) ve seramik lifler (alümina, silika) tercih edilir. Liflerin türü, boyu, hacim oranı ve dizilim yönü, kompozit malzemenin dayanım, rijitlik ve süneklik gibi performans özelliklerini doğrudan etkiler (Chawla, 2012). Ara yüzey (interphase), matris ile takviye elyafı arasında yer alan ve bu iki fazın birlikte çalışmasını sağlayan kritik bir katmandır. Bu katman, mekanik yüklerin matristen liflere etkin bir şekilde aktarılmasına aracılık eder. Ara yüzeyin kalitesi, kompozit malzemenin genel mekanik performansı üzerinde belirleyici rol oynar. Bu nedenle lif yüzeyine uygulanan çeşitli işlemler (örneğin plazma işlemi, silan kaplama, oksidasyon) ile ara yüzey bağlanma kuvveti ve dayanımı iyileştirilebilir (Hull ve Clyne, 1996). Elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit malzeme resmi Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Elyaf takviyeli polimer matrisli kompozit (Gökçe vd., 2020)

Parçacık takviyeli kompozitler, bir matris malzemenin (polimer, metal veya seramik) mikro ya da nano boyuttaki parçacıklarla güçlendirilmesi sonucu oluşan malzemelerdir. Bu kompozitler, sertlik, mukavemet ve aşınma direnci gibi mekanik özelliklerin iyileştirilmesi ile termal ve elektriksel iletkenlik gibi fonksiyonel özelliklerin kazandırılması amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Chawla, 2012). Matris ve takviye parçacıkları olmak üzere iki ana bileşenden oluşan parçacık takviyeli kompozitlerde, matris fazı genellikle polimer, metal veya seramik olabilir ve parçacıkları sarıp bağlar. Takviye parçacıkları ise çoğunlukla seramik tozları (SiC , Al_2O_3), karbon siyahı, cam, kuvars veya metal tozları şeklindedir (Mallick, 2007). Parçacık takviyeli kompozitlerin özellikleri ve avantajları şunlardır:

- Yüksek sertlik ve aşınma direnci sağlarlar.
- Modül ve mukavemeti artırarak yapıya rijitlik katarlar.
- Lif takviyeli kompozitlere göre daha kolay üretim ve işlenebilirlik sunarlar.
- Genellikle daha ekonomik olup düşük maliyet avantajı sağlarlar (Strong, 2008).

Tabakalı (lamine) kompozitler, farklı malzemelerin üst üste katmanlar halinde birleştirilmesiyle oluşturulan çok katmanlı yapılar olup, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, korozyon direnci ve tasarım esnekliği gibi avantajlara sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle özellikle havacılık, otomotiv, inşaat ve spor ekipmanları sektörlerinde yaygın olarak tercih edilirler (Mallick, 2007). Tabakalı (lamine) kompozitlerin uygulama alanları Çizelge 3.10.'da verilmiştir.

Çizelge 3.10. Tabakalı (lamine) kompozitlerin uygulama alanları

Uygulama Alanı	Kullanım Yeri	Sektör
Uçak yapıları	Kanat, gövde, kuyruk, paneller	Havacılık & Uzay
Helikopter rotorları	Yüksek dayanımlı ve hafif rotor palaları	Havacılık
Otomotiv parçaları	Gövde panelleri, şasi parçaları, yarış araçları	Otomotiv
Spor ekipmanları	Tenis raketi, kayak, bisiklet kadrosu	Spor & Rekreasyon
Deniz taşıtları	Sürat teknesi gövdesi, yat parçaları	Gemi & Denizcilik
Rüzgar türbinleri	Rüzgar kanatları (blade)	Yenilenebilir Enerji
İnşaat & Mimari yapılar	Hafif panel sistemleri, köprü takviyeleri	İnşaat
Savunma sanayi	Zırhlı levhalar, kompozit kalkanlar	Askeri & Güvenlik
Medikal ekipman	Protez iskeletleri, tekerlekli sandalye gövdesi	Tıp & Sağlık
Elektronik	Devre kartı destek plakaları, elektromanyetik koruma	Elektrik & Elektronik

Lamine kompozitler, üç temel bileşenden oluşur: tabakalar, matris fazı ve ara yüzey. Tabakalar, genellikle tek yönlü veya dokuma liflerden oluşan ince katmanlardır. Matris fazı, bu tabakaları birleştiren polimer reçinedir. Ara yüzey ise tabakalar arasındaki bağlayıcı bölge olup, yük aktarımını sağlar (Mallick, 2007). Yüksek spesifik dayanım ve modül, ince ve hafif yapılar üretme imkanı ile iyi yorulma ve darbe dayanımı gibi temel özelliklere sahiptir (Gay vd., 2003). Tabakalı (lamine) kompozitler, çeşitli sektörlerde geniş uygulama alanlarına sahiptir. Havacılık ve uzay sektöründe uçak kanatları, gövdeleri ve kuyruk panellerinde kullanılırken; helikopter rotor palalarında yüksek dayanımlı ve hafif yapılarıyla tercih edilirler. Otomotivde gövde panelleri ve yarış aracı parçalarında, spor ekipmanlarında tenis raketi ve bisiklet kadrosu gibi ürünlerde yaygın kullanımları vardır. Ayrıca denizcilik sektöründe sürat tekneleri ve yat parçalarında, yenilenebilir enerjide rüzgar türbini kanatlarında, inşaatta hafif panel sistemleri ve köprü takviyelerinde, savunma sanayinde zırhlı levha ve kalkanlarda, tıp alanında protez iskelet ve tekerlekli sandalye gövdelerinde, elektrik ve elektronik sektöründe ise devre kartı destek plakaları ile elektromanyetik koruma amaçlı malzemelerde tercih edilmektedir (Mallick, 2007; Gay vd., 2003; Strong, 2008). Tabakalı kompozitlerin avantaj ve dezavantajları Çizelge 3.11’de verilmiştir.

Çizelge 3. 11. Tabakalı kompozitlerin avantaj ve dezavantajları

Avantajlar	Dezavantajlar
Yüksek özgül mukavemet ve modül (hafif ve dayanıklı yapı)	Katmanlar arası delaminasyon (ayrılma) riski
Lif yönlendirmesi ile istenen mekanik özelliklerin elde edilmesi	Üretim süreçleri karmaşık ve hassas olabilir
Korozyona karşı dirençlidir	Onarım ve bakım işlemleri zor ve maliyetli olabilir
İyi yorulma ve titreşim dayanımı	Üretim için özel ekipman ve bilgi gerektirir
İstenilen şekil ve boyutta üretim imkânı (tasarım esnekliği)	Düşük ısı iletkenlik (bazı uygulamalarda dezavantaj olabilir)
Farklı malzemelerin kombine edilerek özel amaçlı özellikler sağlanabilmesi	Lif yönüne dik doğrultuda mekanik dayanım düşüktür
Elektriksel yalıtım özelliği (uygulamaya göre avantaj sağlar)	Hammadde maliyeti genellikle metallere göre daha yüksektir
Yüksek yüzey kalitesi ve estetik görünüm	Geri dönüşüm ve doğaya karışım açısından sınırlı çevre dostu özellik

Tabakalı (lamine) kompozit malzemeler, sahip oldukları özgül mukavemet, yüksek yorulma dayanımı, tasarım esnekliği ve korozyon direnci gibi avantajlarla birçok mühendislik alanında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bununla birlikte, üretim karmaşıklığı, yüksek maliyet ve özellikle katmanlar arası delaminasyon gibi yapısal zayıflıklar gibi bazı dezavantajlara da sahiptirler (Mallick, 2007; Strong, 2008; Hull ve Clyne, 1996). Yapısal (sandviç) kompozitler, özellikle yüksek eğilme dayanımı gerektiren ancak hafiflikten ödün verilmeyen mühendislik uygulamalarında tercih edilir. İnce ve güçlü yüzey levhalar, mekanik yükleri taşıırken; hafif çekirdek malzeme, yapı kalınlığını artırarak eğilme rijitliğini belirgin şekilde yükseltir. Bu yapı sayesinde, kompozit malzeme hem rijit hem de hafif olur (Gibson, 2016). Sandviç kompozit yapılarda, yüzey levhaları mekanik yükleri taşıırken, çekirdek malzeme yapının kalınlığını artırarak eğilme rijitliğini belirgin şekilde yükseltir. Bu yapı, minimum ağırlıkla maksimum yapısal performans sağlar. Yapıştırıcı arayüzler, farklı bileşenler arasında mekanik bütünlüğü sağlar (Daniel ve Ishai, 2006). Sandviç kompozitlerin en yaygın kullanım alanlarına ait örnekler Çizelge 3.12’de verilmiştir.

Çizelge 3.12. Sandviç kompozitlerin Uygulama Alanları

Sektör	Uygulama Örneği
Havacılık	Uçak panelleri, zemin kaplamaları
Uzay	Uydu gövdeleri, solar panel taşıyıcıları
Otomotiv	Motor kaputu, tavan paneli
Denizcilik	Gemi gövdesi, teknelerde yapı elemanları
Rüzgar Enerjisi	Rüzgar türbini kanatları
Yapı/Mimari	Hafif kompozit paneller, cephe kaplamaları

Sandviç kompozit yapılar, hafiflik ve yüksek mekanik dayanımın bir arada istendiği uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Özellikle havacılık, uzay, otomotiv,

denizcilik ve yapı sektörlerinde; titreşim sönümlleme, termal yalıtım ve yapısal rijitlik gibi avantajlarıyla tercih edilirler (Vinson, 1999).

3.6. Polimer Matrisli Kompozit Üretim Yöntemleri

3.6.1. Elle serme ve vakum torbalama

Elle serme yöntemi, düşük maliyetli ekipman ihtiyacı ve basit uygulama süreci sayesinde küçük ölçekli üretimlerde sıkça tercih edilen bir kompozit imalat yöntemidir. Ancak üretim süresi uzun ve kalite operatöre bağlıdır. Bu nedenle büyük seri üretimler için uygun değildir (Strong, 2008). Basit, düşük maliyetli bir yöntemdir. Üretim aşamalarını adımları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Kalıbın hazırlanması ve ayırıcı uygulanması
- Takviye elyafının yerleştirilmesi (örneğin cam elyafı)
- Reçinenin uygulanması (fırça, rulo veya dökme)
- Havanın çıkarılması ve tabakanın sıkıştırılması (metal veya polimer rulo ile)
- Kurlama (sertleşme) süreci
- Kalıptan çıkarma ve son işlem (zımpara, kesim vb.) (Strong, 2008).

Bu yöntemin belirgin avantaj ve dezavantajları aşağıdaki şekildedir.

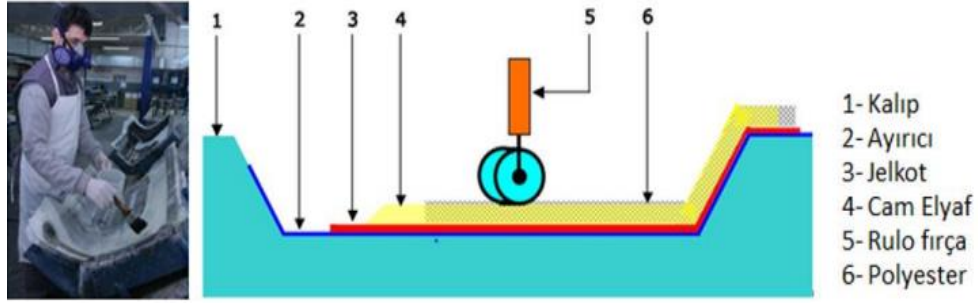
Avantajları

- Düşük maliyetli ekipman gerektirir
- Küçük ve orta ölçekli üretim için uygundur
- Karmaşık şekilli parçalar üretilebilir
- Prototip ve özel parça üretiminde esneklik sunar (Callister, ve Rethwisch ,2020).

Dezavantajları

- İşçilik yoğunudur, üretim süresi uzundur
- Kalite operatöre bağlıdır; hatalı reçine oranı riski vardır
- Hava kabarcıkları ve homojen olmayan reçine dağılımı olabilir
- Otomasyona uygun değildir, büyük seri üretim zordur (Hull ve Clyne, 1996).

Aşağıda Şekil 3.13. 'te Elle yatırma yöntemi üretim süreci şeması verilmiştir.



Şekil 3.13. Elle yatırma yöntemi üretim süreci şeması (Dinkci, 2020).

3.6.2. Vakum torbalama yöntemi

Vakum torbalama, elle serme veya prepreg (önceden reçinelenmiş) işlemi sonrası, parça üzerine bir vakum torbası yerleştirilerek hava boşluklarının ve fazla reçinenin vakumla uzaklaştırıldığı bir kompozit üretim tekniğidir. Bu yöntemle lif hacmi oranı artırılır ve mekanik özellikler iyileştirilir (Gay vd., 2003). Vakum torbalama yönteminde izlenecek adımlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Kalıp hazırlanır ve ayırıcı uygulanır.
2. Takviye elyafı ve reçine katmanları serilir.
3. Ayırıcı film (release film) ve delikli film yerleştirilir.
4. Emici keçeler (breather/bleeder) yerleştirilir.
5. Vakum torbası (vakum bag) sızdırmaz şekilde yerleştirilir.
6. Vakum pompası bağlanarak sistemdeki hava dışarı çekilir.
7. Kütleme (oda sıcaklığında veya fırında) tamamlanır (Strong, 2008).

Vakum torbalama yönteminin olumlu ve olumsuz yönleri aşağıda verilmiştir.

Avantajları

- Yüksek elyaf hacmi oranı (%60 ve üzeri) elde edilir
- Daha az hava boşluğu (voids), daha yüksek mekanik özellikler
- Yüzey kalitesi artar
- Daha kontrollü reçine miktarı
- Orta ölçekli üretimler için idealdir (Chawla, 2012).

Dezavantajları

3.6.3. Reçine transfer kalıplama (RTM)

Reçine transfer kalıplama (RTM), kapalı kalıpta uygulanan bir kompozit üretim yöntemidir. Bu yöntemde, kuru elyaf veya kumaş takviye malzemeleri kalıp içine yerleştirilir. Daha sonra sıvı reçine, pompa veya vakum yardımıyla kalıba enjekte edilir. Reçine, kalıp içindeki boşlukları tamamen doldurduktan sonra kürleme (sertleşme) süreci gerçekleşir. RTM yöntemi, karmaşık şekilli parçaların yüksek kalitede ve tekrarlanabilir üretimi için uygundur (Mallick, 2007). Reçine transfer kalıplamaya ait avantaj ve dezavantajlar Çizelge 3.13 'te verilmiştir.

Çizelge 3.13. Reçine transfer kalıplamaya ait avantajlar ve dezavantajlar

Avantajlar	Dezavantajlar
Yüksek yüzey kalitesi sağlar	Kalıp maliyeti yüksektir
Seri üretime uygundur	Karmaşık sistem kontrolü gerektirir
Düşük boşluk oranı ve iyi mekanik özellikler	Yalnızca orta-büyük ölçekli üretime uygundur
İki taraflı düzgün yüzey (çift yüzey kalitesi)	Enjeksiyon sırasında reçine kaçak riski vardır

Reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi, yüksek yüzey kalitesi ve düşük boşluk oranı ile iyi mekanik özellikler sunar. Seri üretime uygun olup, çift taraflı düzgün yüzey kalitesi sağlar. Ancak kalıp maliyeti yüksektir ve karmaşık sistem kontrolü gerektirir. Ayrıca, yalnızca orta ve büyük ölçekli üretimler için uygundur ve enjeksiyon sırasında reçine kaçak riski bulunmaktadır (Gay vd., 2003).

3.6.4. Pultrüzyon

Pultrüzyon, sürekli elyafların reçine ile emprenye edilip ardından ısıtılmış bir kalıptan çekilerek sürekli ve sabit kesitli kompozit profillerin üretildiği bir imalat yöntemidir. Bu yöntemin adı, İngilizce "pull" (çekmek) ve "extrusion" (ekstrüzyon) kelimelerinin birleşiminden gelir. Pultrüzyon, liflerin reçineye batırılması ve kalıptan çekilmesi ile düz, uzun ve sabit kesitli parçaların seri üretimi için idealdir (Strong, 2008). Pultrüzyon yöntemine ait avantajlar ve dezavantajlar Çizelge 3.14'te verilmiştir.

Çizelge 3.14. Pultrüzyon yöntemine avantajlar ve dezavantajlar

Avantajlar	Dezavantajlar
Sürekli üretime uygundur (yüksek verim)	Yalnızca sabit kesitli profiller üretilebilir
Yüksek mekanik dayanım sağlar	Başlangıç yatırım maliyeti yüksektir
Otomasyona uygundur, insan hatası düşüktür	Karmaşık geometri üretimi zordur
Düşük fire ve yüksek malzeme kullanımı	Reçine seçiminde sınırlamalar olabilir
Uygun maliyetli, seri üretime uygundur	Kalıp değişimi zor ve pahalıdır

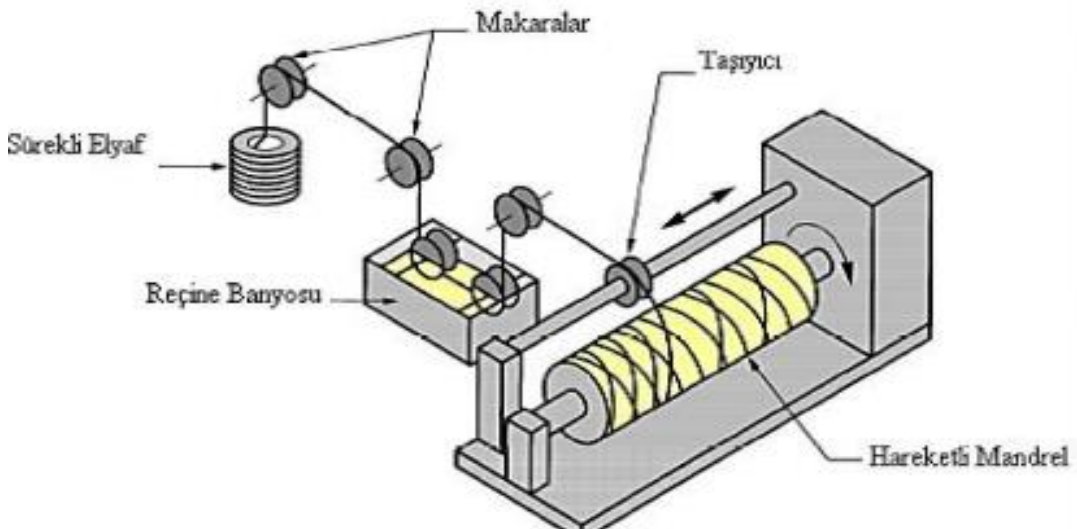
Pultrüzyon yöntemi, yüksek verim ve otomasyon imkânı sunarak sabit kesitli kompozit profillerin seri üretimi için idealdir. Ancak, sadece düz ve sabit kesitli parçalar üretilebilir, karmaşık geometriler için uygun değildir. Başlangıç maliyetleri yüksek olabilir, fakat düşük fire oranı ve yüksek mekanik dayanım avantaj sağlar (Gay vd., 2003).

