



**TERMOPLASTİK VE TERMOSET ESASLI
KARBON ELYAFLI LAMİNE KOMPOZİTLERİN
MİKRO DELİNMESİNDE DELME KUVVETİ VE
TAKIM ÇAPINDAKİ DEĞİŞİMİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Betül KARADENİZ

Danışman

Prof. Dr. Bekir YALÇIN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2024

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TERMOPLASTİK VE TERMOSET ESASLI KARBON ELYAFLI
LAMİNE KOMPOZİTLERİN MİKRO DELİNMESİNDE DELME
KUVVETİ VE TAKIM ÇAPINDAKİ DEĞİŞİMİN ARAŞTIRILMASI**

Betül KARADENİZ

Danışman

Prof. Dr. Bekir YALÇIN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Temmuz 2024

TEZ ONAY SAYFASI

Betül KARADENİZ tarafından hazırlanan “Termoplastik ve Termoset Esaslı Karbon Elyafı Lamine Kompozitlerin Mikro Delinmesinde Delme Kuvveti ve Takım Çapındaki Değişimin Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 30 / 07 / 2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Başkan

: Dr. Öğr. Üyesi Çağın BOLAT
Samsun Üniversitesi, Makine Mühendisliği

Üye

: Prof. Dr. Bekir YALÇIN
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği

Üye

: Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Makine Mühendisliği

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun

..... /..... /..... tarih ve

..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ☐ Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ☐ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ☐ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- ☐ Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ☐ Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ☐ Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

30 / 07 / 2024

Betül KARADENİZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TERMOPLASTİK VE TERMOSET ESASLI KARBON ELYAFLI LAMİNE KOMPOZİTLERİN MİKRO DELİNMESİNDE DELME KUVVETİ VE TAKIM ÇAPINDAKİ DEĞİŞİMİN ARAŞTIRILMASI

Betül KARADENİZ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Günümüzde kompozit malzemeler otomotiv, savunma ve havacılık dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, bir termoplastik (TP) olan Polieter eter keton (PEEK) ve karbon fiberlerle güçlendirilmiş bir termoset (TS) kompozit malzemenin delinebilirliği deneysel olarak araştırılmış ve elde edilen bulguları Taguchi analizi ile desteklenmiştir. Bu çalışma kapsamında, iki farklı kompozit türü dört farklı ilerleme hızı (0,5, 1, 2, 4 $\mu\text{m}/\text{dev}$) ve dört farklı kesme hızı (10, 20, 30, 40 m/dak) kullanılarak mikro delme işlemi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda TS kompozitler için hesaplanan delme kuvveti TP kompozitler için hesaplanandan yüksek bulunmuştur. Delme kuvveti üzerinde malzeme türü ile birlikte ilerleme hızı ve kesme hızının anlamlı etkisi bulunmakta, hem ilerleme hem de kesme hızındaki artışlar delme kuvvetinde azalmayı ortaya çıkarmaktadır. Delme kuvvetinde en önemli etki ilerleme hızı (%50,81) olarak ortaya çıkmış, malzeme türü (%19,65) ve kesme hızı (%17,64) bunu izlemiştir. Diğer taraftan, matkap çapındaki azalma açısından yapılan analizlerde genel olarak, TP malzemedeki TS'ye kıyasla daha yüksek matkap çapında azalma oranları gözlemlenmiştir, bu da TP'nin işlenmesinin mikro matkaba daha fazla zarar verebileceğini düşündürmektedir. Ancak kurulan regresyon modelinde malzeme türünün matkap çapındaki azalma üzerinde anlamlı etkisi olmadığı görülmüştür. TP ve TS

kompozitlerin mikro delinebilirliğindeki matkap çapındaki azalmada etkili olan faktörler ilerleme hızı ve kesme hızı olarak belirlenmiştir. İlerleme hızının matkap çapındaki azalma üzerindeki etkisi (%61,72), kesme hızının etkisinden (%24,83) daha fazla olduğu belirlenmiştir.

2024, xi + 92 sayfa

Anahtar Kelimeler: Termoplastik esaslı kompozitler, Termoset esaslı kompozitler, Mikro delme, Kesme kuvvetleri, Taguchi analizi.



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE VARIATION IN DRILLING FORCE AND TOOL DIAMETER IN MICRO DRILLING OF THERMOPLASTIC AND THERMOSET BASED CARBON FIBER LAMINATED COMPOSITES

Betül KARADENİZ

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Bekir YALÇIN

Nowadays, composite materials are widely used in various industries including automotive, defense and aerospace. In this thesis, the drillability of Polyether ether ketone (PEEK), a thermoplastic (TP), and a thermoset (TS) composite reinforced with carbon fibers was experimentally investigated and the findings were supported by Taguchi analysis. In this study, micro drilling was performed on two different composite types using four different feed rates (0.5, 1, 2, 4 $\mu\text{m}/\text{rev}$) and four different cutting speeds (10, 20, 30, 40 m/min). In the results obtained, the drilling force calculated for TS composites was higher than that calculated for TP composites. There is a significant effect of material type, feed rate and cutting speed on the drilling force, and increases in both feed rate and cutting speed result in a decrease in the drilling force. The most significant effect on drilling force was found to be feed rate (50.81%), followed by material type (19.65%) and cutting speed (17.64%). On the other hand, in the general analyses, higher drill amount reduction rates were observed in TP material compared to TS, but it suggests that TP may cause more damage to the micro drill. However, there was no significant effect on the reduction in the amount of material in the established regression model. The factors affecting the reduction in drill diameter in the micro drillability of TP and TS composites were determined as feed rate and cutting speed. It

was determined that the effect of feed rate on the reduction in drill diameter (61.72%) was greater than the effect of cutting speed (24.83%).

2024, xi + 92 pages

Keywords: Thermoplastic based composites, Thermoset based composites, Micro drilling, Shear forces, Taguchi analysis.



TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim boyunca her zaman tecrübesi ve bilgisiyle yoluma ışık tutan değerli tez danışmanım Prof. Dr. Bekir YALÇIN'a, tezimin şekillenmesinde bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ'a, Doç. Dr. Berkay ERGENE'ye, Doç. Dr. Ali ERÇETİN'e, Dr. Togahan EMERGEN'e ve tezimin her aşamasında yardımını esirgemeyen arkadaşım Sn. Ali YÜKSEL'e teşekkür ederim.

Tezim için katkı sağlayan TUSAŞ firmasına ve Sn. Yahya ÖZ'e teşekkür ederim.

Bu süreçte en büyük destekçim olan sevgili eşim Dr. Mustafa Zahid KARADENİZ'e teşekkür ederim.

Betül KARADENİZ

Afyonkarahisar 2024

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	2
2.1 Kompozit Malzemelerin Tarihçesi	2

2.2 Kompozit Malzemelerin Tanımı.....	4
2.3 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....	5
2.4 Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları.....	7
2.5 Takviye Fazına Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması.....	8
2.5.1 Elyaf (Fiber) Takviyeli Kompozitler.....	10
2.5.2 Parçacık Takviyeli Kompozitler	13
2.5.3 Lamine (Katmanlı) Kompozitler.....	13
2.5.4 Hibrit Kompozitler	14
2.6 Matris Fazına Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması	14
2.6.1 Metal Matrisli Kompozitler	15
2.6.2 Seramik Matrisli Kompozitler	16
2.6.3 Karbon-Karbon Matrisli Kompozitler	17
2.6.4 Plastik Matrisli Kompozitler.....	17
2.6.4.1 Termoplastik Matrisli Kompozitler	21
2.6.4.2 Termoset Matrisli Kompozitler	24
2.7 Plastik Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	27
2.7.1 Elle Yatırma Kalıplama Yöntemi.....	28
2.7.2 Püskürtme Yöntemi.....	29
2.7.3 İplik (Filament) Sarma Yöntemi	30
2.7.4 Vakum Torbalama Yöntemi	32
2.7.5 Vakum İnfüzyon Yöntemi	32
2.7.6 Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi.....	34
2.7.7 Pultrüzyon Yöntemi	35
2.7.8 Otoklav Yöntemi.....	37
2.7.9 Sıcak Presleme Yöntemi.....	38
2.7.10 Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi	39
2.7.11 Rulo Sarma (Roll-Wrapping) Yöntemi	40
2.7.12 Diğer Yöntemler.....	41
2.8 Delme İşlemi.....	42
2.8.1 Temel Tanımlar	43

2.8.2 Mikro Delme	49
2.8.2.1 Mikro Delme Takımları	51
2.8.2.2 Mikro Matkaplarda Takım Geometrisi	52
2.8.2.3 Mikro Matkaplarda Kırılma	53
2.8.2.4 Mikro Delme İşleminde Kesme Kuvvetinin Etkileri.....	54
2.8.2.5 Mikro Delme İşleminde Çapak Oluşumu	54
2.8.2.6 Mikro Delme İşleminde Yüzey Pürüzlülüğü	55
2.8.2.7 Mikro Delme İşleminde Takım Aşınması.....	56
3. MATERYAL ve METOT	57
4. BULGULAR	62
4.1 Delme Kuvveti.....	62
4.2 Mikro Matkap Çapında Değişim	67
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	74
6. KAYNAKLAR.....	76
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Al	Alüminyum
Al ₂ O ₃	Alüminyum oksit
C	Karbon
Co	Kobalt
Cu	Bakır
Fe	Demir
F _z	İtme kuvveti
kN	Kilonewton
Mg	Magnezyum
No	Mobiden
N	Newton
Ni	Nikel
Nm	Newtonmetre
°C	Sıcaklık birimi (Santigrat derece)
Si ₃ N ₄	Silisyum nitrür
SiC Ti	Silisyum karbür
V _c	Titanyum
V _f	Kesme hızı
µm	İlerleme oranı
Kısaltmalar	Mikrometre
BUE	Yığılma kenar
CFIP dak	Sürekli elyaf enjeksiyon prosesi
NASA	Dakika
PEEK	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
RTM	Poliariletereterketon
SEM	Reçine transfer kalıplama yöntemi
TP	Taramalı elektron mikroskobu
TS	Termoplastik
	Termoset

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa Şekil 2.1 Kompozit malzemelerin takviye elemanına göre sınıflandırılması.	9
Şekil 2.2 Kompozit malzemede elyafların yerleşimi.	10
Şekil 2.3 Liflerin doku içerisine yerleşme şekillerine göre kompozit türleri.	11
Şekil 2.4 Karbon elyaf kumaş	13
Şekil 2.5 Lamine kompozitlerde açılı tabakaların ayrı gösterimi	14
Şekil 2.6 Elle yatırma yöntemi.	28
Şekil 2.7 Püskürtme yöntemi.	30
Şekil 2.8 İplik (Flement) sarma yöntemi.	31
Şekil 2.9 Vakum torbalama yöntemi.	32
Şekil 2.10 Vakum infüzyon yöntemi.	33
Şekil 2.11 Reçine transfer kalıplama yöntemi.	35
Şekil 2.12 Puktrüzyon yöntemi.	36
Şekil 2.13 Otoklav yöntemi.	37
Şekil 2.14 Sıcak presleme yöntemi.	39
Şekil 2.15 Enjeksiyon kalıplama yöntemi.	40
Şekil 2.16 Matkap ucu geometrik detayları.	44
Şekil 2.17 Delme mekaniği.	45
Şekil 2.18 Toplam itme kuvveti bileşenleri.	47
Şekil 2.19 Matkap ucunun keski kenarı ve kesici ağızları üzerine etkiyen itme kuvvetlerinin ilerleme hızı ile değişimi.	48
Şekil 2.20 İtme kuvveti ve tork değerlerinin matkap ucunun bir tam tur dönmesiyle değişimi.	48
Şekil 2.21 İki nokta açılı bir matkap ucunun geometrik yapısı ile belirlenen itme kuvveti ve tork değişimi.	49
Şekil 2.22 10 µm çapında bir mikro matkap SEM görüntüsü.	51
Şekil 2.23 Mikro delme işleminde delme kuvveti ve çıkış talaşı karşılaştırması (a) Mikro delme işleminde ana kesme kenarlarına etki eden delme kuvveti profili, (b)düzgün çıkış çapağı, kapaklı düzgün çıkış çapağı ve taçlı çıkış	

çapağının şematik gösterimi.	56
Şekil 3.1 Deney sürecinin işleyişi.....	59
Şekil 4.1 Delme işlemine ilişkin örnek SEM görüntüleri. a) TP için 1 numaralı deney, b) TS için 3 numaralı deney	63
Şekil 4.2 Deney setleri için delme kuvveti grafiği	64
Şekil 4.3 Delme kuvveti için ana etki grafiği ve delme parametrelerinin S/N oranı grafiği (a) Ana etkiler grafiği (b) parametrelerin delme kuvvetine etkisinin S/N oranı grafiği	65
Şekil 4.4 Delme kuvvetinin normal olasılık çizimi	68
Şekil 4.5 Delme kuvvetinin 3 boyutlu dağılım grafiği	69
Şekil 4.6 Deney setleri için matkap çapında azalmanın % değişim grafiği	70
Şekil 4.7 Matkap çapında azalma için ana etki grafiği ve delme parametrelerinin S/N oranı grafiği (a) Ana etkiler grafiği (b) parametrelerin delme kuvvetine etkisinin S/N oranı grafiği	71
Şekil 4.8 Matkap çapında azalma % değişimin normal olasılık grafiği	73
Şekil 4.9 Matkap çapında azalma %değişimin 3 boyutlu dağılım grafiği	73
Şekil 4.10 TP malzemelerde kullanılan matkap uçları için SEM görüntüleri	74
Şekil 4.11 TS malzemelerde kullanılan matkap uçları için SEM görüntüleri	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Bazı malzemelerin mekanik değerleri	21
Çizelge 2.2 Termoset matrisli kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri.....	26
Çizelge 3.1 Taguchi L16 deney düzeneği ve sonuçları	62
Çizelge 4.1 Delme kuvvetinin genel doğrusal model analizi için model özeti	66
Çizelge 4.2 Delme kuvvetinin genel lineer model analizi için varyans analizi	67
Çizelge 4.3 Delme kuvvetinin karma etki modeli analizi için model özeti	67
Çizelge 4.4 Delme kuvvetinin karma etki modeli analizi için varyans bileşenleri	67
Çizelge 4.5 Delme kuvvetinin faktöriyel tasarım modeli analizi için model özeti	68
Çizelge 4.6 Matkap çapında azalma % değişimin genel lineer model analizi için model	

özet	72
Çizelge 4.7 Matkap çapında azalma % değişimin genel lineer model analizi için varyans analizi	72
Çizelge 4.8 Matkap çapında azalma % değişimin karma etki model analizi için varyans analizi	72



1. GİRİŞ

Günümüzde kompozit malzemeler otomotiv, savunma, biyomedikal ve havacılık dahil olmak üzere çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Aslında, yüksek özgül mukavemet, kırılma tokluğu ve aşındırıcı ortamlara karşı direnç gibi benzersiz özellikleri nedeniyle bir uçağın %50'sine kadarını kaplamaktadırlar (Slayton ve Spinardi 2016). Termoplastik malzemeler, yüksek çalışma sıcaklıklarındaki kayda değer performanslarıyla bağlantılı olarak, polimer bazlı kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak büyük bir potansiyele sahiptir. Bu bağlamda, geri dönüştürülebilirlikleri, iyileştirilmiş kürlenme özellikleri ve yüksek toklukları nedeniyle termoplastikler geleneksel termosetlerin yerini almaya başlamıştır (Ahmad vd. 2019).

Termoplastik ve termoset malzemeler karşılaştırıldığında, termoplastiklerin moleküler zincir yapıları nedeniyle daha kolay eritilebildikleri söylenebilir. Ayrıca, termoplastikler termosetlere göre daha sünek davranış ve daha düşük ısı iletkenliği sergilerler. Bu nedenle, termoplastiklerin işlenebilirliğinin termosetlere göre daha düşük olduğu sonucuna varılabilir. Bu keşif doğrultusunda, termoplastik kompozitlerin işlenmesi uzun ve sürekli talaşların oluşmasına neden olurken, termosetlerin işlenmesi nispeten kısa ve süresiz talaşlar üretir (Hocheng ve Puw 1992). Özellikle, PEEK malzemesine karbon fiber takviyesi ile kombine kompozit malzeme gelişmiş mekanik özellikler sergilemekte ve bu kompozitler çoğunlukla üst düzey tıbbi implantların üretiminde kullanılmaktadır (Mata vd. 2009). Karbon elyaf takviyeli PEEK perçinlerin endüstriyel fonksiyonel uygulamalarda yığın malzeme olarak kullanılmasının yanı sıra metalik bazlı bağlantı elemanları yerine bağlantı elemanı olarak kullanılmasına yönelik araştırmalar devam etmektedir (Absi vd. 2022). Ayrıca, mikro delik delme ve kanal açma gibi işlemlerin montaja hazır kompozit parçaların üretimi için çok önemli olduğu bilinmektedir (Bajpai ve Singh 2013).

Literatür çalışmaları incelendiğinde, karbon elyaf takviyeli polimerlerin mikro delinmesine odaklanan sınırlı sayıda çalışma olduğu görülmektedir. Örneğin, Shunmugesh ve Pratheesh (Shunmugesh ve Pratheesh 2020), iş mili hızı, ilerleme hızı ve matkap çapı gibi delme parametrelerinin karbon fiber takviyeli plastiklerin mikro

delinebilirliği üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bir başka çalışmada Basso vd. (2019), itme kuvveti ve hasar oluşumunu erek karbon fiber takviyeli polimer kompozitte doğrudan, destekli ve pilon gibi delme stratejilerinin mikro delik kalitesi üzerindeki etkileri üzerinde çalışmıştır. Bu çalışmaya paralel olarak Rahamathullah ve Shunmugam (2011) da cam elyaf takviyeli polimerde mikro delme stratejileri hakkında bir çalışma gerçekleştirmiştir. Ayrıca, Geier vd. (2023) cam ve karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerin mekanik mikro delinmesine odaklanmış ve mikro delmenin arkasındaki mekanizmadan derinlemesine bahsetmiştir. Ayrıca, Shunmugesh ve Panneerselvam (2011) karbon fiber takviyeli polimer kompozitlerin mikro delinmesinde proses parametrelerinin Taguchi ve Gri İlişkisel Analiz ile optimizasyonu üzerine gösterdikleri performans sonucunda ilerleme hızı ve iş mili hızı kombinasyonunun çoklu tepki özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini bildirmiştir. Ayrıca, Sen vd. (2024) yaptıkları mikro delme çalışmasında karbon kompozit ve karbon aramid (hibrit) kompozitin delik kalitesi sonuçlarını karşılaştırmış ve karbon kompozit için hibrit kompozitten daha iyi delik kalitesi sonuçları elde edildiğini açıklamışlardır. Ayrıca, Anand ve Patra (2018) kompozit parçaların mikro delinmesinde radyal ve itme kuvvetlerinin takım kenar yarıçapından etkilendiğini ortaya koymuştur. Son olarak, Sazlı vd. (2023) karbon fiber takviyeli polimer panellerde mikro delme parametrelerinin matkap çapında azalma üzerindeki etkileri hakkında çalışmıştır.

Literatürde incelenen diğer çalışmalardan farklı olarak, bu deneysel çalışma sadece ilerleme hızı ve kesme hızının etkilerini belirlemeyi amaçlamakla kalmamakta, aynı zamanda matris tipinin delici takım çapı değişimi üzerindeki etkisini de ele almaktadır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Kompozit Malzemelerin Tarihçesi

Kompozitlerin gelişimi, modern endüstriyel çağdan önce gelen ve kompozitlerin ilk formlarının kullanıldığı eski uygarlıklara kadar uzanan zengin bir geçmişe sahiptir. Kompozit malzemeler, tamamen modern bir yenilik olarak ağdaş görüşün aksine,

kökenleri insanlık tarihinin derinliklerine dayanmaktadır. Göçebe kabilelerin barınaklarında yapısal bütünlük ve dayanıklılık sağlamak için çamura saman eklendiği kerpiç üretiminde görüldüğü gibi, dayanıklılığı artırmak için kırılğan matrislerin bitkisel veya hayvansal kökenli liflerle birleştirilmesi yaygın bir uygulamaydı (Friesem ve Shahack 2011). Bu ilkel ancak etkili teknoloji, kompozit malzemelerin kullanımının başlangıcını vurgulamakta ve insanoğlunun teknolojik ilerlemesindeki uzun süreli rolünü göstermektedir.

Kompozitlerin evrimsel yörüngesi 20. yüzyılın başlarında, özellikle de sentetik elyafların ortaya çıkışıyla birlikte önemli bir sıçrama kaydetmiştir. İlk olarak 1930'larda Owens Corning'de bir mühendis tarafından keşfedilen cam elyafların gelişimi, modern kompozitler olarak bilinecek olanın başlangıcını işaret etmiştir (Agarwal vd. 1990). Bu malzemeler kısa sürede çeşitli sektörlerde, özellikle de mukavemet, hafiflik ve radyo frekansı şeffaflığının çok önemli olduğu askeri ve havacılık sektörlerinde uygulama alanı bulmuştur. Örneğin, 20. yüzyılın ortalarında savaşın çalkantılı dönemlerinde fiberglas, radar kulelerinin üretiminde çok önemli hale gelmiş ve hatta deneysel kompozit gövdeli arabalar test edilmiştir (El-Ghaoui vd. 2019).

Teknolojik yenilikler, 1938'de epoksi gibi yüksek performanslı reçinelerin piyasaya sürülmesiyle devam etmiş ve 1936'da polyester matrislerin keşfedilmesiyle birlikte kompozit malzeme endüstrisinde devrim yaratmıştır (Simpson 1953, May 1988). Bu malzemeler, öncekilere kıyasla daha fazla mukavemet ve sertleşme kolaylığı sağlayarak, gelişmekte olan havacılık ve uzay endüstrisi için özellikle cazip hale gelmiştir. Douglas ve Owens Corning Fiberglas gibi şirketler arasındaki işbirliği çabaları, kompozitlerin ileri teknolojik uygulamalardaki rolünü daha da sağlamlaştıran fenolik matris ve cam elyaf takviyeli kalıpların başarılı bir şekilde entegrasyonunu sağlamıştır (Keimel 2003, Kandelbauer vd. 2022).

Tarih boyunca, kompozit malzemelerin savaşta stratejik kullanımı, hayvan tendonlarıyla güçlendirilmiş Moğol yaylarından, zırh ve kalkan yapmak için ağaç reçinesi ile birleştirilmiş kenevir lifleri kullanan Spartalılar ve Emevilere kadar belirgin olmuştur. Kompozit malzeme kullanımının bu tarihsel sürekliliği, hem antik hem de modern

teknolojik ilerlemelerdeki önemli rollerinin altını çizmektedir. Ayrıca, 1920'lerin başında sentetik plastiklerdeki ilerleme ve ardından 1930'larda fiberglas ile takviye edilmeleri, geleneksel malzemelerin yerine getiremediği yapısal işlevleri sağlayan malzemelere olan ihtiyacı vurgulamış ve böylece günümüzde görülen geniş uygulama yelpazesine zemin hazırlamıştır (Elias 2003).

Özetle, kompozit malzemelerin eski yapılardan sofistike modern uygulamalara uzanan tarihsel ve teknolojik evrimi, malzeme biliminde derin bir geçişi kapsamaktadır. Bu geçiş sadece insanlığın yenilikçi ruhunu değil, aynı zamanda kompozitlerin potansiyelinin çeşitli çağlarda ve endüstrilerde pratik olarak gerçekleştirilmesini de yansıtmaktadır. Bu malzemelerin devam eden gelişimi ve uygulamaları, sadece geçmişin eserleri olarak değil, gelecekteki ilerlemelerin önemli unsurları olarak tanımlanmalarını doğrulamaktadır.

2.2 Kompozit Malzemelerin Tanımı

Mühendislik malzemelerinin gelişmiş bir formu olan kompozit malzemeler, her biri benzersiz kimyasal özelliklere sahip iki veya daha fazla farklı bileşenin kombinasyonu yoluyla üretilmektedir. Bu malzemelerin özü, tek başına herhangi bir bileşen tarafından elde edilemeyen bir dizi özelliği somutlaştırma kapasitelerinde yatmaktadır. Bu birleştirme sadece her bir bileşenin bireysel eksikliklerini telafi etmekle kalmamakta, aynı zamanda mekanik mukavemet, korozyon direnci, termal stabilite ve estetik çekicilik gibi genel malzeme özelliklerini de geliştirmektedir (Kalemtaş 2014, Kaya 2016).

Kompozit malzemelerin arkasındaki mimari ilke, bir matris ve bir takviye maddesinin entegrasyonunu içermektedir. Metal, seramik veya plastik bazlı olabilen matris, sürekli faz görevi görürken, tipik olarak çelik, naylon, lifler veya partikül madde gibi malzemelerden yapılan takviye, gerekli mukavemet ve sertliği sağlamaktadır. Bu takviye, kompozite belirli endüstriyel uygulamalar için gerekli olan gelişmiş dayanıklılık ve esneklik gibi benzersiz fiziksel özellikler kazandırdığı için çok önemlidir (Işık 2008, Kaya 2016).

Üretim açısından, kompozit malzemeler oluşturmak için kullanılan metodolojiler, işlem sırasında matrisin fiziksel durumuna göre kategorize edilmektedir. Bu yöntemler genel olarak, her biri nihai ürünün istenen özelliklerine göre seçilen sıvı, katı ve katı-sıvı hal süreçlerine ayrılmaktadır (Nas vd. 2013). Üretimdeki bu çok yönlülük, kompozitlerin uyarlanabilirliğinin altını çizmekte ve farklı sektörlerde geniş bir yelpazedeki işlevsel gereksinimleri karşılamalarına olanak tanımaktadır.

Malzeme bilimi alanında devam eden araştırmalar ağırlıklı olarak kompozitlerin dayanıklılığını ve performansını iyileştirmeye odaklanmaktadır. Bu arayış, sadece uygun maliyetli değil aynı zamanda hafiflik, elektrik iletkenliği ve çevresel bozulmaya karşı direnç gibi üstün özellikler sergileyen malzemeler arayan endüstrilerin sürekli gelişen talepleri tarafından yönlendirilmektedir (Solmaz ve Gür 2007). Bu nedenle kompozit malzemelerin geliştirilmesi, uygulamalarını genişletmeyi ve pratik kullanımdaki verimliliklerini artırmayı amaçlayan sürekli yeniliklerle birlikte kritik bir çalışma alanıdır.

2.3 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Yüksek mukavemet ve düşük yoğunluğun benzersiz karışımıyla karakterize edilen kompozit malzemeler, küresel pazarda sağlam bir büyüme yörüngesini yansıtarak çeşitli endüstrilerde giderek daha önemli hale gelmektedir. Son araştırmalara göre, havacılık, otomotiv ve inşaat gibi sektörler bu genişlemeyi desteklemekte ve tahminler önümüzdeki on yıl içinde pazar büyüklüğünün potansiyel olarak iki katına çıkacağını göstermektedir (Krauklis ve Jorgensen 2021, Zhang vd. 2023). Kompozitlerin uyarlanabilirliği ve üstün özellikleri, onları yapısal bileşenlerden estetik iyileştirmelere kadar bir dizi uygulama için ideal hale getirmekte ve böylece yaygın olarak benimsenmelerini sağlamaktadır.

Havacılık ve uzay alanında, kompozit malzeme kullanımının evrimi özellikle dikkat çekicidir. 1970'lerin başında Concorde döneminde, kompozitler malzeme bileşiminin sadece %8'ini oluşturuyordu. Buna karşılık, Boeing 787 ve Airbus A350 gibi modern uçaklar ağırlıklı olarak bu malzemelerden inşa edilmekte ve önemli teknolojik ilerlemelerin altını çizmektedir. Kompozitlerin hafiflik ve dayanıklılık gibi özellikleri

sadece ticari havacılık için avantajlı olmakla kalmayıp, aynı zamanda performans ve yakıt verimliliği için ağırlık azaltmanın çok önemli olduğu uzay araçları ve roketler için de kritik öneme sahiptir. Ayrıca, kompozitlerin kullanımı, dayanıklılık ve çevresel baskılara karşı direncin çok önemli olduğu uçaklar, helikopterler ve insansız hava araçları gibi askeri donanımlara kadar uzanmaktadır (Mouritz 2012, Eryıldız ve Eker 2015, Castanie 2016).

Savunma sanayii de kompozit malzemelerin benzersiz özelliklerinden yoğun bir şekilde yararlanmaktadır. Vücut zırhı, kask ve kokpit panelleri gibi ürünler, aramid ve S2 cam gibi takviye malzemelerinin sağladığı kompozitlerin yüksek darbe dayanımı ve hafiflik özelliklerinden faydalanmaktadır. Bu malzemeler, askeri ve kolluk kuvvetlerinin güvenliği için kritik öneme sahip olan balistik darbelere karşı gelişmiş koruma sağlayarak enerjiyi emme ve dağıtma yetenekleri nedeniyle seçilmektedir (Benzait ve Trabzon 2018, Czech vd. 2021).

İnşaat alanında kompozitler hem estetik hem de yapısal uygulamalarda devrim yaratmaktadır. Mükemmel mukavemet-ağırlık oranları ve korozyon dirençleri nedeniyle yaya köprülerinin, gergi profillerinin ve diğer yük taşıyıcı elemanların imalatında giderek daha fazla kullanılmaktadırlar. Bu da onları özellikle hava koşullarına ve fiziksel aşınmaya eğilimli ortamlar için uygun hale getirmektedir. Ayrıca kompozit malzemeler, kompozitlerin dayanıklılığından ve bakım gerektirmeyen uzun ömürlülüğünden yararlanan borular, kapaklar ve rögar kapakları gibi altyapı bileşenlerinin üretiminde kullanılmaktadır (Nguyen vd. 2020).

Otomotiv sektörü de daha hafif ve daha verimli araçlara yönelik süregelen talebin etkisiyle kompozitleri benimsemiştir. Kompozitler, 1950'lerin başında ilk ticari araçların üretiminden günümüzün yüksek performanslı Formula 1 yarışçılarına ve günlük binek araçlarına kadar, yakıt verimliliğini artırmak, menzili artırmak ve yük taşıma kapasitesini artırmak için ağırlığı azaltmanın ayrılmaz bir parçası olmuştur. Kompozitlerin otobüs, kamyon ve tarım makineleri gibi ağır vasıtalarda kullanımı, sürdürülebilirlik ve enerji verimliliğine yönelik küresel eğilimlerle uyumlu olarak modern taşımacılıktaki rollerinin altını çizmektedir (Onsen 2010).

Bu sektörlerin her biri, kompozit malzemelerin çağdaş teknoloji ve endüstrideki dönüştürücü etkisini göstermekte, artan önemlerinin ve geliştirme ve uygulamalarında devam eden yeniliklerin altını çizmektedir.

2.4 Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

Kompozit malzemeler çok sayıda fayda sunarken, malzeme biliminin doğasında var olan ödünleşimleri yansıtarak uygulama ve üretimlerinde bazı zorluklar da ortaya çıkarmaktadır. Kompozit malzemelerin başlıca avantajlarından biri hafif olmalarıdır; bu da özellikle havacılık ve otomotiv üretimi gibi yapıların ağırlığının azaltılmasının yakıt verimliliği ve performansın artırılmasıyla doğrudan ilişkili olduğu sektörlerde avantaj sağlamaktadır. Dahası, kompozitler çelik gibi geleneksel malzemelerle kıyaslanabilecek, hatta onları aşan, ancak bununla ilişkili ağırlık cezası olmaksızın dikkate değer bir dayanıklılık sergilemektedir. Bu özellik sadece uzun ömürlülüğü teşvik etmekle kalmaz, aynı zamanda sık sık değiştirme ihtiyacını da azaltır, böylece ürünün yaşam döngüsü boyunca ekonomik faydalar sunmaktadır (Pruez vd. 2013, Thori vd. 2013).