3.6.5. Filament sarma (Elyaf sarma yöntemi)

Filament sarma yöntemi, reçine ile emprenye edilmiş sürekli liflerin bir mandrel üzerine kontrollü ve belirli açılarla sarılmasıyla kompozit yapılar üretir. Özellikle silindirik ve dairesel simetrik parçalar için uygundur ve basınçlı kaplar, borular gibi uygulamalarda yaygın kullanılır. Bu yöntem, yüksek dayanım ve hafiflik gerektiren tasarımlar için tercih edilir (Strong, 2008). Lifler reçineye batırıldıktan sonra, silindirik bir çekirdeğe belirli açılarla spiral şekilde sarılır. Bu yöntem özellikle basınçlı tank, boru ve tüp gibi silindirik parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılır (Mallick, 2007). Filament sarma yöntemine ait avantajlar ve dezavantajlar Çizelge 3.15'te ve filament sarma yöntemine ait görsel şekil Şekil 3.16.'da verilmiştir.

Çizelge 3.15. Filament sarma yöntemine ait avantajlar ve dezavantajlar

Avantajlar	Dezavantajlar
Yüksek mukavemet/ağırlık oranı sağlar	Karmaşık geometriler için uygun değildir
Otomasyona uygun ve tekrarlanabilirlik yüksektir	Yüksek ilk yatırım maliyeti vardır
Elyaf yönelimi kontrolü ile mekanik özellikler optimize edilebilir	Sadece devingen simetrik parçalar için uygundur (boru, tank)
Malzeme israfı azdır, sürekli üretim mümkündür	Son işlem gerekebilir (kesme, kapak açma vb.)



Şekil 3.16. Filament Sarma Yöntemi(Türkmen, 2012)

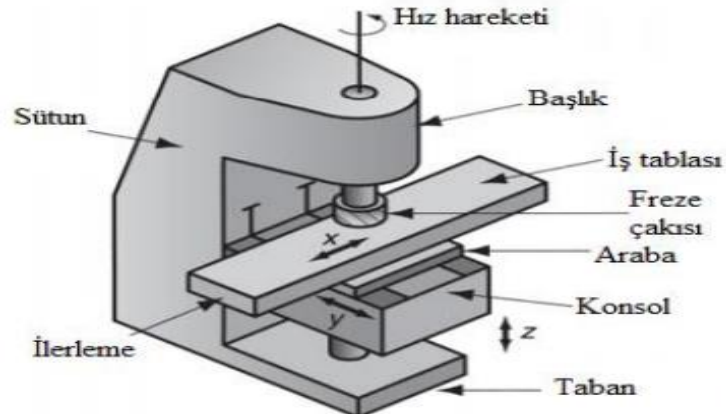
3.7. Frezeleme

Frezeleme, bir veya birden fazla kesici ağza sahip döner bir takımın, iş parçasından talaş kaldırarak istenilen şekil ve boyutun oluşturulması işlemidir. Bu işlemde kesme hareketi genellikle kesici takımın dönmesiyle sağlanmakta, iş parçası ise sabit kalabilmekte ya da ilerleme hareketi yapabilmektedir. Frezeleme, düz yüzeylerin yanı sıra karmaşık geometrilerin işlenmesinde de yaygın olarak tercih edilmektedir (Kalpakjian ve Schmid, 2013). Frezeleme İşleminin Temel Bileşenleri Çizelge 3.16 ' da verilmiştir.

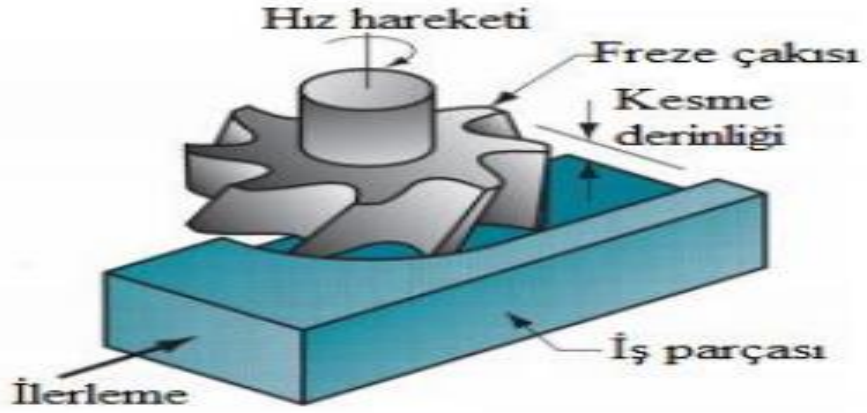
Çizelge 3.16. Frezeleme İşleminin Temel Bileşenleri

Bileşen	Açıklama
Freze Tezgahı	İş parçasını ve kesici takımı taşıyan ve hareketleri sağlayan ana makinedir. CNC veya manuel olabilir.
Kesici Takım (Freze Ucu)	Dönme hareketiyle talaş kaldıran takımdır. Çok ağızlı olup farklı geometrilerde olabilir.
İş Parçası	Talaş kaldırılarak şekil verilecek olan malzemedir. Metal, polimer veya kompozit olabilir.
Bağlama Ekipmanları	İş parçası ve takımın makineye sabitlenmesini sağlar. Mengene, takım tutucu, tabla gibi aparatlar bu gruptadır.

Frezeleme işleminde başlıca bileşenler şunlardır: Freze tezgahı, iş parçasını ve kesici takımı taşıyan ve onların hareketini sağlayan makinedir; bu tezgahlar CNC kontrollü ya da manuel olabilir. Kesici takım, dönme hareketiyle talaş kaldıran, çok ağızlı ve farklı geometrilerde üretilen bir takımdır. İş parçası, şekillendirilmek istenen metal, polimer ya da kompozit malzemeden oluşur. Bağlama ekipmanları ise iş parçasını veya kesici takımı tezgaha sabitlemek için kullanılan mengene, takım tutucu ve tabla gibi aparatları kapsar (Ghosh ve Malik, 2010). Dikey freze tezgahı Şekil 3.17’de ve alın frezeleme görseli ise Şekil 3.18’de verilmiştir.



Şekil 3.17. Dikey freze tezgahı (Şirin ve Şirin, 2020)



Şekil 3.18. Alın frezeleme (Şirin ve Şirin, 2020)

3.7.1. Frezeleme türleri

3.7.1.1. Yüzey frezeleme

Yüzey frezeleme, dönel hareket yapan kesici takımın, iş parçasının yüzeyine dik açıyla uygulanarak talaş kaldırdığı ve böylece istenilen düzeyde pürüzsüzlük ve boyutsal hassasiyet sağladığı bir frezeleme türüdür. Bu yöntemde, kesici takımın eksenini iş parçasının yüzeyine dik konumlandırılır ve takımın dönme hareketi ile yüzeyde kontrollü malzeme kaldırma işlemi gerçekleştirilir. Yüzey frezeleme, özellikle düz yüzeylerin işlenmesinde yaygın olarak kullanılır ve yüzey kalitesi ile geometrik doğruluğun artırılması amacıyla tercih edilir. Bu yöntem, metal, polimer ve kompozit malzemelerin hassas işlenmesinde etkin sonuçlar verir (Kalpakjian ve Schmid, 2014). Yüzey frezeleme işlemlerinde genellikle çok sayıda kesici uca sahip, büyük çaplı freze takımları tercih edilir. Bu takımlar, yüksek verimlilik ve düzgün yüzey kalitesi sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Kullanılan kesici uçlar çoğunlukla karbür veya seramik malzemelerden imal edilir. Karbür uçlar yüksek sertlik ve ısı dayanımı sağlarken, seramik uçlar özellikle yüksek hızlı işleme uygulamalarında tercih edilir. Bu freze takımları, çoğunlukla CNC işleme merkezlerinde kullanılarak otomatik ve hassas talaş kaldırma işlemleri gerçekleştirilir (Ghosh ve Mallik, 1986). Frezeleme işleminde kullanılan temel kesme parametreleri; kesme hızı (V_c , m/dk), ilerleme (f_z , mm/diş), kesme derinliği (a_p , mm) ve kesme genişliği (a_e , mm) iş parçasının yüzey kalitesi ile üretim verimliliğini doğrudan

etkilemektedir. Bu parametrelerin uygun biçimde belirlenmemesi durumunda, takım aşınması hızlanmakta, işleme süresi uzamakta ve istenilen yüzey pürüzlülüğü sağlanamamaktadır. Özellikle yüzey frezeleme uygulamalarında, kesme hızının çok yüksek seçilmesi takım ucunda yanmalara neden olabilmekte; ilerleme miktarının yetersiz olması ise yüzeyde parlatma etkisi yaratmakta ve talaş kaldırma verimliliğini düşürmektedir. Bu nedenle işlem parametreleri, malzeme türü, takım özellikleri ve soğutma koşulları dikkate alınarak dikkatle optimize edilmelidir (Sandvik Coromant, 2019).

3.7.1.2. Çevresel frezeleme

Çevresel frezeleme, silindirik bir kesici takımın çevresine yerleştirilmiş kesici dişlerin, iş parçası üzerinden talaş kaldırması esasına dayanan bir talaş kaldırma yöntemidir. Bu yöntemde kesici takımın ekseni, iş parçasının yüzeyine paralel konumdadır. Bu geometri sayesinde, talaş kaldırma işlemi takımın çevresel dişleriyle gerçekleşir. Genellikle düzlemsel veya prizmatik şekilli yüzeylerin işlenmesinde tercih edilir. Bu yöntem, yüzey frezelemeye kıyasla daha iyi boyutsal doğruluk ve yüzey pürüzlülüğü sağlar. Ayrıca, takımın çevresel alanının tamamı kullanıldığından dolayı takım ömrü açısından da avantaj sağlayabilir (Kalpakjian ve Schmid, 2014). Çevresel frezeleme işleminde kesici takım genellikle çok dişlidir ve talaş kaldırma işlemi, takımın dış çevresinde yer alan kesici uçlar aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu yöntemde takım ekseni, iş parçasının yüzeyine paralel konumlandırılır. Bu sayede özellikle uzun ve düz yüzeylerin işlenmesinde yüksek doğruluk ve verimli talaş kaldırma sağlanır. Çok dişli yapı, talaş kaldırma sürecini sürekli kılarak üretkenliği artırır (Groover, 2010).

3.7.1.3. Parmak frezeleme

Parmak frezeleme, freze takımının hem taban (uç) hem de çevresel kesici yüzeylerinin talaş kaldırma işlemine katıldığı çok yönlü bir frezeleme yöntemidir. Bu yöntem sayesinde, aynı anda hem yüzey düzleştirme hem de kenar işleme gibi çok çeşitli geometrik şekillendirmeler gerçekleştirilebilir. Takımın çok yönlü kesici geometrisi, karmaşık parça üretimi ve yüksek esneklik sağlar (Kalpakjian ve Schmid, 2014). Parmak frezeleme işlemi; yüksek hassasiyet ve esneklik gerektiren üretim süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle kalıpcılık, havacılık ve otomotiv sanayii gibi

sektörlerde; prototip üretimi, kalıp boşaltma ve karmaşık yüzeylerin işlenmesi amacıyla tercih edilmektedir. Ayrıca hassas makine parçalarının imalatında da önemli bir yer tutar (Arıkan, 2012).

3.7.1.4. Açısal frezeleme

Açısal frezeleme, kesici takım eksenini ile iş parçası yüzeyi arasında belirli bir açı oluşturularak yapılan talaş kaldırma işlemidir. Genellikle V-şekilli oluklar, pahlar ve konik yüzeyler gibi özel geometrilerin işlenmesinde tercih edilir. Bu işlemde özel açılı kesiciler kullanılır ve hassas açı toleranslarıyla çalışma imkânı sunar (Kalpakjian ve Schmid, 2014). Açısal frezeleme işlemi; V-oluk açma, pah oluşturma, dişli açılı işleme ve kalıplarda eğimli yüzeylerin oluşturulması gibi özel geometrilere sahip parça üretimlerinde yaygın olarak kullanılır. Özellikle karmaşık açı toleranslarının gerektiği uygulamalarda tercih edilir (Groover, 2010).

3.8. Kompozit Malzemelerde Frezeleme

Kompozit malzemeler, heterojen yapıları nedeniyle metal malzemelere kıyasla işlenmesi daha zor olan malzemelerdir. Özellikle lif takviyeli kompozitlerde (örneğin karbon veya cam elyaf takviyeli yapılar), frezeleme işlemi sırasında delaminasyon, lif çekilmesi, takım aşınması ve yüzey hasarı gibi işleme kaynaklı sorunlarla sıkça karşılaşmaktadır (Hocheng ve Puw, 1992). Elyaf çekilmesi (fiber pull-out) ve matris hasarı, lif takviyeli kompozit malzemelerin işlenmesi sırasında karşılaşılan yaygın sorunlardandır. Kesici takımın ilerlemesi sırasında bazı elyaflar tamamen kesilmeden yerinden çekilir ve bu durum fiber pull-out olarak adlandırılır. Ayrıca, işlem sırasında oluşan yüksek kesme sıcaklıkları nedeniyle epoksi veya polyeater matris sistemlerinde çatlama, yumuşama ya da yanma gibi ısıl bozulmalar meydana gelebilir (Davim ve Reis, 2003). Takım aşınması probleminde sıkça karşılaşılan temel sorunlardan biri, kompozit malzemelerde kullanılan cam, karbon veya aramid elyafların yüksek aşındırıcılığa sahip olmasıdır. Bu nedenle, geleneksel yüksek hız çeliği (HSS) takımlar bu tür malzemelerle çalışırken hızla aşınmaktadır. Oluşan takım aşınması, yalnızca takım ömrünü kısaltmakla kalmamakta; aynı zamanda iş parçası yüzey kalitesini ve boyutsal toleransları da olumsuz yönde etkilemektedir (Sheikh-Ahmad, 2009).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Takviye Malzemeleri

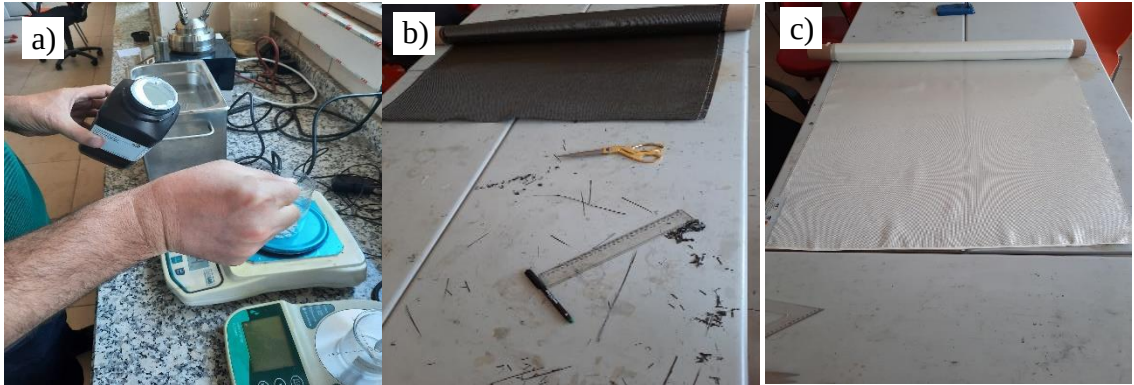
Bu tez çalışmasında Dost Kimya Endüstriyel firmasından epoksi uyumlu, kolay emilen düz dokuma cam ve karbon kumaşlar takviye malzemesi olarak temin edilmiştir. Kompozitlerin üretiminde kullanılan ARC 152 reçinesi ARC Marin epoxy firmasından satın alınmıştır. Kompozit malzemelerde dolgu parçacığı olarak ise Nanografi firmasından temin edilen Titanyum dioksit (TiO_2) nano parçacığı kullanılmıştır. Karbon ve cam elyaf için bazı teknik bilgiler aşağıdaki Çizelge 4.1’de dolgu parçacığı TiO_2 özellikleri ise Çizelge 4.2’de verilmiştir. Deneylerde kullanılan TiO_2 , cam ve karbon elyaf kumaşlar Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Karbon ve Cam elyaf özellikleri

	Karbon Elyaf	Cam Elyaf
Alansal Ağırlık	230 gr/m ²	220 gr/m ²
Elastisite modülü	230 GPa	65 GPa
Kopma Uzaması	%1,4	%2,5
Çekme dayanımı	2500 MPa	1300 MPa

Çizelge 4.2. Titanyum dioksit (TiO_2) özellikleri

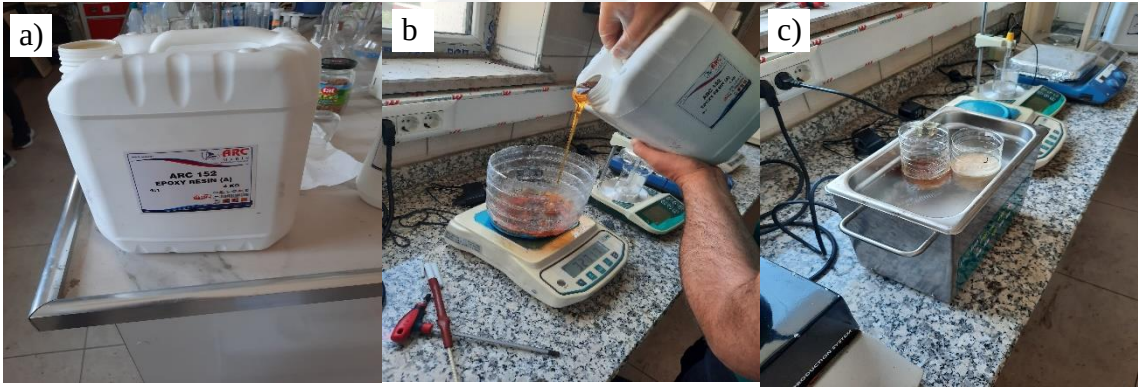
Nano parçacık Toz Saflığı	99,5%
Parçacık boyutu	200 nm
Renk	Beyaz
Yoğunluk (Gr/cm ³)	4,23
Erime noktası (°C)	1843



Şekil 4.1. a) TiO_2 dolgu parçacığı, b) karbon elyaf kumaş ve c) cam elyaf kumaş

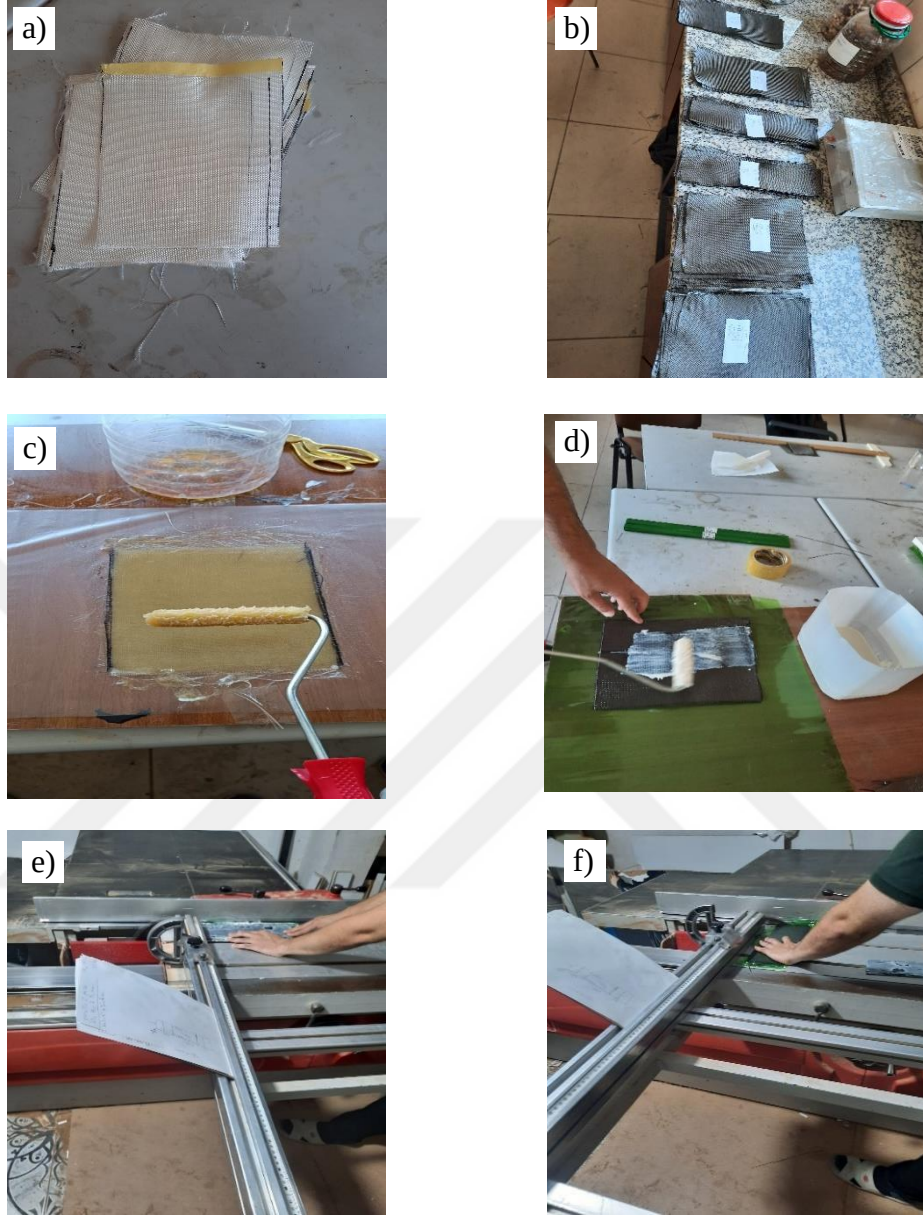
4.2. Kompozit Plakaların Üretilmesi

Kompozit plakalar, el yatırma yöntemi ile Batman Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu Kimya laboratuvarında üretilmiştir. Kompozit plakaların üretiminde kullanılacak olan epoksi reçine, elyaf ve dolgu malzemesinin tartım işlemleri hassas terazide yapılmıştır. Öncelikle cam ve karbon elyaflardan 33 cm x 33 cm ebatlarında kumaşlar kesilmiştir. Daha sonra hem dolgulu hem dolgunsuz epoksi reçine karışımı hazırlanmıştır. Firma direktifleri doğrultusunda reçine/ sertleştirici oranı olarak 4:1 kullanılmıştır. Dalgulu kompozitlerde ise ağırlıkça %1 oranında TiO_2 epoksi reçine içine ilave edilmiştir. TiO_2 parçacıklarının matris içinde homojen dağılmasında ultrasonik karıştırıcı kullanılmıştır. Ultrasonik karıştırıcı TiO_2 parçacıklarının matris içinde homojen dağılması için 30 dakika çalıştırılmıştır. Deneylerde kullanılan epoksi reçine, hassas terazi ve ultrasonik karıştırıcı Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. a) Epoksi Reçine, b) Hassas Terazi ve c) Ultrasonik Karıştırıcı

Düz bir zemin üzerine önce kompozit plakaların yüzeye yapışmasını engellemek için ayırıcı şeffaf bir defter kabı bırakılmış, sonra kesilen elyaf kumaşlardan biri ayırıcı üzerine yerleştirilerek bir rulo fırça yardımıyla hazırlanan reçine ve dolgu karışımı kumaşlara sürülmüştür. Üzerine reçine sürülen birinci tabakanın üstüne yeni kumaş tabakası serilerek bu işlem tekrarlanmıştır. İşlem bittikten sonra kompozit plakalar oda sıcaklığında bir gün süreyle kürleşmeye bırakılmıştır. Üretilen kompozit plakalar 5 mm kalınlığındadır. Üretim aşamaları Şekil 5.3’te gösterilmiştir. Dalgusuz cam elyaf takviyeli kompozit (C0), %1 TiO_2 dolgulu cam elyaf takviyeli kompozit (C1), dolgunsuz karbon elyaf takviyeli kompozit (K0) ve %1 TiO_2 dolgulu karbon elyaf takviyeli kompozit (K1) olmak üzere dört farklı kompozit plaka üretilmiştir.



Şekil 4.3. a) Cam Kumaş, b) Karbon Kumaş, c) Cam Kumaşa Reçine Sürme İşlemi, d) Karbon Kumaşa Reçine Sürme İşlemi, e) ve f) Numunelerin Kesim İşlemi

4.3. Çekme Testi

Çekme deneyi ASTM D638 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyinde Şanlıurfa Harran Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi'nde bulunan 100 kN yük kapasiteli SHIMADZU AGX Plus marka test cihazı kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan çekme test cihazı ve çekme numuneleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Her parametre için 3 çekme deneyi 2 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.4. a) Çekme Cihazı, b) Cam Çekme Numunesi , c) Karbon Çekme Numunesi

4.4. Basma Testi

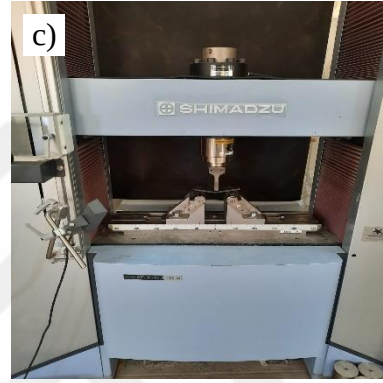
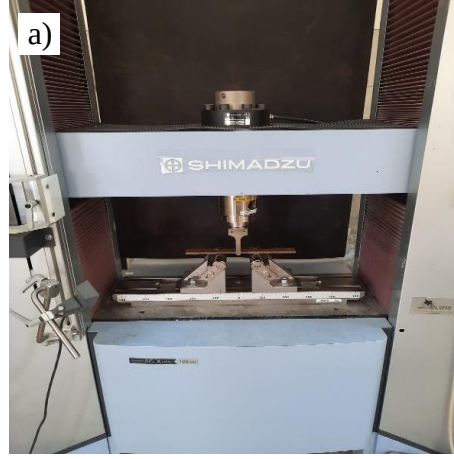
Dolgusuz ve dolgulu hibrit kompozitlerin basma deneyleri Şanlıurfa Harran Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi'nde bulunan 100 kN kapasiteli, bilgisayar kontrollü servo hidrolik AGX Plus marka cihazda ASTM D 695 standartlarına göre 1 mm/dk kafa hızıyla gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan basma test cihazı ve basma numunesine ait görsel Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. Kompozitlerin Basma Deneyleri

4.5. Eğilme Testi

Kompozitlerin kırılma davranışlarının belirlenmesinde üç nokta eğme deneyinin yapılması önem arz etmektedir. İki destek üzerine konulan dairesel yada dikdörtgen kesite sahip numunelere kuvvet uygulanarak numunenin kırılması sağlanır. Eğilme deneyleri Harran Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi'nde bulunan 100 kN yük kapasiteli SHIMADZU AGX Plus marka 3 nokta eğilme test cihazında 1mm/dk hızında ASTM D790 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Eğilme deneylerinde kullanılan test cihazı ve eğilme numune görüntüleri Şekil 4.6'da verilmiştir. Her parametre için 3 adet eğilme deneyi yapılarak elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır.



Şekil 4.6. a) Eğilme Cihazı, b) Cam Eğilme Numunesi, c) Karbon Eğilme Numunesi

Eğilme gerilmesinin hesaplanmasında kullanılan denklem Eşitlik 5.1’de verilmiştir.

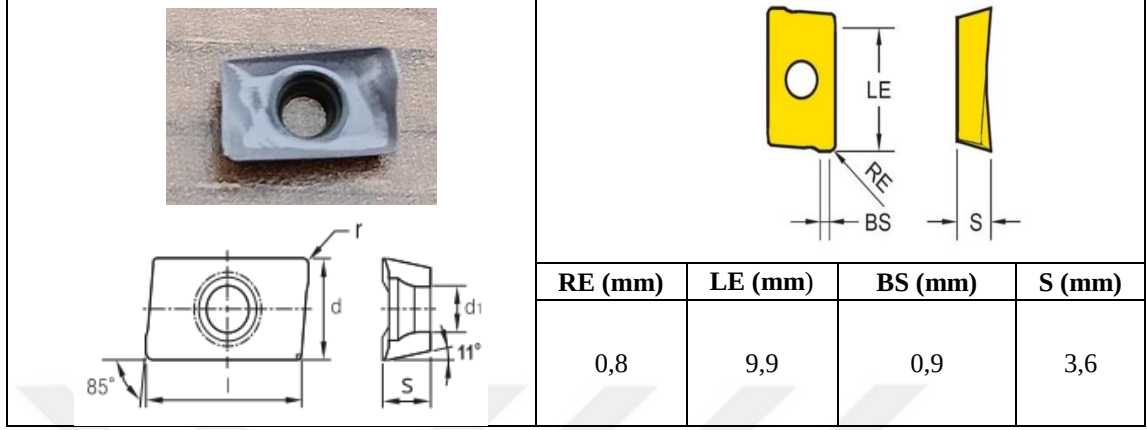
$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} \text{ (MPa)} \quad (5.1)$$

Burada; P: Maksimum yükü (N), σ_f : Eğilme gerilmesini (MPa), L: İki destek arasındaki mesafeyi (mm), d: Numunenin kalınlığını (mm) ve b: Numunenin enini (mm) ifade etmektedir.

4.6. Frezeleme Deneyleri İçin Kullanılan Kesici Takımlar ve Takım Tutucu

Frezeleme deneylerinde APKT 100308 PDTR YG602 kodlu pozitif talaş açısına sahip çift köşeli karbür kesici takım uçlar kullanılmıştır. Kesici takımlar “YG-1” kesici takım firmasından tedarik edilmiştir. Kesici takım ucunun geometrik ölçüleri ve şekli, Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Kesici takım tutucu olarak EM90 D12 W12 L120 Z01 numaralı tek takma uçlu, saplı tarama kullanılmıştır. Frezeleme deneylerinde kullanılan

kesici takımlar PVD TiAlN kaplıdır. Deneylerde kullanılan takım tutucu “MBC” kesici takım firmasından tedarik edilmiştir. Kompozit malzemelerin frezelenmesinde kullanılan ve Şekil 4.8’de gösterilen takım tutucuya bir adet kesici uç takılarak frezeleme deneyleri gerçekleştirilmiştir.



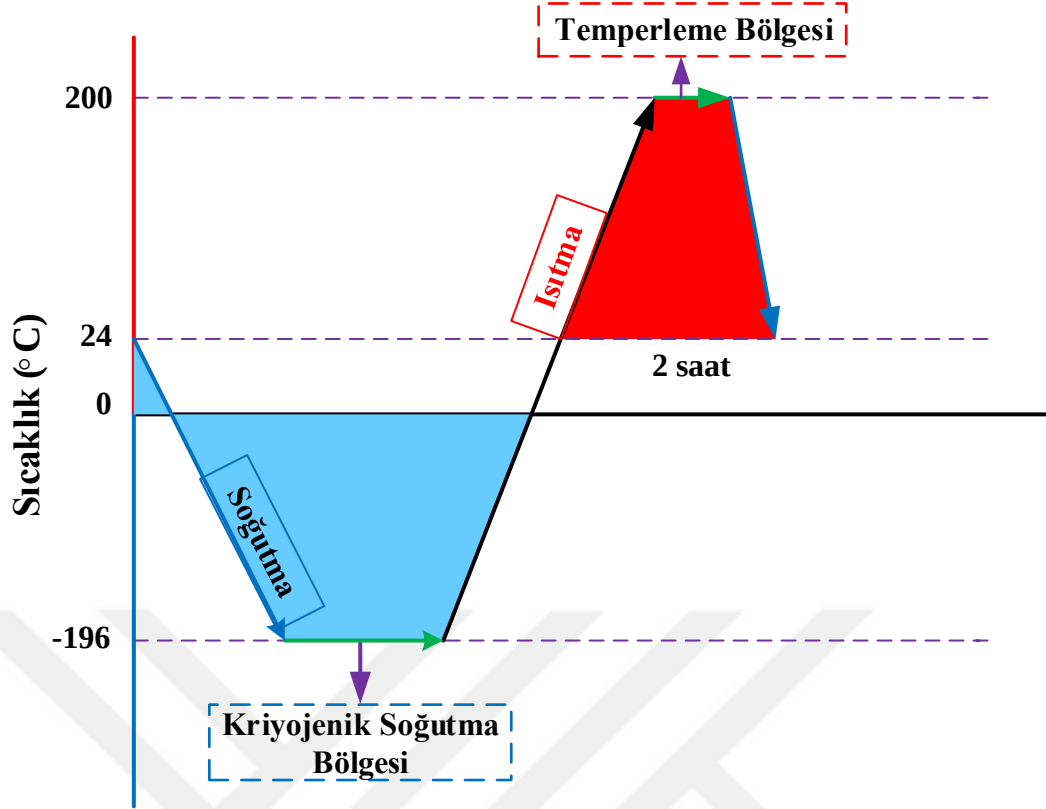
Şekil 4.7. Kesici takım ucunun şekli ve geometrik ölçüleri



Şekil 4.8. Deneylerde kullanılan kesici takım tutucu

4.7. Kesici Takımlara Kriyojenik İşlem Uygulanması

Kesici uçlara kriyojenik işlem öncesi literatür taranarak en uygun soğutma hızı tespit edilmiştir. Daha sonra kesici uçlar “MMDTEKNO” firmasında yer alan ısıtma fırınında oda sıcaklığında 0,5 °C/dk soğutma hızıyla bilgisayar kontrollü olarak fırın içerisi -196°C’ye düşürülmüştür. Daha sonra tekrar literatür araştırması göz önünde bulundurularak 24 saat -196 °C’te kesici takımlar bekletilmiştir. Isıl işlem fırını 0,5 °C/dk ısıtma hızıyla 200 °C’ye getirilmiş ve 2 saat süreyle temperleme işlemi yapılmıştır. En son işlem olarak ısıtma fırını kontrollü bir şekilde oda sıcaklığına düşürülmüştür. Kesici takımlara uygulanan ısıtma işlemi döngüsü grafiği Şekil 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.9. Kriyojenik ısıt işlemin kesici takımlara uygulanması

4.8. Freze Deneylerinde Kullanılan Kesme Parametreleri ve CNC Tezgahı

Kompozit malzemelerin frezelenmesinde kullanılan kesme parametreleri, ISO 3685 kriterleri ve kesici takım firmasının önerdiği kesme parametreleri göz önüne alınarak belirlenmiştir. Frezeleme işlemlerinde kullanılan kesme parametreleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Kompozit malzemelerin frezeleme işleme boyu 30 mm olarak belirlenmiştir. Frezeleme deneylerinde iki tip kesici takım kullanılmıştır. Bu kesici takımlar; kriyojenik ısıt işlem uygulanmamış kesici takım (KL) ve kriyojenik ısıt işlem uygulanmış kesici takım (KS) şeklinde kodlanmıştır. KL kesici takımla dört ilerleme, dört kesme hızı ve sabit kemse derinliği olmak üzere 16 deney gerçekleştirilmiştir. Aynı şartlar KS kesici takım içinde gerçekleştirilerek 16 deney yapılmıştır. Böylelikle toplam 32 tane frezeleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Her bir üretilen kompozit malzeme için 32 adet deney yapılarak toplam 128 adet frezeleme deneyi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.3. Frezelemede kullanılan kesme parametreleri

Diş başına ilerleme, fz (mm/diş)	Kesme hızı, Vc (m/dak)	Kesme derinliği, ap (mm)
0,01	50	1
0,015	75	
0,02	100	
0,025	125	

Kompozit malzemelerin frezeleme deneyleri Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezinde (YETEM) bulunan “Hartford VMC-1020 SP” marka 4 (3+1) eksene sahip CNC freze tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Frezeleme deneyleri için kullanılan CNC tezgâhının görüntüsü Şekil 4.10’da ve tezgaha ait özellikler Çizelge 4.4’te verilmiştir.