Kompozit malzemelerin bir diğer önemli avantajı da korozyona karşı dirençli olmalarıdır. Elementlere maruz kaldığında oksitlenebilen veya korozyona uğrayabilen metallerin aksine, kompozitler kimyasallara ve neme maruz kalma gibi zorlu çevre koşullarına dayanabilir ve bu da onları denizcilik, otomotiv ve inşaat uygulamalarında kullanım için ideal hale getirir. Ek olarak, kompozitlerin tasarım esnekliği çok çeşitli uygulamalara olanak tanımaktadır; diğer malzemelerle elde edilmesi zor veya imkansız olan karmaşık şekillerde kalıplanabilirler, böylece tasarımcılara yenilikçi ve işlevsel tasarımlar oluşturmada benzersiz bir özgürlük sağlarlar (Ngo 2020, Cagar 2021).

Yapısal açıdan bakıldığında, kompozitler mükemmel boyutsal kararlılık sunmaktadır. Çeşitli çevresel koşullar altında formlarını korumakta, sıcaklık ve nem değişikliklerinden kaynaklanan bükülme veya deformasyona karşı direnç gösterebilmektedir. Bu özellik, uçak kanatları gibi bileşenlerin boyutsal bütünlüğünün güvenlik ve performans açısından kritik önem taşıdığı havacılık gibi uygulamalarda özellikle değerlidir. Kompozit malzemelerin uzun ömürlülüğü de önemlidir; bazı

kompozitler tipik kullanım koşulları altında 50 yıla kadar öngörülen kullanım ömrüne sahiptir ve böylece uzun vadeli uygulamalar için uygunluklarının altını çizmektedir (Ghosh vd. 2020).

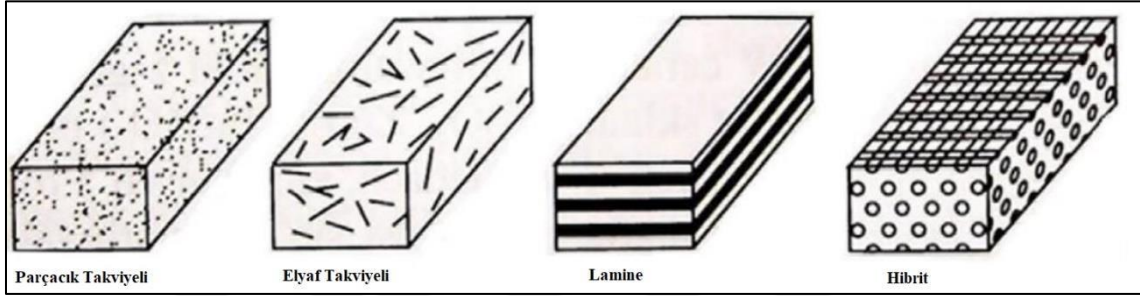
Bu sayısız avantaja rağmen, kompozit malzemelerle ilişkili kayda değer dezavantajlar da vardır. Başlıca dezavantajlardan biri yüksek üretim maliyetidir. Kompozit malzemelerin oluşturulması genellikle sofistike üretim süreçlerini ve yüksek kaliteli hammaddeleri içermektedir ve bu da başlangıç maliyetlerini önemli ölçüde artırmaktadır. Bununla birlikte, bu üretim süreçlerinin karmaşıklığı, onları emek yoğun ve zaman alıcı hale getirerek genel masrafı artırmaktadır. Bir diğer kritik konu da kompozit malzemelerdeki hasarları tespit etmenin zorluğudur. Çatlakların veya aşınmanın kolayca görülebildiği geleneksel malzemelerin aksine, kompozitlerdeki kusurlar malzemenin içinde gizlenebilir ve bakım ve denetim rutinlerini zorlaştırabilir. Ayrıca, kompozitler metallerle birlikte kullanıldığında, diferansiyel termal genleşme ek zorluklar yaratabilir. Metaller tipik olarak sıcaklık dalgalanmaları altında kompozitlerden daha fazla genişir ve büzülür, bu da iki malzeme arasındaki arayüzde gerilime yol açarak potansiyel olarak delaminasyona veya yapısal arızaya neden olabilir. Bu özellik, olası uyumsuzlukları azaltmak ve kompozit tertibatın yapısal bütünlüğünü sağlamak için dikkatli tasarım ve malzeme seçimi gerektirmektedir (Thori 2013).

Sonuç olarak, kompozit malzemeler kendilerini çeşitli sektörlerde oldukça cazip kılan bir dizi faydalı özellik sunarken, uygulamalarında zorluklar da yok değildir. Bu alanda devam eden gelişmeler, performans, maliyet ve kullanım kolaylığı arasındaki dengeyi optimize etmeye çalışan yenilikçi üretim teknikleri ve malzeme formülasyonları aracılığıyla bu dezavantajları ele almayı amaçlamaktadır.

2.5 Takviye Fazına Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması

Takviye fazları, kompozit malzemelerin mimarisinde çok önemli bir rol oynamakta ve öncelikle içine yerleştirildikleri kompozitlerin yapısal bütünlüğünü ve belirli fiziksel özelliklerini geliştirmektedir. Kompozit matris içindeki bu takviye elemanlarının birincil işlevi, mekanik yükün çoğunu taşımak ve böylece kompozitin mukavemetini, sertliğini

ve kimyasallar, sıcaklık dalgalanmaları ve aşınma gibi çevresel faktörlere karşı direncini önemli ölçüde artırmaktır. Takviye malzemelerinin etkinliği, takviye elemanı ile matris arasındaki arayüzey bağının kalitesi, takviye elyaflarının yönü ve boyutları ve matris ıslatma işleminin eksiksizliği gibi birkaç temel faktörden büyük ölçüde etkilenmektedir. Bu tür dikkatli bir yapılandırma, takviye elemanının yapısal yükün yaklaşık %90'ını destekleyebilmesini sağlamakta, böylece kompozitin dayanıklılığını ve performansını artırmaktadır (Rajak vd. 2019).

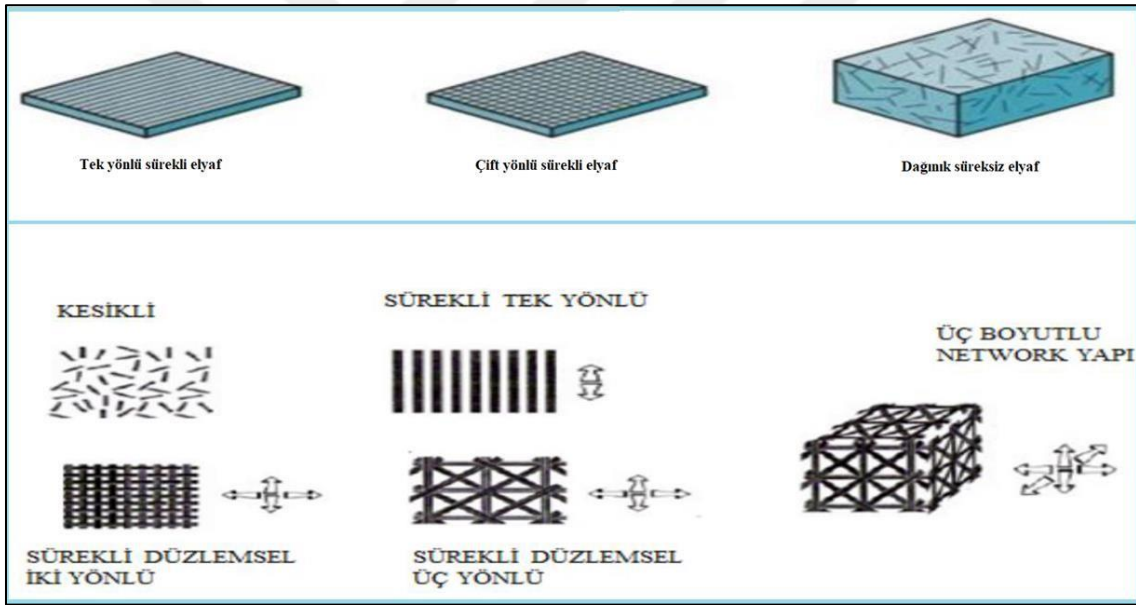


Şekil 2.1 Kompozit malzemelerin takviye elemanına göre sınıflandırılması (Musiał vd. 2023).

Kompozit malzemeler, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi, takviye elemanlarının türüne ve düzenine göre genel olarak sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma, her biri matris içindeki takviyenin geometrisi ve yerleşimi ile ayırt edilen elyaf takviyeli kompozitler, parçacık takviyeli kompozitler, lamine kompozitler ve hibrit kompozitleri içermektedir (Koruvatan 2008). Özellikle elyaf takviyeli kompozitler, düşük ağırlığı korurken yapısal sağlamlığı desteklemek için matrise sorunsuz bir şekilde entegre olan takviyenin elyaflı yapısına atfedilebilen olağanüstü güç-ağırlık oranları nedeniyle tercih edilmektedir (Balasubramanian 2014). Ek olarak, ister lifli, ister partiküllü, katmanlı veya hibrit bir karışım olsun uygun takviye türünün seçimi kompozitin amaçlandığı uygulamanın özel gereksinimlerine kritik bir şekilde bağlıdır. Bu özel yaklaşım, mühendislerin ve tasarımcıların kompozitleri çok çeşitli endüstriyel ve ticari kullanımlar için optimize etmelerine ve çeşitli işlevsel talepleri etkili bir şekilde karşılamak için çeşitli takviye malzemelerinin benzersiz özelliklerinden yararlanmalarına olanak tanımaktadır.

2.5.1 Elyaf (Fiber) Takviyeli Kompozitler

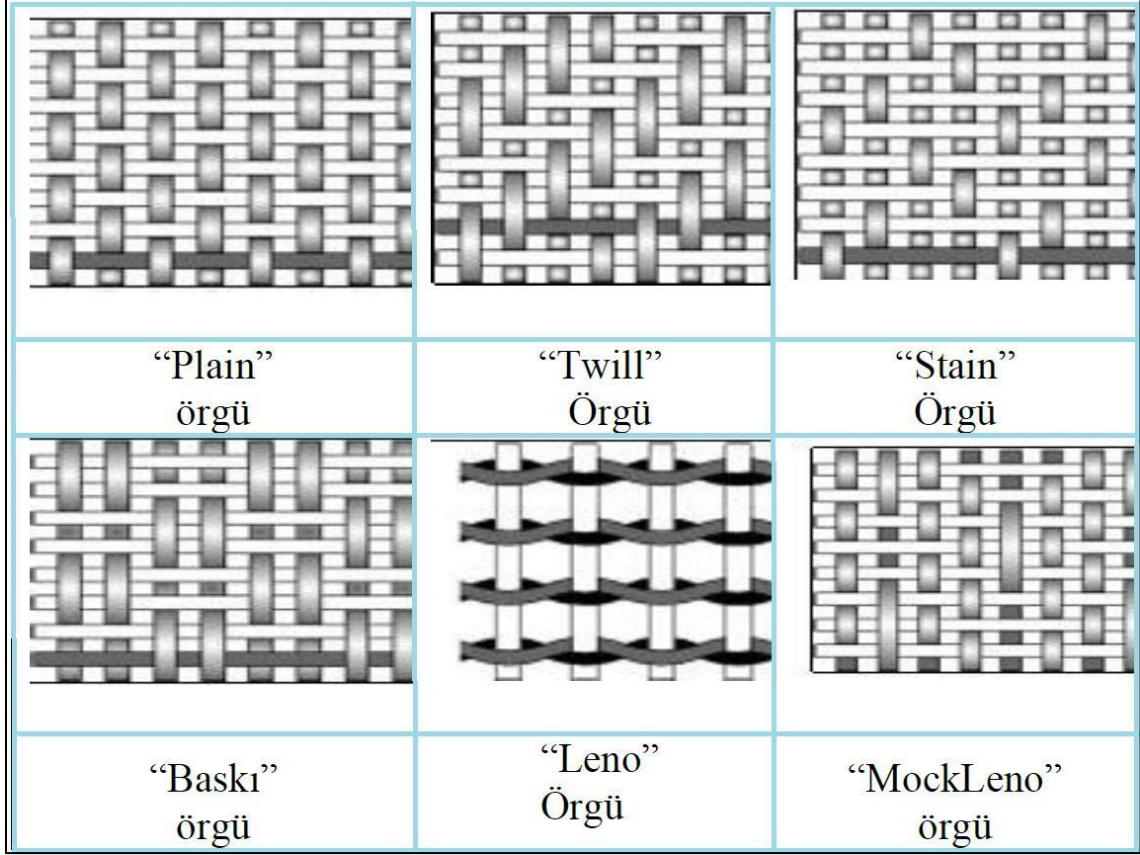
Elyaf yapılı kompozit malzemeler alanında, ince elyafların matris içine yerleştirilmesi, malzemenin genel mukavemetini ve dayanıklılığını belirlemek için çok önemlidir. Elyaf lar tek yönlü, çift yönlü veya rastgele dağılmış bir şekilde yönlendirilebilir ve her bir konfigürasyon kompozitin yönsel mukavemet özelliklerini etkiler. Özellikle, elyaflar gerilme yönünde hizalandığında, bu eksen boyunca mukavemeti önemli ölçüde artırırken, dik yönlerdeki mukavemet nispeten daha düşük kalmaktadır (Güzel 2016). Elyaf yöneliminin bu yönsel bağımlılığı, özel mekanik özellikler gerektiren uygulamalar için kritik öneme sahiptir. Ayrıca, Şekil 2.2’de kompozit matris içindeki elyaf yerleşiminin konfigürasyonu gösterilmekte ve potansiyel yapısal düzenlemelerin çeşitliliği sunulmaktadır.



Şekil 2.2 Kompozit malzemede elyafların yerleşimi (Saçak 2002, Güzel 2016).

Elyaf lar, benzersiz geometrik özellikleri ve malzeme bileşimleri nedeniyle, aynı malzemelerden yapılan eşdeğer katı yapılara kıyasla daha yüksek sertlik ve dayanıklılık sergilemektedir. Yoğunluklarına göre yüksek sertlik ve mukavemete sahip olmaları, onları takviye amaçları için ideal hale getirmektedir. Elyaf takviyeli kompozitler, kısa veya kesilmiş elyaflar içerebilir ve bu elyafların uzunluk/çap oranları mekanik davranışlarını önemli ölçüde etkilemektedir. Uzunluk/çap oranı 100’den az olarak tanımlanan kısa elyaflar, matris içinde tek yönlü veya rastgele yönlendirilmiş olma

eğilimindedir. Grafit ve karbon gibi yaygın olarak kullanılan elyaflar üstün mekanik özellikleriyle dikkat çekmektedir (Saçak 2002). Ek olarak, bu elyafların üretim yönelimleri kritiktir ve yapı içindeki elyaf yerleşimine dayalı olarak kompozit türlerini kategorize eden Şekil 2.3’te gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Liflerin doku içerisine yerleşme şekillerine göre kompozit türleri (Kara 2021).

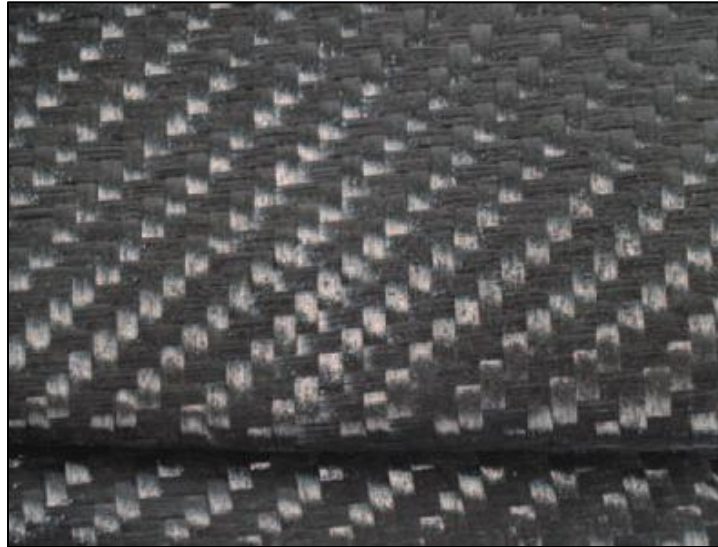
İnce teller oluşturmak için erimiş camın ince açıklıklardan çekilmesiyle üretilen cam elyaf, maliyet etkinliği ve etkileyici mukavemet/ağırlık oranı nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir takviye malzemesine örnek teşkil etmektedir. Uygulamaları, sudan kimyasal borulara ve tanklara kadar uzanan ve ıslak koşullar altında bile

dayanıklılığından yararlanan çok çeşitlidir. A, E, S ve C gibi çeşitli cam elyaf türleri, mekanik özelliklerine ve çevresel dirençlerine bağlı olarak belirli uygulamalar için uyarlanmıştır (Saylan vd. 2024).

Ticari olarak aromatik poliamidler olarak bilinen aramid elyaflar, başka bir takviye elyafı sınıfını örneklemektedir. Kevlar 29 ve Kevlar 49 gibi malzemeler, bu yöne dik olarak

daha düşük özellikler sergilemelerine rağmen, lif eksenine boyunca yüksek gerilme mukavemeti ve darbe direnci nedeniyle özellikle tercih edilmektedir. Bu elyaf lar ayrıca yüksek aşınma direnci ve düşük yoğunluk sunarak aramid elyaf takviyeli kompozitleri cam elyaf muadillerinden yaklaşık %35 daha hafif hale getirmektedir. Aramid elyaf lar, belirli kimyasal ortamlara karşı hassas olmalarına rağmen, doğal elementlere karşı direncini korumakta, bu da onları çeşitli mühendislik uygulamaları için uyarlanabilir ve tercih edilebilir hale getirmektedir (Buyrul 2022).

Karbon elyaf lar, olağanüstü özellikleri nedeniyle takviye malzemelerinde bir zirveyi temsil etmektedir. Güçlü kovalent bağlarla birbirine bağlanmış uzun karbon atomu zincirlerinden oluşan karbon elyaf lar, havacılık ve otomotiv endüstrileri gibi yüksek mukavemet ve düşük ağırlık gerektiren sektörler için temeldir. Karbon elyaf ların düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, minimum sürtünme ve önemli korozyon direnci gibi kendine has özellikleri, modern malzeme bilimindeki artan önemlerinin altını çizmektedir. Geleceğe yönelik tahminler, hafif ancak güçlü malzemelere yönelik artan talep nedeniyle karbon elyaf kullanımında 2050 yılına kadar potansiyel olarak 190 kt'ı aşan önemli bir artışa işaret etmektedir (Zhang vd. 2020). Karbon elyaf ların kompozitlerdeki çeşitli uygulamaları ve biçimleri Şekil 2.4'te örneklendirilmiş olup, çok yönlülükleri ve yaygın kullanımlarının görsel bir temsilini sunmaktadır.



Şekil 2.4 Karbon elyaf kumaş (Feraboli vd. 2012).

2.5.2 Parçacık Takviyeli Kompozitler

Parçacık takviyeli kompozitler, mikro veya makro parçacıkların matris içine yerleştirildiği ve kompozitin genel özelliklerini geliştiren özel malzemelerdir. Partiküller arasındaki ayrım öncelikle boyuta dayanır: 1 mikrondan büyük olanlar tipik olarak sadece partikül olarak adlandırılırken, daha küçük olanlar mikroskobik seviyedeki spesifik etkileşimleriyle dikkat çekmektedir. Bu partiküller, büyük ölçüde partikül boyutu, yüzey enerjileri (yapışmayı etkileyen), hacimsel oranlar ve matris boyunca partikül dağılımının homojenliği gibi faktörlere bağlı olarak kompozitin mekanik mukavemetine, sertliğine, elektrik iletkenliğine, aşınma direncine ve yüksek sıcaklık toleransına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır (Lubin 1982). Elyaf takviyeli kompozitlerin aksine, parçacık takviyeli kompozitler tamamen rastgele partikül dağılımı sergileyerek izotropik olmayan malzeme özelliklerine yol açmaktadır. Parçacıkların bu şekilde rastgele bir araya getirilmesi, üretim sürecini basitleştirmenin yanı sıra elyaf takviyeli kompozitlere kıyasla maliyetleri de düşürmektedir (Bulut 2014, Asi 2018).

2.5.3 Lamine (Katmanlı) Kompozitler

Lamine veya katmanlı kompozitler, iki boyutlu elyaf takviyeli laminat katmanlarının belirli tasarım hedeflerine göre istiflendiği ve bağlandığı çok katmanlı yapılardan oluşmaktadır. Bu kompozitler, elyafların stratejik olarak yönlendirilmesi ve katmanlandırılması sayesinde yüksek mukavemet, ısıya ve korozyona karşı direnç ve hafiflik gibi gelişmiş özelliklere sahiptir. Çekme, basınç, eğilme ve darbe dayanımı gibi mekanik özellikler, farklı katmanlar arasında elyaf yönelimini değiştirerek ve laminat yapısını uyarlayarak optimize edilmekte ve çeşitli yönlerde malzeme performansında önemli iyileştirmeler sağlanmaktadır (Hull ve Clyne 1996, Strong, 2008). Yaygın katmanlı kompozit türleri arasında düşük su geçirgenliği ve üstün mekanik ve fiziksel özellikleriyle tanınan laminer ve sandviç kompozitler yer almaktadır. Bu malzemelerin iç yapısı Şekil 2.5'te sunulmakta olup, bu şekil karmaşık katmanlama ve elyaf yerleşimini göstermektedir.



Şekil 2.5 Lamine kompozitlerde açılı tabakaların ayrı gösterimi (Li vd. 2018).

2.5.4 Hibrit Kompozitler

Hibrit kompozitler, iki veya daha fazla takviye elemanının tek bir kompozit yapı içinde birleştirildiği ve gelişmiş özelliklere sahip malzemelerin geliştirilmesini kolaylaştıran bu alanda daha ileri bir evrimi temsil etmektedir. Bu kompozitler, Kevlar'ın maliyet etkinliği ve sıkıştırma zayıflığı ile grafitin yüksek sıkıştırma mukavemeti ve daha düşük tokluğu gibi farklı elyafaların avantajlarını bir araya getirmektedir. Ortaya çıkan hibrit kompozit, tek bir elyaf türünden oluşarlardan daha üstün bir tokluk, maliyet ve mukavemet dengesi sunmaktadır (Kaya 2016, Singh ve Patnaik 2017). Karma kompozitler olarak da bilinen bu malzemeler, çeşitli kompozit malzemeleri, metalleri ve polimerleri karıştırarak hafif ve sağlam özellikleri nedeniyle hava, kara ve suda çeşitli ulaşım uygulamaları için son derece uygun hale getirmektedir (İnançer 2015).

2.6 Matris Fazına Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemelerde matris, kompozitin genel bütünlüğünü ve istenen şeklini korumak için takviye malzemelerini kapsülleyen ve yapılandıran temel faz olarak konumlanmaktadır. Bu matris fazı, kuvvetleri takviye boyunca eşit olarak dağıttığı için çok önemlidir, böylece kompozitin yapısal dayanıklılığını artırır ve formunu korumaktadır. Ayrıca matris, takviyenin mekanik aşınmadan, çevresel streslerden ve

kimyasal reaksiyonlardan korunmasında rol oynayarak elyafların veya partiküllerin korunmasını ve matrise bağlanmalarının sağlam kalmasını sağlamaktadır. Matris ve elyaflar arasındaki arayüzey bağ mukavemeti, elyafların matristen ayrılmasını önlediği, böylece yük transferini sürdürdüğü ve herhangi bir malzeme hasarının ilerlemesini yavaşlattığı için elyaf takviyeli kompozitlerde özellikle kritiktir (Imamura ve Yamaguchi 1995, Campbell 2003).

Matris, kompozit malzemenin bileşimine ve özel uygulamalarına bağlı olarak çeşitli türlere ayrılmaktadır. Tipik olarak metal matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler, karbon-karbon matrisli kompozitler ve plastik matrisli kompozitler olarak sınıflandırılan her matris türü, kompozite süneklik, sertlik ve çeşitli çevresel faktörlere karşı direnç gibi farklı özellikler kazandırmaktadır (Topuz 2021). Parçacık takviyeli kompozitlerde matris, parçacıkları birbirine bağlayarak yapısal bütünlük sağlarken, elyaf takviyeli kompozitlerde yalnızca elyafları yerinde tutmakla kalmamakta, aynı zamanda yüklerin elyaflara etkili bir şekilde aktarılmasını da kolaylaştırır. Matrisin takviye malzemesini sarma ve koruma kabiliyeti, kompozitin stres altında bozulmadan performans göstermesini ve böylece kompozitin gelişmiş yüzey kalitesini ve yapısal bütünlüğünü korumasını sağladığı için esastır (Mazumdar 2001).

2.6.1 Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler, belirli uygulamalara uygun gelişmiş özellikler elde etmek için metalleri diğer elementlerle birleştirerek malzeme biliminde önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir. Tipik olarak bu kompozitler, çeşitli formlardaki seramikler (lifler, parçacıklar, plakalar veya lifli yapılar) gibi diğer takviye elemanlarının gömülü olduğu matris görevi gören bir metal alaşımı içermektedir. Matris için metal seçimi genellikle alüminyum (Al), titanyum (Ti), magnezyum (Mg), bakır (Cu), demir (Fe), kobalt (Co), molibden (Mo) ve nikel (Ni) gibi yüksek mukavemetli seçenekleri içermektedir. Al ve alaşımları, düşük yoğunlukları, uygun maliyetleri, kolay bulunabilirlikleri ve sağlam mekanik özellikleri nedeniyle özellikle tercih edilmektedir. Kullanım açısından alüminyumun ardından Ti, Cu ve Mg alaşımları gelmektedir (Deniz 2005, Haghshenas 2016, Topuz 2021).

Bu metal matrisli kompozitlerin temel özellikleri, özellikle zorlu endüstriyel ortamlarda pratik uygulamalarına önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Yüksek mukavemet ve önemli bir elastikiyet modülü ile birlikte düşük yoğunluk ile karakterize edilirler. Bu kompozitler ayrıca mükemmel tokluk ve darbe dayanımı, yüzey çatlaklarına karşı düşük hassasiyetle yüksek yüzey sertliği ve sıcaklık değişimlerine veya termal şoklara karşı sağlam bir tolerans sergiler. Ek olarak, kayda değer elektriksel ve termal iletkenlik gösterirler. Bu özellikler göz önüne alındığında, alüminyum matrisli kompozitler, mukavemet, dayanıklılık ve ağırlık azaltmanın çok önemli olduğu otomotiv ve havacılık endüstrilerinde geniş kullanım alanı bulmaktadır. Magnezyum matrisli kompozitler son derece düşük yoğunlukları nedeniyle uzay endüstrisi için özel olarak tasarlanırken, titanyum alaşımları yüksek sıcaklık dayanımları ve mükemmel korozyon dirençleri sayesinde füze ve uçak yapılarında vazgeçilmezdir (Haghshenas, 2016). Malzemelerin bu şekilde kaynaşması, özellikle hafiflik ve dayanıklılık dengesinin kritik olduğu alanlarda metal matrisli kompozitlerin ayrılmaz bir bütün olmasını sağlamaktadır.

2.6.2 Seramik Matrisli Kompozitler

Bu kompozitler, kaya dış yapılarında yaygın olarak bulunan kil ve kaolin gibi malzemelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesiyle üretilen seramiklerden elde edilmektedir.

Silisyum nitrür (Si_3N_4), silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve çeşitli seramik elyaflar gibi popüler türleri içermektedir. Seramik matrisli kompozitlerin üretim süreci tipik olarak homojen bir matrisle sonuçlanan tek adımlı bir yöntemi içermektedir. Düşük süneklik ve tokluk dirençlerine rağmen, ileri teknoloji kullanımı bu seramiklerin güçlü iyonik ve kovalent bağlar yoluyla metallerin yanı sıra metal olmayan elementlerle de bağlanmasına olanak tanımaktadır. Bu bağlanma, sert ve dayanıklı bir yapıyla sonuçlanarak malzemenin zorlu ortamlarda kullanılabilirliğini artırır. Seramik matrisli kompozitlerin üç ana formu vardır: sürekli elyaflarla güçlendirilmiş olanlar, süreksiz elyaflarla güçlendirilmiş olanlar ve partiküllü kompozitler, her biri belirli endüstriyel uygulamalar için benzersiz faydalar sunar (Deniz 2005, Topuz 2021).

Bu kompozitler, üstün termal ve kimyasal direncin yanı sıra düşük yoğunlukları ve yüksek erime noktaları ile karakterize edilmektedir. Ayrıca, doğaları gereği kırılgan olmalarına

rağmen sertlikleri, dayanıklılıkları ve kaymaya karşı dirençleri ile tanınmaktadır. Bu kompozitlerin sağlam yapısı, termal ve kimyasal kararlılıklarıyla birleştğinde, onları gaz türbinleri, yapısal yeniden giriş için termal koruma sistemleri gibi bileşenlerde kullanıldıkları havacılık, fren rotorları için otomotiv, füzyon reaktörlerindeki ısı eşanjörleri ve duvarlar gibi uygulamalar için enerji gibi sektörlerde yüksek performanslı uygulamalar için ideal hale getirmektedir (Razzell vd. 2016).

2.6.3 Karbon-Karbon Matrisli Kompozitler

Karbon-karbon matrisli kompozitler hem takviye hem de matris bileşenlerinin karbondan yapıldığı önemli bir mühendislik malzemesi kategorisini temsil etmektedir. Bu kompozitler, onları yüksek performanslı mühendislik uygulamalarında özellikle değerli kılan bir dizi mekanik ve termal özellik ile ayırt edilmektedir. Bu malzemelerin temel özellikleri arasında yüksek gerilme mukavemeti ve modülü, kayma ve yayılmaya karşı direnç ve olağanüstü kırılma mukavemeti yer alır. Ayrıca, doğal oksitleme özelliklerinin yanı sıra yüksek termal iletkenlikle eşleştirilmiş düşük bir termal genleşme katsayısı sergilemektedirler (Razzell vd. 2016, Topuz 2021).

Bu özellikleri nedeniyle, karbon-karbon matrisli kompozitler, aşırı koşullara dayanabilen malzemeler gerektiren sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamalar, roket motorlarındaki sürtünme malzemelerinden uzay araştırmaları, uçak yapımı ve yüksek performanslı otomobillerdeki bileşenlere kadar uzanmaktadır. Yüksek sıcaklıklı ortamlara uygunlukları da onları sıcak damgalama kalıpları gibi üretim süreçlerinde kullanım için ideal hale getirmektedir. Bununla birlikte, bu kompozitlerin nispeten pahalı olduğunu ve bu durumun kullanımlarını benzersiz özelliklerinin vazgeçilmez faydalar sağladığı uygulamalarla sınırlayabileceğini unutmamak önemlidir (Razzell vd. 2016, Topuz 2021).

2.6.4 Plastik Matrisli Kompozitler

Esas olarak organik polimerlerden oluşan plastikler, makromoleküler yapılarıyla karakterize edilen sentetik malzemelerdir. Bu makromoleküller esasen karbon (C),

hidrojen (H), nitrojen (N), oksijen (O), silikon (Si), sülfür (S), klor (Cl) ve flor (F) gibi elementlerden türetilen ve monomer olarak bilinen tekrarlanan birimlerin büyük zincirleridir. Bu polimerleri oluşturma süreci, monomerlerin geniş zincirler oluşturmak üzere bağlandığı polimerizasyon olarak bilinen kimyasal reaksiyonu içermektedir. Bu karakteristik zincir şeklindeki yapı, plastiklerin temel çerçevesini oluşturur ve onlara benzersiz ve çeşitli özelliklerini kazandırır (Rudin 1999).

Plastikler, malzeme grupları arasında nispeten yeni olmalarına rağmen, büyük ölçüde çok yönlülükleri ve ekonomik faydaları nedeniyle günlük hayatta hızla her yerde bulunur hale gelmiştir. Plastiklerin özellikleri geniş bir spektrumu kapsamakta ve katkı maddelerinin kullanımı yoluyla kapsamlı özelleştirmeye izin vermektedir. Tipik olarak, plastikler düşük özgül ağırlıklarıyla dikkat çekmektedir. Çok çeşitli mekanik özellikler sergilerler ve şekillendirilmeleri ve işlenmeleri oldukça kolaydır. Ayrıca, plastikler genellikle ısı ve elektriği zayıf iletirler, şeffaflık seçenekleri sunarlar ve korozyona ve kimyasallara karşı dirençlidirler. Yeniden kullanım için yeniden işlenebilme yetenekleri ve düşük üretim maliyetleri, çeşitli endüstrilerde yaygın kullanımlarına ve popülerliklerine daha da katkıda bulunmaktadır (Crawford 2002).

Plastikler, çok yönlü ve şekillendirilebilir yapıları nedeniyle, onları günlük eşyalardan endüstriyel bileşenlere kadar çeşitli uygulamalar için uygun kılan çeşitli özellikler sergilemektedir. Plastiklerin doğal özellikleri görünümleriyle başlar; tipik olarak renksiz olan plastikler, istenen estetik sonuçları elde etmek için genellikle renklendirici maddelerin eklenmesini gerektirir. Bu maddeler, opaklık için pigmentleri ve şeffaflık için organik boyaları içerir ve özel ihtiyaçlara göre özelleştirmeye izin verir (Herman 2004, Dodiuk 2021). Plastikler genellikle cam, seramik ve metaller gibi daha sert malzemelere kıyasla çizilmeye karşı daha düşük direnç gösterdiğinden, yüzey sertliği bir diğer önemli husustur. Plastiklerin yoğunluğu da, özellikle hafif malzemelerin çok önemli olduğu endüstrilerde, uygulamalarında önemli bir rol oynamaktadır. Tipik olarak yoğunluğu 0,8 ila 2,5 g/cm³ arasında değişen plastikler, daha geleneksel malzemelere göre önemli bir ağırlık avantajı sunar (Rudin 1999).

Plastiklerin termal özellikleri, uygulama ve performans açısından özellikle önemlidir. Plastikler geniş bir sıcaklık aralığında yumuşama eğilimindedir ve termal iletkenlikleri oldukça düşüktür, bu da sürtünme veya tekrarlayan stres nedeniyle oluşan ısının termal yorgunluğa yol açabileceği anlamına gelmektedir. Bununla mücadele etmek için, metal tozları veya fiberler gibi katkı maddeleri termal iletkenliği arttırmak için dahil edilir, böylece malzemenin ısı yayma yetenekleri geliştirilir. Plastikler genel olarak termoplastikler ve termosetler olarak kategorize edilir ve her tür ısıya karşı farklı tepkiler gösterir. Termoplastikler 65-120°C arasında değişen sıcaklıklarda yüksüz olarak bozulabilirken, genellikle daha sert ve ısıya daha dayanıklı olan termosetler önemli bir bozulma olmaksızın 150-230°C arasındaki sıcaklıklara sürekli maruz kalmaya dayanabilir (Crawford 2002).

Kimyasal olarak plastikler, metallere kıyasla birçok ortama karşı üstün direnç gösterirler. Örneğin, termoplastikler zayıf asitlerden, alkalilerden ve tuzlardan büyük ölçüde etkilenmezler, bu da polietilen ve polipropilen gibi malzemeleri kimyasal depolama kaplarının yapımı için ideal hale getirir. Bununla birlikte, organik çözücülerden ve şişmeye veya çözünmeye neden olabilecek güçlü asitlerden veya alkalilerden kaynaklanan hasara karşı hassastırlar. Bir plastiğin kimyasal direnci sadece ortamın kimyasal yapısına değil aynı zamanda polimer yapısı, sıcaklık ve mekanik stres gibi faktörlere de bağlıdır. Özellikle, stres ve kimyasal ortam arasındaki etkileşim mikro çatlaklara neden olarak daha fazla bozulmayı kolaylaştırabilir (Herman 2004, Dodiuk 2021).

Bu özelliklere ek olarak plastikler, mekanik ve elektriksel özelliklerini değiştirebilen ve genellikle performansta düşüşe yol açan çeşitli derecelerde su emilimi sergilemektedir. Bu husus, dayanıklılık ve güvenilirliğin kilit önem taşıdığı uygulamalarda çok önemlidir. Plastiklerin solvent direnci bir diğer kritik faktördür; bir solventin plastiğe nüfuz etme ve onu çözme kabiliyeti plastiğin moleküller arası bağlarının gücüne bağlıdır. Elektriksel özelliklerle ilgili olarak, plastikler yapılarında serbest hareket eden elektronların veya iyonların bulunmaması nedeniyle tipik olarak zayıf iletkenlik gösterirler, bu da moleküler zincirlerindeki yüksek derecede oryantasyon ve kristallik ile birleşir (Rudin 1999).

Plastiklerin mekanik özelliklerini anlamak, bu malzemelerin gerilim altında nasıl tepki verdiğini göz önünde bulundurmayı gerektirmektedir. Gerilme testleriyle gözlemlenebilen plastiklerin gerilim altındaki davranışları, pratik uygulamaları hakkında fikir vermektedir. Örneğin, elastikiyet modülü, akma gerilmesi ve çekme mukavemeti, bir plastiğin çeşitli mekanik yükler altında nasıl performans göstereceğini belirleyen kritik parametrelerdir. Bu özellikler plastiklerin sert ya da yumuşak, güçlü ya da zayıf, kırılğan ya da sünek olarak sınıflandırılmasına yardımcı olur ve bu da farklı uygulamalar için uygunluklarını etkiler (Crawford 2002).

Plastik matrisli kompozit malzemeler, tipik olarak elyaf formundaki sert, dayanıklı takviye maddelerinin plastik bir matrise entegre edilmesiyle ustaca tasarlanmıştır. Sürekli elyafların dahil edilmesi özellikle bu kompozitlerin mukavemetini artırır ve elyaf içeriği optimum seviyeye ulaştığında etkinlikleri zirve yapmaktadır. Mukavemetteki bu artış, kompozitin diğer malzemelere göre daha üstün özelliklere sahip olmasını sağlamaktadır. Plastiklerin kompozitlerde matris malzemesi olarak kullanılması, çeşitli avantajlı özelliklerden kaynaklanmaktadır. Plastikler özellikle hafiftir, mükemmel korozyon direnci sergiler ve üretim sürecini basitleştiren düşük erime sıcaklıklarına sahiptir. Ek olarak, yüksek kaliteli yüzey kalitesi elde etme kapasiteleri, kapsamlı işleme ihtiyacı büyük ölçüde azaldığından, büyük veya karmaşık şekilli bileşenlerin metallere göre daha ekonomik bir şekilde üretilmesini sağlamaktadır. Bu özellikler, elyaf takviyeli plastik kompozitleri karmaşık parçaların daha verimli bir şekilde üretilmesi için özellikle avantajlı kılmaktadır (Herman 2004).

Plastik matrisli kompozitler ayrıca olağanüstü yalıtım özellikleri sergileyerek elektrik mühendisliğindeki çok sayıda uygulama için son derece uygun hale gelmektedir. Bu kompozitlerin bir diğer ayırt edici özelliği de metal ve seramik muadillerine kıyasla sıvılarla daha fazla etkileşime girerek otomotiv endüstrisi ve makine bileşenleri gibi sıvı teması içeren uygulamalar için daha elverişli hale gelmeleridir. Plastik matrisli kompozitlerin çeşitli endüstrilerdeki baskınlığı, bazı alüminyum alaşımları da dahil olmak üzere birçok geleneksel malzemedan önemli ölçüde daha yüksek olan özgül mukavemetleri ve esneklik modülleri ile daha da doğrulanmaktadır. Bu da onları, bu özelliklerin çok önemli olduğu havacılık ve uzay endüstrilerinde özellikle değerli kılmaktadır (Rudin 1999, Crawford 2002).

Ancak, sayısız avantajlarına rağmen, plastik matrisli kompozitlerin dezavantajları da bulunmaktadır. Genellikle diğer kompozit malzemelere kıyasla daha düşük işleme sıcaklıkları, daha yüksek bir termal genleşme katsayısı ve nem emilimi sergilerler, bu da belirli uygulamalarda bir dezavantaj olabilir. Ayrıca, bu malzemeler genellikle belirli yönlerde daha az esneklik gösterir ve bu da belirli yapısal uygulamalarda kullanımlarını sınırlayabilir. Bazı malzemelerin önde gelen mekanik değerleri Çizelge 2.1’de verilmiştir (Rudin 1999, Crawford 2002).

Çizelge 2.1 Bazı malzemelerin mekanik değerleri.

Malzeme	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Özgül çekme dayanımı (MPa)	Özgül modülü	Uzama (%)
Al	2,8	84	71	30	25	-
Al alaşımı	2,8	600	71	210	25	-
Titanyum	4,51	700	117	192	25,1	20
Alaşımsız çelik	7,86	460	210	60	27	20
Düşük alaşımlı çelik	7,8	600	207	80-250	26,5	20-30
Dökme demir	-	275	138	-	-	0,6
Pirinç/%30 Zn	8,5	550	100	60	12	-
Karbon/%60 epoksi	1,62	1400	220	865	135	0,8
Cam/%60 epoksi	1,66	1510	165	910	99	-
Cam/%50 polyester	1,9	750	38	390	19,8	1,8

Bu kompozitlerdeki matris malzemeleri genel olarak termoplastikler ve termosetler olarak sınıflandırılır ve her biri uygulama gereksinimlerine bağlı olarak farklı özellikler ve avantajlar sunmaktadır. Bu sınıflandırmalar, plastik matrisli kompozitlerin çeşitli mühendislik taleplerini karşılamadaki çok yönlülüğünü ve uyarlanabilirliğini yansıtmaktadır.

2.6.4.1 Termoplastik Matrisli Kompozitler

Termoplastik matris kompozitler, yeniden ısıtıldıklarında malzeme içindeki atomların birbirleri üzerinde kaymasını sağlayan düz zincirli polimer yapıları ile karakterize edilmektedir. Bu benzersiz moleküler davranış, termoplastik malzemelerin geri dönüştürülebilirliğini kolaylaştırır, çünkü fiziksel özellikleri değişse de herhangi bir kimyasal değişikliğe uğramadan yeniden ısıtma ve soğutma işlemiyle yeniden şekillendirilebilir ve yeniden kullanılabilirler (Sönmez 2009, Bakırcı vd. 2023). Yeniden

ısıtma işlemi, bu malzemeleri, polimerlerde dövülebilir hale geldikleri sıcaklığı belirleyen kritik bir termal eşik olan camsı geçiş sıcaklığına (T_g) ulaşmalarına bağlı olarak yumuşak hale getirmektedir (Yıldızhan 2008).

Termoplastik kompozitler, muadillerine, özellikle de termosetlere göre çeşitli avantajlar sunmaktadır. Özellikle, termoplastikler gelişmiş dayanıklılık ve direnç gösterirler ve termosetlerin aksine, üretim sonrası soğutma işlemleri gerektirmezler. Termoplastiklerden kalıplanan parçalar ısı kullanılarak birleştirilebilir ve sadece kalıplara yeniden yerleştirilerek geri dönüştürülebilir, bu da sürdürülebilirliklerinin ve üretim süreçlerinde kullanım kolaylıklarının altını çizmektedir. Ancak bu kompozitlerin dezavantajları vardır. Tipik olarak termosetlere kıyasla daha yüksek üretim sıcaklıkları gerektirirler ve doğaları gereği daha serttirler, bu da daha fazla esneklik gerektiren alanlardaki uygulamalarını sınırlayabilir (Şahin 2022).

Termoplastik polimerler alanında, moleküler yapı değişebilir, tipik olarak zincirler arasında herhangi bir çapraz bağlanma olmadan dallanmış veya doğrusal olarak sunulabilir. Bu yapısal özellik, işleme ve uygulama çok yönlülüğü için çok önemlidir (Vahapoğlu 2013). Polietersülfon (PES) ve Polieterimid (PEI) gibi ilk termoplastik reçineler amorf yapılar sergilemiş ve başlangıçta çeşitli uygulamalarda tercih edilmiştir. Zamanla, Polietereterketon (PEEK) ve Polifenilen Sülfür (PPS) gibi diğer plastiklerin gelişimi, çözücülere dirençli malzemelere yönelik artan taleple desteklenmiştir. Ayrıca, Poliamidimid (PAI) ve Poliimid gibi polimerler, sınırlı miktarlarda da olsa, spesifik özellik profillerinden dolayı kullanılmaktadır (Sönmez 2009). Bu malzemelerin her biri, çeşitli endüstriyel bağlamlarda seçilmeleri ve uygulanmaları için çok önemli olan erime noktaları, gerilme mukavemetleri ve izin verilen maksimum işleme sıcaklıkları gibi ayırt edici özelliklere sahiptir (Woishnis ve Ebnesajjad 2012, Kayabaş 2018).

Polietilen (PE), bir dizi faydalı özelliği ve petrolden elde edilmesi nedeniyle değer verilen baskın bir ticari polimer olarak öne çıkmaktadır. Yumuşak yüzeyi ve hafif yapısının yanı sıra uygun fiyatı, dayanıklılığı ve düşük sürtünme katsayısı ile tanınmaktadır. Bununla birlikte, iyi bir kimyasal direnç sunmasına rağmen mukavemeti nispeten düşüktür. PE, buz kapları, bardaklar ve oyuncaklar dahil olmak üzere çeşitli ürünlerde yaygın kullanım

alanı bulur ve şişirme, enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon gibi yöntemlerle işlenir. Özellikle PE, Düşük Yoğunluklu Polietilen (LDPE) ve Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE) olarak kategorize edilirken; LDPE, kristalleşmeyi engelleyen ve daha düşük paketleme derecesi nedeniyle yoğunluğu azaltan daha fazla dallanma ile karakterize edilmektedir (Callister ve Rethwisch 2013).

Bir başka çok yönlü polimer olan polipropilen (PP), mükemmel elektriksel özelliklere ve yorulma mukavemetine, kimyasal stabiliteye ve termal bozulmaya karşı dirence sahiptir ve bunların hepsi nispeten ucuzdur. Uygulamaları ambalaj filmlerinden sterilize edilebilir şişelere kadar çok çeşitlidir ve şişirme ve enjeksiyon gibi çeşitli yöntemlerle oluşturulabilir. PP'nin %40 ile %70 arasında değişebilen kristallığı, esnekliğine ve tokluğuna katkıda bulunur ve erime noktası yaklaşık 160 °C'dir, bu da onu geniş bir kullanım yelpazesi için uygun hale getirmektedir (Callister ve Rethwisch 2013).

Araştırmaları 1930'lara kadar uzanan ve üretimi 1940'larda başlayan poliamid (PA), mükemmel aşınma direnci ve tokluğu ile bilinmektedir. İyi mekanik mukavemeti ve nem emme özellikleri, onu dişli çarklar ve kablolar ve teller için kaplamalar gibi yüksek aşınma uygulamalarında kullanım için ideal hale getirmektedir. Yalıtım özelliklerine rağmen, PA yüksek voltaj ve frekans koşulları altında statik elektrik üretebilir, bu da kullanımını daha düşük frekanslı uygulamalarla sınırlamaktadır. Mekanik olarak tamamen geri dönüştürülebilir olması, sürdürülebilir üretim uygulamaları için cazibesini daha da artırmaktadır (Callister ve Rethwisch 2013).

Polietilentereftalat (PET), 1940'larda piyasaya sürülen küresel plastik üretiminde PE ve PP'nin ardından üçüncü sırada yer almaktadır. PET, üstün yırtılma ve yorulma mukavemeti, yüksek yüzey parlaklığı ve kimyasallara, yağlara, asitlere, çözücülere ve greslere karşı direnci ile ünlüdür. Yaygın uygulamalar arasında giysiler, içecek kapları ve manyetik kayıt bantları yer alır ve çeşitli endüstrilerdeki çok yönlülüğünü göstermektedir (Callister ve Rethwisch 2013).

Poliketon (PEEK), 1980'lerde üretimine başlanan yüksek performanslı plastikler arasında kategorize edilir. PEEK, olağanüstü mukavemeti, ısı direnci ve kimyasal inertliği nedeniyle özellikle uçak ve otomotiv endüstrilerinde değer görmektedir. Enjeksiyon

kalıplama ve tel kaplama gibi farklı üretim teknikleri için uygun olan peletler ve tozlar dahil olmak üzere çeşitli şekillerde işlenebilir. Üretimi zorlaştıran 340°C’lik yüksek erime noktasına rağmen, belirli katkı maddelerinin eklenmesi viskoziteyi azaltabilir ve üretimi kolaylaştırabilir (Alqurashi vd. 2021).

Poliamid-İmid (PAI), olağanüstü sürünme ve aşınma direnci, yüksek sıcaklık toleransı ve mükemmel sürtünme özellikleri ile dikkat çekmektedir. Özel sertliği ve mukavemeti, onu zorlu ortamlardaki contalar, dişliler ve rulmanlar gibi bileşenler için ideal hale getirir. PAI’nin çok yönlülüğü, kompresör valflerinden hidrolik bileşenlere kadar çeşitli yüksek performanslı parçalardaki uygulamalarına da yansımaktadır (Callister ve Rethwisch, 2013, Yıldızhan 2008).

2.6.4.2 Termoset Matrisli Kompozitler

Termoset plastikler, polimer zincirleri arasında oluşan, ısı uygulaması ile katılan ve yeniden ısıtıldığında yumuşamayan yoğun çapraz bağlı yapıları ile karakterize edilmektedir. Bu malzemeler, makromoleküller boyunca düzenli aralıklarla oluşan sağlam kovalent bağ ağları nedeniyle çözücülerde çözünmez. Isı ve basınç altında oluşturulduktan sonra, bu ağ yapısı kalıcı hale gelirken kimyasal bağlarını kırmadan malzemeyi yeniden şekillendirmeyi veya eritmeyi imkansız hale getirir. Bu özellik, termosetleri kimyasal yapıları bozulana kadar sıcaklığa karşı oldukça dirençli hale getirir. Termoset oluşturma süreci, nihai malzemeyi üretmek için tipik olarak iki farklı aşamada gerçekleşir. Başlangıçta, 500 ila 5000 arasında değişen nispeten düşük moleküler ağırlığa sahip bir ön polimer sentezlenir. Bu ön polimere, genellikle “reçine” olarak adlandırılan viskoz, sıvı bir karışım oluşturmak için boyalar gibi çeşitli katkı maddeleri eklenir, bu da “termoset reçineler” teriminin termoset polimerlerden daha yaygın olmasını sağlamaktadır. Daha sonra, kalıplama aşamasında, bu reçine kalıplara yerleştirilerek ısı uygulaması ve diğer işlemler yoluyla dayanıklı, çapraz bağlı bir yapıya dönüştürülür. Termosetler genellikle el yatırması ya da transfer kalıplama gibi teknikler kullanılarak şekillendirilerek hepsi eritilip yeniden şekillendirilemeyen telefon kutuları, bilgisayar klavyeleri, televizyon dolapları ve melamin mutfak eşyaları gibi ürünlerde kullanılır (Herman 2004).

Termoset plastikler, olağanüstü termal kararlılıkları, yüksek sertlikleri ve mükemmel boyutsal kararlılıkları nedeniyle mühendislik tasarım uygulamaları için seçilmektedir. Ayrıca yük altında sürünme ve deformasyona karşı direnç göstererek üstün elektrik ve ısı yalıtım özellikleriyle hafif ancak sağlam bir form sağlarlar. Termoset plastikleri oluşturmak için tipik olarak basınçlı kalıplama ve transfer kalıplama gibi kalıplama işlemleri kullanılır, ancak üretim maliyetlerini düşürmek için enjeksiyon kalıplamadaki gelişmeler yapılmıştır. Termosetler genellikle bileşimlerinde iki ana tip katkı maddesi içerir: sertleşme ve kalıplama sürecini kolaylaştıran olgunlaştırıcı maddeler, malzeme özelliklerini geliştiren çeşitli organik, inorganik dolgu maddeleri ve takviye malzemeleri. Termoset plastiklerin 1,34 ila 2,3 g/cm³ arasında değişen yoğunluğu genellikle diğer plastiklerin çoğundan daha yüksektir ve çekme mukavemetleri 28 ila 103 MPa arasında değişir. Bununla birlikte, bu mukavemet, malzemenin darbe mukavemetini de artıran yüksek miktarda cam elyaf takviyesinin dahil edilmesiyle 207 MPa'ya kadar önemli ölçüde artırılabilir. Termoset malzemelerin dielektrik dayanımı 5516 ila 25610 V/mm arasında değişir, bu da önemli yalıtım kapasitelerini gösterir, ancak maksimum kullanılabilir sıcaklıkları nispeten düşüktür, 77 ila 288°C arasında değişir. Termoset plastiklerin başlıca örnekleri arasında, mekanik ve fiziksel özellikleri Çizelge 2.2'de ayrıntılı olarak açıklanan fenolik, polyester ve epoksi reçineler yer almaktadır (Dodiuk 2021). Cam elyafı, kevlar elyafı, bor elyafı ve karbon elyafı gibi takviye malzemeleri, özellikleri daha da geliştirmek için çeşitli dolgu maddeleri ve katkı maddelerinin yanı sıra yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle ince çaplı elyaflardan (cam, karbon ve aramid gibi) ve güçlendirilmiş polimerlerden (epoksi, polyester ve üretan gibi) oluşan ileri teknoloji kompozitler, denizcilik uygulamaları, otomotiv ve ulaşım sektörleri ve spor ekipmanları dahil olmak üzere korozyon direnci, hafiflik ve yanmazlık gibi özelliklerin çok önemli olduğu endüstrilerde geniş kullanım alanı bulmaktadır (Herman 2004).

Çizelge 2.2 Termoset matrisli kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri.

Özellik	Epoksi	Polyester	Fenolik
Yoğunluk (gr/cm ³)	1,11	1,04-1,46	1,24-1,32
Çekme dayanımı (MPa)	70	41-90	34-62
Kopma uzaması (%)	3-6	4,2	1.5-2
Isıl iletkenlik (W/mK)	0,19	0,19	0,15
Isıl genleşme katsayısı (10 ⁶ /°C)	45-65	55-100	68

Polyester reçineler, özellikle denizcilik ve inşaat uygulamalarında tercih edilen, en yaygın kullanılan termoset reçinelerdir. Bu reçineler iki ana t re ayrılır: daha uygun maliyetli olan orto talik polyester ve geli mi  su direnci gibi üstün özellikleriyle bilinen izo talik polyester. Polyester reçinelerin polimerizasyonu, tam polimerizasyon elde etmek için katalizör ve hızlandırıcı olarak bilinen belirli maddelerin dahil edilmesini gerektirmektedir. Esasen düşük viskoziteli lineer polimerler olan doymamış polyesterler, bu katkı maddeleriyle karı tırıldıklarında çapraz ba ların oluşumu yoluyla termoset haline d n  ebilirler. Polyester reçinelerin yararları ve dezavantajları tartışılırken, hızlı sertle tikleri, övgüye değer mekanik özelliklere sahip oldukları, düşük sıcaklıklarda k rlendikleri, karışım oranları konusunda nispeten ba ı layıcı bir yapı sergiledikleri ve ekonomik olarak faydalı oldukları belirtilmektedir. Bununla birlikte, g   l  ve genellikle rahatsız edici bir koku yayma ve ısıya maruz kaldıklarında b   lme yaşama gibi dezavantajları da vardır (Dodiuk 2021).

Vinil esterler polyesterlere benzerlik gösterir, ancak elyaf ile matris arasındaki üstün bağlanma mukavemeti nedeniyle  ne çıkar ve bu da kritik bir avantajdır. Kimyasallara ve çevresel faktörlere karşı ola an  t  direnç gösterirler ve mekanik özellikler açısından polyesteri geride bırakırlar. Bununla birlikte, vinil esterler yüksek stiren içeriği, polyestere kıyasla daha yüksek maliyetler, optimum özelliklere ulaşmak için ikincil k rleme işlemlerinin gerekliliği ve k rleme işlemi sırasında önemli ölçüde b   lme gibi zorluklar da sunmaktadır (Herman 2004).

Epoksi reçineler, e  iz mekanik performans ve çevresel direnç ile termoset reçineler arasında en yüksek performans gösteren reçineler olarak ayırt edilir. Epoksi sistemleri, son derece dayanıklı, kimyasal olarak dirençli ve g   l  bir şekilde ba lanmış çapraz bağlı ürünler oluşturmak için etkileşime giren polimerlerdir. Suyu, asitlere ve alkalilere karşı oldukça dayanıklı olan epoksi reçinelerin bu özellikleri zaman içinde korunur. Epoksi reçinelerin ayırt edici özellikleri arasında düşük viskoziteleri, uygun karşı maddelerle karı tırıldıklarında termoset plastiklere dönüşüm kolaylığı ve düşük viskoziteli sertle tiricilerinin uygulanmasının basitliği yer almaktadır. Kürlenme süreci basittir ve kullanılan sertle tiricinin türüne bağlı olarak hızlandırılabilir, kürlenme sıcaklıkları 50 ila 1500  C arasında de i ir. Epoksi reçinelerin en önemli avantajlarından biri, sertleşme sırasında minimum b   lmeleridir, bu da ihmal edilebilir yan ürün salınımına neden olur

ve yüzeyler arasındaki bağın bütünlüğünü korur. Bu nedenle, yapıştırıcı özellikleri son derece güçlüdür ve genellikle uygulanan basınca veya uzun bekleme sürelerine ihtiyaç duymadan mümkün olan en iyi yapışmayı sağlar. Ayrıca, epoksi reçinelerin mekanik özellikleri, mekanik yapı içindeki gerilimi azaltan ve böylece mukavemeti artıran düşük büzülme oranları nedeniyle genellikle diğer döküm reçinelerinin özelliklerini aşar. Ek olarak, epoksi reçineler yüksek elektrik yalıtım kabiliyetleri sergiler ve kimyasal dirençleri kullanılan sertleştiricinin türüne göre değişir, uygun sertleştirici ile eşleştirildiğinde üstün direnç elde edilir. Epoksi reçineler, teneke ve varil kaplamaları, otomotiv ve mutfak eşyaları astarları ve kablo kaplamaları dahil olmak üzere koruyucu ve dekoratif kaplamalarda geniş uygulama alanı bulmaktadır. Elektrik ve elektronik endüstrisinde, dielektrik dayanımları, kürlenme sırasında minimum büzülme, mükemmel yapışma ve nem ve yüksek nem gibi olumsuz çevre koşullarına karşı dayanıklılıkları nedeniyle tercih edilirler. Yaygın uygulamalar arasında yüksek gerilim izolatörleri, anahtarlar ve transistörler için koruyucular bulunur. Epoksi reçineler ayrıca, ağırlıklı olarak grafit gibi yüksek modüllü takviyeler kullanan yüksek performanslı uygulamalarda, fiber takviyeli kompozit malzemelerde matris görevi görür (Augustsson 2004, Ratna 2009).

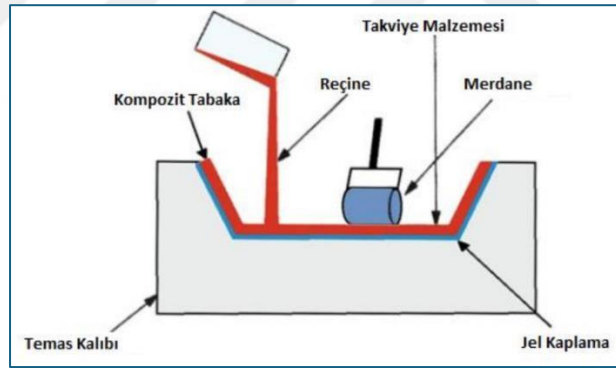
2.7 Plastik Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Plastik matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri çok sayıda ve çeşitlidir; amaçlanan uygulamanın özel gereksinimlerine ve koşullarına bağlı olarak belirli bir yöntemin seçimini etkileyen çeşitli faktörler vardır. Bu faktörler arasında nihai ürünün istenen temel özellikleri, yapısal bileşimi, maliyet hususları, üretim hacmi ve ilgili malzemelerin işlenebilirliği yer almaktadır. Özellikle tasarım hassasiyeti ve stabilitesinin çok önemli olduğu endüstrilerde, kompozit malzemeler genellikle istenen kalite ve işlevselliği elde etmek için üretim sonrası işlemlerden geçirilir. Polimer matrisli kompozit (PMC) parçalar üretmek için mevcut yöntemler arasında seçim, üretilecek parçanın kalitesine, istenen özelliklerine, miktarına ve maliyet hususlarına bağlıdır (Mazumdar 2001, Mallick 2007, Khan vd. 2016).

2.7.1 Elle Yatırma Kalıplama Yöntemi

Elle yatırma kalıplama yöntemi, özellikle düşük üretim hacimleri ve tanklar, uçak kanatları ve tekne gövdeleri gibi büyük ölçekli ürünler için uygun olan kompozit malzemeler oluşturmak için geleneksel ve yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, keçe veya dokuma tipi liflerden oluşan kuru kumaşların önceden hazırlanmış bir kalıp üzerine veya kalıbın içine elle yerleştirilmesini içerir. Daha sonra lifleri iyice doydurmak için reçine uygulanır ve istenen kalınlık elde edilene kadar devam edilir. İşlem boyunca, hava kabarcıklarını ortadan kaldırmak ve reçine ile elyafların eşit dağılımını sağlamak için silindirler kullanılır. Bu yöntemde tipik olarak kullanılan reçineler, etkili kürlenme özellikleri ve el yatırma işlemine uygunlukları nedeniyle tercih edilen polyester ve epoksidir. El yatırma yönteminin basitliği ve maliyet etkinliği onu özellikle avantajlı kılmaktadır, ancak optimum reçine penetrasyonu için yüzey pürüzlülüğünün en aza indirilmesini sağlamak için manuel beceri gerektirir (Işık 2008).

Şekil 2.6’da elle yatırma süreci gösterilmektedir.



Şekil 2.6 Elle yatırma yöntemi (Metin 2021).

Bir açık kalıp kompozit işleme yöntemi olarak ortaya çıkan el yatırması tekniği ilk olarak tekne gövdelerinin üretiminde kullanılmıştır. Oda sıcaklığında kürlenebilen epoksi, polyester, vinilester ve fenolik gibi ısıyla sertleşen reçinelerle kullanıma uygun olan bu yöntem aynı zamanda cam, karbon, aramid ve kevlar fiberler gibi iyi bilinen takviye malzemelerini de içerir. Elle yatırma yöntemi sürekli olarak gelişmekte ve devam eden araştırma ve geliştirmelere konu olmaktadır. Süreç birkaç temel adımı içerir: Kalıp yüzeyinin temizlenmesi, bir kalıp ayırıcı madde ve muhtemelen pürüzsüz bir nihai ürün yüzeyi için bir jelkot uygulanması, takviye kumaşlarının kalıp içine yerleştirilmesi,

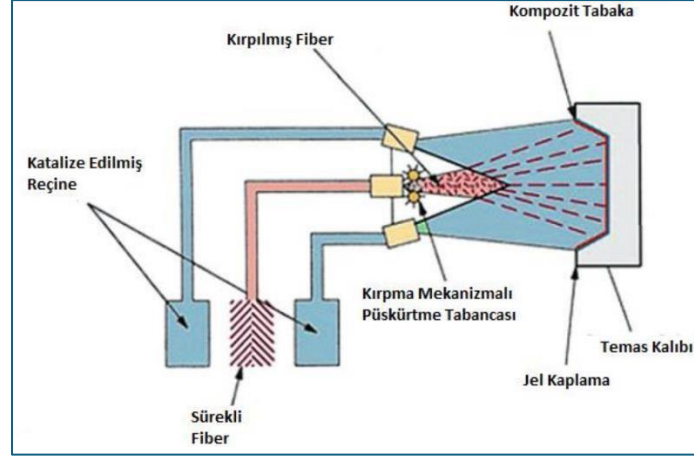
katmanların sıvı reçine ile manuel olarak emprenye edilir. Son olarak reçine ile doyurulmuş kumaşların oda sıcaklığında, atmosferik basınçta, değişen sıcaklık ve basınçlar altında kürlenmesine izin verilmesi (Kuppusamy vd. 2020, Metin 2021).