Şekil 4.10. CNN Frezeleme tezgahı

Çizelge 4.4. CNN Freze Tezgahının özellikleri

CNN Tezgâh Özellikleri	Değerler
X Eksen mesafesi	1020 mm
Y Eksen mesafesi	510 mm
Z Eksen mesafesi	400 mm
Kontrol ünitesi	Mitsubishi
Magazin kapasitesi	20 takım
Maksimum devir sayısı	6000 dev/dk

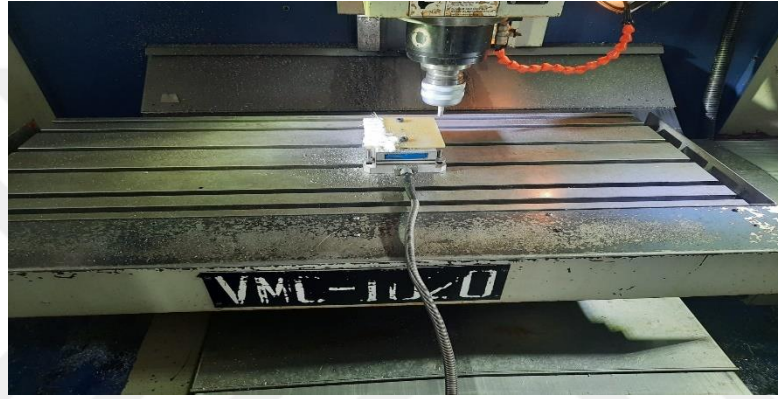
4.9. Frezeleme Deneylerinde Kesme Kuvvetlerinin Ölçümü

Kompozit malzemelerin frezelenmesi sonucu oluşan kesme kuvvetleri, üç eksenli kuvvet ölçebilen Kistler Tip 9257B” dinamometre ile ölçülmüştür. -5 ile 5 kN aralığında ölçüm alma hassasiyetine sahip olan dinamometre cihazı, esas kesme kuvveti (Fx), ilerleme kuvveti (Fy) ve radyal kuvvetini (Fz) ölçülebilmektedir. KISTLER 5070B 4

kanallı sinyal güçlendirici (ampflikatör) yardımıyla dinamometreden alınan değerler RS 232 kablo yardımıyla bilgisayara aktarılmıştır. Veri toplama yazılımı olarak “CutPro” programı kullanılmıştır. Talaş kaldırmada kesici takıma üç kuvvet bileşeni etki eder. Bileşke kuvvet F, bu üç kuvvet bileşeninin vektörel toplamıdır ve Eşitlik 5.2’de verilen denklem yardımıyla hesaplanır.

$$F = \sqrt{Fx^2 + Fy^2 + Fz^2} \quad (5.2)$$

Süleyman Demirel Üniversitesi YETEM laboratuvarında frezeleme deneylerinde kullanılan dinamometre cihazı Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11. İş parçasının dinamometreye bağlanma şekli

4.10. Frezeleme Sonrası Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

Kompozit malzemelerin frezeleme sonrasında oluşan ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin belirlenmesi için kullanılan cihaz, Süleyman Demirel Üniversitesi YETEM laboratuvarında bulunan “HOMMEL Tester T 500” yüzey pürüzlülük ölçüm cihazıdır. Frezeleme işlemine tabi tutulan kompozit plakaların yüzey pürüzlülük ölçümleri beş farklı noktadan alınarak aritmetik ortalanması hesaplanmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri 0,8 mm ölçme aralığında ve 4,8 mm ölçüm boyunda alınmıştır. Yüzey pürüzlülük cihazı ve yüzey pürüzlülük cihazı ile kompozit malzeme üzerinde yapılan yüzey pürüzlülük ölçüm işlemi Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. Yüzey Pürüzlülük cihazı ve ölçümü

4.11. SEM Cihazı

Dolgulu ve dolgusuz kompozit malzemelerin kriyojenik işlem görmüş ve kriyojenik işlem görmemiş kesici takımlar ile frezeleme işlemi sonrası oluşan talaşların incelenmesi için Süleyman Demirel Üniversitesi Üniversitesi YETEM laboratuvarında bulunan “FEI QUANTA FEG 250” marka SEM (Taramalı Elektron Mikroskop) cihazı kullanılmıştır. Talaş morfolojisi için kullanılan SEM cihazına ait görüntü Şekil 4.13’te verilmiştir. Çekme testi sonrası kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri Çukurova Üniversitesi CÜMERLAB’ta bulunan Quanta 650 Field Emission SEM cihazı ile elde edilmiştir. Kırılma yüzeyi için kullanılan SEM cihazına ait görüntü Şekil 4.14’te verilmiştir.



Şekil 4.13. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) cihazı görüntüsü



Şekil 4.14. Quanta 650 Field Emission SEM cihazı görüntüsü

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

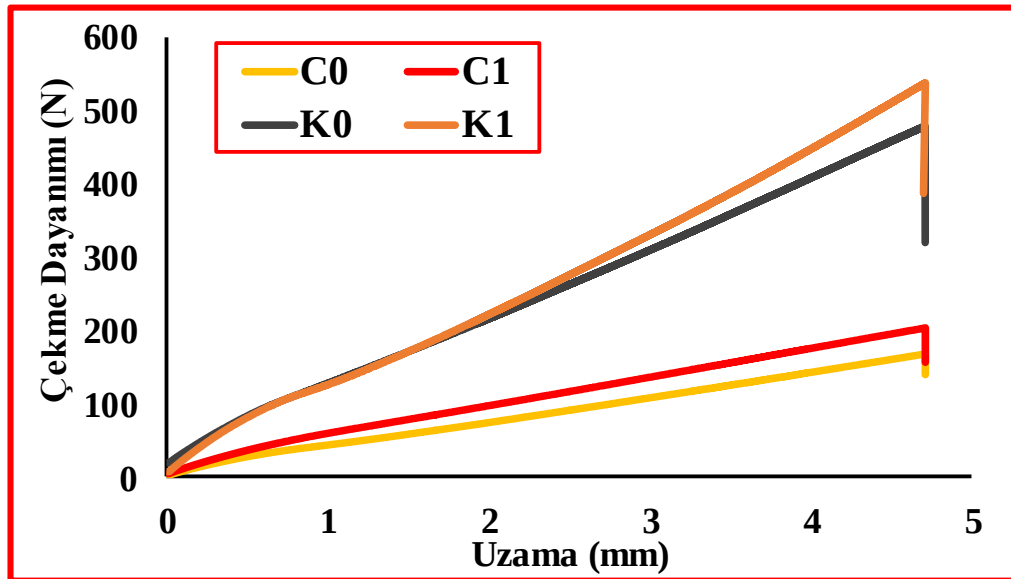
5.1. Mekanik testler

Çekme, basma, eğilme deneylerinde kullanılan kompozit malzemeler aşağıdaki şekilde kodlanmıştır. Dolgusuz cam elyaf takviyeli kompozit (C0), nano %1 TiO₂ dolgulu cam elyaf takviyeli kompozit (C1), dolgusuz karbon elyaf takviyeli kompozit (K0) ve nano %1 TiO₂ dolgulu karbon elyaf takviyeli kompozit (K1) olmak üzere dört farklı kompozit malzeme tipi kullanılmıştır.

5.1.1. Çekme test sonuçları

ASTM D638 standardına uygun olarak oda sıcaklığında çekme testleri, C0, C1, K0 ve K1 kompozitler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Hem nanoparçacık dolgulu hem de dolgusuz kompozit numunelerin kuvvet-uzama eğrileri Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Numuneler, nihai çekme mukavemetine kadar doğrusal bir eğilim sergilemekte ve ardından kopma nedeniyle ani düşüşler yaşamaktadır. Kompozit numunelerdeki ani kuvvet düşüşü gevrek kırılmayı işaret etmektedir. C0 ile karşılaştırıldığında C1 hibrit kompozitin çekme dayanımının arttığı gözlenmektedir. TiO₂ ilave edilmemiş C0 kompozitin çekme dayanımı 168 MPa iken %1 TiO₂ nano dolgu ilavesi sayesinde kompozitin çekme dayanımının 181 MPa’a yükseldiği görülmüştür. Şekil 5.1’deki çekme – uzama grafiği incelendiğinde K0 ve K1 kompozitlerin çekme dayanımlarının C0 ve C1 kompozitlere kıyasla daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. K0 kompozitlere %1 TiO₂ nano parçacıkları ilave edildiğinde çekme dayanımının geliştiği gözlenmiştir. K0 kompozitte kopma yükü 478,58 MPa iken nano dolgu ilavesi sayesinde K1 hibrit kompozitin kopma yükünün 537,67 MPa’a çıktığı tespit edilmiştir. TiO₂ dolgusunun C0 kompozitlerde çekme dayanımına katkısı %8, K0 kompozitlerde ise %12 olmuştur. Hem K0 hem de C0 kompozitlerde TiO₂ dolgusuyla çekme dayanımlarındaki artış, matris içinde nano TiO₂ parçacıklarının iyi dağılması sayesinde matris ile elyaf arasındaki bağlanma gücünü artırarak daha güçlü bir ara yüzey etkileşimi oluşturmaya atfedilmektedir. Bu sayede nanoparçacıkların geniş yüzey alanı, matris ve elyaf ara

yüzeyinin daha güçlü bağlanmasını sağlayarak gerilimin etkin bir şekilde transfer edilmesine yardımcı olmakta ve bu da çatlak yayılımını geciktirmekte ve mekanik özellikleri iyileştirmektedir (Prasad vd. 2018). Carballeira ve Hauptert yaptıkları çalışmada 14 nm boyutlarında TiO_2 parçacıklarını değişen oranlarda epoksi matris içine katarak mekanik özelliklerini incelediklerinde, %1 TiO_2 dolgu oranına kadar çekme dayanımının arttığını, %2 dolgu oranında düşme trendine girdiğini ve %6 dolgu oranına kadar ise tekrar çekme dayanımında artış meydana geldiğini belirlemişlerdir. Bu oranın üzerine çıkıldığında ise çekme dayanımının olumsuz etkilenmeye başladığını görmüşlerdir. En yüksek çekme dayanım artışını %48 olarak belirlemişlerdir. TiO_2 dolgusu sayesinde çekme dayanımındaki artışı, matris ve dolgu malzemeleri arasındaki ara yüzey kalitesi, bir diğer ifadeyle statik yapışma mukavemeti sayesinde matrsten dolgu malzemelerine yük ve elastik deformasyon aktarımına atfetmişlerdir (Carballeira ve Hauptert, 2010). Benzer şekilde Prasad vd., keten elyaf takviyeli epoksi kompozitlere %0,5 ile %0,9 arasında değişen oranlarda 50 nm boyuta sahip TiO_2 dolgusu ilave ederek çekme dayanımı üzerindeki etkisini incelediklerinde %0,7 TiO_2 dolgu ilavesinde en yüksek çekme dayanımı elde etmişlerdir. Dolgusuz kompozitin çekme dayanımın %0,7 TiO_2 ilavesiyle 71,06 MPa'dan 78,85 MPa'a çıktığını belirlemişlerdir. Kopma uzamasının, bir diğer ifadeyle sünekliliğinin artan TiO_2 dolgusuyla düştüğünü tespit etmişlerdir (Prasad vd. 2018).

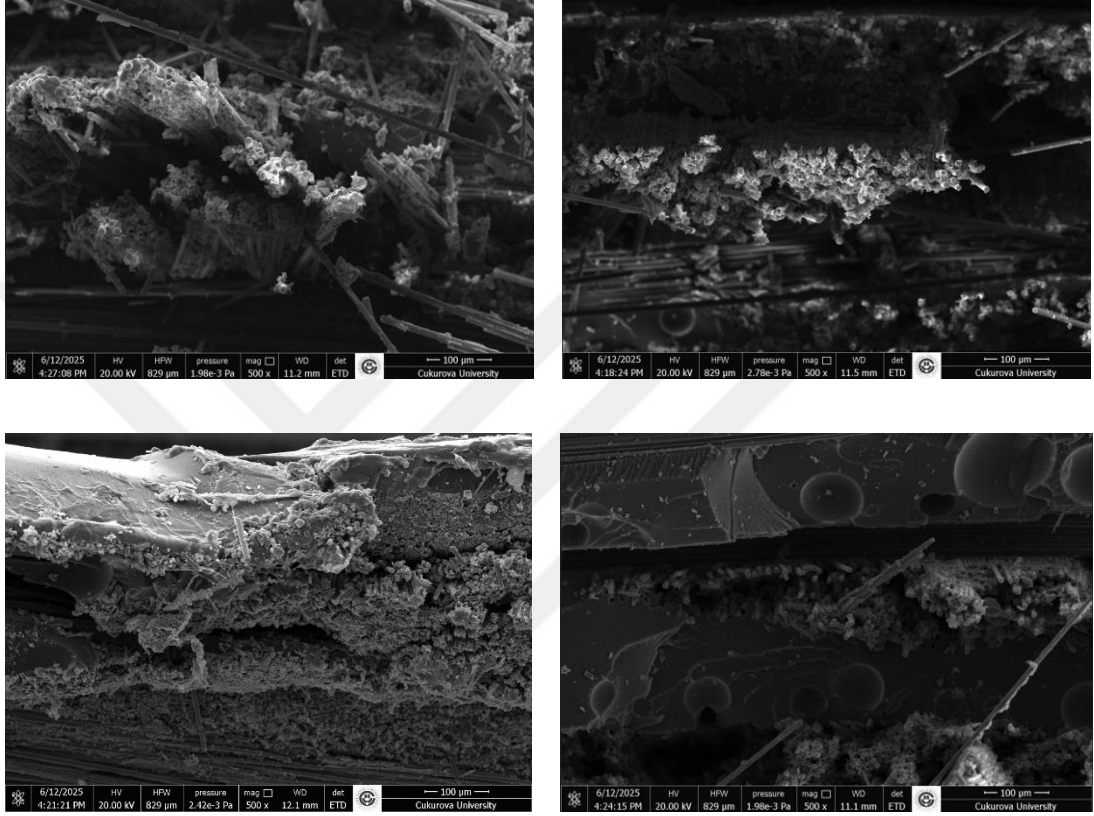


Şekil 5.1. Nano TiO_2 dolgusunun cam ve karbon kompozitlerin çekme dayanımı üzerindeki etkisi

5.1.2. Kırılma yüzey morfolojisi

Partikül takviyesiz cam elyaf bazlı kompozit malzemelerin SEM görüntüleri Şekil 5.2.a'da, TiO_2 partikül takviyeli cam elyaf bazlı kompozit malzemelerin SEM görüntüleri Şekil 5.2.b'de, partikül takviyesiz karbon elyaf bazlı kompozit malzemelerin SEM görüntüleri Şekil 5.2.c.'de ve TiO_2 partikül takviyeli karbon elyaf bazlı kompozit malzemelerin SEM görüntüleri ise Şekil 5.2.d.'de verilmiştir. Şekil 5.2.a.'da verilen partikül takviyesiz cam elyaf bazlı kompozit malzemelerin SEM görüntüleri incelendiğinde cam elyafların kompozit malzeme matrisi içerisinde ayrı fiber demetleri halinde koparak çıktıkları gözlemlenmiştir. Buna ek olarak bazı cam elyafların ise bağımsız bir şekilde koparak matris malzemeden ayrıldıkları görüntülenmiştir. Matris malzemeden koparak karışık bir şekilde yayılım gösteren bu cam elyaflar kompozit malzemenin kısmen mukavemetsiz bir yapıda olduğuna işaret etmektedir. Şekil 5.2.b.'de verilen TiO_2 partikül takviyeli cam elyaf bazlı kompozit malzemelerin SEM görüntüleri incelendiğinde cam elyafların kompozit malzeme matrisi içerisinde belirli bir bölgeden yoğun olarak toplu fiber demetleri halinde koparak çıktıkları gözlemlenmiştir. Buna ek olarak hasar bölgesine uzak alanlarda ise bağımsız bir şekilde koparak matris malzemeden ayrılan cam elyaflar kısmen görüntülenmiştir. Şekil 5.2.b.'de verilen TiO_2 partikül takviyeli cam elyaf bazlı kompozit malzemelerin SEM görüntüleri Şekil 5.2.a.'da verilen partikül takviyesiz cam elyaf bazlı kompozit malzemelerin SEM görüntüleri ile karşılaştırıldığında TiO_2 partikül takviyeli cam elyaf bazlı kompozit malzemelerin partikül takviyesiz cam elyaf bazlı kompozit malzemelere kıyasla daha mukavemetli oldukları saptanmıştır. Şekil 5.2.c.'de verilen partikül takviyesiz karbon elyaf bazlı kompozit malzemelerin SEM görüntüleri incelendiğinde karbon elyafların kompozit malzeme matrisi içerisinde ayrı fiberler halinde koparak çıktıkları tespit edilmiştir. Hasar bölgesine uzak olan fiberlerin yatay yönde uzama göstermeleri karbon fiberlerin yükü taşıyabildiklerini göstermektedir. Şekil 5.2.d.'de verilen TiO_2 partikül takviyeli karbon elyaf bazlı kompozit malzemelerin SEM görüntüleri incelendiğinde karbon elyafların kompozit malzeme matrisi içerisinde ve hatta kompozit malzeme matrisinde hasarlar da oluşturarak ayrıldıkları, kısmen de olsa toplu fiber demetleri halinde koparak matris malzemeden çıktıkları gözlemlenmiştir. Karbon elyafların matris malzeme boşluklar, çatlaklar ve kırıklar oluşturarak ve buna rağmen toplu şekilde matris malzemeden ayrılmaları TiO_2 partikül takviyeli karbon elyaf bazlı kompozit malzemelerin mukavemetli bir yapıda olduğunu ve fiberler arası bağ kuvvetlerinin

yüksek olduğunu ispatlamaktadır. Şekil 5.2.d.'de verilen TiO₂ partikül takviyeli karbon elyaf bazlı kompozit malzemelerin SEM görüntüleri Şekil 5.2.b.'de verilen TiO₂ partikül takviyeli cam elyaf bazlı kompozit malzemelerin SEM görüntüleri ile karşılaştırıldığında TiO₂ partikül takviyeli karbon elyaf bazlı kompozit malzemelerin TiO₂ partikül takviyeli cam elyaf bazlı kompozit malzemelere kıyasla daha mukavemetli oldukları şüphesizdir.