Bu yöntem basittir, tasarımda önemli esneklik ve nihai ürünün belirli alanlarının dayanıklılığını artırma imkanı sunar. El yatırması yönteminin birincil dezavantajı, sürecin ve nihai ürünün kalitesinin operatörün becerisine bağlı olarak önemli ölçüde değişebilmesidir. Yöntem genellikle ürünün tek bir pürüzsüz tarafını üretir, reçine içeriği çok düşük tutulursa yüksek boşluk içeriğine ve zayıf reçine ıslatma alanlarına yol açabilir. Elle yatırma tekniği, rüzgar türbini kanatları, çeşitli plaka türleri, tekne, yat gövdeleri, küvetler, sıvı depolama tankları ve mimari kalıpların üretimi de dahil olmak üzere çok sayıda alanda uygulama bulmakta ve çeşitli kompozit yapıların üretiminde çok yönlülüğünü ve yaygın kullanımını göstermektedir (Kuppusamy vd. 2020).

2.7.2 Püskürtme Yöntemi

Manuel yerleştirme tekniğinin gelişmiş bir versiyonu olan püskürtme yöntemi, üretim sürecini geliştirmek için makineler kullanır ve daha karmaşık malzemelerin oluşturulmasına olanak tanır. Bu yöntemde, doğranmış elyaflar, elyaf ve reçine karışımını eşit şekilde püskürten bir reçine tabancası kullanılarak bir kalıp yüzeyine uygulanır. Püskürtme adımından sonra, kompozit malzemeyi düzgün bir şekilde şekillendirmek için ürünün yüzeyi bir silindir kullanılarak düzleştirilir (Bayraktar 2016). Püskürtme yönteminin etkinliği dört temel faktörden etkilenmektedir: Kullanılan malzemeler (özellikle reçine ve elyaf), püskürtme cihazı, operatörün becerisini içeren gerçek püskürtme işlemi ve uygulanan kaplamanın kalınlığı (Parghi ve Alam 2018).

Şekil 2.7’de elyaf püskürtme işlemi gösterilmektedir.



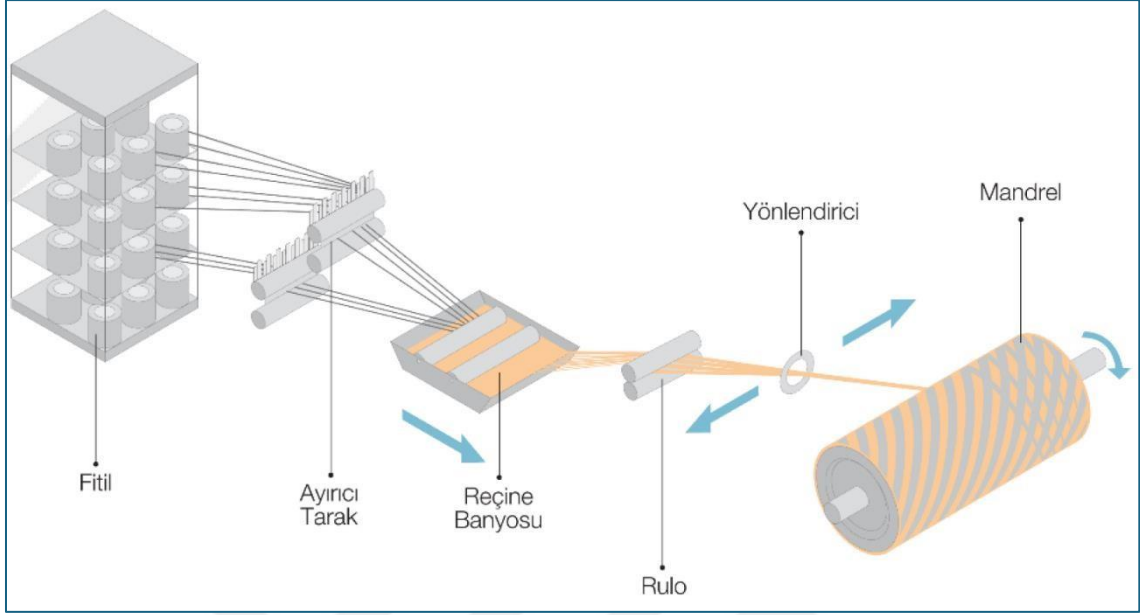
Şekil 2.7 Püskürtme yöntemi (Metin 2021).

Tipik olarak bu yöntemde, istenen kalınlığı elde etmek için kalıp üzerine püskürtülen sadece doğranmış elyaflar kullanılır. Polyester, izoftalik polyesterler ve vinil esterler gibi reçineler bu uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Püskürtme yöntemiyle üretilen parçaların kürlenmesi genellikle oda sıcaklığında gerçekleşir, ancak işlem harici ısıtma ile hızlandırılabilir. Nihai ürünün özelliklerini geliştirmek için, kalsiyum karbonat, alüminyum trihidrat, keçe ve dokuma fitil gibi malzemeler sprey reçineye dolgu maddesi olarak dahil edilir. El yatırmasına benzer şekilde, püskürtme yöntemi uygun maliyetli ve basittir, bu da onu karmaşık parçaların üretimi için uygun hale getirir. Bununla birlikte, elyafların rastgele yerleştirilmesi ve elyaf içeriğinin %30-%35 ile sınırlı olması nedeniyle, üretilen parçaların yapısal mukavemeti genellikle elyaf içeriğinin %65-%70'e ulaşabildiği el yatırması ile yapılanlardan daha düşüktür. Nihai ürünün yüzey kalitesi de değişir; ön yüzey tipik olarak pürüzsüzdür ve liflerin görülebildiği arka yüzey pürüzlü kalır. El yatırmasında olduğu gibi, ürünlerin kalitesi önemli ölçüde operatörün uzmanlığına bağlıdır. Püskürtme yönteminin tipik uygulamaları arasında tekne gövdeleri, araba ve kamyon gövde panelleri, yüzme havuzları, korozyona dayanıklı ürünler, elektrikli aletler ve havalandırma kanallarının üretimi yer almaktadır (Khan ve Mehmood 2016; Metin 2021).

2.7.3 İplik (Filament) Sarma Yöntemi

İplik (veya filament) sarma yöntemi, kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan bir başka sofistike tekniktir ve özellikle araba şaftları, su kaydırakları ve borular gibi silindirik şekillere sahip öğeler oluşturmak için etkilidir. Bu yöntem, reçine ile önceden

ıslatılmış elyafların dönen bir kalıp etrafına sarılmasını içerir (Arıcı 2023). Şekil 2.8’de iplik sarma süreci gösterilmektedir.

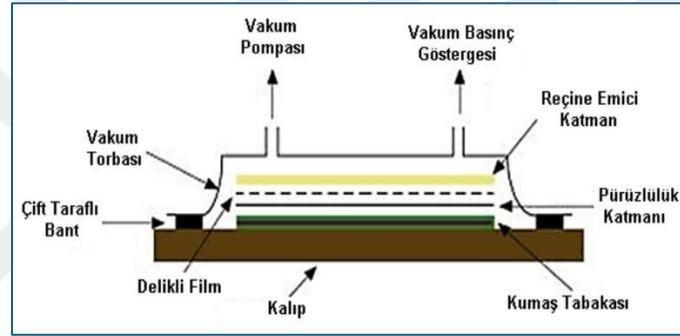


Şekil 2.8 İplik (Flement) sarma yöntemi (Arıcı 2023).

Elyaf bir makaradan çekilir ve nihai ürünün mukavemeti ve esnekliği gibi mekanik özelliklerini etkilemek için çeşitli açılarda sarılabilir. Kalıbın etrafına yeterli miktarda elyaf sarıldıktan sonra elyafların sertleşmesine, sağlam ve dayanıklı bir yapıya dönüşmesine izin verilir. Bu teknik sadece mekanik mukavemet için çok önemli olan elyaf oryantasyonu üzerinde hassas kontrol sağlamakla kalmaz, aynı zamanda farklı duvar kalınlıklarına ve karmaşık geometrik şekillere sahip parçalar üretme olanağı da sunar. Ek olarak, iplik sarma yöntemi özellikle hafif ancak güçlü bileşenler üretme kabiliyeti nedeniyle değerlidir, bu da onu otomotiv ve havacılık gibi bu tür niteliklerin gerekli olduğu endüstrilerde tercih edilen bir seçim haline getirir. Modern otomasyonla geliştirilen bu yöntem, yüksek üretim hızlarına ve tutarlı kaliteye ulaşabilir, işçilik maliyetlerini azaltır ve insan hatasını en aza indirir. İplik sarma yöntemi aynı zamanda farklı elyaf ve reçine türlerinin kullanılmasına olanak tanıyarak malzeme özelliklerinin özel uygulama ihtiyaçlarına göre uyarlanmasında çok yönlülük sağlar (Korkmaz 2014, Arıcı 2023).

2.7.4 Vakum Torbalama Yöntemi

Vakum torbalama yöntemi, kompozit malzeme üretiminde, kontrollü vakum koşulları altında reçine ile ıslatılmış elyafların veya prepreglerin kürlenmesini içeren özel bir tekniktir. Bu yöntem, yüksek elyaf-reçine oranına sahip kompozitler oluşturmak için tasarlanmıştır ve fazla reçinenin ve hava ceplerinin yapıdan verimli bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlar. Bu, elyaf yüklü reçinenin daha sonra kapatılan ve vakum basıncına maruz bırakılan, malzemeleri etkili bir şekilde sıkıştıran ve aksi takdirde kompozitin yapısal bütünlüğünü tehlikeye atabilecek hava kabarcıklarını ortadan kaldıran bir vakum torbasına yerleştirilmesiyle elde edilir (Korkmaz 2014, Durgun vd. 2014, Arıcı 2023). Şekil 2.9’da vakum torbalama yöntemi gösterilmektedir.



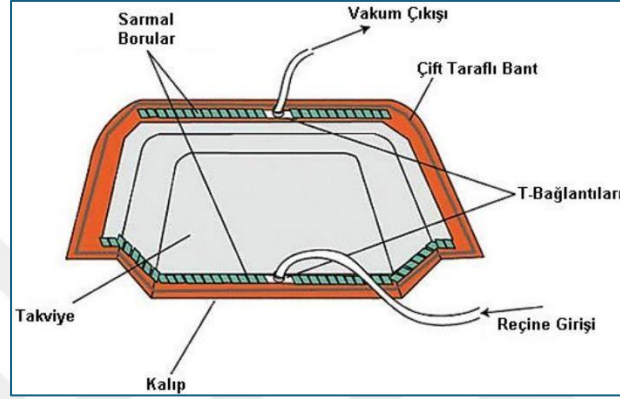
Şekil 2.9 Vakum torbalama yöntemi (Durgun vd. 2014).

Süreç, elle yatırma yöntemiyle benzerlikler taşımakla birlikte, reçinenin daha düzgün bir şekilde dağılmasını ve daha yoğun bir elyaf paketlemesini sağlayan uygulanan basınç nedeniyle nihai ürünün kalitesi açısından bu yöntemi geride bırakmaktadır. Bu teknik, özellikle havacılık ve uzay bileşenleri ve üst düzey spor malzemeleri gibi hassasiyet ve homojenlik gerektiren yüksek performanslı parçaların üretimi için faydalıdır. Vakum torbalama işlemi sadece boşluk içeriğini en aza indirmekle kalmaz, aynı zamanda elyafları birbirine yakın bir şekilde hizalayıp sıkıştırarak kompozitin mekanik özelliklerini de geliştirir (Korkmaz 2014, Durgun vd. 2014).

2.7.5 Vakum İnfüzyon Yöntemi

Vakum infüzyon yöntemi, kompozit üretiminde reçinenin vakum basıncı kullanılarak bir kalıba aktarıldığı bir tekniktir. Etkili bir şekilde uygulandığında, bu yöntem hava kabarcıklarını ortadan kaldırarak son derece pürüzsüz yüzey kalitesine sahip parçaların

üretilmesini sağlayabilir (Bahar 2009). Bu yöntem, hassasiyeti ve verimliliği nedeniyle özellikle karmaşık yapılara sahip kompozit parçaların imalatı için tercih edilmektedir. Kurulum genellikle bir vakum pompası, soyma katmanı, akış ağı, bir vakum tankı (reçine toplama tankı olarak da bilinir), kalıbın kendisi, reçine ve hava akışını yönetmek için spiral hortumlar ve bir reçine kovası içerir (Durgun vd. 2014). Şekil 2.10 vakum infüzyon sürecini göstermektedir.



Şekil 2.10 Vakum infüzyon yöntemi (Durgun vd. 2014).

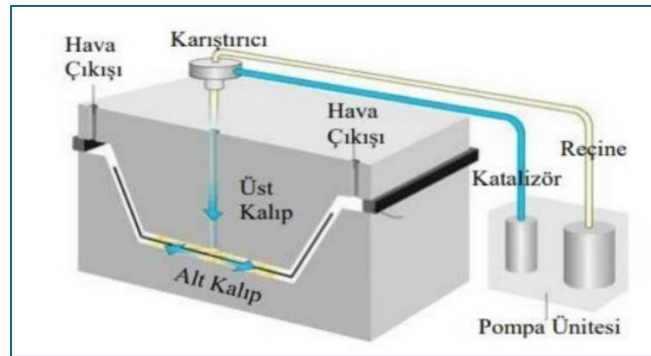
İşlem kalıp yüzeyinin iyice temizlenmesiyle başlar, ardından elyafların kalıba yapışmasını önlemek için bir kalıp ayırıcı madde uygulanır. Daha sonra, elyaflar kalıbın içine serilir, pürüzsüz bir yüzey elde etmek için bir soyma katıyla ve reçine akışını artırmak için bir akış ağıyla kaplanır. Spiral hortumlar daha sonra reçine ve havanın hareketini yönetmek için laminasyonun üzerine stratejik olarak yerleştirilir. Kalıbın kenarları hava geçirmez bantlarla sıkıca kapatılır ve hermetik bir sızdırmazlık sağlamak için bir vakum torbası ile daha da kapatılır. Vakum torbası ile kalıp yüzeyi arasındaki havayı çeken pompa tarafından sızdırmaz kalıbın içinde bir vakum oluşturulur. Reçine emdirme işlemine başlamadan önce, sistem vakum koşulları altında olası sızıntılara karşı kontrol edilir. Vakumun bütünlüğünden emin olunduktan sonra, lifleri iyice doyurmak için hazırlanan reçine sisteme verilir (Sunilpete ve Cadambi 2020).

Vakum infüzyon yönteminin önemli avantajlarından biri, yüksek mukavemet gerektirmeyen tek taraflı bir kalıp kullanarak büyük parçalar üretme kabiliyetidir, bu da kalıp tasarımı ve üretim maliyetleri açısından uygun maliyetli olmasını sağlar. Reçinenin elyaf yüzeyi boyunca eşit dağılımı ve emilimi, reçine birikmesi veya elyaf kırışması gibi sorunları önleyerek daha az malzeme israfı ile yüksek kaliteli bir yüzey sunar. Ayrıca bu

yöntem, Reçine Transfer Kalıplama (RTM) gibi diğer işlemlere kıyasla daha düşük genel kalıp ve üretim maliyetlerine sahiptir. Bununla birlikte, vakum infüzyon yöntemi bir dizi zorluğu da beraberinde getirmektedir. İşlem adımlarının karmaşıklığı ve gereken çok sayıda özel ekipman, yöntemi daha basit yöntemlere kıyasla daha maliyetli hale getirebilir. Ek olarak, belirli alanlarda reçinenin tam olarak ıslanmaması riski vardır ve bu da parçanın yapısal bütünlüğünü tehlikeye atabilir. Ayrıca, kalıp ve üretimdeki genel maliyet verimliliğine rağmen, hammaddeler ve ilgili özel ekipman pahalı olabilir ve bu da daha yüksek ilk kurulum maliyetlerine yol açar. Bu yöntem, sürecin genel sürdürülebilirliğini ve maliyet etkinliğini etkileyebilecek pahalı atık malzemeler de üretir (Durgun 2013, Durgun vd. 2014).

2.7.6 Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi

Reçine transfer kalıplama yöntemi (RTM), takviye malzemesinin doğrudan kalıba veya ön şekillendirmeden sonra yerleştirilmesini içerir. RTM özellikle sürekli elyaf takviyeli kompozitlerin üretimi için etkilidir ve kalite ve verimliliği sağlamak için kesin bir adımlar dizisine bağlıdır. Başlangıçta, kalıplar temizlenir ve nihai ürünün çıkarılmasını kolaylaştırmak için bir kalıp ayırıcı madde uygulanır. Daha sonra, elyaf takviyeli kumaşlar iki kalıp arasına yerleştirilir. Kurulum hazır olduğunda, kalıplara bir reçine ve katalizör karışımı enjekte edilir. Son adım, kompoziti nihai formuna katılaştırmak için malzemenin ısı altında kürlenmesini içerir (Korkmaz 2014). Şekil 2.11 reçine transfer kalıplama sürecini göstermektedir.



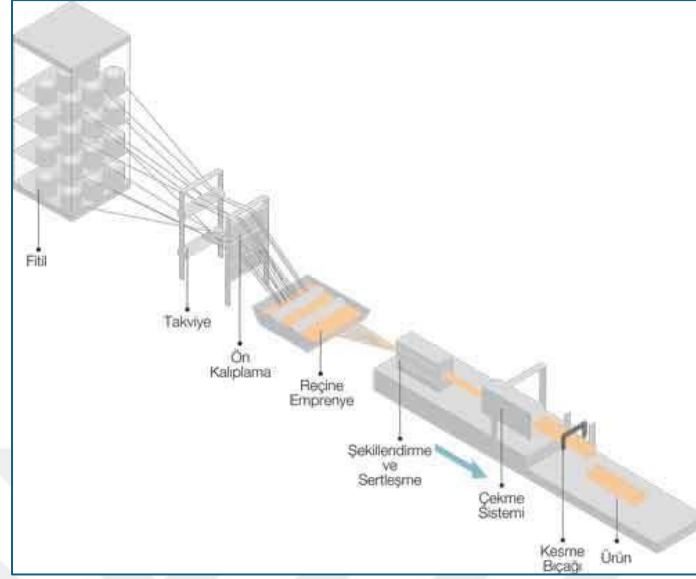
Şekil 2.11 Reçine transfer kalıplama yöntemi (Arıcı 2023).

RTM yönteminin başlıca avantajlarından biri, karmaşık şekillere sahip parçalar üretebilmesidir. Kullanılan kalıplar genellikle diğer yöntemlere kıyasla daha ucuz ve basittir, bu da genel üretim maliyetlerini düşürür. RTM ayrıca önemli bir tasarım esnekliği sunar ve bitmiş parçalar her iki tarafta da yüksek yüzey kalitesi sergileyerek ek son işlem süreçlerine olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Bu avantajlara rağmen, yöntemin bazı sınırlamaları vardır. Örneğin, işlemin viskozite gereksinimleri nedeniyle reçine seçimi genellikle kısıtlıdır. Preformun ve takviye elemanlarının kalıp içinde uygun şekilde düzenlenmesi, yapısal kusurlardan kaçınmak için çok önemlidir ve üretim süreci sırasında zaman zaman hava kabarcıkları oluşabilir ve bu da potansiyel olarak malzeme bütünlüğünü tehlikeye atabilir. Bu sorunu hafifletmek için, hava sıkışmasını ortadan kaldırmaya yardımcı olmak üzere vakum entegre eden Vakum Destekli RTM yöntemi geliştirilmiştir. RTM, özellikle hassas yapısal bütünlük ve estetik nitelikler gerektiren parçaların üretimi için çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yaygın uygulamalar arasında ulaşım ve kargo araçlarının gövde panelleri, ekran panelleri, tıbbi cihazlar, depolama tankları, araç koltukları, küçük tekneler, rüzgar türbini kanatları ve uçak parçaları yer almaktadır. Bu yöntemin yüksek performanslı malzemeleri karmaşık kalıp tasarımlarıyla entegre etme kabiliyeti, modern endüstriyel uygulamalardaki hayati rolünü yansıtarak onu gelişmiş kompozit üretim projeleri için tercih edilen bir seçenek haline getirmektedir (Tempelman vd. 2014, Henning vd. 2019, Mallick 2021).

2.7.7 Pultrüzyon Yöntemi

Pultrüzyon yöntemi, sürekli elyafları bir reçine banyosundan ve ardından reçinenin sertleştirildiği ve ürünün şekillendirildiği ısıtılmış bir kalıptan çekerek kompozit malzemeler oluşturmak için kullanılan ayırt edici bir üretim tekniğidir. Bu sürekli işlem, elyafları tek yönlü bir şekilde hizalayarak nihai ürünün yapısal bütünlüğünü ve homojenliğini sağlar. Elyaflar daldırma veya doğrudan enjeksiyon yoluyla reçine ile emprenye edilirken, sıcaklık ve basıncın reçineyi sertleştirdiği ve kompoziti tutarlı bir kesit şekline katılaştırdığı ısıtılmış kalıptan çekilirler. Bu yöntem özellikle hızı ve maliyet etkinliği ile ünlüdür, reçine içeriği üzerinde hassas kontrol ile sürekli üretime izin verir, tutarlı kalite ve malzeme özellikleri sağlar (Leblebiciler ve Asi 2022). Şekil 2.12,

Pultrüzyon yöntemini göstermekte ve sürecin ve ilgili ekipmanın sürekli yapısını ortaya koymaktadır.

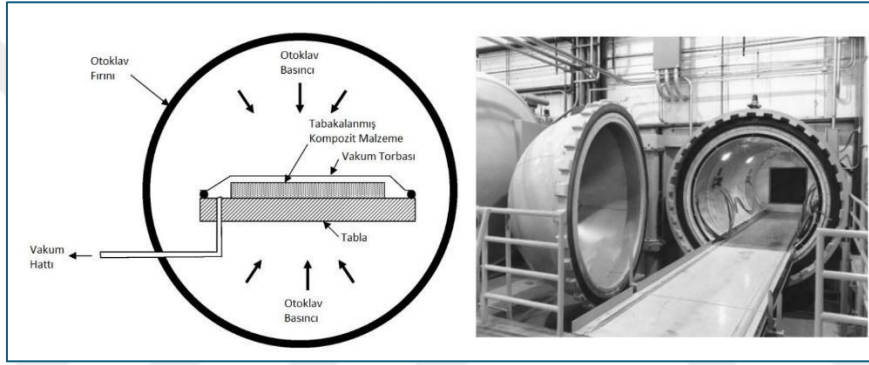


Şekil 2.12 Puktrüzyon yöntemi (Arıcı 2023).

Pultrüzyon prosesi son derece verimli ve ekonomik olmakla birlikte, özellikle çubuklar, borular, kirişler ve diğer yapısal şekiller gibi uzun kompozit profillerin üretimi için uygundur, ancak bazı sınırlamaları da vardır. Bir pultrüzyon operasyonu kurmanın ilk maliyeti, ısıtılmış kalıpların masrafı ve çekme sistemlerinin kurulumu nedeniyle yüksek olabilir. Ayrıca, parçaların tasarımı genellikle sabit kesit profilleriyle sınırlıdır ve bu da üretilebilecek şekil çeşitliliğini kısıtlar. Bu da yöntemin diğer kalıplama yöntemleriyle elde edilebilecek daha karmaşık geometrilere uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Bu yöntem özellikle kirişler ve kolonlar için bina inşaatı, direkler ve çapraz kollar için elektrik sektörü ve demiryolu ve otobüs altyapı bileşenleri için ulaşım gibi uzun, düz bileşenlerin gerekli olduğu endüstrilerde tercih edilmektedir. Pultrüzyon sürecinin otomasyonu, minimum insan müdahalesi ile yüksek hacimli üretime olanak tanıyarak sadece uygun maliyetli değil, aynı zamanda yüksek kaliteli kompozitlerin üretiminde tutarlı olmasını sağlar. Parça tasarımındaki sınırlamalarına rağmen, pultrüzyonun faydaları onu kompozit üretim endüstrisinde maliyet, verimlilik ve malzeme performansı arasında bir denge sunan değerli bir süreç haline getirmektedir (Leblebiciler ve Asi 2022, Arıcı 2023).

2.7.8 Otoklav Yöntemi

Otoklav yöntemi, yüksek sıcaklık, basınç ve vakum kombinasyonunun kompozit parçaların sertleşmesini kolaylaştırdığı özel fırınlarda gerçekleştirilen bir üretim yöntemidir. Bu yöntem, iç koşulları fırının dışından titizlikle kontrol etme kabiliyetiyle tanınır ve bu da onu üstün elyaf özelliklerine sahip malzemelerin üretimi için son derece uygun hale getirir. Otoklavlar oldukça maliyetlidir ve sıcaklık ve basıncın karmaşık etkileşimini etkin bir şekilde yönetmek için kalifiye personel tarafından çalıştırılmaları gerekir (Ekuase vd. 2022). Şekil 2.13, bu yüksek hassasiyetli üretim sürecini ve bir otoklav fırını örneğini göstermektedir.



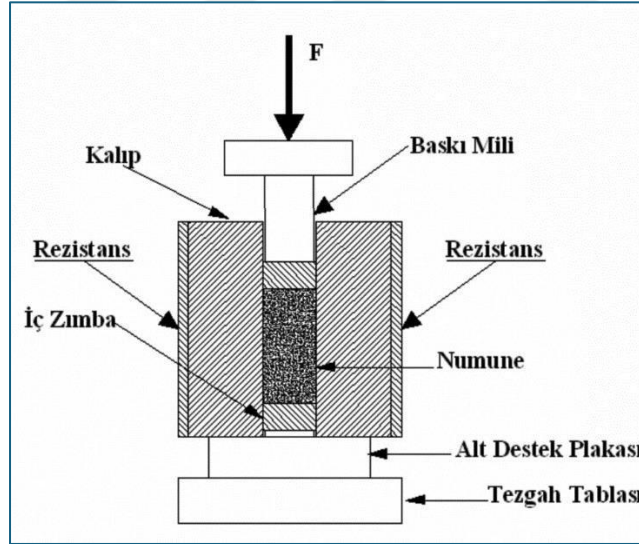
Şekil 2.13 Otoklav yöntemi (Metin 2021).

Bazı açılardan vakum infüzyon yöntemine benzeyen otoklavlama, tutarlı bir şekilde yüksek kaliteli malzemeler üretme kabiliyetiyle ünlüdür. Bu teknoloji, minimum boşluk içeriği ile yüksek elyaf hacmi fraksiyonları elde etmede mükemmeldir, bu da onu yapısal bütünlük ve dayanıklılık gerektiren gelişmiş kompozit parçaların üretimi için ideal hale getirir. Otoklavlar tipik olarak düşük hacimli üretim için kullanılsa da, kritik uygulamalarda kullanılan yüksek performanslı kompozitler oluşturmak için vazgeçilmezdir. Süreç, kompozit malzemelerin optimum kürlenmesini sağlamak için çok önemli olan sıcaklık, vakum ve basınç için karmaşık sistemler ve kontroller içerir. Proses aşamaları, reçine emdirilmiş kumaşların veya prepreglerin hazırlanmasını içerir; bunlar daha sonra otoklav içinde boşaltıcılar ve havalandırma delikleri gibi yapılarla katmanlandırılır. Boşaltıcı, optimum elyaf hacim oranını korumak için fazla reçinenin emilmesinde hayati bir rol oynarken, havalandırma, kürlenme işlemi sırasında oluşabilecek

hava ceplerinin kaçmasına izin verir, böylece kusurları önler ve nihai üründe homojenliği sağlar (Li 2014, Dong vd. 2019, Metin 2021).

2.7.9 Sıcak Presleme Yöntemi

Sıcak presleme yöntemi, kompozit malzemelerin üretiminde kullanılan, malzemeyi şekillendirmek ve sertleştirmek için ısı ve basıncın aynı anda uygulandığı modern ve verimli bir tekniktir. Bu yöntem, tipik olarak üst ve alt kalıplar olarak adlandırılan iki kalıbın kullanılmasını içerir. Takviye malzemesi, reçine ile birlikte alt kalıba yerleştirilir. Bu kurulum daha sonra üst kalıpla kapatılarak mühürlenir. Kapatıldıktan sonra, üst kalıp basınçlı hava yoluyla basınca maruz bırakılır ve kürlenme işlemini kolaylaştırmak için ısıtılır. Hem ısı hem de basıncın uygulanması, malzemedeki hava kabarcıklarıyla birlikte fazla reçinenin dışarı atılmasına yardımcı olarak daha yoğun ve daha düzgün bir kompozit yapı sağlar. Bu proses özellikle yüksek boyutsal hassasiyete ve mükemmel yüzey kalitesine sahip parçaların üretiminde etkilidir (Nas vd. 2013). Şekil 2.14, bileşenlerin kalıplar içinde nasıl sıkıştırıldığını ve sertleştirildiğini gösteren bu süreci göstermektedir.



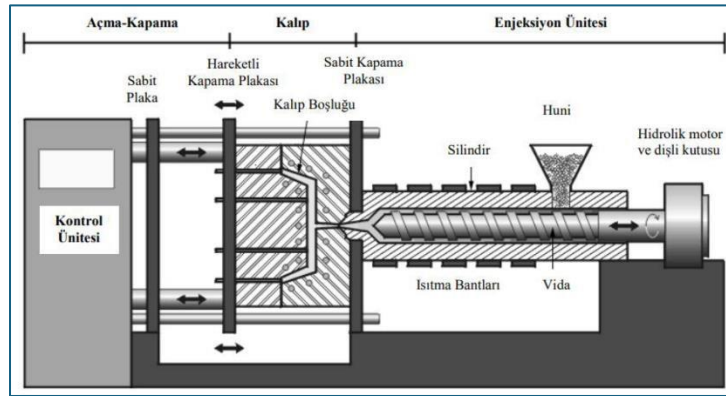
Şekil 2.14 Sıcak presleme yöntemi (Nas vd 2013).

Sıcak presleme yöntemi, kompozit malzemelerin şekillendirilmesi ve kürlenmesine yönelik birincil işlevinin ötesinde, nihai ürünün özellikleri üzerinde hız ve kontrol açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Üreticiler, sıcaklığı ve uygulanan basıncı ayarlayarak kompozitin mekanik özelliklerini belirli gereksinimleri karşılayacak şekilde

uyarlayabilirler. Bu yöntem, otomotiv ve havacılık bileşenleri gibi minimum boşluk içeriğinin çok önemli olduğu yüksek mukavemetli parçalar oluşturmak için yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, sıcak presleme yöntemi, sentetik polimerlerden doğal elyaflara kadar çeşitli reçine sistemlerini ve elyaf takviyelerini işleme kabiliyetiyle bilinir ve farklı uygulamalar arasında çok yönlülük sağlar. Kontroldeki hassasiyet aynı zamanda israfı azaltır ve üretim sürecinin verimliliğini artırır, bu da onu kalite ve maliyet etkinliği için üretim operasyonlarını optimize etmek isteyen endüstriler için tercih edilen bir seçim haline getirir (Nas vd. 2013).

2.7.10 Enjeksiyon Kalıplama Yöntemi

Enjeksiyon kalıplama yöntemi, imalat endüstrisinde kritik ve yaygın bir tekniktir ve özellikle yüksek boyutsal kararlılığa sahip karmaşık şekilli ürünlerin üretilmesindeki etkinliği ile bilinir. Bu yöntemde kapalı bir düzende bir araya gelen erkek ve dişi kalıplardan oluşan bir sistem kullanılır. Yüksek sıcaklıklarda akışkan olan termoplastik malzeme, yüksek basınç altında bu kalıplara enjekte edilir. Kalıplar, erimiş plastiği hassas bir şekilde istenen forma sokacak şekilde tasarlanmıştır. Enjekte edildikten sonra, malzemenin kalıbın sınırları içinde soğumasına ve katılaşmasına izin verilir. Soğutma işlemi tamamlandıktan sonra kalıp açılır, basınç düşürülür ve bitmiş parça dışarı atılır. Bu döngü hızlı üretime olanak tanıyarak makine başına saatte binlerce parçalık bir üretim hızına ulaşmayı mümkün kılar ve böylece özellikle yüksek hacimli üretim ihtiyaçları için uygun hale gelir (Abrate ve Walton 1992, Arıcı 2023). Şekil 2.15 doldurma, soğutma ve çıkarma sırasını yakalayan enjeksiyon kalıplama sürecini göstermektedir.