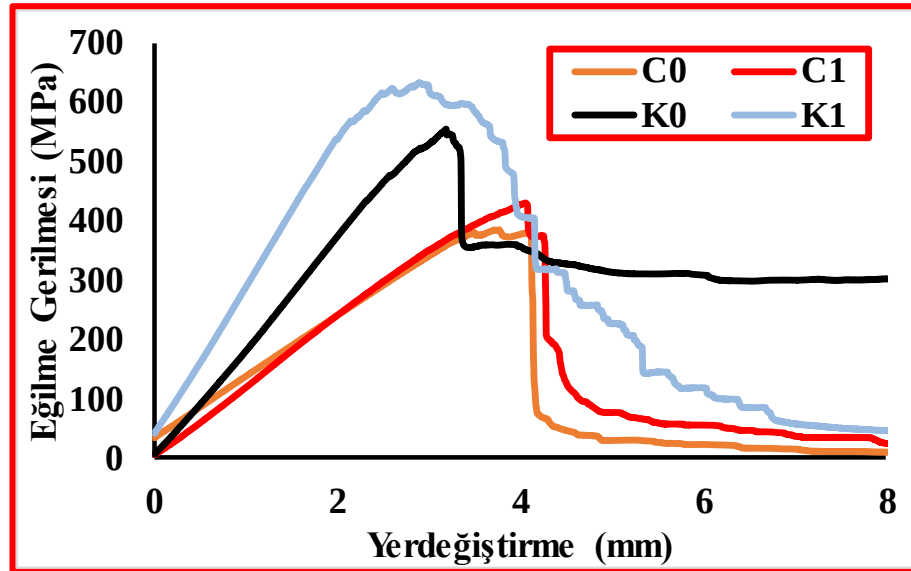


Şekil 5.2. a) C0, b) C1, c) K0 ve d) K1 numunelerin kırılma yüzeylerine ait SEM görüntüleri

5.1.3. Eğilme test sonuçları

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin eğilme davranışı, önemli tasarım parametrelerinden biridir. Bu parametreyi incelemek amacıyla, üç nokta eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Eğilme testleri sırasında, numunelerin alt tarafındaki katmanlar çekme, üst tarafındaki katmanlar ise basınç gerilimi altında olduğundan hem çeki hem de bası gerilmeleri meydana gelmiştir. Kompozit malzemelerin mukavemet artışı, takviye malzemesi, dolgu maddesi ve matris özellikleri ile doğrudan ilişkilidir (Suresha vd. 2019). Dolgusuz ve dolgulu cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin eğilme dayanımlarına ait grafik Şekil 5.3'te verilmiştir. Şekil 5.3 incelendiğinde C0 kompozitlerin çekme dayanımının 384 MPa olduğu belirlenmiştir. CETK kompozite %1

oranında nano TiO_2 parçacıkları ilave edildiğinde eğilme dayanımının 429 MPa'a çıktığı anlaşılmıştır. K0 kompozitlerde eğilme dayanımı 554 MPa iken, TiO_2 dolgusu sayesinde eğilme dayanımı K1 kompozitlerde %14 artarak 632 MPa'a ulaşmıştır. TiO_2 dolgusunun hem CETK hem de KETK kompozitlerde eğilme dayanımına olumlu bir katkı sağladığı anlaşılmaktadır. TiO_2 dolgusunun CETK kompozitlerin eğilme dayanımına katkısının KETK kompozitlere kıyasla daha az olduğu belirlenmiştir. Matristen nano dolgulara yük transferi ve elastik deformasyon, elyaf ile matris ara yüzeyi tarafından yönlendirilmektedir. Eğilme özelliklerindeki iyileşme, nanoparçacıkların epoksi içindeki düzgün dağılım ve geniş ara yüzey alanı ile doğrudan ilişkilidir. Böylece, epoksiden nanoparçacıklara gerilme transferi önemli ölçüde artmakta ve nano- TiO_2 parçacıklarının artan yüzey alanı, enerji emilimi için geliştirilmiş bir ara yüzey sağlamaktadır. Bu da matris, elyaf ve nano dolgu yüzeyiyle iyi bir kilitlenme mekanizması oluşturmaktadır (Yadhav vd. 2021). Suresha vd., jüt elyaf takviyeli epoksi kompozitlerde TiO_2 dolgusunun ve artan dolgu oranının eğilme dayanımını araştırdıklarında, %7,5 dolgu oranına kadar kompozitin eğilme dayanımının geliştiğini vurgulamışlardır. %7,5 dolgu ilavesinde jüt epoksi kompozitin eğilme dayanımının 64,2 MPa'dan 95,27 MPa'a yükseldiğini belirlemişlerdir. Eğilme dayanımındaki artışı, TiO_2 parçacıklarının epoksiye göre daha yüksek rijitliğe sahip olmasına atfetmişlerdir (Suresha vd. 2015).



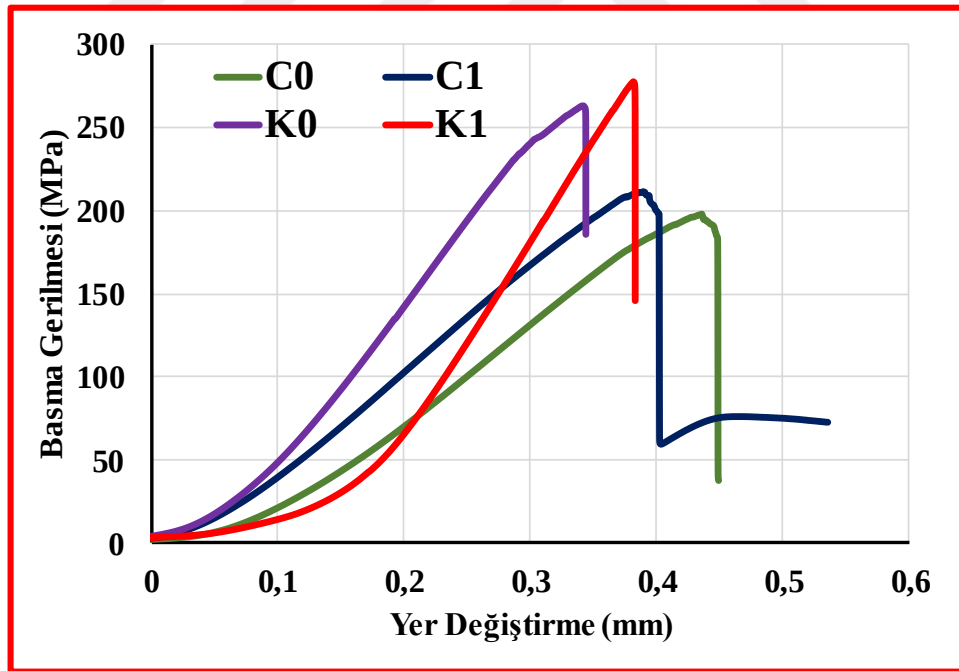
Şekil 5.3. Nano TiO_2 dolgusunun cam ve karbon kompozitlerin eğilme gerilmesi üzerindeki etkisi

Prasob ve Sasikumar ise TiO_2 dolgulu jüt takviyeli epoksi kompozitlerde %10 TiO_2 dolgu ilavesiyle eğilme dayanımının %48 arttığını gözlemlemişlerdir. Sert TiO_2 dolgu

parçacıklarının, kompozitin rijitliğini artırarak eğilme mukavemetini arttırdığını ve sünekliğini ise azalttığını ifade etmişlerdir (Prasob ve Sasikumar, 2018).

5.1.4. Basma test sonuçları

ASTM D695 standardına uygun olarak oda sıcaklığında basma testleri, C0, C1, K0 ve K1 kompozitler üzerinde gerçekleştirilmiştir. C0, C1, K0 ve K1 kompozitlerin basma dayanım eğrileri Şekil 5.4.'te verilmiştir. C0 basma dayanımının 197,82 MPa olduğu belirlenmiştir. Basma yükü altında elyafların ezilmesi ve kırılması sonucu kompozit malzeme yük taşıma kabiliyetini kaybeder ve mukavemet maksimum değere ulaştıktan sonra düşüş trendine girer. TiO₂ dolgu ilavesiyle cam elyaf takviyeli kompozitin basma dayanımının yaklaşık %7 oranında arttığı gözlenmiştir. Dolgu parçacıklarının elyaf ve matrise yapışarak gerilim transferine katkı sunması ile basma dayanımı gelişmesi sağlanmıştır. Böylece matriste azalan plastik akış, basma dayanımının artması ile sonuçlanmıştır (Ayyanar vd. 2024).



Şekil 5.4. Nano TiO₂ dolgusunun cam ve karbon kompozitlerin basma üzerindeki etkisi

Güven vd., Al₂O₃ ve TiO₂ dolgulu cam elyaf takviyeli kompozitlerde TiO₂ ilavesinin kompozitin basma dayanımının gelişmesini sağladığını belirlemişlerdir (Güven

vd. 2024). Karbon elyaf takviyeli dolgusuz kompozitin basma dayanımının, %1 TiO₂ nano dolgu parçacığı ilavesiyle 263 MPa'dan 277,42 MPa'ya yükseldiği belirlenmiştir. Basma dayanımındaki artış, ilave edilen TiO₂ dolguları sayesinde uygulanan dış yüklere karşı matris/elyaf ayrılmasının zorlaşmasına ve matris çatlak oluşumunun engellenmesine atfedilebilir (Li vd. 2024).

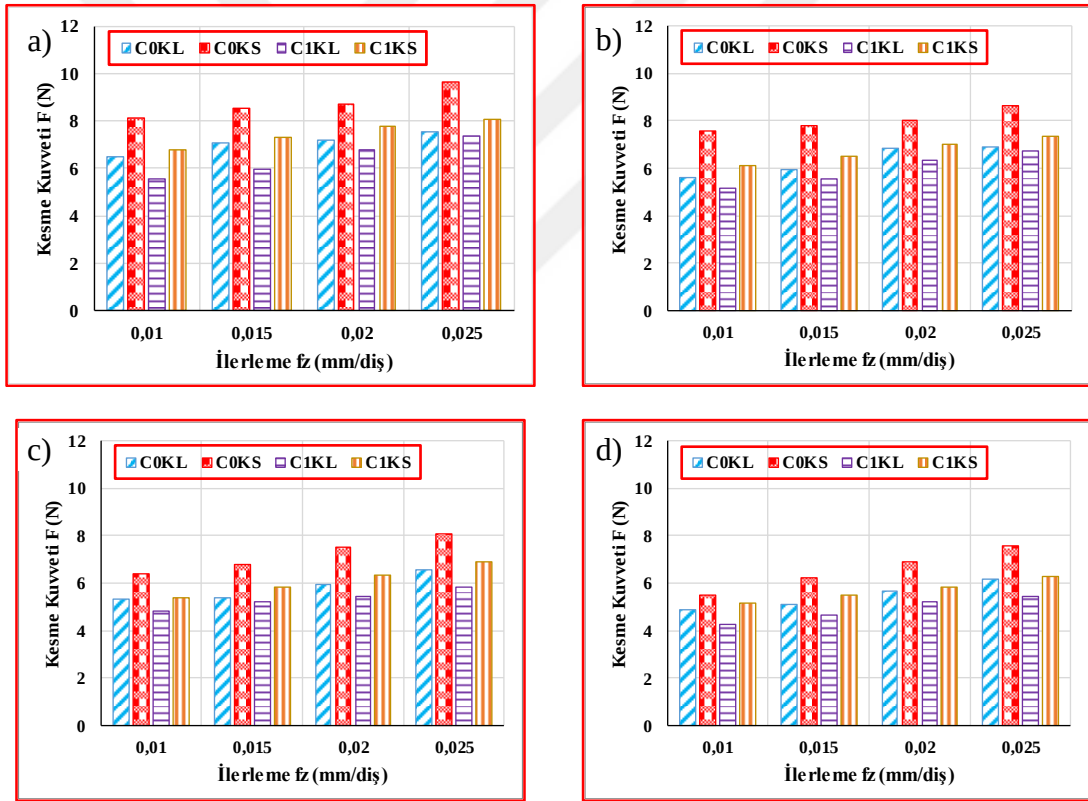
5.2. Frezeleme Sonuçları

Frezeleme deneylerinde kullanılan kompozit malzemeler aşağıdaki şekilde kodlanmıştır. Kriyojenikli takımla frezelenen dolgusuz cam elyaf takviyeli kompozit (C0KL), kriyojeniksiz takımla frezelenen dolgusuz cam elyaf takviyeli kompozit (C0KS), kriyojenikli takımla frezelenen %1 TiO₂ nano dolgulu cam elyaf takviyeli kompozit (C1KL) ve kriyojeniksiz takımla frezelenen %1 TiO₂ nano dolgulu cam elyaf takviyeli kompoziti (C1KS) ifade etmektedir. Aynı şekilde kriyojenikli takımla frezelenen dolgusuz karbon elyaf takviyeli kompozit (K0KL), kriyojeniksiz takımla frezelenen dolgusuz karbon elyaf takviyeli kompozit (K0KS), kriyojenikli takımla frezelenen %1 TiO₂ nano dolgulu karbon elyaf takviyeli kompozit (K1KL) ve kriyojeniksiz takımla frezelenen %1 TiO₂ nano dolgulu karbon elyaf takviyeli kompoziti (K1KS) ifade etmektedir.

5.2.1. Kesme kuvvetleri

Frezeleme deneyleri, farklı kesme parametrelerde kriyojenikli ve kriyojeniksiz kesici takımlarla C0, C1, K0 ve K1 kompozitler üzerinde kuru işleme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Kesme kuvvetleri, kompozit malzemelerin frezelenmesi sırasında oluşan kuvvetlerin bileşkesi alınarak hesaplanmıştır. Dolgusuz ve nano dolgulu cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin frezelenmesinden elde edilen kesme kuvvetleri Şekil 5.5 - Şekil 5.8'de verilmiştir. Şekil 5.5 - Şekil 5.8'de verilen kesme kuvvetleri grafikleri incelendiğinde ilerleme oranı arttığında kesme kuvvetlerin arttığı görülmektedir. Ortaya çıkan bu durum literatürle paralellik arz etmektedir (Azmi vd. 2013; Çelik ve Alp 2022; Bayraktar ve Turgut 2016). İlerleme oranı, deforme olmamış talaş kalınlığının belirlenmesinde ve talaş kesit alanında önemli bir rol oynamaktadır. İlerleme oranı arttıkça talaş kesit alanı artmakta buda kesilecek elyaf tabaka sayısını artmasına neden olmaktadır. Kesilecek elyaf tabaka sayısının artması kesme kuvveti artışına yol

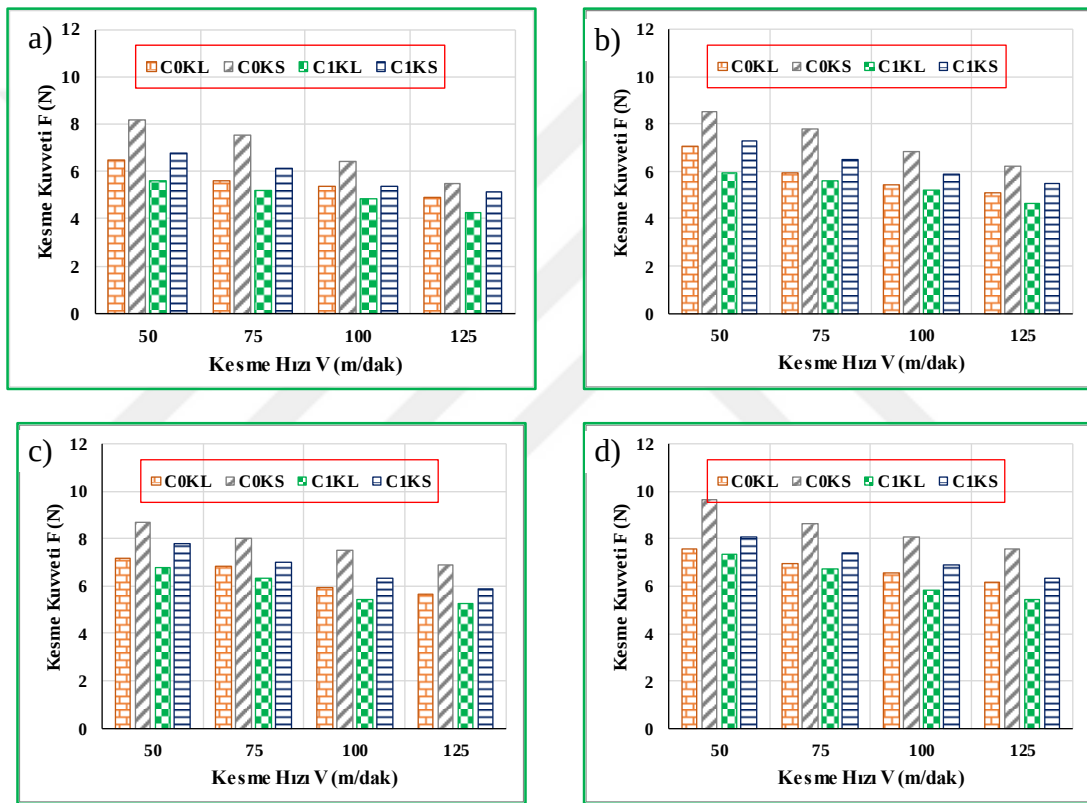
açmaktadır. Kesme hızı açısından Şekil 5.5 - Şekil 5.8.'deki kesme kuvvetleri incelendiğinde, kesme hızı arttıkça kesme kuvvetlerin azaldığı anlaşılmaktadır. Bu durum yapılan önceki çalışmalarla ile örtüşmektedir (Azmi vd., 2013; Patil ve Chalwa 2013; Çelik ve Alp 2022). Kesme hızının artışına bağlı olarak kesme bölgesinde sürtünmeden kaynaklı ısı artışı meydana gelmekte, elyaf ve epoksinin düşük termal iletkenliğe sahip olmasından ötürü ısı kesme bölgesinden tahliye edilememekte ve bu durum polimer matriste yumuşamaya neden olmaktadır. Böylece kompozit malzemenin frezelenmesi için gerekli olan kesme kuvvetleri düşmektedir. Şekil 5.5 - Şekil 5.8.'deki grafikler incelendiğinde en büyük kesme kuvveti ($F=11,78$ N) kesme hızı $V=50$ (m/dak) ve ilerleme hızı $fz=0,025$ (mm/diş) olduğunda ortaya çıkmıştır. En düşük kesme kuvveti ($F=4,64$ N) ise $V=125$ (m/dak) ve ilerleme hızı $fz=0,01$ (mm/diş) parametrelerinde elde edilmiştir.



Şekil 5.5. CETK'lerde a) $V = 50$ m/dak, b) $V = 75$ m/dak ,c) $V = 100$ m/dak ve d) $V = 125$ m/dak kesme hızlarında ilerleme oranlarının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi

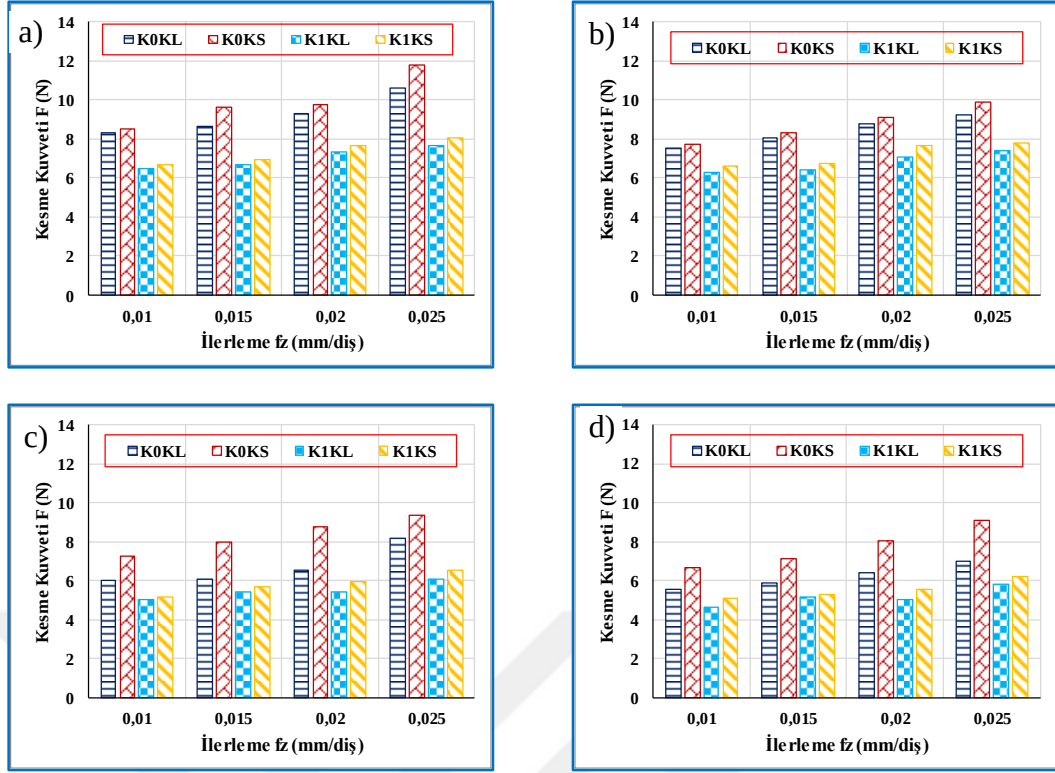
Dolgunsuz ve nano dolgulu cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin frezelenmesinde elde edilen kesme kuvvetleri karşılaştırıldığında en yüksek kesme kuvvetleri karbon elyaf takviyeli kompozitlerden elde edilmiştir. Karbon elyaf takviyeli kompozitlerde kesme kuvvetlerinin daha yüksek çıkmasının ana nedeni karbon elyafın

daha yüksek sertliğe sahip olmasına bağlanabilir (Jagannatha ve Harish, 2015; Mohanty vd. 2018). Karbon elyafın daha yüksek sertliğe sahip olması, frezeleme sırasında kesici takımın daha yüksek dirençlere maruz kalacağı anlamı taşımaktadır. Şekil 5.5 - Şekil 5.8.'deki kesme kuvvetleri incelendiğinde nano TiO_2 dolgusunun hem CETK hem de KETK'lerde kesme kuvvetlerini azalttığı görülmüştür. TiO_2 nano parçacıklarının kompozit içerisinde yağlayıcı görevi üstlenmesinden dolayı dolgulu kompozitlerde kesme kuvvetlerini düşürücü bir etki yapmıştır. Kesici takım iş parçasını işlemesi sırasında TiO_2 nano parçacıklarının sürtünme kuvvetlerini düşürmesi sayesinde kesme kuvvetleri dolgusuz kompozitlere kıyasla daha düşük elde edilmiştir.

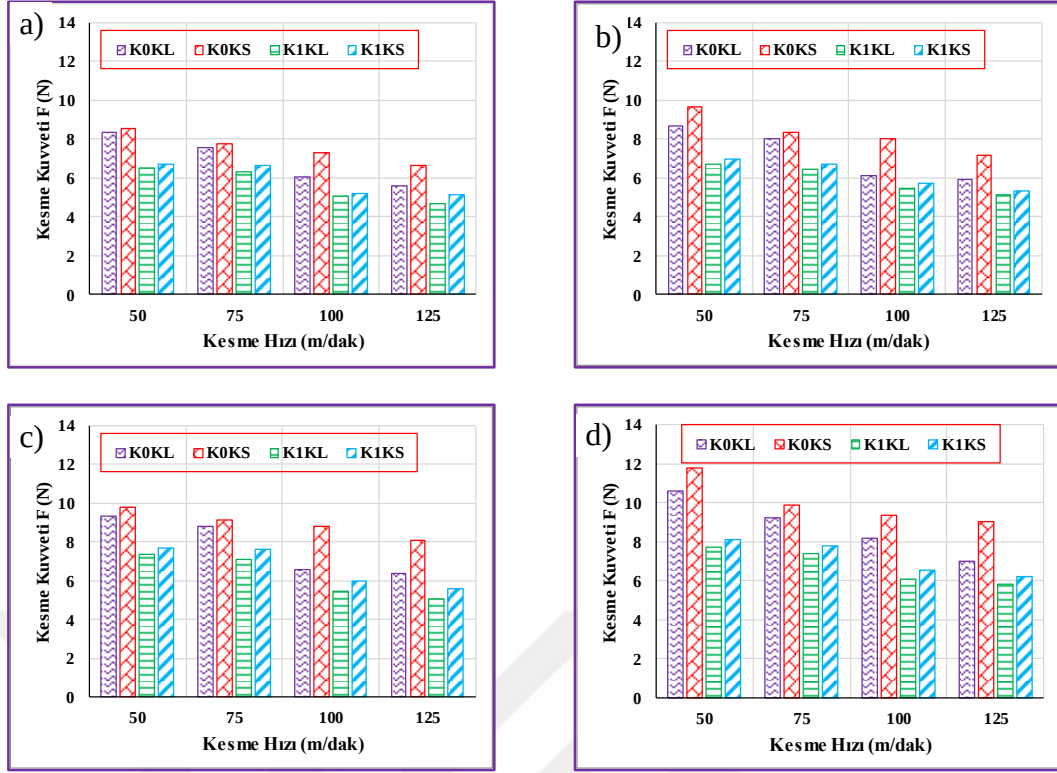


Şekil 5.6. CETK'lerde a) $f_z = 0,01$ mm/diş, b) $f_z = 0,015$ mm/diş, c) $f_z = 0,02$ mm/diş ve d) $f_z = 0,025$ mm/diş ilerleme oranlarında kesme hızlarının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi

CETK hem de KETK'lerin frezelenmesinde kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlemin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi incelendiğinde kriyojenik kesici takımlarla işlenen kompozitlerden elde edilen kesme kuvvetlerinin daha düşük çıktığı tespit edilmiştir. Literatür çalışmalarında elde edilen sonuçlar ile çalışmamızla örtüşmektedir (Varghese vd., 2019; Akıncioğlu vd. 2015).



Şekil 5.7. KETK'lerde a) V = 50 m/dak, b) V = 75 m/dak, c) V = 100 m/dak ve d) V = 125 m/dak kesme hızlarında ilerleme oranlarının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi



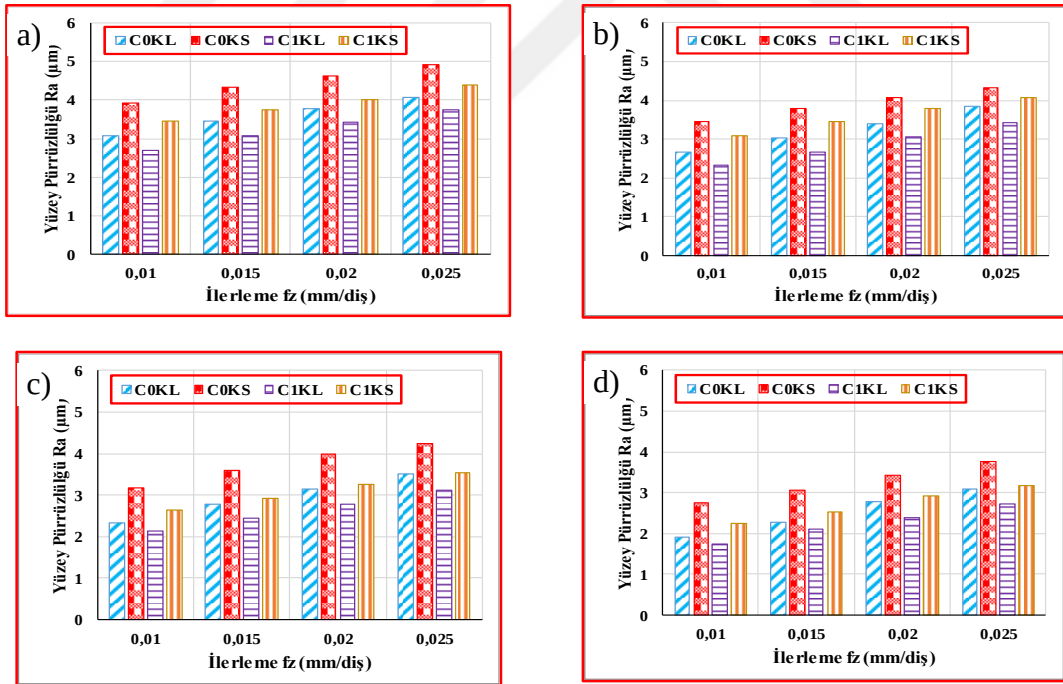
Şekil 5.8. KETK’lerde a) $f_z = 0,01$ mm/diş, b) $f_z = 0,015$ mm/diş, c) $f_z = 0,02$ mm/diş ve d) $f_z = 0,025$ mm/diş ilerleme oranlarında kesme hızlarının kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi

Adin ve arkadaşları benzer şekilde kriyojenik işlem görmüş kesici takım ile işlenen elyaf takviyeli kompozitlerde kesme kuvvetlerinin daha düşük elde edildiğini tespit etmişlerdir (Adin vd., 2023). Kriyokenik işlem görmüş takımların daha kararlı bir mikro yapıya sahip olması kesici takım aşınmasını azaltmakta ve takım ömrünün uzatmaktadır. Buda kompozitlerin frezelenmesi sırasında oluşan kesme kuvvetlerinin düşmesini sağlamaktadır (Varghese vd. 2019; Akıncıoğlu vd. 2015).

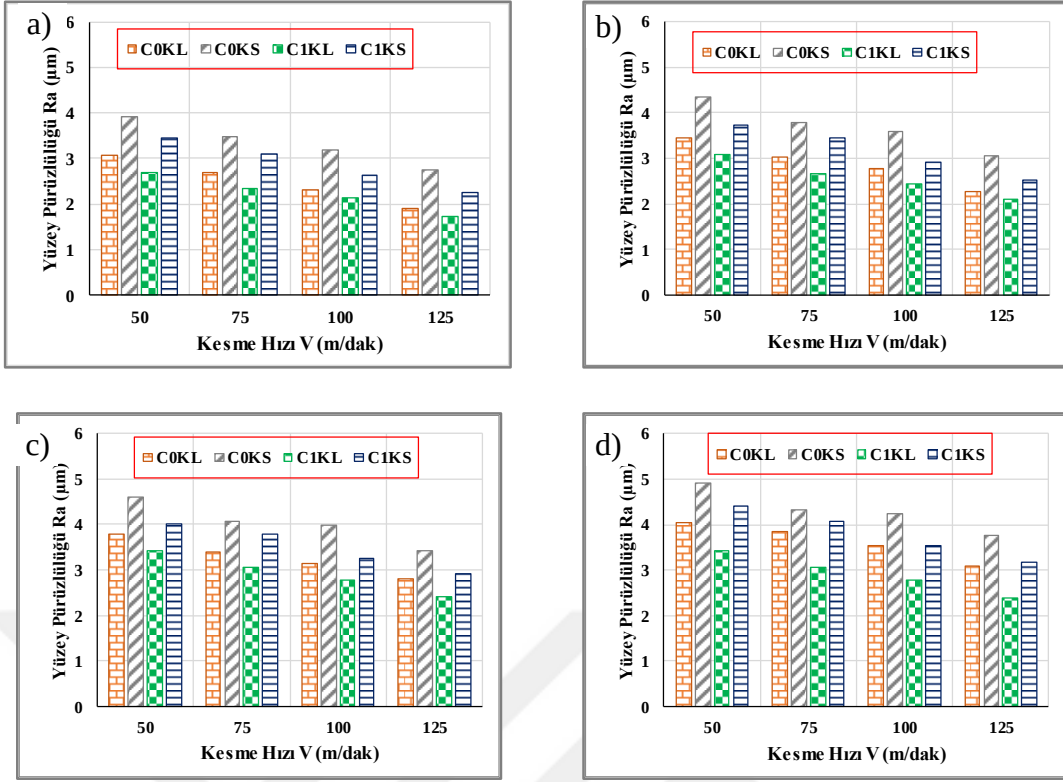
5.2.2 Yüzey pürüzlülüğü

CETK ve KETK dolgusuz ve nano dolgulu malzemelerin farklı kesme parametrelerde kuru işleme şartlarında kriyojenik işlem görmüş ve görmemiş kesici takımlarla frezelenmesi sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) sonuçları değerlendirilmiştir. Dolgusuz ve nano dolgulu cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin frezelenmesinden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 5.9 - Şekil 5.12’de verilmiştir. Şekil 5.9 - Şekil 5.12’te verilen yüzey pürüzlülüğü grafikleri incelendiğinde ilerleme oranı artığında yüzey pürüzlülüğü değerlerinin arttığı görülmektedir. İlerlemenin artmasına bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerlerinin artmasının

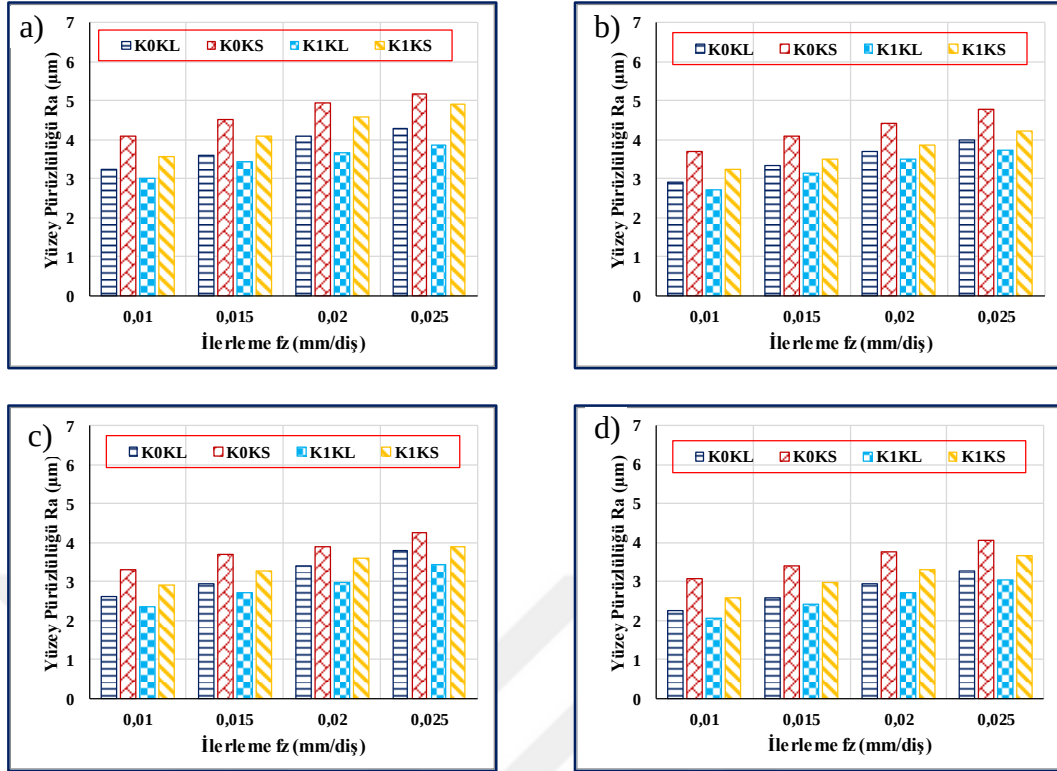
nedeni kompozit üzerindeki artan gerinim hızı ve bunun sonucunda elyaf ve epoksi üzerinde meydana gelen aşırı kırılmalardır. Çalışmamızla uyumlu olarak literatürde ilerleme oranlarının artışına bağlı yüzey pürüzlülüğün kötüleştiğini belirlemiştir (Azmi vd. 2013; Babu vd. 2013; Ceritbinmez vd. 2021; Çelik ve Alp 2022; Shi vd. 2019; Bayraktar ve Turgut 2016). Ayrıca ilerlemeye bağlı olarak yüzey pürüzlülüğün artışındaki bir diğer faktör ise yüksek ilerleme hızlarında talaş tahliyesinin yeterli olamamasından dolayı kompozit malzeme yüzeyinde çapaklanma meydana gelmektedir ve bu durumda yüzey pürüzlülüğünün kötüleştirmektedir (Ceritbinmez vd. 2021). Kesme hızı açısından Şekil 5.9 - Şekil 5.12'deki yüzey pürüzlülük değerleri değerlendirildiğinde kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülük değerleri dolgunuz ve nano TiO₂ dolgululu CETK ve KETK'lerde azalmıştır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde elde edilen sonuçlarla paralellik gösterdiği tespit edilmiştir (Azmi vd. 2013; Babu vd. 2013; Ceritbinmez vd. 2021; Çelik ve Alp 2022). Artan kesme hızı ile yüzey pürüzlülüğünde meydana gelen iyileşmenin esas nedeni takım/talaş ara yüzeyindeki malzeme deformasyonunun az olmasıdır.