Şekil 2.15 Enjeksiyon kalıplama yöntemi (Arıcı 2023).

Birincil işlevi olan kalıplamanın ötesinde, enjeksiyon kalıplama yöntemi çeşitli ek faydalar sunmaktadır. Süreç son derece otomatiktir, bu da işçilik maliyetlerini en aza indirir ve verimliliği en üst düzeye çıkarır. Polietilen, polistiren ve naylon dahil ancak bunlarla sınırlı olmamak üzere, her biri otomotiv bileşenlerinden tüketici elektroniğine kadar çeşitli uygulamalar için uygun farklı özellikler sunan çok çeşitli termoplastik malzemeleri işleme kapasitesine sahiptir. Yöntemin sıkı toleransları koruma ve ince ayrıntıları çoğaltma yeteneği, onu hassas özellikler gerektiren parçaların oluşturulması için paha biçilmez kılmaktadır. Ayrıca, enjeksiyon kalıplamada kullanılan kalıplar karmaşık olabilir ve diğer üretim süreçleriyle elde edilmesi zor veya imkansız olan karmaşık geometrilere sahip parçaların oluşturulmasına izin verir. Bu hassasiyet ve ölçeklenebilirlik seviyesi, enjeksiyon kalıplamanın küresel olarak plastik bileşenlerin üretiminde bir köşe taşı teknolojisi olmaya devam etmesinin nedenidir (Abrate ve Walton 1992, Arıcı 2023).

2.7.11 Rulo Sarma (Roll-Wrapping) Yöntemi

Rulo sarma yöntemi, öncelikle yüksek mukavemetli borular, bisiklet çerçeveleri, golf sopaları ve olta takımları gibi hafif ancak sağlam bileşenler oluşturmak için kullanılan özel bir tekniktir. Bu yöntem, çelik gibi geleneksel malzemelerden yapılanlardan önemli ölçüde daha hafif ve daha güçlü parçalar üreterek kendini gösterir. Reçine ile önceden emprenye edilmiş, genellikle S-E cam, karbon veya Kevlar elyaflarla güçlendirilmiş prepreg levhalar kullanır. Karbon elyaf, üstün mukavemet/ağırlık oranı nedeniyle özellikle ince duvarlar ve minimum ağırlık gerektiren uygulamalarda tercih edilir. İşlem sırasında, prepreg tabakaların etrafına sıkıca sarıldığı istenen çapta bir mandrele bir kalıp ayırıcı madde uygulanır. Bu sarım, nihai ürünün mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyen elyaf yönelimini ve yoğunluğunu kontrol etmek için belirli desenlerde yapılır (Browne vd. 2007, Morkavuk vd. 2023, Arıcı 2023).

Rulo sarma işlemi, mandrel boyunca hizalandığında esneklik, 90° açıda basınç ve çekme ve 45° açıda burulma gibi çeşitli mukavemetleri artırmak için elyaf düzenlemesini içerir. Elyaflar yerleştirildikten sonra, büzülme bantları uygulanır ve her katman sadece 1-2 mm ilerleyerek tutarlılık ve kompaktlık sağlamak için kurulum sıkıca sarılır. Bunu takiben, sarılmış form, malzemenin ısı kaynaklı genleşmesinin ve dış bandın büzülmesinin basınç

uyguladığı, reçine ve takviyeyi etkili bir şekilde birleştiren ve yapıyı zayıflatabilecek boşlukları en aza indiren bir fırında kürlenmeye tabi tutulur. Kürlendikten sonra, malzeme mandrelden çıkarılır ve üretim süreci, büzülme bantlarının çıkarılmasıyla sona erer ve gelişmiş kompozit malzemelerin avantajlarından yararlanan yüksek kaliteli, uygun maliyetli ve özelleştirilmiş bir ürünle sonuçlanır (Browne vd. 2007, Morkavuk vd. 2023, Arıcı 2023).

2.7.12 Diğer Yöntemler

Yeni nesil üretim yöntemleri, ürünlerin performansını ve uygulanabilirliğini artıran daha verimli süreçler sunarak kompozit malzemeler alanında yenilikler yaratmaktadır. Bunlar arasında düz profiller üreten geleneksel pultrüzyonun aksine, Kavisli Pultrüzyon, reçineye batırılmış kuru elyafı belirli bir yarıçapla şekillendirilmiş sabit bir kalıba yönlendirerek ve ardından ısıtılmış bir kalıpta kürleyerek kavisli yapıların oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Bu yöntem, geleneksel tampon koruma çubuklarının kavisli kompozit parçalarla değiştirildiği 2020 Chevrolet Corvette'in arka tamponunda olduğu gibi otomotiv uygulamalarında başarıyla uygulanmıştır. Bu yenilik sadece estetik çekiciliği artırmakla kalmıyor, aynı zamanda aracın yapısal bütünlüğüne ve hafiflemesine de katkıda bulunmaktadır (Mazumdar 2001, Struzziero vd. 2021).

Buna paralel olarak, Otomatik Elyaf Yerleştirme ve Otomatik Bant Döşeme gibi robotik sistemler hassasiyet ve verimlilikte önemli sıçramaları temsil etmektedir. Bu sistemler, termoset veya termoplastik bazlı prepregleri elyaf demetleri veya bantlar şeklinde bir kalıp yüzeyine yerleştirmek için robotik kollar kullanılmaktadır. Elyaf, parçanın karmaşıklığına uyacak şekilde yüksek hassasiyetle yönlendirilebilir ve malzemenin yönlü mukavemet özellikleri optimize edilebilir. Bu yöntem işçilik maliyetlerini büyük ölçüde azaltmakta ve atıkları en aza indirerek üretim sürecinin sürdürülebilirliğini artırmaktadır. NASA'nın uzay uçağı parçaları için bu yöntemleri kullandığı havacılık gibi yüksek teknoloji sektörlerinde halihazırda kullanılmaktadır ve yöntemin katı kalite ve performans standartlarını karşılama kapasitesinin altını çizmektedir (Lukaszewicz vd. 2012, Yassin ve Hojjati 2018, Oromiehie vd. 2019).

Ayrıca, Prepreg Overmolding, termoset veya termoplastik prepreglerin kullanımını geleneksel plastik enjeksiyon kalıplama teknikleriyle entegre eden bir süreçtir. Bu yöntem, ekler veya braketler gibi ek yapısal bileşenlerin doğrudan kompozit parçalara dahil edilmesine olanak tanımaktadır. Sonuç, gelişmiş işlevsellik ve basitleştirilmiş montaj süreçleri ile son derece entegre bir yapıdır. Bu teknik, kompozit ve geleneksel üretim süreçleri arasındaki boşluğu etkili bir şekilde kapatarak karmaşık kompozit uygulamalar için yeni olanaklar sunmaktadır (Andrzejewski 2023).

Son olarak, Sürekli Elyaf Enjeksiyon Prosesi (CFIP), karbon elyafların sıvı reçine ile birlikte kalıplara sürekli enjeksiyonu için geliştirilmiş bir tekniktir. Bu süreç, 3 boyutlu baskı teknolojisini entegre etme avantajıyla birlikte, özellikle boru gibi içi boş yapılar üretmek için faydalıdır. CFIP, birden fazla birleştirilmiş parça boyunca sürekli elyaf yolları içerebilen yüksek mukavemetli, hafif yapıların oluşturulmasına olanak tanımakta, böylece bağlantı performansını ve genel yapısal bütünlüğü önemli ölçüde artırmaktadır. Bu yöntem, otomotivden havacılığa kadar çeşitli sektörlerde benzeri görülmemiş bir verimlilik ve malzeme entegrasyonu sunarak kompozit üretimini dönüştürmeye hazırlanmaktadır (Tian vd 2023).

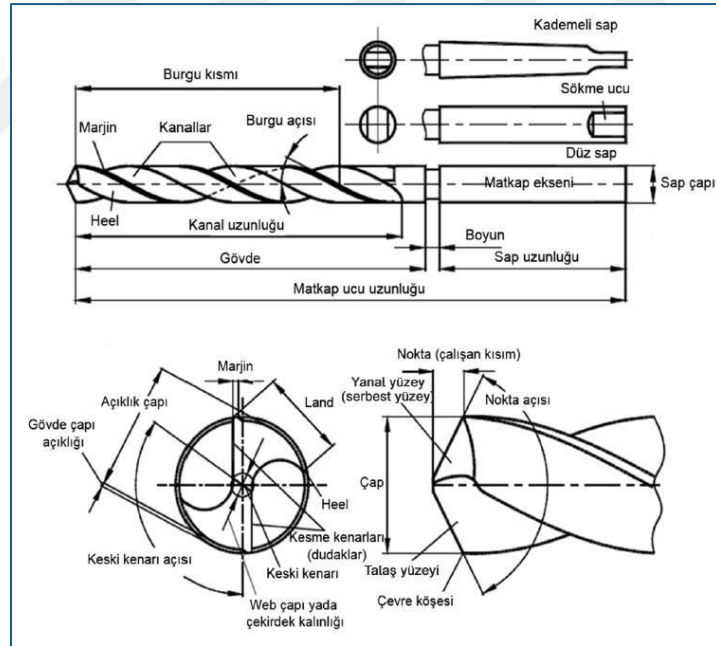
Bu yenilikçi teknolojiler, modern malzeme bilimi ile elde edilebileceklerin sınırlarını zorlayarak kompozit üretimin dinamik evrimini yansıtmaktadır.

2.8 Delme İşlemi

Lazer işleme, su jeti ile işleme ve Elektrik Deşarj Makinesi gibi alternatifler mevcut olsa da kompozitlerin delinmesi genellikle geleneksel mekanik yöntemlere dayanır. Bununla birlikte, geleneksel matkap uçları, sondajın doğal karmaşıklıklarına rağmen baskın seçim olmaya devam etmektedir. Fiber takviyeli kompozitlerin delinmesini geliştirmek, etkileyen faktörlerin kapsamlı bir şekilde kavranmasını gerektirir. Bunlar, matkap ucu malzemesinin ve geometrisinin özelliklerini, uygulanan kuvvetleri (itme ve tork gibi) ve kesme hızı ve ilerleme hızı gibi delme parametrelerini içerir ve bunların tümü delinmiş deliğin kalitesini doğrudan etkiler.

2.8.1 Temel Tanımlar

Sağlam, yüksek hızlı makinelerin ortaya çıkması ve yüksek basınçlı soğutucuların kullanılmasıyla son yıllarda matkap ucu ve muhafaza malzemelerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiş, bu da delme hızlarında kayda değer artışlara neden olmuştur. Aynı zamanda, bilgisayar kontrollü hassas taşlama cihazlarının yaygınlaşması, yeni matkap ucu tasarımlarının yaygın olarak benimsenmesini kolaylaştırmıştır. Matkap ucu geometrisinin ve yüzey özelliklerinin optimizasyonu, operasyonel verimliliği ve uç ve kaplama malzemelerinin etkinliğini en üst düzeye çıkarmak için çok önemli bir yol olarak ortaya çıkmıştır. Şekil 2.16’da gösterilen standart bir burgulu matkap ucu geometrisi, nokta açısı, kenar kalınlığı, keski kenarı, kanal profili ve sayısı dahil olmak üzere karmaşık geometrik parametreler dizisini örneklemektedir. İki oluk içeren konfigürasyonda, her bir ana kesme kenarı tek bir kesici uç rolünü üstlenir ve böylece talaş tahliyesi için kesme bölgesini tanımlamaktadır (Çelik 2013).

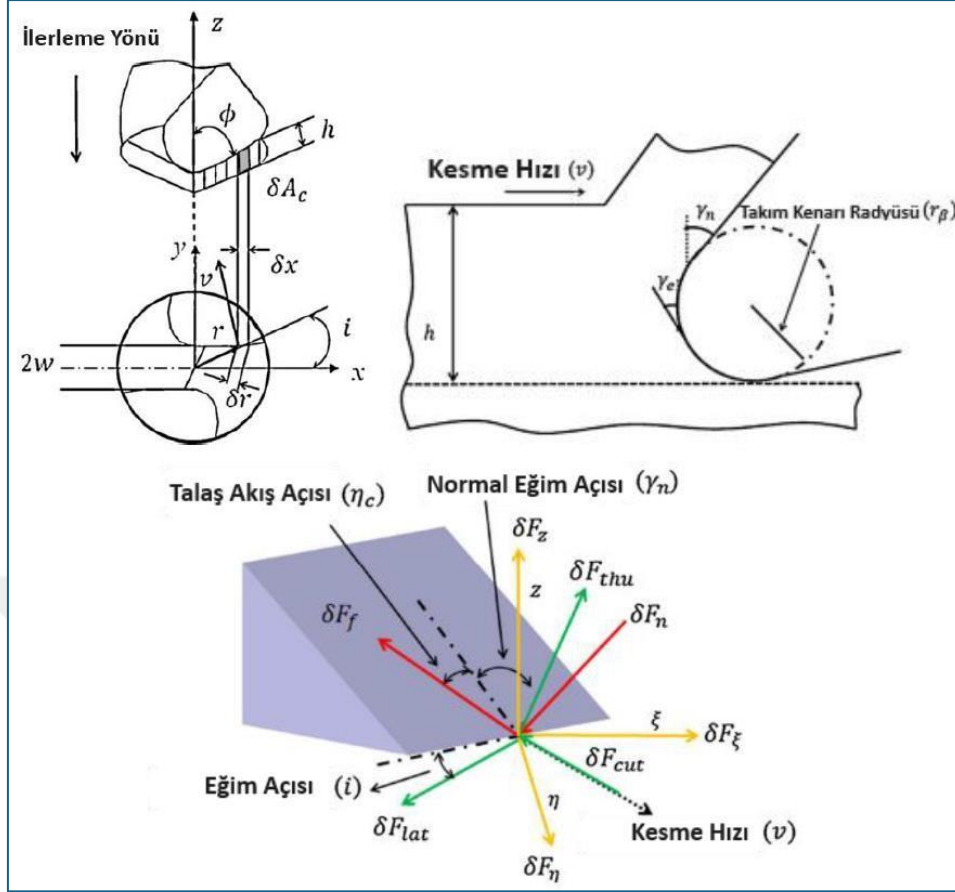


Şekil 2.16 Matkap ucu geometrik detayları (Çelik 2013).

Kompozit plakaların delinmesinde çeşitli malzemelerden oluşan ve farklı geometriler sergileyen matkap uçlarının kullanımı yaygındır. Bilimsel literatürde bildirilen matkap uçlarının kategorizasyonu, geometrik özelliklerine göre burgulu, kademeli, brad point, slot, düz kanallı ve çekirdek matkap uçları olmak üzere altı ana grubu tanımlamaktadır.

Bu geometrik varyasyonlar, farklı matkap bağlamalarında matkap uçlarının performansı ve uygulanabilirliği için temel unsurlardır. Bu geometrik konfigürasyonların iyileştirilmesi ve analizine yönelik çabalar, matkap etkinliğini ve hassasiyetini artırmayı amaçlayan stratejik bir zorunluluğun altını çizmektedir (Liu vd. 2012).

Delme işlemleri alanında, temel hareket takımın veya iş parçasının dönme hareketini gerektirir. Kesme hızı (V_c , m/dak), takımın çevresel hızının türetilmesiyle hesaplanan delme işlemlerinde çok önemli bir ölçüttür. Spesifik olarak, takım D olarak gösterilen bir çapa sahipse, her dönüş sırasında πD çevresel hızıyla dairesel bir yol izler. Takım çapının milimetre cinsinden ifade edilmesi, m/dak cinsinden kesme hızını belirlemek için elde edilen değerin 1000'e bölünmesini gerektirir. Bu arada, iş parçası penetrasyon oranı (V_f , mm/dev.) olarak da bilinen ilerleme oranı, birim zamanda kat edilen mesafeyi tanımlar ve takımın iş parçasına göre göreceli yer değiştirmesini veya tam tersini temsil eder. Alternatif olarak makinenin veya tablanın ilerleme hızı olarak yorumlanan bu parametre, delme işlemi sırasında takım ile iş parçası arasındaki dinamik etkileşimi kapsar. Ek olarak, devir başına ilerleme (f , mm/dev), ilerleme hızının belirlenmesine katkıda bulunan kritik bir parametre olarak ortaya çıkmakta ve takımın veya iş parçasının tekil bir devirde maruz kaldığı yer değiştirmeyi ifade etmektedir (Yüksel 2023).



Şekil 2.17 Delme mekaniği (Yüksel 2023).

Şekil 2.17’de verilen delme mekaniğine ilişkin hesaplamalara ait genel tanımlar ve buna bağlı denklemler aşağıdadır:

f_n : devir başına ilerleme (mm/devir)

D: delik işlem çapı (mm)

V_c : kesme hızı (m/dakika)

L: delik işlem boyu (mm) n:

iş mili hızı (devir/dakika)

R_a : delik yüzeyi pürüzlülüğü

V_f : ilerleme hızı (mm/dakika)

HP: Özgül kesme kuvveti

Kesme hızı, (V_c) m/dk

$$V_c = \frac{D_c \times \pi \times n}{1000} \quad (2.1)$$

İş mili hızı, (n) devir/dk

$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D_c} \quad (2.2)$$

Devir başına ilerleme, (f_n) $\mu\text{m}/\text{devir}$

$$f_n = \frac{V_f}{n} \quad (2.3)$$

İlerleme hızı, V_f ($\mu\text{m}/\text{devir}$)

$$V_f = f_n \times n \quad (2.4)$$

Ana kesme kenarının temel kesici talaş alanı (δA_c) (Denklem 2.5) ve deforme olmamış talaş kalınlığı (h) (Denklem 2.6)

$$\delta A_c = h \delta \times \cos i / \sin \phi \quad (2.5)$$

$$h = 0,5 f \sin \phi \quad (2.6)$$

Burada;

i = r radyal mesafede kesici kenarın eğim açısı

ϕ = matkap uç açısının yarısı δx =

eleman genişliği h = deforme

olmamış talaş kalınlığı f = ilerleme

Konik bir matkap için eğim açısı; gövde kalınlığı ($2w$) ile uç açısı (2ϕ) arasındaki açıdan şu şekilde belirlenmektedir.

$$i = \sin^{-1} \left(\frac{w \sin \phi}{r} \right) \quad (2.7)$$

Etkin talaş açısı (γ_e), talaş akış açısı (n_c), normal eğim açısı (γ_n)

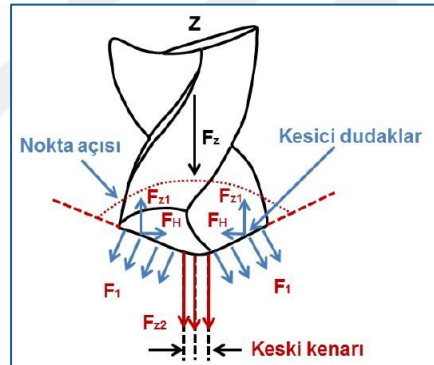
$$\delta F_{thu} = \delta F_f \cos n_c \cos \gamma_e - \delta F_n \sin \gamma_e$$

$$\rho = \sin^{-1} \left(\frac{W}{r} \right)$$

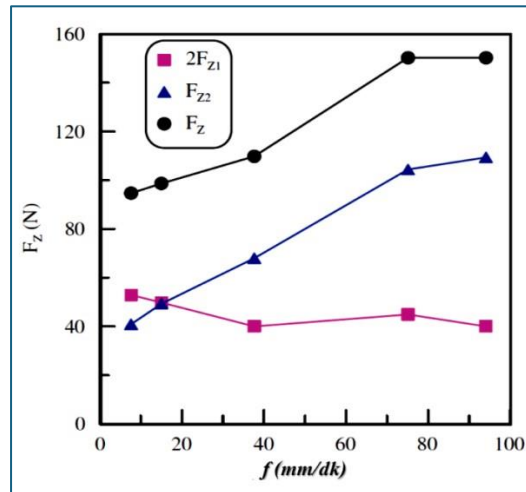
$$\delta F_z = \delta F_{thu} \frac{\cos \rho \sin \theta}{\cos i} - \delta F_{lat} \frac{\cos \phi}{\sin i}$$

$$(2.10)$$

Şekil 2.18’de gösterildiği gibi, delme sırasındaki toplam itme kuvveti (F_z) iki bileşene ayrıştırılabilir: F_{z1} ve F_{z2} . F_{z1} , kesici dudakların kompozit ile etkileşimi sonucu oluşan itme kuvvetini temsil ederken, F_{z2} keski kenarı tarafından üretilen itme kuvvetine karşılık gelir ve $F_z = 2F_{z1} + F_{z2}$ olarak tanımlanır. F_z ’yi tespit etmek için, kompozit ön delme yapılmadan delinebilir. Kesme dudaklarından (F_{z1}) gelen katkı, keski kenarının itme etkisinin izole edilmesine olanak tanıyacak şekilde keski kenarıyla eşleşen uzunlukta bir pilot delikle delinerek değerlendirilebilir. İlerleme hızına göre bu itme bileşenlerinde ortaya çıkan değişimler Şekil 2.19’da gösterilmektedir.

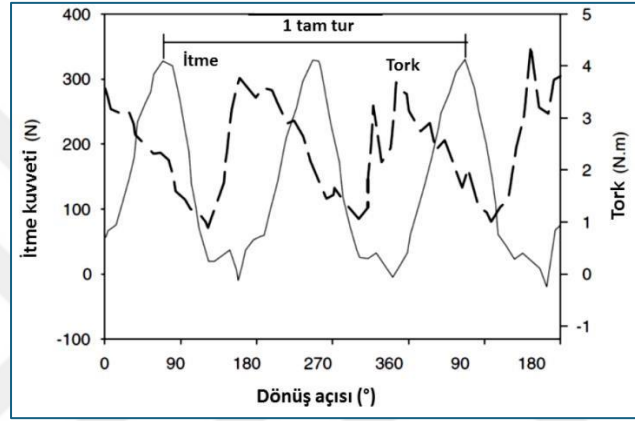


Şekil 2.18 Toplam itme kuvveti bileşenleri (Çelik 2013).



Şekil 2.19 Matkap ucunun keski kenarı ve kesici ağızları üzerine etkiyen itme kuvvetlerinin ilerleme hızı ile değişimi (Çelik 2013).

Kompozit plakalarda delme kuvvetleri, değişen elyaf dağılım açılarından etkilenen döngüsel değişimler sergilemektedir. Bu davranış, kompozitleri delerken iki kanallı bir matkap ucunun tam bir dönüşü boyunca itme kuvveti ve torkun döngüsel olarak değiştiği Şekil 2.20’de gösterilmektedir. Bu kuvvetlerin modelleri hem döngüsel hem de tekrarlayıcıdır ve tepe değerleri genellikle delaminasyondan önce geldiği için kritik öneme sahiptir (Çelik 2013).



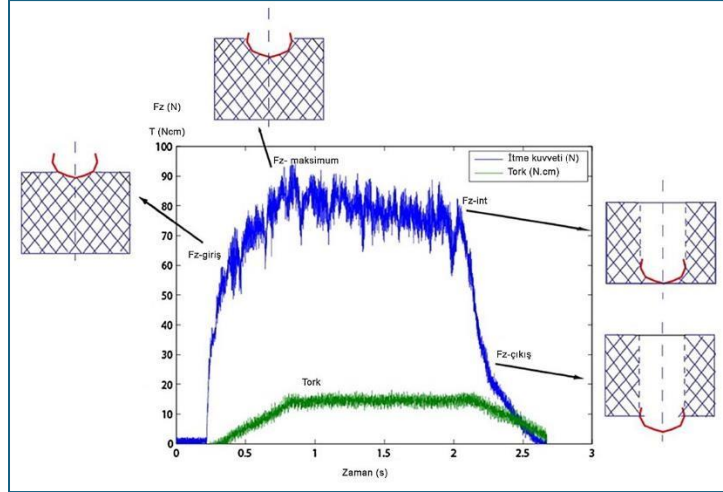
Şekil 2.20 İtme kuvveti ve tork değerlerinin matkap ucunun bir tam tur dönmesiyle değişimi (Çelik 2013).

Delme sırasında oluşan tork, ana kesme kenarları üzerine etkiyen kesme kuvvetleriyle oluşur ve şiddeti bu kuvvetler tarafından belirlenir (Denklem 2.11).

$$M = F_c \frac{d}{2} \quad (2.11)$$

Burada F_c ana kesme kenarları üzerine etkiyen kesme kuvveti, d ise matkap ucu çap uzunluğudur (Çelik 2013).

Şekil 2.21’de, iki nokta açılı bir matkap ucunun geometrik yapısına göre değişen tipik bir itme kuvveti ve tork grafiği verilmiştir.



Şekil 2.21 İki nokta açılı bir matkap ucunun geometrik yapısı ile belirlenen itme kuvveti ve tork değişimi (Çelik 2013).

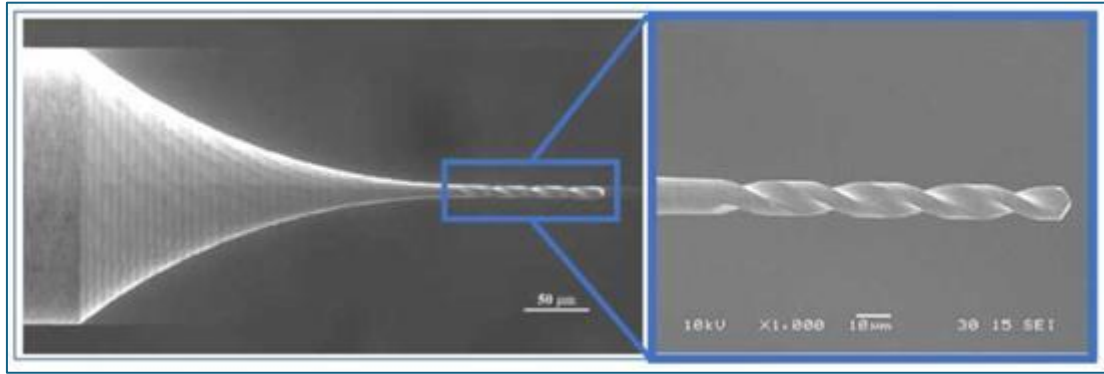
Matkap ucunun farklı nokta açıları, tepe noktasına yaklaştıkça itme kuvveti eğrisinde çift eğimli bir artışa neden olur. Tersine, matkap ucu malzemeye tam olarak nüfuz ettiğinde tork tepe noktasına ulaşır. Nokta açısı, itme kuvvetinin önemli bir belirleyicisidir. Matkap ucunun delikten çıkmasıyla birlikte itme kuvvetinde belirgin bir düşüş meydana gelir. Ancak, torku ileten matkap ucunun dış kısmı malzemeye temas halinde kaldığından, torktaki azalma itme kuvvetindeki azalmayla çakışmaz. Bu model, yine iki farklı eğimin olduğu delik çıkışında yansıtılır; matkap ucu malzemeden çıktıktan sonra itme kuvveti hızla azalır ve F_{z-int} olarak gösterilir. Bu aşamanın sonundaki itme kuvveti $F_{z-çıkış}$ olarak adlandırılır ve F_{z-int} ile $F_{z-çıkış}$ ın kümülatif etkisi matkap ucunun kompozit içindeki itme kuvvetinin genel yoğunluğunu belirler (Çelik 2013).

2.8.2 Mikro Delme

Çeşitli endüstriyel sektörlerde artan hassasiyet talepleri, şu anda küresel olarak yaklaşık 60 milyar dolar değerinde olan mikro işleme endüstrisinin hızla genişlemesini katalize etmiştir. Bu artış, ağırlıklı olarak hem makro ölçekli hem de mikro ve nano ölçekli bileşen üretimine yönelik gelişen ihtiyaçtan kaynaklanmaktadır. Bu sektörde, otomotiv, makine ve havacılık gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılan delik delme süreçleri çok önemlidir ve endüstriyel yeteneklerdeki gelişmeleri özetlemektedir (Terzioğlu vd. 2020).

Mikro işlemenin özel bir segmenti olan mikro delme üretim taleplerini karşılamak için yüksek hassasiyetli aletler gerektirmektedir. Mikro matkaplar, özellikle de kobalt bağlı sementite tungsten karbürden yapılanlar, özellikle yüksek hızlarda çalıştırıldıklarında, genellikle azalan kesme verimliliği ve hızlı aşınma eğilimi nedeniyle engellenmektedir. Sonuç olarak, üretimi pahalı olan bu matkaplar, kullanım ömürlerini uzatmak ve performansı optimize etmek için sıklıkla kaplamalarla geliştirilmektedir. Delme işlemi sırasında oluşan titreşimler ve kesme sıvılarının (genellikle mineral yağlar ve kimyasal yağlayıcılar) kullanımı gibi faktörler, yüksek hızlarda yaygın olan talaş sıkışması gibi sorunların önlenmesinde çok önemlidir (Yücel ve Çiçek 2011).

Elektronik, havacılık, uzay, tıp ve otomotiv gibi çeşitli endüstrilerde yüksek hassasiyetli, minyatür cihazların kullanımının artması, mikro delme işlemlerinin önemini artırmaktadır (Hasan vd. 2017). Çapları 10 μm ila 1 mm arasında değişen mikro matkaplar, yakıt enjeksiyon nozulları, baskılı devre kartları, tıbbi iğneler ve implantlar gibi bileşenlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.22’de 10 μm çapında bir mikro matkabı gösteren bir SEM görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 2.22 10 μm çapında bir mikro matkap SEM görüntüsü (Balcı 2023).

Mühendislik malzemelerinin bu kadar küçük takımlarla mikro delinmesi, hızlı takım aşınması, erken takım kırılması, azalan yüzey kalitesi, yoğun çapak oluşumu ve titreşimler gibi çeşitli zorlukları beraberinde getirmektedir (Cheong vd. 1999). Bu mikro boyutlu matkaplarda aşınmayı tespit etmek zordur ve iş parçasına ciddi şekilde zarar verebilecek kırılmalara karşı hassastırlar. Ek olarak, kesme sırasında talaş oluşumu

genellikle takım ucunda artan yanal kuvvetlerle sonuçlanır ve bu da yanal takım sapmasına neden olarak delik çaplarının buymesine ve yuvarlaklık hatalarına yol açabilir. Bu tür yanal kuvvetlerin aynı zamanda erken takım arızalarının da yaygın bir nedeni olduğu bilinmektedir (Okasha vd. 2010).

2.8.2.1 Mikro Delme Takımları

Mikro delme aletleri, tipik olarak çapı 10 m ila 1 mm arasında değişen son derece küçük delikler oluşturmak için tasarlanmış özel kesme aletleridir. Bu aletler mikro işleme endüstrisinde çok önemlidir ve karmaşık mikro boyutlu parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılır. Bu hassasiyet, biyomedikal cihaz üretimi, elektronik bileşen üretimi ve hassas mekanizmaların ve mikro optik sistemlerin geliştirilmesi gibi endüstriler için çok önemlidir. Ayrıca bu aletler, son derece detaylı işleme sonuçları üretme kabiliyetleri nedeniyle uzay endüstrisi ve mikroelektronik sektöründe de önemli uygulamalar bulmaktadır (Balcı 2023).