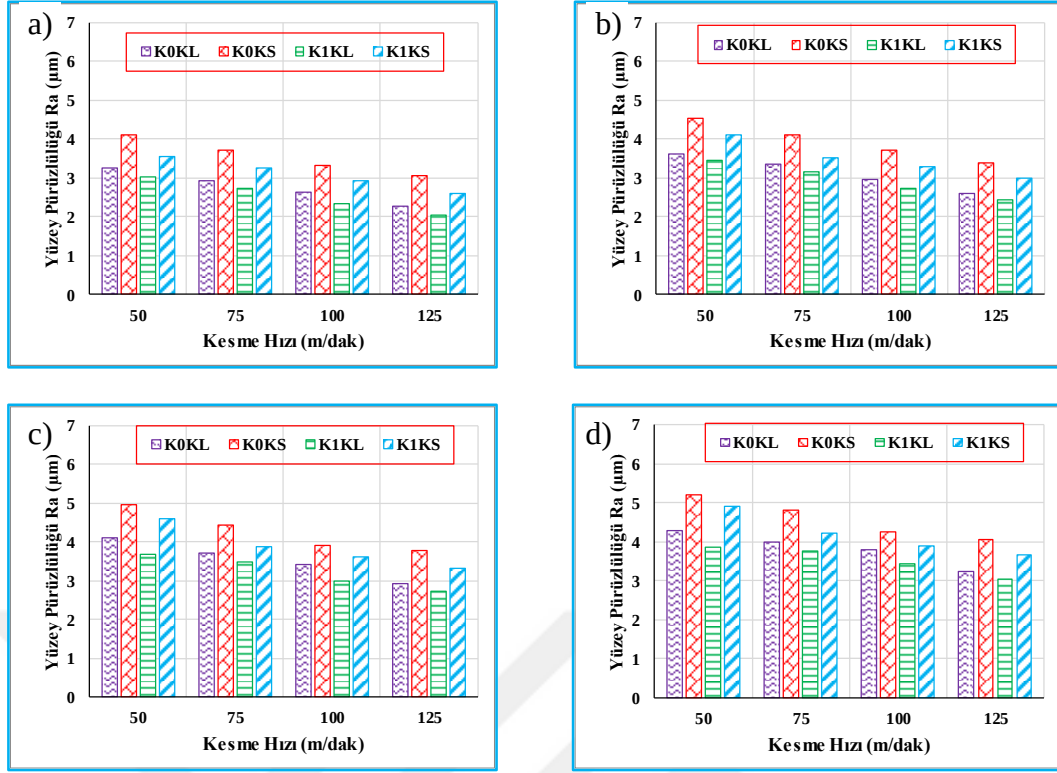
Şekil 5.9. CETK'lerde a) V = 50 m/dak, b) V = 75 m/dak, c) V = 100 m/dak ve d) V = 125 m/dak kesme hızlarında ilerleme oranlarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi



Şekil 5.10. CETK'lerde a) $f_z = 0,01$ mm/diş, b) $f_z = 0,015$ mm/diş, c) $f_z = 0,02$ mm/diş ve d) $f_z = 0,025$ mm/diş ilerleme oranlarında kesme hızlarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi



Şekil 5.11. KETK’lerde a) V = 50 m/dak, b) V = 75 m/dak, c) V = 100 m/dak ve d) V = 125 m/dak kesme hızlarında ilerleme oranlarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi



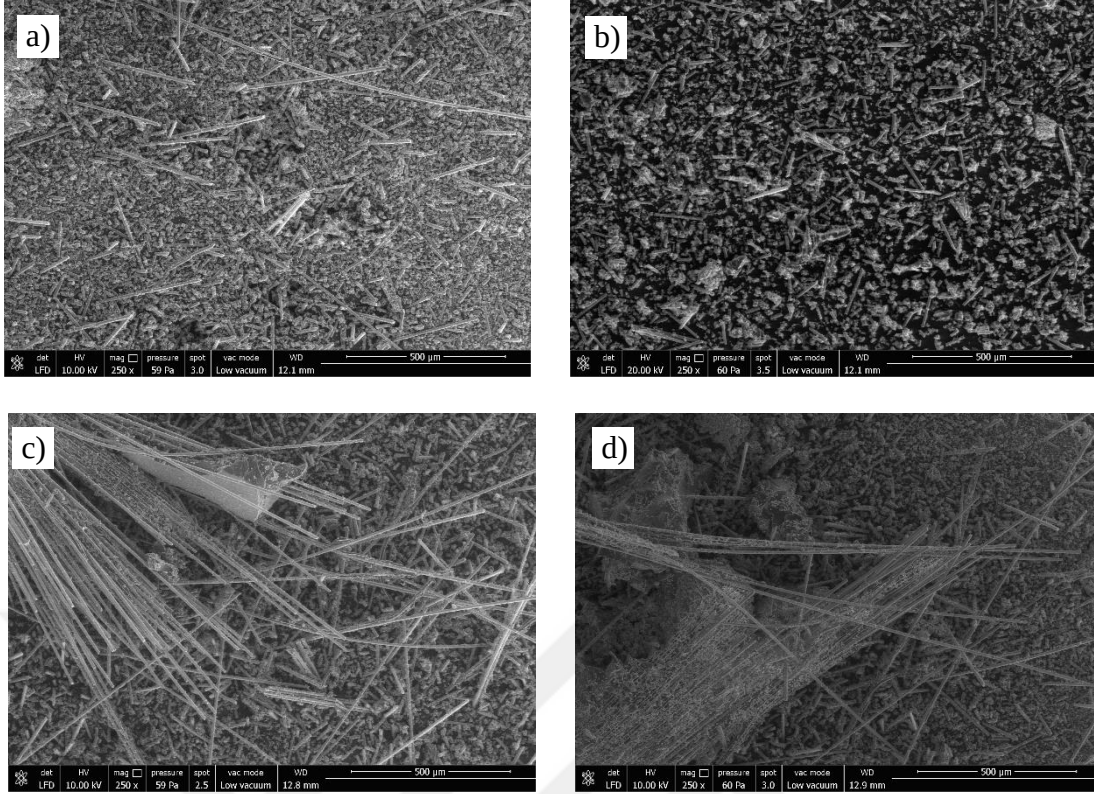
Şekil 5.12. KETK’lerde a) $f_z = 0,01$ mm/diş, b) $f_z = 0,015$ mm/diş, c) $f_z = 0,02$ mm/diş ve d) $f_z = 0,025$ mm/diş ilerleme oranlarında kesme hızlarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi

Dolgusuz ve nano dolgulu cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin frezelenmesinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri karşılaştırıldığında en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri karbon elyaf takviyeli kompozitlerden elde edilmiştir. Karbon elyafın cam elyafa göre daha yüksek sertlikte olması yüzey pürüzlülüğünü artırıcı bir etki yapmıştır. Şekil 5.9 - Şekil 5.12.’deki yüzey pürüzlülüğü değerleri incelendiğinde nano TiO_2 dolgusunun hem CETK hem de KETK’lerde yüzey pürüzlülüğü değerlerini azalttığı görülmüştür. Yüzey pürüzlülük değerleri açısından nano TiO_2 parçacıkları elyaf takviyeli kompozitin tokluğunu arttırarak takım aşınmasını ve elyaf çekilmesini azalmasını sağlayarak daha düşük pürüzlülük değerlerinin elde edilmesinde katkı sunmuştur. Yapılan benzer bir çalışmada elde edilen sonuçların bu çalışmayla örtüştüğü görülmüştür (Somaiah vd. 2025). Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlemin her iki kompozit tipinde de yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi incelendiğinde kriyojenik işlemin yüzey pürüzlülük değerlerini düşürerek olumlu bir katkı sunduğu ortaya çıkmıştır. Bu durum literatürdeki sonuçlarla paralellik arz etmektedir (Mukkoti vd. 2018; Patil vd. 2020). Yapılan başka bir çalışmada da kriyojenik işlem görmüş HSS kesici takımla işlenen kompozitlerde yüzey pürüzlülük değerlerinin daha düşük çıktığı belirlenmiştir (Adin vd. 2023). Kesici takımlara kriyojenik işlem uygulandığında kesici

takımların aşınma direncinin ve ısı iletkenliklerini artması sayesinde daha kesme sıcaklıkları elde edilmekte bundan dolayı kriyojenik işlemlili kesici takımlarla işlenen malzemeler yüzey pürüzlülük değeri daha düşük çıkmaktadır (Mukkoti vd. 2018; Patil vd. 2020).

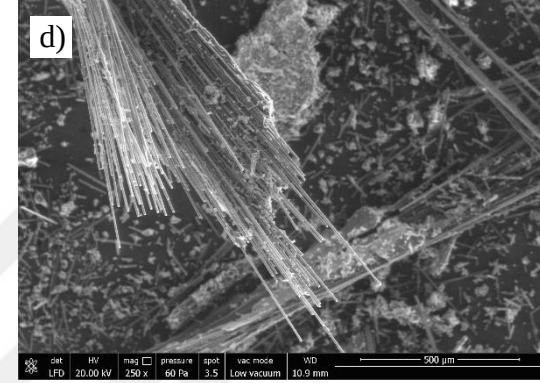
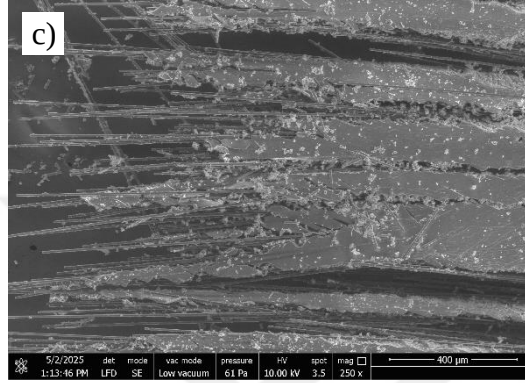
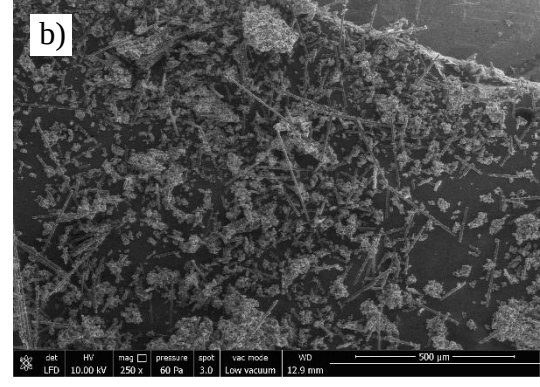
5.2.3 Talaş morfoloji SEM görüntüleri

Kuru işleme şartlarında kriyojenikli ve kriyojeniksiz kesici takımlarla en yüksek kesme parametrelerde C0, C1, K0 ve K1 kompozitlerin frezelenmesi sonucu oluşan talaşlar incelenmiştir. Talaşlar, en yüksek ($f_z=0,025$ mm/diş, $V=125$ m/dak ve $a_p=1$ mm) kesme parametrelerinde elde edilmiştir. Dolgusuz ve nano dolgulu cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin frezelenmesinden elde edilen talaşların SEM görüntüleri, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'te verilmiştir. Şekil 5.13'teki SEM görüntüleri incelendiğinde Şekil 5.13.a ve b'deki nano TiO_2 'nin etkisine bakıldığında nano TiO_2 dolgulu kompozitin dolgusuz kompozite göre kesilmiş elyaf parçacıklarının boylarının birbirine yakın olduğu ve homojen bir yapı sergilediği görülmektedir. Ancak dolgusuz kompozitte ise talaş kümesi içinde yer yer tekil uzun elyafların bağımsız bir şekilde olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum nano TiO_2 varlığının işlenebilirlik sırasında yağlayıcı özelliğinden dolayı talaş kesimini kolaylaştırdığını göstermektedir. Şekil 5.13c ve d'deki nano TiO_2 varlığının talaş morfoloji üzerindeki etkisi incelendiğinde her iki resimde üst kısımda elyaf demetlerinin biriktiği alt kısımlarında ise daha küçük elyaf parçacıkların yığıldığı görülmüştür. Nano TiO_2 kompozitte dolgusuz kompozite kıyasla elyaf demetleri altında kalan kopmuş elyaf parçacıkların boyutsal olarak daha büyük olduğu gözlenmiştir. Kriyojenik kesici takımla işlenen CETK'lerde oluşan talaşlar incelendiğinde çoğunlukla kısa elyaflardan oluşan bir talaş morfolojisi gözlenirken, kriyojeniksiz kesici takımla işlenen CETK'lerde ise çoğunlukla elyaf demetlerinden oluşan uniform olmayan bir talaş morfolojisi ortaya çıkmıştır.



Şekil 5.13. CETK'lerin $V=125$ m/dak, $f_z=0,025$ mm/diş ve $a_p=1$ mm kesme parametreleri ile işlenmesi sonucu oluşan a) COKL, b) C1KL, c) COKS ve d) C1KS talaşlarının SEM görüntüleri

Şekil 5.14'teki SEM görüntüleri incelendiğinde Şekil 5.14a ve b'deki görseller kıyaslandığında nano TiO_2 dolgulu KETK'lerdeki talaş morfolojisinin küçük parçacıklar şeklinde olduğu gözlenmiştir. Dolgusuzda ise küçük parçacıklara ek olarak elyaf demetlerinde talaş içerisinde mevcut olduğu görülmektedir ve daha heterojen bir yapı sergilemektedir. Şekil 5.14c ve d'deki SEM görüntülerinde kriyojeniksiz kesici takım ile işlenen kompozitte elyaf demetlerinin kriyojenikli kesici takım ile işlenene kompozite kıyasla daha yoğun olduğu görülmektedir. Kriyojeniksiz takımda elyaf demeti bir bütün halinde malzemeden koparken kriyojenikli takımda ise küçük elyaf parçacıkların ve öbeklenmiş elyaf demetlerin bir arada olduğu karışık bir talaş yapısı ortaya çıkmıştır. Bu da kriyojeninin kesici takım kazandırdığı tokluk, sertlik ve aşınma direnci sayesinde frezelemede talaş oluşumunu kolaylaştırmıştır.



Şekil 5.14. KETK'lerin $V=125$ m/dak, $f_z=0,025$ mm/diş ve $a_p=1$ mm kesme parametreleri ile işlenmesi sonucu oluşan a) K0KL, b) K1KL, c) K0KS ve d) K1KS talaşlarının SEM görüntüleri

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada el yatırma yöntemiyle iki farklı elyaf tipi kullanılarak (cam ve karbon) kompozitler üretilmiştir. Daha sonra TiO_2 dolgusu kullanılarak üretilen dolgulu kompozitlerin mekanik özellikleri ve frezeleme sonuçları dolgusuz cam ve karbon elyafli kompozitlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca frezeleme işlemlerinde kriyojenik işlem uygulanmış ve kriyojenik işlem uygulanmamış kesici takımların ve kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Buna ilaveten frezeleme sonrası elde edilen talaşların morfolojileri SEM görüntüleri ile analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- TiO_2 dolgu parçacığı ilavesiyle hem cam hem de karbon elyaf takviyeli kompozitlerin çekme dayanımında artış sağlanmıştır. TiO_2 dolgusu CETK kompozitin çekme dayanımını 181 Mpa çıkarırken KETK kompozitin çekme dayanımı ise 537,67 MPa çıkararak sırasıyla %8 ve %12 artış sağlamıştır.
- Çekme sonrası SEM yardımıyla kırılma yüzeyleri incelenen dolgusuz kompozitlerde elyafların bağımsız bir şekilde koparak matris malzemeden ayrıldıkları görülmüştür. TiO_2 dolgulu kompozitlerde ise elyafların kompozit malzeme matrisi içerisinde belirli bir bölgeden yoğun olarak toplu fiber demetleri halinde koparak çıktıkları gözlemlenmiştir.
- Eğilme davranışı incelenen CETK ve KETK'lerde TiO_2 dolgusunun eğilme dayanımında artış sağladığı belirlenmiştir. %1 oranında nano TiO_2 ilavesiyle CETK'lerde eğilme dayanımı 384 Mpa'dan 429 MPa'a, KETK'lerde ise 554 MPa'dan 632 MPa'a ulaşmıştır.
- Basma testleri yapılan dolgulu ve dolusuz CETK ve KETK'lerde matrise ilave edilen nano parçacık takviyesinin basma dayanımını geliştirdiği belirlenmiştir. CETK'lerde basma mukavemetinde %7 oranında artış sağlanırken KETK'lerde ise bu oran yaklaşık %5 olarak elde edilmiştir.
- Dalgusuz ve nano dolgulu CETK ve KETK'lerin frezelenmesinde ilerleme oranı artığında kesme kuvvetlerin arttığı, kesme hızının artmasına bağlı olarak ise kesme kuvvetlerinin azaldığı tespit edilmiştir. CETK'lerin kesme kuvvetleri KETK'lere kıyasla daha düşük çıkmıştır. Her iki elyaf tipi içinde TiO_2 dolgulu kompozitlerin kesme kuvvetlerinin daha düşük çıktığı belirlenmiştir.