Mikro delikler oluşturmak için lazer işleme ve elektro erozyon gibi çeşitli yöntemler mevcut olsa da, mikro matkaplar kullanılarak mekanik delik açma, özellikle cihazların minyatrleştirilmesinde en yaygın ve verimli teknik olmaya devam etmektedir. Bu matkaplar özellikle devre kartlarının delinmesi ve hassas uygulamalarda küçük çaplı deliklerin oluşturulması gibi görevler için tercih edilmektedir. Bununla birlikte, bu matkapların küçültülmüş boyutları genellikle dayanıklılığın azalmasına ve kırılma eğilimine yol açar; bu da çalışma ömürlerini önemli ölçüde kısaltabilir ve kırılan uçların iş parçalarından çıkarılmasını zorlaştırarak potansiyel olarak zarar verebilir (Yücel ve iek 2011, Acer 2023). Bu nedenle, mikro delme işleminde kullanılan makineler, takım ömrünü uzatmak ve performansı artırmak için titreşimleri en aza indirebilmelidir. Mikro matkaplar tipik olarak yüksek hız çeliğinden veya tungsten karbürden yapılır ve ikincisi daha iyi aşınma direnci sunar. Performansı daha da artırmak için elmas takımlardaki yenilikler de araştırılmaktadır. Sık sık takım kırılması ve etkili kaplamaların uygulanmasının karmaşıklığı gibi zorluklara rağmen, özellikle titanyum alaşımları işlenirken mikro delme takımlarının ömrünü ve etkinliğini artırmak için TiAlN kaplamalar gibi çözümler geliştirilmiştir. Bu kaplamalar takımın sertliğini ve dolayısıyla

dayanıklılığını artırmaya yardımcı olur, ancak sonuçlar ilgili özel koşullara ve malzemelere göre değişebilir (Yüksel 2023). Sonuç olarak, mikro delmenin başarısı kesici takımların ve kaplama işlemlerinin dikkatli bir şekilde seçilmesine bağlıdır ve mikro işlemede yüksek hassasiyet ve performans elde etmek için malzeme seçiminin ve teknolojik adaptasyonun öneminin altını çizmektedir.

2.8.2.2 Mikro Matkaplarda Takım Geometrisi

Mikro delme işlemi, kullanılan delme aletlerinin geometrisinden ve keskinliğinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Mikro matkapların kırılma eğilimi, sadece keskin olmalarını değil, aynı zamanda sık sık kırılmalarını önlemek için yüksek dayanıklılığa sahip olmalarını da gerektirmektedir. Kudla (2006), bir matkabın burulma mukavemetinin matkabın çapı, kesit profili, kesme bölümünün uzunluğu ve doğal malzeme özellikleri gibi çeşitli faktörlerle yakından bağlantılı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, hız ve ilerleme dahil olmak üzere kesme koşulları, uç açısı başta olmak üzere takım geometrisi ve takım kaplamalarının uygulanması gibi diğer unsurlar da delme işlemlerinin etkinliğinde, özellikle de çapak oluşumunu nasıl etkiledikleri konusunda önemli rol oynamaktadır.

Mikro delmede yaygın bir sorun olan çapak oluşumu, çeşitli koşullar altında çapak boyutunu tahmin etmek için analitik modellerin geliştirilmesi de dahil olmak üzere kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Kim ve Dornfeld (2002) böyle bir model tasarlamış ve 19° ile 30° arasında bir helis açısı ve 135° 'lik bir uç açısı ile doğrulamıştır. Araştırma, makro ölçekli delme işlemlerinde uç açısının (118° ile 140° arasında değişen) ve helis açısının (25° ile 40° arasında değişen) artırılmasının çapak boyutunu azaltabileceğini göstermektedir.

Takım geometrisini anlamak, mikro delme işlemlerinin performansını optimize etmek için çok önemlidir. Bu geometrinin üç kritik yönü Şekil 2.16'da gösterildiği gibi keski kenarı, helis açısı ve nokta açısıdır. Matkap ucunda konumlandırılan keski kenarı, iş parçasıyla ilk temas noktasıdır ve matkabın merkezlenmesine yardımcı olarak delme yükünün ağırlığını taşır. Helis açısı, yiv yönü ile matkap eksenindeki açı, matkap yivinin tasarımında hayati bir rol oynar ve eğim açısı boyutunu etkiler. Helis açısındaki değişimler, delme sırasındaki kuvvetleri ve torku önemli ölçüde etkiler. Ayrıca, nokta

açısı da bir diğer önemli faktördür; bu açıdaki artış, iş parçası ile kesici takım arasındaki daha büyük temas alanı nedeniyle kesme kuvvetlerini artırır (Gong 2001, Imran 2010).

2.8.2.3 Mikro Matkaplarda Kırılma

Mikro matkapların kırılması ve bunun sonucunda kısa ömürlü olması, hassas mühendislikte önemli zorluklar yaratmaktadır. Mikro matkapların kırılmaya yatkınlığı, esas olarak delme işlemleri sırasında uygulanan önemli gerilimler altında sınırlı dayanıklılıklarından kaynaklanmaktadır. Kudla'nın (2006) vurguladığı gibi, mikro matkapların dayanıklılığı, bükülme, burulma ve diğer karmaşık gerilmelere etkili bir şekilde dayanamamalarından ciddi şekilde etkilenmektedir. Bu sorun, çapları 3,5 mm'den küçük matkaplarda daha da kötüleşir, çünkü eksenel gerilmelere karşı daha az direnç gösterirler ve bu da onları özellikle eksenel yönde savunmasız hale getirir (Yüksel 2023). Daha küçük boyuttan kaynaklanan doğal mekanik dezavantaj genellikle daha düşük burulma sertliği ile sonuçlanır ve bu da özellikle yüksek en-boy oranlarına sahip mikro delikler içeren delme işlemlerinde bükülme ve burkulmaya yol açabilir.

Mikro matkapların yapısal zayıflıkları, erken kırılma eğilimleriyle birleştiğinde, aşırı kesme kuvvetlerini azaltmak için optimize edilmiş kesme parametrelerinin uygulanmasını gerektirir. Imran (2010) kesme hızı, ilerleme hızı, takım malzemesi ve kaplama seçiminin dikkatli bir şekilde ayarlanması yoluyla bu kuvvetlerin dengelenmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu parametrelerde ince ayar yapılarak mikro matkaplar üzerindeki fiziksel gerilimler önemli ölçüde azaltılabilir, böylece operasyonel dayanıklılıkları artırılabilir ve takım arızası görülme sıklığı azaltılabilir.

Ayrıca, takım tasarımı ve malzeme bilimindeki ilerlemeler, gelişmiş geometrik özellikler içeren ve daha yüksek kırılma tokluğuna sahip malzemelerden yapılan mikro matkapların geliştirilmesine yol açmıştır. Bu yenilikler, kırılmaya neden olan mekanik gerilimlere karşı daha iyi direnç sağlamayı amaçlamaktadır. Elmas benzeri karbon veya titanyum alüminyum nitrür gibi kaplamalara yönelik araştırmalar da mikro matkapların güç ve dayanıklılığına katkıda bulunabilir ve delme sırasında sürtünmeyi azaltırken aşınma ve yıpranmaya karşı koruyan sert bir dış katman sunar. Bu teknolojik gelişmeler, mikro matkapların ömrünü uzatmak ve takım değiştirme maliyetinin ve makine duruş süresinin

çok yüksek olabileceği yüksek hassasiyetli üretim görevlerinde güvenilirliklerini sağlamak için çok önemlidir (Kudla 2011, Huang vd 2023).

2.8.2.4 Mikro Delme İşleminde Kesme Kuvvetinin Etkileri

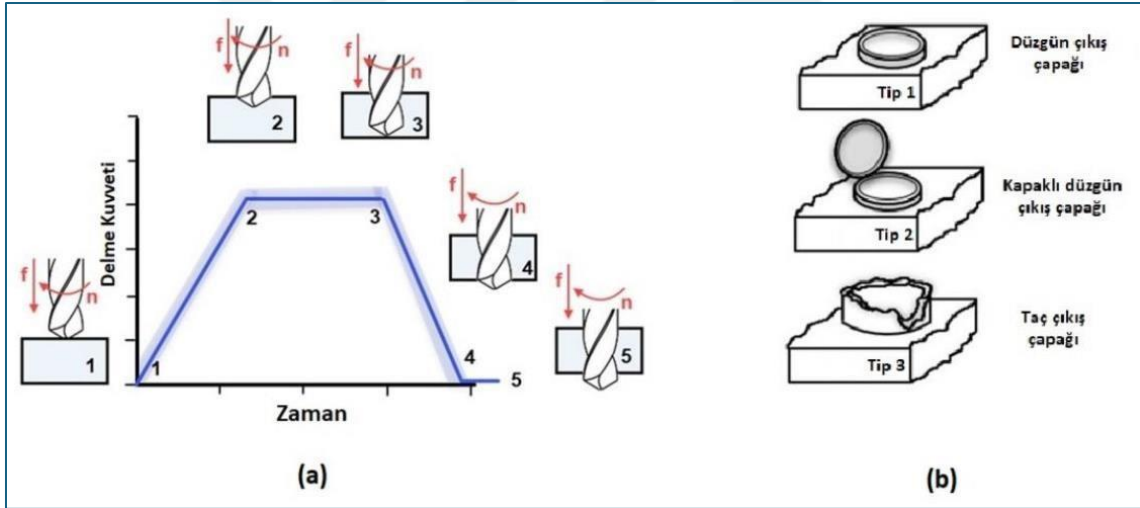
Mikro delme işlemlerinde kesme kuvvetlerinin dinamiklerini anlamak, proses performansını hem değerlendirmek hem de iyileştirmek için çok önemlidir. Bu kuvvetler takım aşınması, çapak oluşumu, yüzey bütünlüğü ve boyutsal doğruluk gibi kritik sonuçları etkiler. Mikro delme; boyut etkisi, artan yüzey/hacim oranı ve kesme kuvvetlerinin davranışını önemli ölçüde değiştiren malzeme özelliği değişiklikleri nedeniyle geleneksel delme işleminden farklıdır (Yang vd. 2004). Takım aşınması, kırılma ve iş parçası deformasyonu gibi sorunları tanımlamak için çok önemli olan kesme kuvvetleri, delme işlemlerinin analizi ve optimizasyonunda hayati bir rol oynamaktadır (Kudla 2001). Bu kuvvetlerin etkin yönetimi ve analizi, delme işlemini iyileştirmek, takım aşınmasını azaltmak ve yüzey kalitesini artırmak için zorunludur (Imran 2010). Zhang vd. (2014), matkabın tüm kesici kenarlarından gelen kuvvetlerin toplanmasını içeren toplam delme kuvvetinin (F1) ölçülmesine yönelik kümülatif yaklaşımı detaylandırarak delme işlemi sırasında kuvvet dağılımına ilişkin kapsamlı bir bakış açısı sağlamıştır (Yüksel 2023).

Mikro delme işleminde delme verimliliği, kesme kenarının yarıçapından büyük ölçüde etkilenir. Bu boyut etkisi hem ürün kalitesini hem de takımın kullanım ömrünü olumsuz etkileyebilir ve takımın kesme kenarı yarıçapının yanı sıra kesilmemiş talaşın kalınlığıyla da yakından bağlantılıdır. Ayrıca, soğutma-sürtünme, ilerleme hızı ve iş mili hızı gibi faktörler de mikro delme işlemleri sırasında kesme verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir (Balcı 2023).

2.8.2.5 Mikro Delme İşleminde Çapak Oluşumu

Çapak oluşumu, bir mikro deliğin çıkışında bir mikro matkabın kenarlarına sürtünerek sünek iş malzemesinin yanal olarak uzamasından kaynaklanır. Ürün kalitesinin düşmesi ve montaj işlemlerinde bazı zorluklar gibi çeşitli sorunlara yol açar. Ayrıca, bazı sert

çapaklar iş malzemesinde mikro çatlaklara da neden olabilir. Bu nedenle, işleme süreçlerinde çapak alma gibi ikincil işlemleri ortadan kaldırmak için delme işlemlerinin optimum kesme koşulları kullanılarak gerçekleştirilmesi istenmektedir. Bu şekilde, işleme süresi ve maliyetleri önemli ölçüde azaltılır. Çapak alma işlemi mikro delikler için çok zor, pahalı ve zaman alıcı bir işlem olduğundan, çapakların en aza indirilmesi veya ortadan kaldırılması mikro delme işleminde büyük önem taşımaktadır. Çapak yükseklikleri, uygun kesme koşulları kullanılarak önemli ölçüde azaltılabilir. Daha yüksek kesme derinlikleri, ilerlemeler ve aşınmış takımlar kesme kuvvetlerini ve dolayısıyla çapak yüksekliklerini artırır (Balcı 2023). Min vd. (2001) ve Yazman vd. (2020)'ne göre, çapaklar üç ana tipte kategorize edilebilir: pürüzsüz çıkış çapağı, kapaklı pürüzsüz çıkış çapağı ve taçlı çıkış çapağı, her biri delinmiş deliklerin son işlem kalitesini etkileyen farklı özelliklere sahiptir (Yüksel 2023). Mikro delme işleminde delme kuvveti ve çıkış talaşı karşılaştırmasına ilişkin bir görsel Şekil 2.23'te sunulmuştur.



Şekil 2.23 Mikro delme işleminde delme kuvveti ve çıkış talaşı karşılaştırması (a) Mikro delme işleminde ana kesme kenarlarına etki eden delme kuvveti profili, (b) düzgün çıkış çapağı, kapaklı düzgün çıkış çapağı ve taçlı çıkış çapağının şematik gösterimi (Yalçın 2023).

2.8.2.6 Mikro Delme İşleminde Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü, işlenmiş bileşenlerin performansını ve uzun ömürlülüğünü önemli ölçüde etkilediği için mikro delmede kritik bir kalite parametresidir. Mikro delme süreçlerinin amacı, minimum pürüzlülük değerlerine sahip bileşenlerden oluşan hassas mekanik sistemler imal etmek, böylece hizmet ömürlerini artırmak ve bakım ihtiyaçlarını

azaltmaktır. Geleneksel işlemede olduğu gibi, mikro işlemede de yüzey pürüzlülüğü kesme koşullarından, takım malzemesi ve geometrisinden ve iş malzemesinin yapısından büyük ölçüde etkilenir. Bununla birlikte, mikro işlemenin ayırt edici bir yönü, kesilmemiş talaş kalınlığı kesme kenarı yarıçapından daha küçük olduğunda ploughing oluşmasıdır. Bu olgu, önemli yapışma ve çizilme etkileri nedeniyle yüzey pürüzlülüğünün artmasına katkıda bulunur. Özellikle, dış başına ilerleme arttıkça daha pürüzsüz yüzeyler elde edilir ve bu da boyut etkisini azaltır (Sun ve To 2018).

2.8.2.7 Mikro Delme İşleminde Takım Aşınması

Takım aşınması ürün kalitesini, işleme süresini ve maliyetleri önemli ölçüde etkiler. Takım malzemesi, geometri, kaplama ve kesme koşullarının iş malzemesine göre en uygun şekilde seçilmesi, bir kesici takımdaki aşınmayı önemli ölçüde azaltabilir. Kesme işlemleri sırasında deformasyon bölgelerinde oluşan yüksek sıcaklıklar ve gerilmeler takım aşınmasını hızlandırır (Imran 2010). Mikro boyutlu matkaplarda, çok ince kesitleri nedeniyle takım aşınmasını tespit etmek zordur ve bu da delme işlemleri sırasında aşırı aşınma nedeniyle takım kırılması riskini artırır.

Mikro delme işlemlerinde, delinen iş malzemesine bağlı olarak yan aşınma, keski kenarı aşınması, yığma kenar (BUE), talaş ve kırıklar baskın aşınma türleridir. Yanak aşınması, takım-iş parçası arayüzündeki aşındırıcı etkileşimler nedeniyle kesici takımın yan yüzünde meydana gelir ve takımın kesme kapasitesini azaltır, kesme kuvvetlerini, yüzey pürüzlülüğünü ve enerji tüketimini artırır. Takım-talaş arayüzündeki difüzyon ve aşındırıcı etkilerden dolayı talaş yüzeyinde gelişen krater aşınması, kesme kenarını önemli ölçüde zayıflatarak kırılmaya eğilimli hale getirebilir. Takım-iş parçası arayüzündeki yüksek kesme ve basma gerilmelerinden kaynaklanan keski kenarı aşınması, takımın merkezleme kabiliyetini ve genel kesme verimliliğini azaltır (Zhou ve Yu 2021). BUE, talaşların yüksek basınç altında kesici kenara yapışmasını içerir ve tipik olarak östenitik paslanmaz çelikler ve titanyum alaşımları gibi sünek malzemelerin düşük hızlarda ve ilerlemelerde işlenmesinde meydana gelir ve yüzey kalitesini, çapak oluşumunu ve işleme kuvvetlerini olumsuz yönde etkiler (Çetindağ 2019). Talaş veya

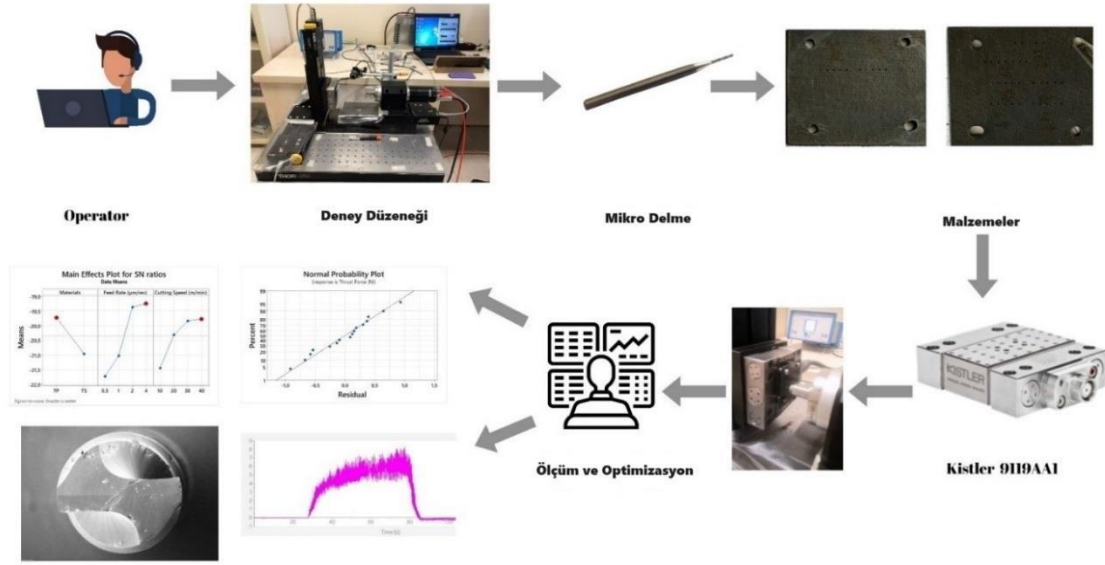
kırılmalar, delme sırasında yüksek kesme derinlikleri, ilerleme hızları, BUE oluşumu veya aşırı titreşim ve aşınmadan kaynaklanabilecek aşırı mekanik yüklerden kaynaklanır.

3. MATERYAL ve METOT

Çalışma deneyleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Mikro İşleme Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Yüksek hassasiyetli mikro delme deneyleri, maksimum 60.000 dev/dak iş mili dönüş hızına ulaşmak için donatılmış özel bir yatay üç eksenli işleme merkezi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu düzenek, 0,1 µm eksen doğruluğu ve 0,4 µm tekrarlanabilirlik doğruluğu ile karakterize edilmekte ve işlemlerde yüksek hassasiyet sağlamaktadır. Kurulum içindeki eksen hareketleri, step motorlar tarafından tahrik edilen “THORLABS” marka lineer kızaklar tarafından kolaylaştırılarak hassas ve kontrollü ayarlamalara olanak tanımıştır. Bu deneyler için, tescilli yazılımı tarafından yönetilen “IMT” marka bir fener mili kullanılmıştır. Ek olarak, kesme kuvveti değerlerinin ölçümü bir “Kistler-9119AA1” mini dinamometre kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Kesme kuvveti sinyallerini ölçülebilir kuvvet ölçümlerine dönüştürmek için bir amplifikatör kullanılmış ve elde edilen veriler Dynoware yazılımı kullanılarak sistematik olarak kaydedilmiştir. Tüm deney düzeneği, kuru kesme koşulları altında gerçekleştirilen deneyler sırasında stabilite ve hassasiyet sağlamak için titreşimsiz bir optik tabla üzerine monte edilmiştir. Çalışma, kesme hızlarını ve ilerleme oranlarını değiştirerek değişen işleme koşullarının etkilerini araştırmıştır.

Deney sonrası, iş parçası ve mikro matkaplar Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan LEO 1430 VP model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak detaylı incelemeye tabi tutulmuştur. SEM, mikro matkaplardaki aşınmanın analiz edilmesini, iş parçasının çıkış noktalarındaki çapakların incelenmesini ve delinen delik çaplarının ölçülmesini kolaylaştırmıştır. Kapsamlı inceleme, belirtilen deneysel koşullar altında aşınma özelliklerinin ve işleme sonuçlarının tam olarak anlaşılmasını sağlamıştır. Deney sürecinin işleyişi Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Deney sürecinin işleyişi.

Bu çalışmada, Minitab yazılımı kullanılarak L16 Taguchi ortogonal deney tasarımı hazırlanmıştır. Taguchi deney tasarımı (DOE), deneyleri sistematik olarak planlamak ve analiz etmek için mühendislik ve istatistikte kullanılan metodolojik bir çerçevedir. Genichi Taguchi tarafından geliştirilen bu yaklaşım, süreçleri ve ürünleri optimize etme, kaliteyi artırma ve istenen sonuçlara ulaşma konusundaki etkinliği ile tanınmaktadır. Geleneksel deneysel tasarım yöntemlerinden farklı olarak Taguchi DOE, faktörlerin ve etkilerinin bağımsız olduğunu varsaymaktadır. Bu varsayım, her bir faktörün etkisinin diğerlerinden izole edilmesine olanak tanıyarak bireysel katkıları hakkında net bilgiler sağlamaktadır (Yüksel 2023).

Taguchi analizinin birincil amacı, minimum sayıda deneysel denemeden maksimum miktarda bilgi elde etmektir. Bu verimlilik, deneylerin dengeli olmasını ve her bir faktörün seviyelerinin sistematik olarak değişmesini sağlayan ortogonal dizilerin kullanılmasıyla elde edilir. Deneylerin bu şekilde yapılandırılmasıyla, çok sayıda denemeye gerek kalmadan optimum koşulların ve faktörler arasındaki etkileşimlerin belirlenmesi mümkün hale gelir (Mahapatra ve Patnaik 2009). Taguchi yönteminin amacı, üretim maliyetlerini ve üretim süreçlerindeki tutarsız değişkenliği azaltmak için sürecin performans karakteristiği için hedef değeri (τ) ile ölçülen değer (y) arasındaki

farkı (bir kayıp fonksiyonu olarak) belirterek tanımlamaktır. Eşitlik (3.1)'de gösterilmiştir.

$$L(y) = kc(y - \tau)^2 \quad (3.1)$$

Eğer performans karakteristiği değerini en aza indirmek amaçlanıyorsa, $\tau = 0$ ve kayıp fonksiyonu Eşitlik (3.2) olarak ifade edilir:

$$L(y) = kc(y)^2 \quad (3.2)$$

Eğer performans karakteristiği değerini en üst düzeye çıkarmak amaçlanıyorsa, kayıp fonksiyonu Eşitlik (3.3) olarak ifade edilir:

$$L(y) = \frac{kc}{(y)^2} \quad (3.3)$$

Taguchi metodolojisi, temel yanıt değişkenlerini sıkça S/N oranları olarak adlandırılan amaç fonksiyonlarının seçimi ile belirlemektedir. En yaygın olarak kullanılan üç fonksiyon "daha küçük daha iyi", "daha büyük daha iyi" ve "nominal daha iyi"dir. Bu fonksiyonlar, Taguchi tekniğinde S/N oranlarının seçiminde kritik bir rol oynamaktadır. Her bir parametrenin çıktı üzerindeki etkisini belirlemek için sinyal-gürültü oranı (S/N oranı) hesaplanmalıdır. Eşitlik 3.4'de y_i performans karakteristiğinin ortalama değeri, s_i varyansı, i deney sayısını, N_i toplam deney sayısını ve u belirli bir deney için deneme sayısı olarak tanımlanmaktadır (Yalçın 2023).

$$S/N_i = 10 \log \frac{y_i^2}{s_i^2} \quad (3.4)$$

Performans karakteristiğini en aza indirmek için Eşitlik 3.5'deki S/N oranının aşağıdaki tanımı hesaplanmalıdır:

$$S/N_i = -10 \log \left(\frac{1}{N_i} \sum_{u=1}^{N_i} \frac{y_u^2}{N_i} \right) \quad (3.5)$$

Performans karakteristiğini en üst düzeye çıkarmak istenildiğinde, Eşitlik 3.6'daki S/N oranının aşağıdaki tanımı hesaplanmalıdır:

$$S/N_i = -10 \log\left(\frac{1}{N_i} \sum_{u=1}^{N_i} \frac{1}{y_u^2}\right) \quad (3.6)$$

Taguchi, sürekli ölçümleri karşılaştırmak ve çıktı ölçümlerinin üzerindeki faktörlerin anlamlılığını belirlemek için kullanılan bir varyans analizidir. Ölçümler üzerindeki F faktörleri, bir nicel "yanıt değişkeni" ile önerilen bir açıklayıcı "faktör" arasındaki ilişkiye bakarak gerçekleştirilir. Bir değişken, genellikle F istatistiği kullanılarak bir veya daha 52 fazla açıklayıcı faktörle ilişkilendirilmektedir. Bu F istatistiği kullanılarak elde edilen p değeri, farkın anlamlı olup olmadığını görmek için hesaplanmaktadır. F değeri, yanıtla ilişkili olup olmadığını belirlemek için kullanılan bir test istatistiğidir. p değeri ise genellikle 0,05 anlamlı düzeyde kabul edilir ve bu sonuca varma riskinin %5 olduğunu göstermektedir. P değerinin 0,10 - 0,05 aralığında, olduğunda ise sınırda bir anlamlılık olduğu anlamına gelmektedir (Yüksel 2023).

Pratik açıdan Taguchi yöntemi, faktörlerin ve seviyelerin seçimi, ortogonal dizinin oluşturulması, faktörlerin diziye atanması ve dizinin konfigürasyonuna göre deneylerin yürütülmesi dahil olmak üzere birkaç temel adımı içerir. Veriler toplandıktan sonra, her bir faktörün etkisini belirlemek ve optimum ayarları tanımlamak için istatistiksel analiz yapılır. Bu çalışmada, her biri iki seviyede 15'e kadar faktörün değerlendirilmesine olanak tanıyan ve deneysel alanı verimli bir şekilde keşfetmek için sağlam bir çerçeve sağlayan L16 ortogonal dizisi seçilmiştir. Bu yapılandırılmış yaklaşım sayesinde çalışma, mikro delme işlemi parametrelerini optimize etmeyi ve böylece sonuçların kalitesini ve hassasiyetini artırmayı amaçlamaktadır.

Kullanılan malzemeler TUSAŞ firmasından tedarik edilmiştir. Karbon elyaf takviyeli termoplastik ve karbon elyaf takviyeli termoset kompozit malzemelerin her biri 2 mm kalınlığında olmaktadır. Termoplastik malzemenin çekme mukavemeti (0°) 2280 MPa, çekme modülü (0°) 130 GPa, basma mukavemeti (0°) 1576 MPa, basma modülü 142 GPa, düzlemsel kesme mukavemeti (0°) 83,4 MPa ve termoset malzemenin çekme mukavemeti (0°) 2207 MPa, çekme modülü (0°) 141 GPa, basma mukavemeti (0°) 1531 MPa, basma modülü 128 GPa, düzlemsel kesme mukavemeti (0°) 114 MPa olan mekanik özelliklere sahiptir.

Afyon Kocatepe Üniversitesi mikro işleme laboratuvarında bulunan kesme çapı 0,7 mm, sap çapı 0,3 mm, kullanılabilir maksimum uzunluk 5,6 mm, uç açısı 130° olan karbür kaplama SECO marka mikro matkap tercih edilmiştir.

Çalışma kapsamında, bir termoplastik olan Polieter eter keton (PEEK) ve karbon fiberlerle güçlendirilmiş bir termoset kompozit malzemenin delinebilirliği deneysel olarak araştırılmış ve elde edilen bulguları Taguchi analizi ile desteklenmiştir. Bu çalışma kapsamında, iki farklı kompozit türü (TP ve TS) dört farklı ilerleme hızı (0,5, 1, 2, 4 $\mu\text{m}/\text{dev}$) ve dört farklı kesme hızı (10, 20, 30, 40 m/dak) kullanılarak işlenmiştir.

Belirlenen deney setleri ve sonuçları Çizelge 3.1’de sunulmuştur.

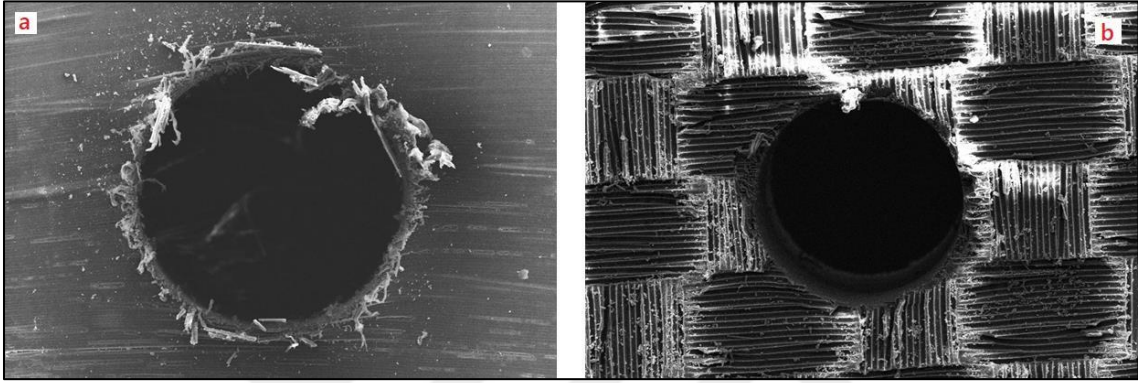
Çizelge 3.1 Taguchi L16 deney düzeneği ve sonuçları.

Deney No	Malzeme	İlerleme Oranı ($\mu\text{m}/\text{dev}$)	Kesme Hızı (m/dak)	Delme Kuvveti (N)	Takım Çapındaki % Azalma
1	TP	0,5	10	13,53	7,86
2	TP	0,5	20	11,55	8,71
3	TS	0,5	30	11,62	9,14
4	TS	0,5	40	12,18	9,59
5	TP	1	10	12,12	8,71
6	TP	1	20	9,59	9,43
7	TS	1	30	11,76	8,71
8	TS	1	40	11,73	9,43
9	TS	2	10	11,07	8,29
10	TS	2	20	9,73	9,43
11	TP	2	30	8,23	9,29
12	TP	2	40	8,44	9,14
13	TS	4	10	10,71	9,29
14	TS	4	20	10,71	11,21
15	TP	4	30	8,25	11,39
16	TP	4	40	7,49	11,43

4. BULGULAR

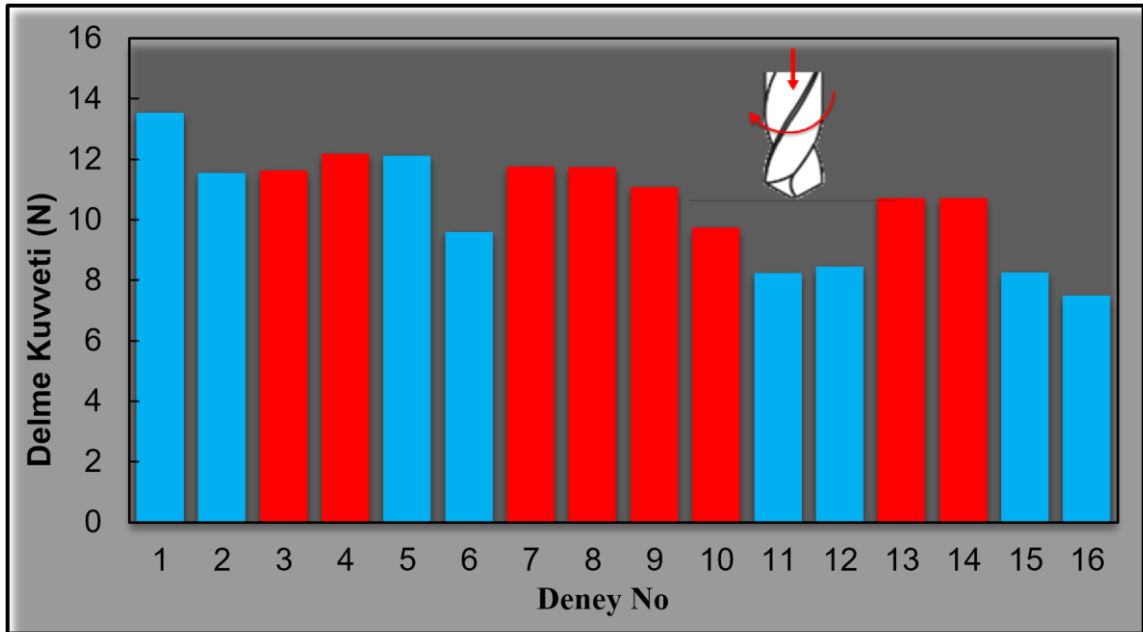
4.1 Delme Kuvveti

Çalışma kapsamında 1 adet TP ve 2 adet TS plaka üzerinde toplam 16 delik açılmıştır (8 TP ve 8 TS olmak üzere). Şekil 4.1’de TP plaka için 1 numaralı deneyden ve TS için 3 numaralı deneyden örnek SEM görüntüleri verilmiştir.



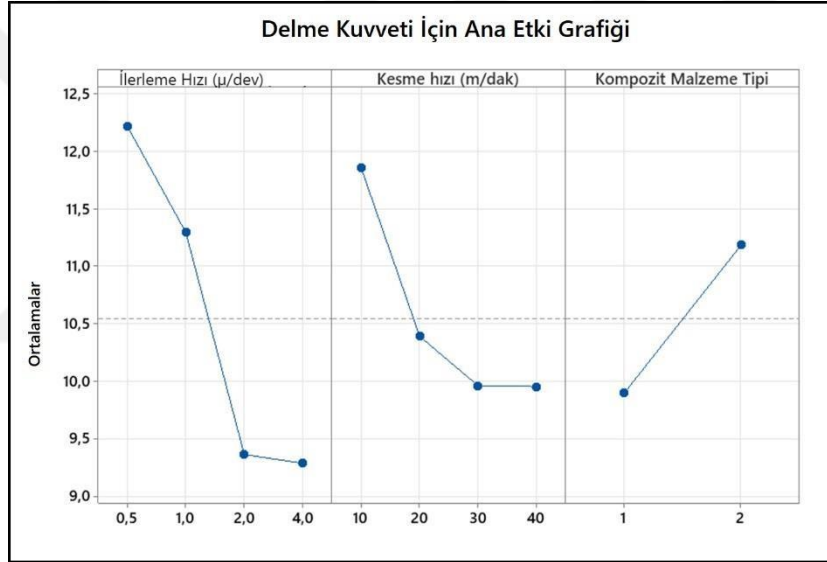
Şekil 4.1 Delme işlemine ilişkin örnek SEM görüntüleri. a) TP için 1 numaralı deney, b) TS için 3 numaralı deney.

Şekil 4.9, deneylere göre mikro delme işleminden kaynaklanan takım üzerindeki delme kuvvetinin dağılımını göstermektedir.

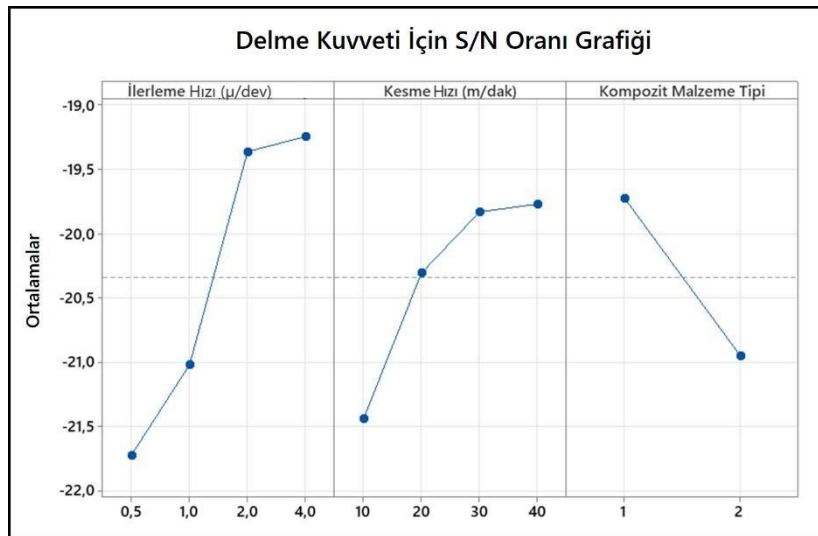


Şekil 4.2 16 adet mikro işleme deneylerinde ölçülen delme kuvvetleri.

Şekil 4.2’de sunulan grafikte mavi sütunlar TP, kırmızı sütunlar ise TS için deneylerde elde edilen maksimum delme kuvvetini göstermektedir. TP için en düşük delme kuvvetleri sırasıyla 11, 16 ve 12 numaralı deneylerde, TS için en düşük delme kuvvetleri ile sırasıyla 10, 13 ve 14 numaralı deneylerde elde edilmiştir. Şekilde yer alan her iki kompozit türü kıyaslandığında TP kompozitin TS’ye kıyasla genel olarak daha düşük delme kuvveti ürettiği söylenebilir. Bu önermeyi desteklemek için kompozit malzeme türü, ilerleme hızı ve kesme hızından oluşan delme parametrelerinin mikro delinebilirlik üzerindeki etkisini belirlemek için varyans analizi yoluyla delme kuvveti etkileri grafiği oluşturulmuştur. Sonuçlar Şekil 4.3’te sunulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 4.3 Delme kuvveti için ana etki grafiği ve delme parametrelerinin S/N oranı grafiği (a) Ana etkiler grafiği (b) parametrelerin delme kuvvetine etkisinin S/N oranı grafiği.

Şekil 4.3' te görüleceği üzere, TP (1) ve TS (2) kompozit malzemelerin mikro delinmesi sırasında elde edilen deney verileri kullanılarak, ilerleme hızı ve kesme hızı girdi parametrelerinin ölçülen delme kuvveti üzerine esas etkisi ve S/N oranlarına etkisi Taguchi analizi ile elde edilmiştir. Taguchi analizinde, en az delme kuvveti oluşumunu veren en iyi delme koşulu ve girdilerin delme kuvveti çıktısına etkisi tayin edilmiştir. Buna göre, ilerleme hızı ve kesme hızı arttıkça delme kuvvetlerinde düşme gözlemlenirken (Şekil 4.3, a) ve termoset kompozitin delinmesinde termoplastiğe göre daha fazla delme kuvveti ölçülmüştür (Şekil 4.3, a) incelendiğinde, kompozit malzemenin tipine göre delme kuvvetinin farklılaştığı görülmektedir.

Bununla birlikte tüm deney seti için ilerleme hızının artması ile ortalama delme kuvvetinin azaldığı, 4 µm/dev ilerleme hızında delme kuvvetinin minimum olduğu görülmüştür. Benzer şekilde kesme kuvvetinin artmasına bağlı olarak ortalama delme kuvvetinin de azaldığı, ancak 30 m/dak ve 40m/dak kesme hızında ortalama delme kuvvetinin benzer olduğu belirlenmiştir. Literatürde yer alan araştırmalarda ilerleme ve kesme hızının artmasına bağlı olarak sıcaklığın arttığı ve bu sıcaklık artışın kompozit malzemenin matrisinde yumuşamaya neden olarak delme kuvvetlerinin azaldığı açıklanmıştır (Weinert ve Kempmann 2004, Xu vd. 2020).

Şekil 4.3(b)'de sunulan S/N oranı grafiklerine göre en düşük delme kuvveti, TP kompozitlerde, 4 µm/dev ilerleme hızında ve 30 m/dak kesme hızındaki mikro delme işlemlerinden elde edilebilir.

Bu çıktıların incelenmesi için öncelikle genel bir doğrusal model analizi gerçekleştirilmiştir. Delme kuvvetinin genel doğrusal model analizi için model özeti Çizelge 4.1'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.1 Delme kuvvetinin genel doğrusal model analizi için model özeti.

S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)
---	----------------	----------------------	-----------------------

0,684178	%91,77	%84,56	%67,06
----------	--------	--------	--------

Çizelge 4.1 incelendiğinde, Düzeltilmiş R-kare (R^2 adj) değerinin %84,56 olduğu görülmektedir. Taguchi yönteminde Düzeltilmiş R^2 değerinin %85 ile %99 aralığında olması, tasarımın ve analizin güvenilirliğinin kabul edilebilir olduğunu göstermektedir (Bahrami 2022). Buna göre elde edilen %84,56 değeri, veri azlığına yol açan girdi sayısının yetersizliği nedeniyle, bu parametre için tahmin edilebilirlik tutarlılık oranının yeterli düzeye ulaşmadığını göstermektedir. Dolayısıyla, kurulan model tutarlı olmakla birlikte, veri eksikliğinin öngörude bulunma olasılığını engellediği tespit edilmiştir.

Çizelge 4.2’de delme kuvveti için varyans analizi tablosu yer almaktadır. p-değeri skorlarına bakıldığında, delme kuvvetini etkileyen en önemli parametrelerin ilerleme hızı ve malzeme olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.2 Delme kuvvetinin genel lineer model analizi için varyans analizi.

Değişken	df	Adj SS	Adj MS	F	p
İlerleme Hızı	3	25,365	8,4549	18,06	0,001
Kesme Hızı	3	9,721	3,2403	6,92	0,013
Malzeme	1	6,645	6,6448	14,20	0,005
Hata	8	3,745	0,4681		
Toplam	15	45,475			

Delme kuvveti için Taguchi analizindeki ikinci adım karma etki modeli analizini içermektedir. Çizelge 4.3’te sunulan analiz sonuçlarına göre, model tutarlılık oranı %91,08 olup, karma etki modeli analizinin genel doğrusal modele benzer olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.3 Delme kuvvetinin karma etki modeli analizi için model özeti.

S	R^2	R^2 (adj)	AICc	BIC
0,684178	%91,08	%91,08	63,09	61,93

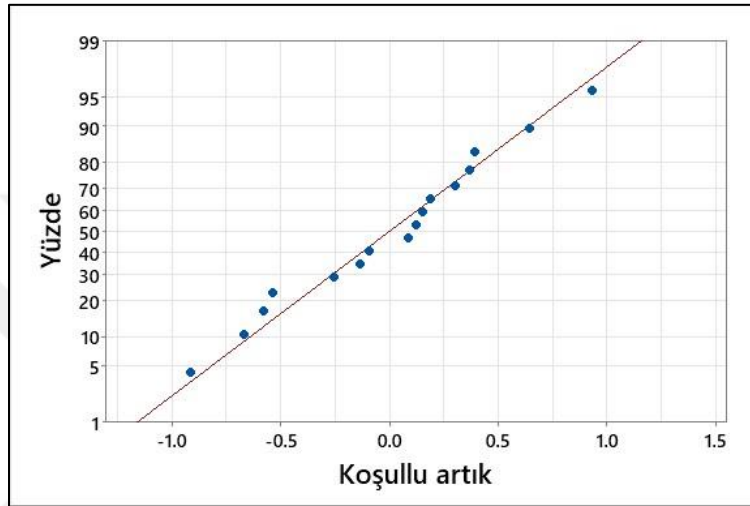
Hangi girdi parametrelerinin delme kuvveti sonucunu önemli ölçüde etkilediğini belirlemek için Çizelge 4.4’te verilen varyans bileşenlerini incelemek gerekmektedir. Buna göre, çıktı değeri üzerinde en etkili girdi parametresinin varyansın %50,81’ini oluşturan ilerleme hızı olduğu görülmektedir. Karma etki modeli analizinin sonuçlarına göre, malzeme türü genel doğrusal modele kıyasla daha düşük bir etki oranına sahiptir.

Çizelge 4.4 Delme kuvvetinin karma etki modeli analizi için varyans bileşenleri.

Değişken	Var	Katkı Oranı	p
----------	-----	-------------	---

İlerleme Hızı	1,996695	%50,81	0,124
Kesme Hızı	0,693058	%17,64	0,148
Malzeme	0,772087	%19,65	0,256
Hata	0,468099	%11,91	0,023
Toplam	3,929939		

Karma etki modeli analizinde son olarak normal olasılık grafiği incelenmiştir. Şekil 4.4'teki grafikte deney setlerini temsil eden noktaların yatay ekseninde 0 değerine yakın olması modelin ve sonuçlarının tutarlı ve kabul edilebilir olduğunu göstermektedir.



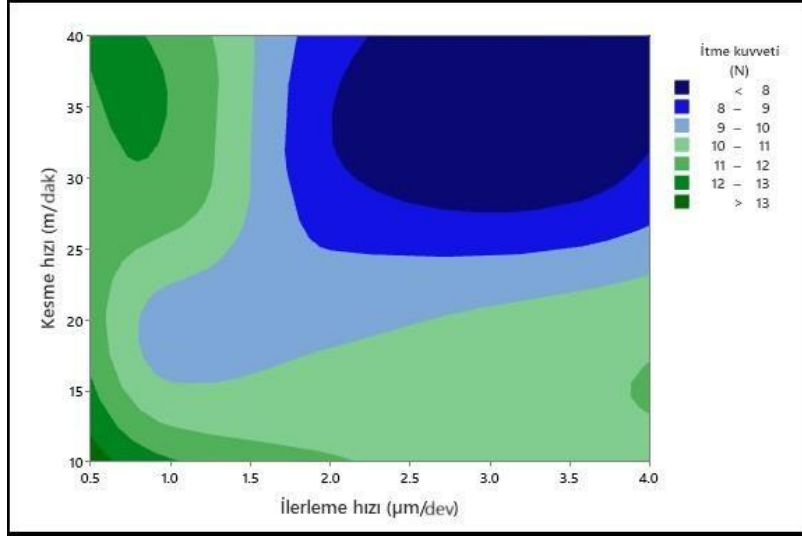
Şekil 4.4 Delme kuvvetinin normal olasılık çizimi.

Delme kuvveti için kurulan faktöriyel tasarım modelinin özeti Çizelge 4.5'te sunulmuştur. Tahmin edilen 0,6444'lük R-kare (R^2), 0,8333'lük Düzeltilmiş R^2 ile aynı hızda değildir, yani aradaki fark 0,2'den azdır. Yeterlilik Hassasiyeti S/N oranını ölçer ve bu oranın 4'ten büyük olması arzu edilir (Bahrami 2022). 9,683'lük bir oran yeterli bir düzeye işaret etmekte ve bu modelin etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. İlgili sonuçlar Çizelge 4.5'te sunulmuştur.

Çizelge 4. 5 Delme kuvvetinin faktöriyel tasarım modeli analizi için model özeti.

Std. Sap.	0,7109	R^2	0,9111
Ortalama	10,54	Ayarlanmış R^2	0,8333
C.V. %	6,74	Tahmin Edilen R^2	0,6444
		Yeterlilik Hassasiyeti	9,6828

Son olarak Şekil 4.5'te, kesme hızı ve ilerleme hızı parametrelerinin etkisi altındaki delme kuvvetinin üç boyutlu dağılımı verilmiştir.



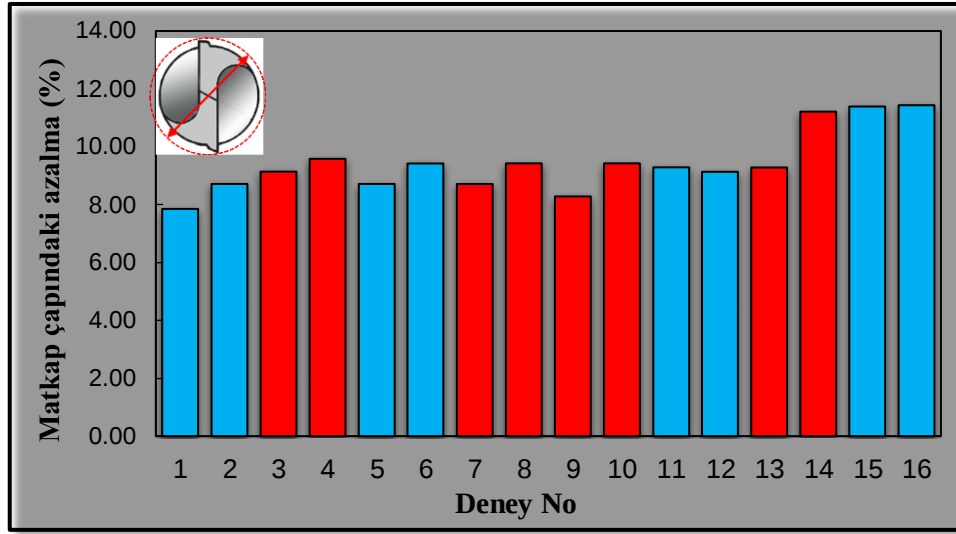
Şekil 4.5 Delme kuvvetinin 3 boyutlu dağılım grafiği.

4.2 Mikro Matkap Çapında Değişim

Taguchi analizlerine tabi tutulan bir diğer parametre mikro matkap çapında yüzde değişimdir. Mikro delme testleri sonrası takım çapındaki değişim, yeni matkap çapı ile test sonrası ölçülen matkap çapı kullanılarak

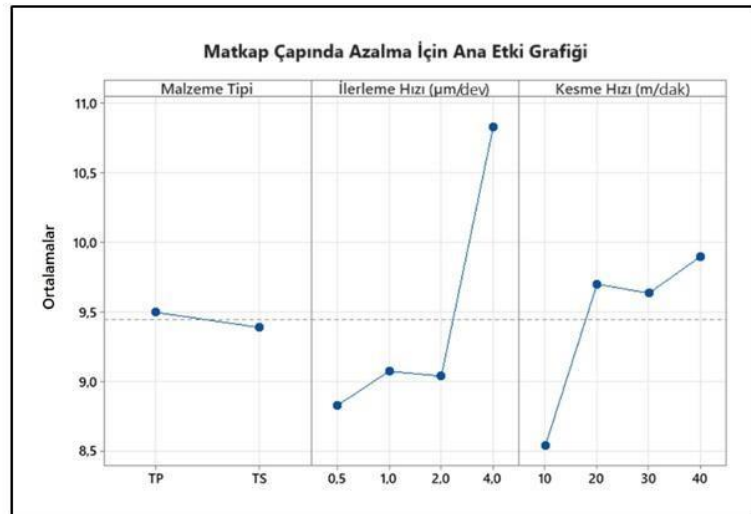
$$\frac{(\text{Sıfır takım çapı} - \text{işleme sonrası ölçülen takım çapı})}{\text{sıfır takım çapı}} \quad (4.1)$$

eşitlikle % azalma olarak nitelendirilmiş ve deneylere göre dağılımın Şekil 4.6' da verilmiştir. Grafikte mavi sütunlar TP, kırmızı sütunlar ise TS için deneylerde elde edilen matkap çapındaki azalmayı yüzdesel olarak göstermektedir.

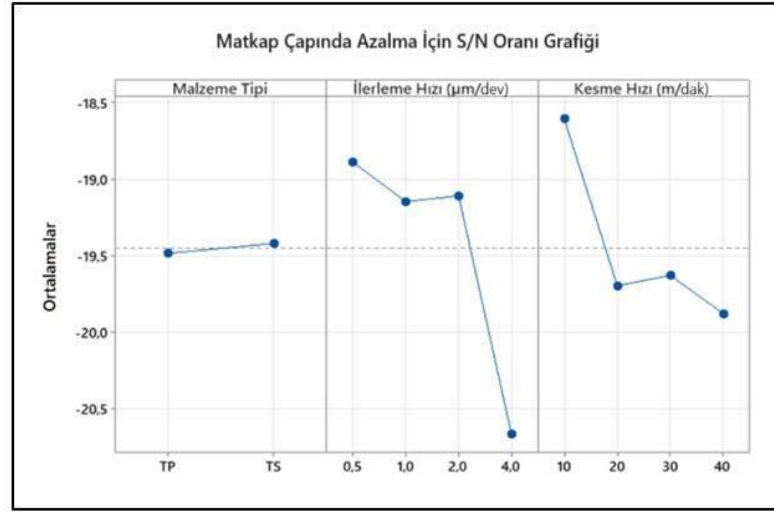


Şekil 4.6 16 adet mikro delme deneyi için ölçülen takım çapında % azalma grafiği.

Şekil 4.6'ya göre TP için en düşük matkap çapındaki azalma sırasıyla 1, 2 ve 5 numaralı deneylerde, TS için en düşük matkap çapındaki azalma ise sırasıyla 9, 7 ve 3 numaralı deneylerde elde edilmiştir. Şekilde yer alan her iki kompozit türü kıyaslandığında TS kompozitin TP'ye kıyasla genel olarak daha düşük matkap çapındaki azalma görüldüğü söylenebilir. Bu önermeyi desteklemek için kompozit malzeme türü, ilerleme hızı ve kesme hızından oluşan delme parametrelerinin mikro delinebilirlik üzerindeki etkisini belirlemek için varyans analizi yoluyla matkap çapındaki azalma etkileri grafiği oluşturulmuştur. Sonuçlar Şekil 4.7'de sunulmuştur.



(a)



(b)

Şekil 4.7 Matkap çapında azalma için ana etki grafiği ve delme parametrelerinin S/N oranı grafiği (a) Ana etkiler grafiği (b) parametrelerin delme kuvvetine etkisinin S/N oranı grafiği.

Şekil 4.7(a) incelendiğinde, kompozit malzemenin tipine göre matkap çapında azalma küçük bir düzeyde farklılaştığı görülmektedir. Buna göre TS kompozitler için matkap çapındaki azalma %9,21 olup bu değer TP kompozitler için hesaplanan %9,68 matkap çapındaki azalma düşüktür.

Bununla birlikte tüm deney seti için ilerleme hızının artması ile matkap çapında azalma oranının arttığı, 0,5 µm/dev ilerleme matkap çapında azalma oranının minimum olduğu görülmüştür. Benzer şekilde kesme kuvvetinin artmasına bağlı olarak ortalama matkap çapında azalmanın da arttığı, 20 m/dak'da bu artışın bozulduğu ve 30 m/dak ile 40 m/dak kesme hızlarında tekrar arttığı belirlenmiştir. Literatürde yer alan araştırmalarda ilerleme oranının matkap çapında azalmada en önemli unsur olduğu, genel olarak kompozitlerde düşük ilerleme ve kesme hızlarının matkap çapında değişimi azalttığı rapor edilmiştir (Davim vd. 2004, Mohan vd. 2007, Liu vd. 2012).

Şekil 4.7(b)'de sunulan S/N oranı grafiklerine göre en düşük matkap çapında azalma, TS kompozitlerde, 0,5 µm/dev ilerleme hızında ve 10 m/dak kesme hızındaki mikro delme işlemlerinden elde edilebilir.

Bu çıktılarının incelenmesi için öncelikle bir genel doğrusal model analizi gerçekleştirilmiştir. Matkap çapında azalma yüzde değişimin genel doğrusal model analizi için model özeti aşağıdaki Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6 Matkap çapında azalma % değişimin genel lineer model analizi için model özeti.

S	R ²	R ² (adj)	R ² (pred)
0,442569	%90,53	%82,25	%62,13

Bu model için tutarlılık oranı %90,53’tür. Ancak girdi sayısının yetersiz olması nedeniyle tahmin edilebilirlik tutarlılık oranı istenilen düzeyde sağlanamamıştır. Çizelge 4.7’de matkap çapındaki azalma değeri için varyans analizi tablosu yer almaktadır. Fdeğeri skorları incelendiğinde, matkap çapındaki azalmayı etkileyen en etkili parametrenin ilerleme hızı olduğu, malzeme türünün ise önemli bir etkisinin olmadığı

görülmektedir.

Çizelge 4.7 Matkap çapında azalma % değişimin genel lineer model analizi için varyans analizi.

Değişken	df	Adj SS	Adj MS	F	p
İlerleme Hızı	3	10,4226	3,47420	17,74	0,001
Kesme Hızı	3	4,5149	1,50498	7,68	0,010
Malzeme	1	0,0475	0,04746	0,24	0,636
Hata	8	1,5669	0,19587		
Toplam	15	16,5519			

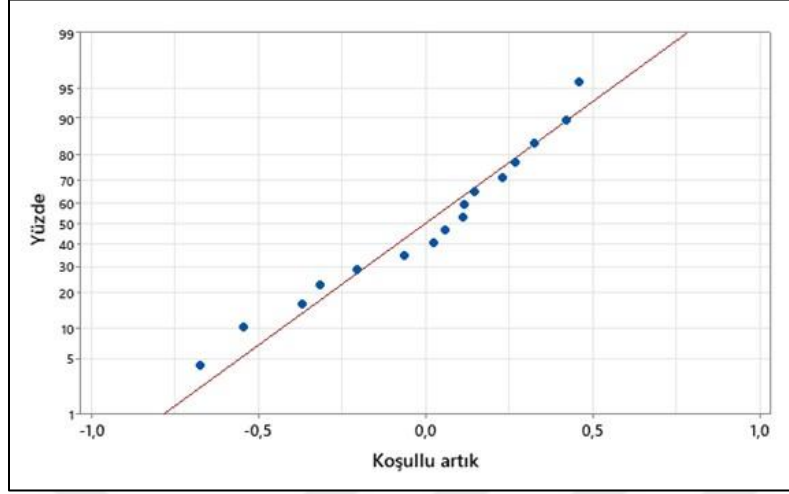
Matkap çapında azalma için yapılan karma etki modeli analizinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Çizelge 4.8’deki varyans bileşenleri incelendiğinde, sonuca en fazla katkı sağlayan parametrenin ilerleme hızı olduğu, malzeme tipinin ise %0 katkı ile tamamen etkisiz kaldığı görülmektedir.

Çizelge 4.8 Matkap çapında azalma % değişimin karma etki model analizi için varyans analizi.

Kaynak	Var	Katkı	p
İlerleme Hızı	0,823705	%61,72	0,123
Kesme Hızı	0,331400	%24,83	0,141
Malzeme	0,000000	%0,00	*
Hata	0,179378	%13,44	0,017
Toplam	1,334483		

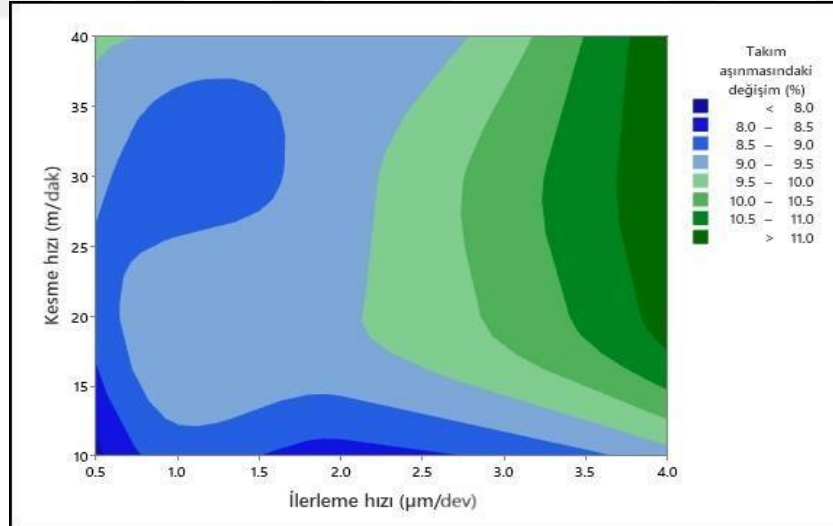
Karma etki modeli analizinde son olarak matkap çapında azalmanın yüzde değişimi için normal olasılık grafiği incelenmiştir. Şekil 4.8’deki grafikte deney setlerini temsil eden

noktaların yatay eksende 0 değerine yakın olması modelin ve sonuçlarının tutarlı ve kabul edilebilir olduğunu göstermektedir.



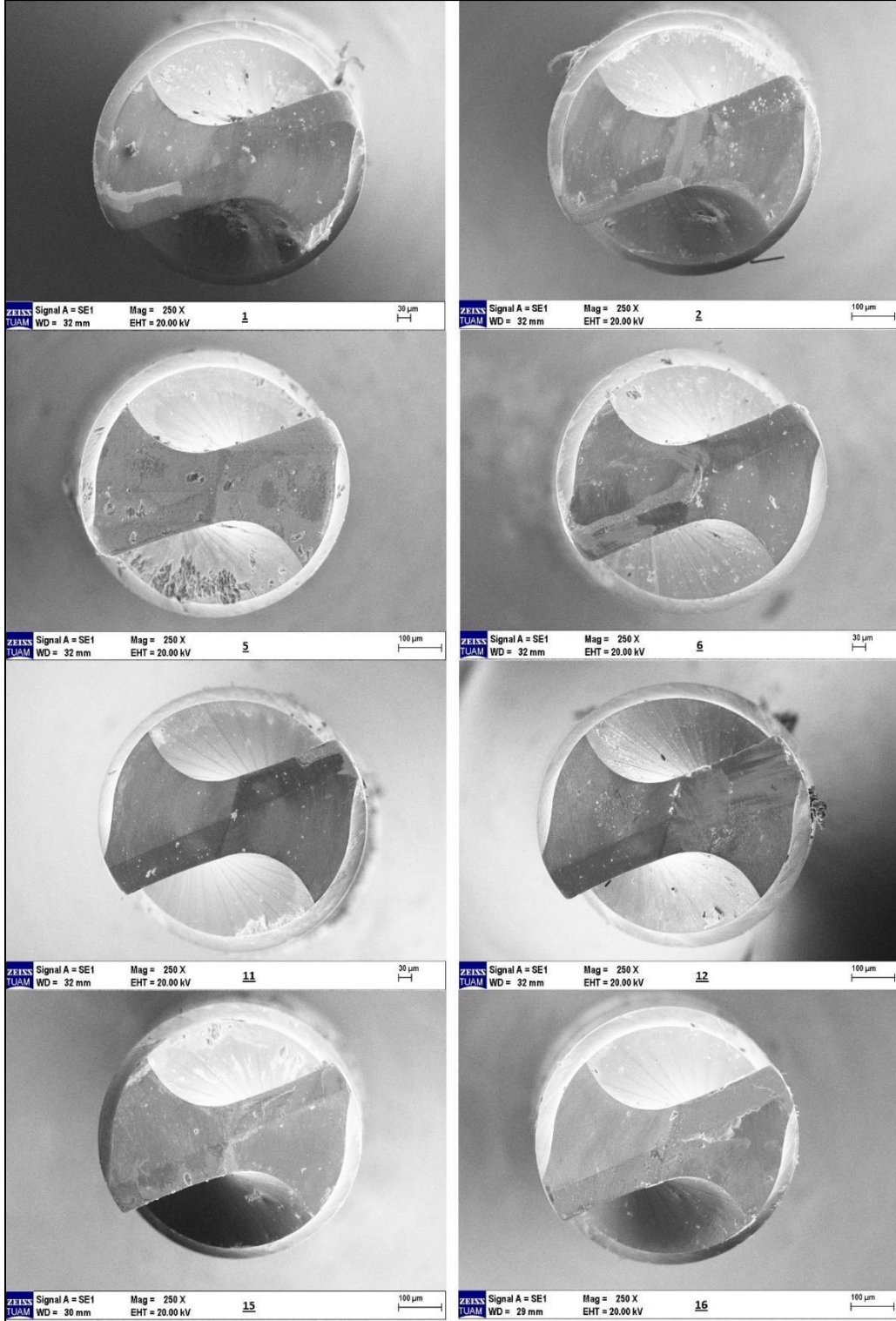
Şekil 4.8 Matkap çapında azalma % değişimin normal olasılık grafiği.