- Elyaf tipi açısından yüzey pürüzlülüğünde CETK'lerin frezelenme sonrası yüzey pürüzlülük değerlerinin daha düşük çıktığı ortaya çıkmıştır. Dolgu etkisi sayesinde ise her iki elyaf çeşidinde yüzey pürüzlülük değerleri üzerinde olumlu bir katkı sağlamıştır. CETK ve KETK'lerin frezelenmesinde kesme hızının artışına bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerlerinin azaldığı, ilerleme oranının artışına bağlı olarak ise arttığı tespit edilmiştir. Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlem, hem CETK hem de KETK'lerde kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri üzerinde düşürücü bir etki yapmıştır.
- CETK'lerin frezelenme sonrası talaş morfolojileri incelendiğinde dolgusuz kompozitte ise talaş kümesi içinde yer yer tekil uzun elyafların bağımsız olarak dağıldığı ve heterojen bir yapı sergilediği, nano TiO₂ dolgulu kompozitte ise elyaf parçacıklarının boylarının daha homojen bir yapı sergilediği ve daha kısa olduğu gözlenmiştir. KETK'lerdeki talaş morfolojisi incelendiğinde ise dolgusuz kompozitlerde elyaf demetlerinin yanı sıra daha kısa elyaf parçacıklarının bir arada olduğu uniform olmayan bir yapı görülmüştür. Dalgulu KETK'de ise talaş morfolojisinin küçük parçacıklar şeklinde olduğu gözlenmiştir.
- Krojenikli kesici takımla frezelenen CETK ve KETK'lerde küçük elyaf parçacıkların ve öbeklenmiş elyaf demetlerin bir arada olduğu bir talaş yapısı gözlenirken kriyojeniksiz takımla frezelenen kompozitlerde ise elyaf demetlerin bütün halinde kompozitten koptuğu görülmüştür

6.2. Öneriler

Cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerde TiO₂ dolgusunun mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin ve kriyojenik işlem uygulanmış kesici takımlarla frezelenmesinin değerlendirilmesi amacıyla gelecekteki çalışmalara katkı sağlayabilecek aşağıdaki öneriler sunulmuştur:

- Bu çalışmada tek bir dolgu oranı kullanılmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda birden fazla dolgu oranı kullanarak optimum oranın bulunması hedeflenebilir.
- Karbon ve cam elyafların aynı kompozit içerisinde kullanılarak hibritlenme yöntemi ile mekanik özellikleri ve işlenebilirliği incelenebilir.
- Farklı soğutma yöntemleri kullanılarak kompozit malzemelerin frezelenmesi araştırılabilir.

- Kriyojenik işlemin hem kompozit malzemelere hem de kesici takımlara uygulanarak mekanik testler ve frezeleme üzerindeki etkisi incelenebilir.



KAYNAKLAR

- Adin, M. Ş., İşcan, B., & Baday, Ş. (2023). Machining fiber-reinforced glass-epoxy composites with cryo-treated and untreated HSS cutting tools of varying geometries. *Materials Today Communications*, 37, 107301.
- Ali, H. M., Iqbal, A., & Liang, L. (2013). A comparative study on the use of drilling and milling processes in hole making of GFRP composite. *Sadhana*, 38, 743–760.
- Akıncioğlu, S., Gökkaya, H., & Uygur, İ. (2016). The effects of cryogenic-treated carbide tools on tool wear and surface roughness of turning of Hastelloy C22 based on Taguchi method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82, 303-314.
- Arıkan, R. (2012). *Talaşlı İmalat Teknikleri*. Nobel Yayıncılık.
- Ayyanar, C. B., Kumar, R., Helaili, S., Bal, T., Gapsari, F., Anam, K., ... & Siengchin, S. (2024). Experimental and numerical analysis of natural fillers loaded and E-glass reinforced epoxy sandwich composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 32, 1235-1244.
- Azmi, A. I., Lin, R. J. T., & Bhattacharyya, D. J. I. J. A. M. T. (2013). Machinability study of glass fibre-reinforced polymer composites during end milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(1), 247-261.
- Bayraktar, F. (2021). Kesici takım ve iş parçasına uygulanan kriyojenik işlemin kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrüne etkisinin araştırılması (Yüksek lisans tezi). Düzce Üniversitesi, Düzce.
- Bayraktar, Ş., & Turgut, Y. (2016). Investigation of the cutting forces and surface roughness in milling carbon fiber reinforced polymer composite material. *Materials and technology* 50 (4), 591–600.
- Babu, G. D., Babu, K. S., & Gowd, B. U. M. (2013). Effect of machining parameters on milled natural fiber-reinforced plastic composites. *J. Adv. Mech. Eng*, 1, 1-12.
- Babu, N., Nair, K. V., Kallorath, K. K., Arulprakasam, S., & Ullattil, S. (2024). Performance Analysis of TiAlSiN Coated Tungsten Carbide End Milling Tool Subjected to Shallow and Deep Cryogenic Treatments. *Materials Research*, 27, e20240133.
- Bledzki, A. K., & Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*, 24(2), 221–274.
- Brown, D. (2002). Aramid fibers. In D. Hull & T. W. Clyne (Eds.), *An introduction to composite materials* (2nd ed., pp. 105–124). Cambridge University Press.
- Bunsell, A. R. (2018). *An introduction to fibre reinforced composite materials* (3rd ed.). CRC Press.

- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). Materials science and engineering: An introduction (10th ed.). Wiley.
- Carballeira, P., & Hauptert, F. (2010). Toughening effects of titanium dioxide nanoparticles on TiO₂/epoxy resin nanocomposites. *Polymer composites*, 31(7), 1241-1246.
- Ceritbinmez, F., Yapici, A., & Kanca, E. (2021). The effect of nanoparticle additive on surface milling in glass fiber reinforced composite structures. *Polymers and Polymer Composites*, 29(9_suppl), S575–S585.
- Chawla, K. K. (2012). Composite materials: science and engineering. Springer Science & Business Media.
- Çelik, Y. H., Alp, M. S. (2022). Determination of milling performance of jute and flax fiber reinforced composites. *Journal of Natural Fibers*, 19(2), 782-796.
- Çiçek, A., Gürün, H., Kıvak, T., & Ekici, E. (2012). AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin delinmesinde derin kriyojenik işlemin takım ömrü üzerindeki etkilerinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 1(1), 41–51.
- Daniel, I. M., & Ishai, O. (2006). Engineering mechanics of composite materials (2nd ed.). Oxford University Press.
- Davim, J. P., & Reis, P. (2003). Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRPs) using design experiments. *Composite Structures*, 59(4), 481–487.
- Devi, C., Mahalingam, S. K., Cep, R., & Kouril, K. (2023). Effect of cryo-treated cutting tool end milling on custom 450 stainless steel. *Materials*, 16(13), 4744.
- Donnet, J.-B., Bansal, R. C., & Wang, M.-J. (1998). Carbon fibers (2nd ed.). Marcel Dekker.
- Erkan, Ö., & Işık, B. (2009). Cam elyaf takviyeli kompozit malzemenin işlenmesi esnasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin incelenmesi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS 09), Karabük, Türkiye, 1–6.
- Erkan, Ö., Işık, B., Çiçek, A., & Kara, F. (2013). Prediction of damage factor in end milling of glass fibre reinforced plastic composites using artificial neural network. *Applied Composite Materials*, 20, 517–536.
- Ertan, R., Kuş, A. & Durgun, İ. (2019). Üç boyutlu dokuma kumaş takviyeli sandviç kompozitlerde yüzeylerdeki elyaf katman sayısının eğilme davranışına etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(3), 231–240.
- Gara, S., & Tsoumarev, O. (2016). Effect of tool geometry on surface roughness in slotting of CFRP. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(1–4), 451–461.

- Gara, S., Fredj, R., Naïmi, S., & Tsoumarev, O. (2017). Prediction of cutting forces in slotting of multidirectional CFRP laminate. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(9–12), 3379–3391.
- Gay, D., Hoa, S. V., & Tsai, S. W. (2003). *Composite materials: Design and applications*. CRC Press.
- Ghosh, A., & Mallik, A. K. (1986). *Manufacturing science*. Affiliated East-West Press.
- Ghosh, A., & Malik, A. K. (2010). *Manufacturing science* (2nd ed.). New Delhi: East-West Press.
- Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1999). *Cellular solids: Structure and properties* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Gibson, R. F. (2016). *Principles of composite material mechanics* (4th ed.). CRC Press.
- Gökçe, N., Eren, Ş., & Subaşı, S. (2020). Hibrit polimer matrisli ve cam lifi takviyeli polimer kompozitlerin çekme özelliklerinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım Ve Teknoloji*, 8(4), 872-883.
- Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems* (4th ed.). Wiley.
- Guven, C., Kisa, M., Demircan, G., Ozen, M., & Kirar, E. (2024). Effect of seawater aging on mechanical, buckling, structural, and thermal properties of nano Al₂O₃ and TiO₂-doped glass-epoxy nanocomposites. *Polymer Composites*, 45(8), 7376-7390.
- Gürbüz, H., & Baday, Ş. (2021). Milling Inconel 718 workpiece with cryogenically treated and untreated cutting tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116, 3135–3148.
- Güven, C., Kısa, M., Özen, M., & Demircan, G. (2022). Al₂O₃ ve TiO₂ nanopartikül katkısının cam elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerine ve burkulma davranışına etkisi. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 7(3), 161-172.
- Dinkci, H. (2020). Vakum torbalamada basınç değişkeninin karbon elyaf matrisli epoksi yapılarda estetik ve mekanik özelliklere etkisi. *Uluslararası Bilim, Teknoloji ve Tasarım Dergisi (ISTD)*, 1(1), 1-15.
- Hull, D., & Clyne, T. W. (1996). *An introduction to composite materials* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Hocheng, H., & Puw, H. Y. (1992). On drilling characteristics of fiber-reinforced thermoset and thermoplastics. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 32(4), 583–592.

- Işık, B., & Demirci, H. İ. (2014). Camelyaf takviyeli plastik kompozit malzemenin kanal frezelenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin incelenmesi. 5. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2014), 465–471.
- İç, Y. T., Elaldı, F., Keçeci, B., Uzun, G. Ö., Limoncuoğlu, N., & Aksoy, İ. (2019). Kevlar fiber-epoksi kompozit malzemesinin frezeleme işleminin faktöriyel tasarım ve hedef programlama yöntemleriyle eniyilemesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34(3), 1549–1560.
- İmak, A. (2015). Tabakalı hibrit kompozit malzemelerin yorulma davranışlarının analizi (Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- İnce, M. E. (2019). Kesikli Cam Liflerinden Oluşturulmuş Dokusuz Kumaşların Sıkıştırılabilirliği. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 21(63), 845-857.
- Jagannatha, T. D., & Harish, G. (2015). Mechanical properties of carbon/glass fiber reinforced epoxy hybrid polymer composites. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 4(2), 131-137.
- Jenarthanan, M. P., & Jeyapaul, R. (2016). Modelling of machining force in end milling of GFRP composites using MRA and ANN. Australian Journal of Mechanical Engineering, 14(2), 104–114.
- Jenarthanan, M. P., Jeyapaul, R., & Ramesh Kumar, S. (2017). Comparative analysis of delamination factor prediction using RSM and ANN during endmilling of GFRP composites. Australian Journal of Mechanical Engineering, 15(2), 111–124.
- Kalpakistan, S., & Schmid, S. R. (2013). Manufacturing engineering and technology (7th ed.). Pearson Education.
- Kiliçkap, E., Yardımeden, A., & Çelik, Y. H. (2015). Investigation of experimental study of end milling of CFRP composite. Science and Engineering of Composite Materials, 22(1), 89-95.
- Korkut, T. B., & Gören, A. (2022). Güneş panellerinde polimer kompozit malzeme kullanımı ile optimum ısı transferi performansının elde edilmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 27(3), 1177–1192.
- Kuram, E. (2016). İnce Cidarlı Parçaların Mikro Frezelenmesinde Talaş Kaldırma Yolunun Takım Aşınması, Kuvvetler Ve Parça Kalitesi Üzerindeki Etkisi. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 4(4), 293-298.
- Liu, D., Gao, L., & Zhou, P. (2020). Effects of deep cryogenic treatment on WC-Co cutter performances in milling of superalloy GH536. Advances in Mechanical Engineering, 12(5), 1687814020918494.
- Li, J., Zhang, X., Pang, S., Wu, Y., Yang, C., Su, L., ... & Wei, X. (2024). Study on the compressive strength and failure mechanism of fiber-reinforced polymer green filling materials. Construction and Building Materials, 452, 138990.

- Mallick, P. K. (2007). Fiber-reinforced composites: Materials, manufacturing, and design (3rd ed.). CRC Press.
- Mukkoti, V. V., Sankaraiah, G., & Yohan, M. (2018). Effect of cryogenic treatment of tungsten carbide tools on cutting force and power consumption in CNC milling process. *Production & Manufacturing Research*, 6(1), 149-170.
- Mohanty, S. S., Rout, A. K., Jesthi, D. K., Routara, B. C., & Nayak, R. K. (2018). Evaluation of mechanical and wear performance of glass/carbon fiber reinforced polymer hybrid composite. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 19854-19861.
- Morgan, P. (2005). Carbon fibers and their composites. CRC Press.
- Motorcu, A. R., & Bilge, T. (2018). Laminant Kompozitin Cep Frezelenmesinde Yüzey Pürüzlülüğü Ve Boyutsal Tamlığın Değerlendirilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(1), 79–100.
- Ozkan, D., Panjan, P., Gok, M. S., & Karaoglanli, A. C. (2019). Investigation of machining parameters that affects surface roughness and cutting forces in milling of CFRPs with TiAlN and TiN coated carbide cutting tools. *Materials Research Express*, 6(9), 095616. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab2f7d>
- Özbek, N. A., & Özbek, O. (2007). Kriyojenik olarak işlenmiş ve işlenmemiş tungsten karbür takımların frezeleme işlemlerindeki performansı. *Politeknik Dergisi*, 32(3), 638–643.
- Patil Deogonda, B., & Chalwa, V. N. (2013). Machining of glass fiber reinforcement epoxy composite. *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*, 38-42.
- Patil, N., Gopalakrishna, K., & Sangmesh, B. (2020). Performance evaluation of cryogenic treated and untreated carbide inserts during machining of AISI 304 steel. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 17(1), 7709-7718.
- Prasad, V., Joseph, M. A., & Sekar, K. (2018). Investigation of mechanical, thermal and water absorption properties of flax fibre reinforced epoxy composite with nano TiO₂ addition. *Composites part A: Applied science and manufacturing*, 115, 360-370.
- Prasob, P. A., & Sasikumar, M. (2018). Static and dynamic behavior of jute/epoxy composites with ZnO and TiO₂ fillers at different temperature conditions. *Polymer Testing*, 69, 52-62.
- Samtaş, G., & Korucu, H. (2019). Kriyojenik işlem görmüş EN AW 5754 (AlMg3) alüminyum alaşımının frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü için kesme parametrelerinin optimizasyonu. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(3), 690–699. <https://doi.org/10.29109/gujsc.527225>

- Sandvik Coromant. (2019). Metal cutting technology: Technical guide. Sandvik Machining Solutions. <https://www.sandvik.coromant.com>
- Sheikh-Ahmad, J. Y. (2009). Machining of polymer composites. Springer Science & Business Media.
- Sheikh-Ahmad, J., Urban, N., & Cheraghi, H. (2012). Machining damage in edge trimming of CFRP. *Materials and Manufacturing Processes*, 27(7), 802–808. <https://doi.org/10.1080/10426914.2011.648751>
- Shi, Z. Y., Cui, P., & Li, X. (2019). A review on research progress of machining technologies of carbon fiber-reinforced polymer and aramid fiber-reinforced polymer. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 233(13), 4508-4520.
- Somaiah, A., Prasad, B. A., & Nath, N. K. (2025). Taguchi-Based Optimization and ANOVA Analysis of Drilling Parameters for Enhanced Hole Quality in GFRP Composites with MgO and TiO₂ Nanofillers. *Materials Circular Economy*, 7(1), 5.
- Strong, A. B. (2008). *Fundamentals of composites manufacturing: Materials, methods and applications* (2nd ed.). Society of Manufacturing Engineers.
- Suresha, B., Guggare, S. L., & Raghavendra, N. V. (2016). Effect of TiO₂ filler loading on physico-mechanical properties and abrasion of jute fabric reinforced epoxy composites. *Materials Sciences and Applications*, 7(9), 510-526.
- Suresha, B., Varun, C. A., Indushekhara, N. M., & Vishwanath, H. R. (2019). Effect of nano filler reinforcement on mechanical properties of epoxy composites. In *IOP conference series: Materials science and engineering* (Vol. 574, No. 1, p. 012010). IOP Publishing.
- Şirin, Ş., & Şirin, E. (2020). AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Frezelenmesi Üzerine Bir Derleme. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 1(2), 14-24.
- Takmaz, A., Erkan, Ö., & Yücel, E. (2016). Cam elyaf takviyeli plastik kompozit malzemenin kenar frezelenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin İstatistiksel olarak İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 567–573.
- Tepehan, B., & Sülü, İ. Y. (2022). Miğfer yapıları için oluşturulan tabakalı hibrit kompozit plakanın mekanik analizi. *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(1), 69-80.
- Turgut, T., Kayran, A., Alemdaroğlu, N., & Ceylan, M. (2007). Vakum torbalama yöntemi ile kompozit malzemeden yapı üretimi: Örnek bir havacılık uygulaması. *Mühendis ve Makina*, 48(566), 14–21.
- Türkmen, İ. (2012). Cam elyaf takviyeli polyester matrisli kompozit malzemelerde elyaf tabaka sayısına bağlı mekanik özelliklerin ve darbe dayanımının incelenmesi (Yüksek lisans tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü).

- Varghese, V., Ramesh, M. R., & Chakradhar, D. (2019). Experimental investigation of cryogenic end milling on maraging steel using cryogenically treated tungsten carbide-cobalt inserts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105, 2001-2019.
- Vinson, J. R. (1999). *The behavior of sandwich structures of isotropic and composite materials*. CRC Press.
- Wang, H., Sun, J., Li, J., & Li, W. (2015). Roughness modelling analysis for milling of carbon fibre reinforced polymer composites. *Materials Technology*, 30(sup1), A46–A50. <https://doi.org/10.1179/1753555714Y.00000000238>
- Yadhav, B. L., Govindaraju, H. K., Kiran, M. D., & Suresha, B. (2021). Three-point bending and impact behaviour of carbon/epoxy composites modified with titanium dioxide nanoparticles. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1755-1761.
- Yağmur, S., Kurt, A., & Şeker, U. (2020). Karbon fiber takviyeli kompozit (KFTK) malzemelerin frezelenmesinde delaminasyon ve kesme kuvvetlerinin değerlendirilmesi ve matematiksel modellenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(1), 457–466.
- Yastımoğlu, F., & Özkan, A. (2017). Tekrarlanan yükler altında kompozit malzemelerin yapıların incelenmesini amaçlayan deney aygıtı tasarımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(1), 56–66.
- Yudar, S. (2023). Uçak motorlarında süperalaşımlar yerine kullanılabilecek olan kompozit malzemelerin incelenmesi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(3), 585-595.
- Yong, A. Y. L., Seah, K. H. W., & Rahman, M. (2007). Performance of cryogenically treated tungsten carbide tools in milling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32, 638-643.
- Zenkert, D. (1995). *An introduction to sandwich construction*. Engineering Materials Advisory Services Ltd.