Şekil 4.9’da, kesme hızı ve ilerleme hızı parametrelerinin etkisi altında matkap çapında azalmanın % değişimin üç boyutlu dağılımı gösterilmektedir.

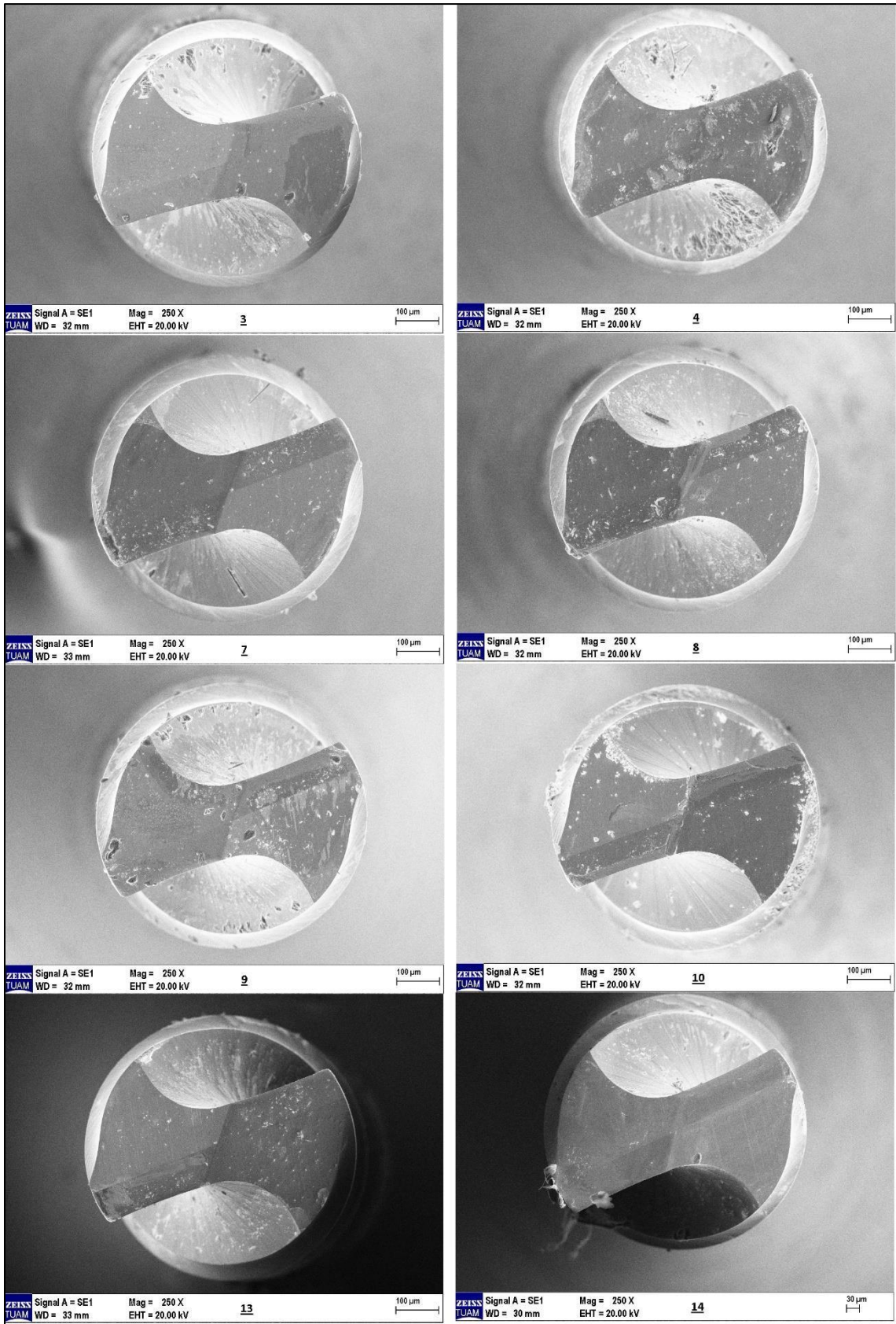


Şekil 4.9 Matkap çapında azalma % değişimin 3 boyutlu dağılım grafiği.

Şekil 4.10’da TP malzemeler, Şekil 4.11’de ise TS malzemelerin mikro delme işleminde kullanılan matkap çapında azalmayı gösteren SEM görüntüleri sunulmuştur.



Şekil 4.10 TP malzemelerde kullanılan matkap çaplarının SEM görüntüleri.



Şekil 4.11 TS malzemelerde kullanılan matkap çaplarının SEM görüntüleri.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tezinde, havacılık ve savunma uygulamalarında sıklıkla tercih edilen termoplastik (PEEK) esaslı karbon elyaf takviyeli lamine kompozitin mikro delinmesi ile termoset esaslı karbon elyaf takviyeli lamina kompozitin mikro delinmesi sırasında oluşan delme kuvveti ve matkap çapındaki değişim (% çapsal azalma) deneysel mukayese edilmiştir. Bu amaçla L16 Taguchi deney tasarımı yapılmış olup, buna göre 16 adet mikro delme deneyi yapılmıştır. Her deney beş tekrar ile gerçekleştirilmiş ölçümlerin ortalaması alınarak Taguchi analizine tabi tutulmuştur. Taguchi deney tasarımı, termoplastik (TP) ve termoset (TS) olmak üzere iki farklı test malzeme tipi, dört farklı ilerleme hızı (0,5, 1, 2 ve 4 $\mu\text{m}/\text{dev}$) ve dört farklı kesme hızı (10, 20, 30 ve 40 m/dak) girdi olarak; delme kuvveti ve mikro matkap çapındaki azalma oranı çıktı olarak belirlenmiştir. Yapılan mikro delme sonuçlarına göre aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

- Buna göre, karbon takviyeli termoset kompozitin mikro delinmesinde delme kuvveti, PEEK termoplastik esaslı karbon takviyeli kompozitin mikro delinmesi sırasında oluşan delme kuvvetinden daha fazla ölçülmüştür.
- Mikro delme sırasında, ilerleme ve kesme hızı değerlerinin artmasıyla delme kuvvetinin arttığı görülmüştür.
- S/N oranları grafiklerine göre; delme kuvvetini ve mikro matkap çapındaki azalma oranını en fazla etkileyen parametre ilerleme hızı olmuştur, ikinci kesme hızı ve sonuncu ise kompozit malzeme tipi olarak sıralanmıştır.
- TP ve TS kompozitler için delme kuvveti üzerinde malzeme türü ile birlikte ilerleme hızı ve kesme hızının anlamlı etkisi bulunmaktadır. Hem ilerleme hem de kesme hızındaki artışlar delme kuvvetinde azalma ortaya çıkarmıştır. Delme kuvvetinde en önemli etki ilerleme hızının etkisi (%50,81) olarak ortaya çıkmış, malzeme türünün etkisi (%19,65) ve kesme hızının etkisi (%17,64) bunu izlemiştir.
- Matkap çapında azalma açısından yapılan analizlerde genel olarak, TP malzemede TS'ye kıyasla daha yüksek aşınma oranları gözlemlenmiştir, bu da TP'nin işlenmesinin mikro matkaba daha fazla zarar verebileceğini düşündürmektedir.

Ancak kurulan regresyon modelinde malzeme türünün matkap çapında azalma üzerinde anlamlı etkisi olmadığı görülmüştür.

- TP ve TS kompozitlerin mikro delinebilirliğindeki matkap çapında azalmada etkili olan faktörler ilerleme hızı ve kesme hızı olarak belirlenmiştir. İlerleme hızının matkap çapında azalma üzerindeki etkisi %61,72, kesme hızının etkisi de %24,83 olarak belirlenmiştir.
- Son olarak, daha sonra yapılacak çalışmalara mikro delik giriş ve çıkışında meydana gelen çapak yüksekliklerinin ölçülmesi ve görüntülenmesi, çapakları gidermeye yönelik mikro delme parametrelerinin optimizasyonu ve çapakların ortadan kaldırılmasıyla ilgili yöntemlerin geliştirilmesine yönelik araştırmaların yapılması tavsiye edilebilir.
- Mikro deliklerin küçük boyut etkisinden dolayı delik kalitesini belirleme zorluğu bulunmaktadır. Özellikle bu alandaki zorluğun aşılabilmesi için araştırmalar planlanabilir. Mikro delik delemasyonu ile ilgili çalışmaların yapılması tavsiye edilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Abrate S, Walton D A, 1992, Machining of Composite Materials Part I: Traditional Methods, Composites Manufacturing, 3(2), 75-83.
- Absi C, Alsinani N, Lebel L L, 2022, Carbon Fiber Reinforced Poly (Ether Ether Ketone) Rivets for Fastening Composite Structures, Composite Structures, 280, 114877.
- Acer S, 2023, Elektron Işını Ergitme Yöntemi ile Üretilmiş Ti-6Al-4V Malzemenin Mikro Delme İşleminde Kesici Takımı Etkileyen Kuvvet ve Titreşimin Analiz Edilmesi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Agarwal B D, Broutman L J, Agarwal B D, 1990, Analysis and Performance of Fiber Composites, John Wiley & Sons.
- Ahmad F, Manral A, Bajpai P K, 2019, Machining of Thermoplastic Composites, Processing of Green Composites, 107-123.
- Alqurashi H, Khurshid Z, Syed A U Y, Habib S R, Rokaya D, Zafar M S, 2021, Polyetherketoneketone (PEKK): An Emerging Biomaterial for Oral Implants and Dental Prostheses, Journal of Advanced Research, 28, 87-95.
- Anand R S, Patra K, 2018, Cutting Force and Hole Quality Analysis in Micro-Drilling of CFRP, Materials and Manufacturing Processes, 33(12), 1369-1377.
- Andrzejewski J, 2023, the Use of Recycled Polymers for the Preparation of SelfReinforced Composites by the Overmolding Technique: Materials Performance Evaluation, Sustainability, 15(14), 11318.
- Arıcı M Y, 2023, Farklı Fiber Yönlerinde Üretilen Epoksi Polimer Matrisli Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Borularda İşlenebilirliğin Araştırılması, Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Düzce.
- Asi D, 2018, Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerde İlave Olarak Kullanılan Parçacıkların Geometrisinin Kompozit Malzemelerin Fiziksel ve Mekaniksel Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Uşak Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Uşak.

- Augustsson C, 2004, Nm Epoxy Handbook, Nils Malmgren Ab, Kungälv.
- Bahar A M, 2009, Pultrüzyon Yöntemiyle CTP Üretimi ve Üretim Parametrelerinin Malzeme Nihai Özelliklerine Etkisi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Yıldız Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Bahrami T, 2022, Ürün Tasarımı Geliştirmesinde Taguchi Deney Tasarımının Uygulanması, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85s, Ankara.
- Bajpai P K, Singh I, 2013, Drilling Behavior of Sisal Fiber-Reinforced Polypropylene Composite Laminates, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 32(20), 1569-1576.
- Bakırcı A, Koçak C, Yamaç Ö, Çakır M C, 2023, Tek Proseste Kompaund Elde Edebilen Tandem Bir Sistemle Yapılan Termoplastik Geri Dönüşümünün Çevreye ve Dünyaya Faydaları, Orelever Proceedings of Research and Development, 3(1), 647-658.
- Balasubramanian M, 2014, Composite Materials and Processing, CRC Press, New York.
- Balcı A, 2023, Investigation of Effects of Heat Treatment and Hot Isostatic Pressing on Micro-Drilling of Additively Manufactured Ti6Al4V Alloy, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Basso I, Batista M F, Jasinevicius R G, Rubio J C C, Rodrigues A R, 2019, Micro Drilling of Carbon Fiber Reinforced Polymer, Composite Structures, 228, 111312.
- Bayraktar Ö, 2016, Ön Gerilimli Karbon Elyaf Takviyeli Kompozit Üretimi İçin Sistem Tasarımı, İmalatı ve Kompozit Malzeme Üretimi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Benzait Z, Trabzon L, 2018, A Review of Recent Research on Materials Used in Polymer–Matrix Composites for Body Armor Application, Journal of Composite Materials, 52(23), 3241-3263.
- Browne A L, Johnson N L, Botkin M E, 2007, Composite Crash Box: Roll Wrap Fabrication and Dynamic Axial Crush Performance, in ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 43106, 305-312.

- Bulut M, 2014, Türkiye’de Kompozit Malzeme Üretimi ve Kompozit Malzeme Sektörünün Genel Değerlendirilmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans, Ankara.
- Buyrul F, 2022, Aramid Elyaf Takviyeli Polimer Matris Kompozitlerin Mekanik Deney Sonuçlarının Yapay Sinir Ağlarıyla Tahminleri ve İstatistiksel Analizleri, International Journal of Engineering Research and Development, 14(1), 271281.
- Cagar P, 2021, Endüstriyel Ürünlerin Tasarımında Yaygın Yer Edinen Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin Özellikleri, Turkish Journal of Fashion Design and Management, 3(2), 79-88.
- Callister W D, Rethwisch DD, 2013, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Nobel Akademi, İstanbul.
- Campbell F C, 2003, Manufacturing Processes for Advanced Composites, Elsevier Science, Missouri.
- Castanie B, 2016, Composite Structures in Aeronautics: Past, Present and Future, in the 5th Burapha University International Conference, July 28-29, Pattaya, Thailand.
- Cheong M S, Cho D W, Ehmann K F, 1999, Identification and Control for MicroDrilling Productivity Enhancement, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 39(10), 1539-1561.
- Crawford R J, 2002, Plastics Engineering, St Edmundsbury Press Ltd, London.
- Czech K, Oliwa R, Krajewski D, Bulanda K, Oleksy M, Budzik G, Mazurkow A, 2021, Hybrid Polymer Composites Used in the Arms Industry: A Review, Materials, 14(11), 3047.
- Çetindağ H A, 2019, An Investigation on the Influence of Different Cooling/Lubrication Techniques on the Tool Wear and Surface Integrity in the Hard Turning of AISI 52100 Bearing Steel, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Davim J P, Reis P, Antonio C C, 2004, Experimental Study of Drilling Glass Fiber Reinforced Plastics (GFRP) Manufactured by Hand Lay-Up. Composites Science and Technology, 64(2), 289-297.

- Deniz M E, 2005, Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri ve Isıl İşleme Presleme Tekniğini Kullanarak Kompozit Malzeme Üretecek Bir Düzenegın Tasarım ve İmalatı, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Şanlıurfa.
- Dodiuk H, 2021, Handbook of Thermoset Plastics, William Andrew, New York.
- Dong C, Zhou J, Ji X, Yin Y, Shen X, 2019, Study of the Curing Process of Carbon Fiber Reinforced Resin Matrix Composites in Autoclave Processing, Procedia Manufacturing, 37, 450-458.
- Durgun İ, Vatansever O, Ertan R, Yavuz N, 2014, Otomotiv Sektöründe Kullanılan Kompozit Parça İmalat Yöntemlerinin Deneyisel Olarak Karşılaştırılması, Engineer & the Machinery Magazine, 649, 1-49.
- Durgun, 2013, II Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu Vakum İnfüzyon Yöntemi ile Karbon Fiber Motor Kaput Üretimi, İzmir.
- Ekuase O A, Anjum N, Eze V O, Okoli O I, 2022, A Review on the Out-Of-Autoclave Process for Composite Manufacturing, Journal of Composites Science, 6(6), 172.
- El-Ghaoui K, Chatelain J F, Ouellet-Plamondon C, 2019, Effect of Graphene on Machinability of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP), Journal of Manufacturing and Materials Processing, 3(3), 78.
- Elias H G, 2003, An Introduction to Plastics, John Wiley & Sons, New Jersey.
- Eryıldız E, Eker A A, 2015, Savunma Sanayinde Kullanılan İleri Kompozit Malzemeler ve Uygulama Alanları, International Journal of Engineering Research and Development, 7(4), 8-12.
- Feraboli P, Kawakami H, Wade B, Gasco F, DeOto L, Masini A, 2012, Recyclability and Reutilization of Carbon Fiber Fabric/Epoxy Composites. Journal of Composite Materials, 46(12), 1459-1473.
- Friesem D, Boaretto E, Eliyahu-Behar A, Shahack-Gross R, 2011, Degradation of Mud Brick Houses in An Arid Environment: A Geoarchaeological Model, Journal of Archaeological Science, 38(5), 1135-1147.

- Geier N, Patra K, Anand R S, Ashworth S, Balázs B Z, Lukács T, Davim J P, 2023, A Critical Review on Mechanical Micro-Drilling of Glass and Carbon Fibre Reinforced Polymer (GFRP and CFRP) Composites, *Composites Part B: Engineering*, 254, 110589.
- Ghosh A K, Dwivedi M, Ghosh A K, 2020, Advantages and Applications of Polymeric Composites, *Processability of Polymeric Composites*, 29-57.
- Gong Y, 2001, Modeling and Simulation of Micro-Drilling Dynamics, Unpublished Doctoral Dissertation, Northwestern University.
- Güzel G, 2016, Epoksi Reçinesi- Yüksek Fırın Cürufu / Yer Fıstığı Kabuğu Tozu Kompozitlerinin Hazırlanması ve Özelliklerinin İncelenmesi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya.
- Haghshenas M, 2016, Metal–Matrix Composites, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Elsevier Publications, 1-28.
- Hasan M, Zhao J, Jiang Z, 2017, A Review of Modern Advancements in Micro Drilling Techniques, *Journal of Manufacturing Processes*, 29, 343-375.
- Henning F, Kärger L, Dörr D, Schirmaier F J, Seuffert J, Bernath A, 2019, Fast Processing and Continuous Simulation of Automotive Structural Composite Components, *Composites Science and Technology*, 171, 261-279.
- Herman F M, 2004, Encyclopedia of Polymer Science and Technology, John Wiley & Sons Inc, 2, 307-328.
- 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.
- Huang G, Wan Z, Yang S, Li Q, Zhong G, Wang B, Liu Z, 2023, Mechanism Investigation of Micro-Drill Fracture in PCB Large Aspect Ratio Micro-Hole Drilling, *Journal of Materials Processing Technology*, 316, 117962.
- Hull D, Clyne T W, 1996, An Introduction to Composite Materials, 2nd Edition, Cambridge University Press, Cambridge.

- Imamura T, Yamaguchi Y, 1995, Composite Materials for Aircraft Structures, Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 43, 213-223.
- Imran M, 2010, Feasibility and Process Development of Mechanical Micro Drilling for Nickel Based Super Alloys, Unpublished Doctoral Dissertation, the University of Manchester.
- Işık A, 2008, Kompozit Malzemeden İmal Edilmiş Bir Takviye Elemanın Eğilme ve Burulma Yüğü Altında Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- İnançer G, 2015, Farklı Takviye Malzemeli Plastik Kompozitlerin Darbe Davranışına Çevrenin Etkisi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İzmir.
- Kalemtaş A, 2014, Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış, Putech & Composites, 22, 18-30.
- Kandelbauer A, Tondi G, Zaske O C, Goodman S H, 2022, Unsaturated Polyesters and Vinyl Esters, in Handbook of Thermoset Plastics, 97-158, William Andrew Publishing.
- Kara M, 2021, Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yama ile Tamir Edilmiş Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Konya.
- Kaya A, 2016, Kompozit Malzemeler ve Özellikleri, Putech & Composites, 29, 38-45.
- Kayabaş Ö, 2018, Polimer Matrisli Kompozitlerin Nanopartikül Takviyesi İle Mekanik Özelliklerinin Gelişiminin Araştırılması, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.
- Keimel F A, 2003, Historical Development of Adhesives and Adhesive Bonding, Handbook of Adhesive Technology, 1-12.
- Khan L A, Mehmood A H, 2016, Cost-Effective Composites Manufacturing Processes for Automotive Applications, Lightweight Composite Structures in Transport: Design, Manufacturing, Analysis and Performance, 93-119.

- Kim J, Dornfeld D A, 2002, Development of An Analytical Model for Drilling Burr Formation in Ductile Materials, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 124(2), 192-198.
- Korkmaz N, 2014, Karbon Elyaf Takviyeli Dokuma Kumaş İçeren Kompozit Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi Üzerine Bir Çalışma, Süleyman Demirel Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Koruvatan A, 2008, Farklı Kür Sıcaklığı ve Sürelerinde Üretilen Tabakalı Kompozit Plakaların Pimli/Civatalı Bağlantılarının Hasar Analizinin İncelenmesi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Balıkesir.
- Krauklis A E, Karl C W, Gagani A I, Jorgensen J K, 2021, Composite Material Recycling Technology—State-Of-The-Art and Sustainable Development for the 2020s, *Journal of Composites Science*, 5(1), 28.
- Kudla L, 2001, Influence of Feed Motion Features on Small Holes Drilling Process, *Journal of Materials Processing Technology*, 109(3), 236-241.
- Kudla L A, 2006, Deformations and Strength of Miniature Drills, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220(3), 389-396.
- Kudla L A, 2011, Fracture Phenomena of Microdrills in Static and Dynamic Conditions, *Engineering Fracture Mechanics*, 78(1), 1-12.
- Kuppusamy R R P, Rout S, Kumar K, 2020, Advanced Manufacturing Techniques for Composite Structures Used in Aerospace Industries, *Modern Manufacturing Processes*, 3-12.
- Leblebicier B, Asi O, 2022, Pultrüzyon Yöntemi ile Üretimi Yapılan Kompozit Malzemelerin Sıcaklık Şoku Testi Sonucunda Mekaniksel Özelliklerinin İncelenmesi, *Uşak Üniversitesi Fen ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 6(1), 1-10.
- Li D, Li X, Dai J, Xi S, 2018, A Comparison of Curing Process-Induced Residual Stresses and Cure Shrinkage in Micro-Scale Composite Structures with Different Constitutive Laws. *Applied Composite Materials*, 25, 67-84.

- Li G, 2014, Self-Healing Composites: Shape Memory Polymer Based Structures, SelfHealing Composites: Shape Memory Polymer Based Structures, John Wiley & Sons, New Jersey.
- Liu D, Tang Y, Cong W L, 2012, A Review of Mechanical Drilling for Composite Laminates. Composite Structures, 94(4), 1265-1279.
- Lubin G, 1982, Handbook of Composites, Van Nostrand Reinhold, Chicago.
- Lukaszewicz D H J A, Ward C, Potter K D, 2012, the Engineering Aspects of Automated Prepreg Layup: History, Present and Future, Composites Part B: Engineering, 43(3), 997-1009.
- Mahapatra S S, Patnaik A, 2009, Study on Mechanical and Erosion Wear Behavior of Hybrid Composites Using Taguchi Experimental Design, Materials & Design, 30(8), 2791-2801.
- Mallick P K, 2007, Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design, Boca Raton, CRC Press.
- Mallick P K, 2021, Thermoset Matrix Composites for Lightweight Automotive Structures, Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles, 229263.
- Mata F, Gaitonde V N, Karnik S R, Davim J P, 2009, Influence of Cutting Conditions on Machinability Aspects of PEEK, PEEK CF 30 and PEEK GF 30 Composites Using PCD Tools, Journal of Materials Processing Technology, 209(4), 1980-1987.
- May C A, 1988, Introduction to Epoxy Resins, Epoxy Resins Chemistry and Technology, 1, 1-8.
- Mazumdar S, 2001, Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering, CrC Press, Florida.
- Metin F, 2021, Elektroeğirme Nanofiber Takviyeli Cam/Epoksi Kompozitlerin Düşük Hızlı Darbe Hasar Davranışları ve Sonlu Elemanlar Simülasyonu, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Doktora Tezi, Konya.

- Min S, Kim J, Dornfeld D A, 2001, Development of A Drilling Burr Control Chart for Low Alloy Steel, AISI 4118, Journal of Materials Processing Technology, 113(1–3), 4-9.
- Mohan N S, Kulkarni S M, Ramachandra A, 2007, Delamination Analysis in Drilling Process of Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) Composite Materials. Journal of Materials Processing Technology, 186(1-3), 265-271.
- Morkavuk S, Köklü U, Aslantaş K, 2023, An Experimental Comprehensive Analysis of Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastic Tubes and Comparison with Carbon Fiber Reinforced Plastic Plate, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 42(7-8), 323-345.
- Mouritz A P, 2012, Introduction to Aerospace Materials, Elsevier, New York.
- Musial M, Logon D, Majcher K, Niewiadomski P, Trapko T, Jarczewska K, Stefaniuk D, 2023, Evaluation of Mechanical Properties and HPM Pulse Shielding Effectiveness of Cement-Based Composites, Energies, 16(10), 4062.
- Nas E, Gökkaya H, Sur G, 2013, Sıcak Presleme Yöntemi Kullanılarak Kompozit Malzemelerin Üretilebilirliği Üzerine Bir Değerlendirme, Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 3(2), 56-65.
- Ngo T D, 2020, Composite and Nanocomposite Materials: From Knowledge to Industrial Applications, BoD–Books on Demand.
- Nguyen K T, Navaratnam S, Mendis P, Zhang K, Barnett J, Wang H, 2020, Fire Safety of Composites in Prefabricated Buildings: From Fibre Reinforced Polymer to Textile Reinforced Concrete, Composites Part B: Engineering, 187, 107815.
- Okasha M M, Mativenga P T, Driver N, Li L, 2010, Sequential Laser and Mechanical Micro-Drilling of Ni Superalloy for Aerospace Application, CIRP Annals, 59(1), 199-202.
- Onsen M, Bayramoğlu M, Geren N, 2010, the Use of Composite Materials in Automotive Industry, ÇÜ Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24(2), 165-174.

- Oromiehie E, Prusty B G, Compston P, Rajan G, 2019, Automated Fibre Placement Based Composite Structures: Review on the Defects, Impacts and Inspections Techniques, *Composite Structures*, 224, 110987.
- Parghi A, Alam M S, 2018, A Review on the Application of Sprayed-FRP Composites for Strengthening of Concrete and Masonry Structures in the Construction Sector, *in Composite Structures*, 187, 518-534.
- Pruez J, Shoukry S, Williams G, Shoukry M, 2013, Lightweight Composite Materials for Heavy Duty Vehicles, West Virginia Univ, Morgantown.
- Rahamathullah I, Shunmugam M S, 2011, Thrust and Torque Analyses for Different Strategies Adapted in Microdrilling of Glass-Fibre-Reinforced Plastic, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 225(4), 505-519.
- Rajak D K, Pagar D D, Kumar R, Pruncu C I, 2019, Recent Progress of Reinforcement Materials: A Comprehensive Overview of Composite Materials, *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 6354-6374.
- Ratna D, 2009, *Handbook of Thermoset Resins*, ISmithers, Shawbury.
- Razzell A G, Venkata Siva S B, Rama Sreekanth P S, 2016, Joining and Machining of Ceramic Matrix Composites, *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, Elsevier.
- Rudin A, 1999, *the Elements of Polymer Science and Engineering*, Second Edition, Academic Press, San Diego.
- Saçak M, 2002, *Lif ve Elyaf Kimyası*, Gazi Kitapevi, Ankara.
- Saylan T, Ünal H, Yetgin S H, 2024, Cam Elyaf Takviyeli Poli-Amıt 6 Kompozitler ile Poliamit-6 Polimerinin% 30 Cam Elyaf Takviyeli Poli-Amıt 6 Kompozitine Karşı Aşınma ve Sürtünme Davranışları, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 26(76), 148-155.

- Sazli M A S, Wahab N A, Nasir N S, Mustapa M S, 2023, Influence of Micro Drilling Parameters Towards Tool Wear on Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) Panel, in AIP Conference Proceedings, 2530, 1, AIP Publishing.
- Sen M, Eryilmaz O, Bakir B, 2024, Micro Drilling Characterization of the Carbon and Carbon–Aramid (Hybrid) Composites, Polymer Composites, 45, 5449-5459.
- Shunmugesh K, Panneerselvam K, 2016, Optimization of Process Parameters in MicroDrilling of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Using Taguchi and Grey Relational Analysis, Polymers and Polymer Composites, 24(7), 499-506.
- Shunmugesh K, Pratheesh A, 2020, Taguchi Grey Relational Analysis Based Optimization of Micro-Drilling Parameters on Carbon Fiber Reinforced Plastics, Materials Today: Proceedings, 24, 1994-2003.
- Simpson G G, 1953, the Major Features of Evolution, Columbia University Press, New York.
- Singh T, Patnaik A, 2017, Thermo-Mechanical and Tribological Properties of MultiWalled Carbon Nanotubes Filled Friction Composite Materials, Polymer Composites, 38(6), 1183-1193.
- Slayton R, Spinardi G, 2016, Radical Innovation in Scaling Up: Boeing’s Dreamliner and the Challenge of Socio-Technical Transitions, Technovation, 47, 47-58.
- Solmaz Y, Gür M, 2007, Tabakalı Kompozit Plakalarda Takviye Malzemesi ve Oryantasyon Açısının Gerilme Analizine Etkisi, Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi, 6(1), 16-25.
- Sönmez M, 2009, Polimer Matrisli Kompozitlerin Endüstri Ürünleri Tasarımında Önemi ve Geleceği: Türkiye’den Dört Örnek Firma Üzerine Bir İnceleme, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Strong A B, 2008, Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications, 2nd Ed, Dearborn, Mich.
- Struzziero G, Maistros G M, Hartley J, Skordos A A, 2021, Materials Modelling and Process Simulation of the Pultrusion of Curved Parts, Composites Part A:

- Applied Science and Manufacturing, 144, 106328.
- Sun Z, To S, 2018, Effect of Machining Parameters and Tool Wear on Surface Uniformity in Micro-Milling, Micromachines, 9(6), 268.
- Sunilpete M A, Cadambi R M, 2020, Development of Cost Effective Out-Of-Autoclave Technology–Vacuum Infusion Process with Tailored Fibre Volume Fraction, Materials Today: Proceedings, 21, 1293-1297.
- Şahin Y, 2022, Kompozit Malzemelere Giriş, Seçkin Yayıncılık, Ankara.
- Tempelman E, Shercliff H, Van Eyben B N, 2014, Resin Transfer Molding, Manufacturing and Design, 171-186.
- Terzioğlu H, Yalcin G, Neşeli S, 2020, Mikro Delik Delme Tezgâhı Z Ekseninin Bilgisayarla Kontrolü, Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Özel Sayı, 498-503.
- Thori P, Sharma P, Bhargava M, 2013, An Approach of Composite Materials in Industrial Machinery: Advantages, Disadvantages and Applications, International Journal of Research in Engineering and Technology, 2(12), 350355.
- Tian L, Zhang P, Xian G, 2023, Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic Composite Pultrusion with in Situ Polymerizable Methyl Methacrylate: A Review, Polymer Composites, 44(8), 4345-4369.
- Topuz S, 2021, Metal Matrisli Kompozitlerin Polyester Esaslı Kompozit Üretiminde Değerlendirilmesi ve Karakterizasyonu, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Vahapoğlu V, 2013, Kauçuk Türü Malzemeler: Sınıflandırma, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 4(1), 25-34.
- Weinert K, Kempmann C, 2004, Cutting Temperatures and Their Effects on the Machining Behavior in Drilling Reinforced Plastic Composites. Advanced Engineering Materials, 6(8), 684-689.
- Woishnis W, Ebnesajjad S, 2012, Chemical Resistance of Thermoplastics, Vol 1, William Andrew, New York.

- Xu J, Huang X, Davim J P, Ji M, Chen M, 2020, On the Machining Behavior of Carbon Fiber Reinforced Polyimide and PEEK Thermoplastic Composites. *Polymer Composites*, 41, 3649-3663.
- Yalçın B, Yüksel A, Aslantaş K, Der O, Ercetin A, 2023, Optimization of Micro-Drilling of Laminated Aluminum Composite Panel (Al-PE) Using Taguchi Orthogonal Array Design. *Materials*, 16, 4528.
- Yang Z, Tan Q, Shiju E, 2004, On-Line Monitoring of Drilling Torques of Microdrills, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 218(12), 1735-1740.
- Yassin K, Hojjati M, 2018, Processing of Thermoplastic Matrix Composites Through Automated Fiber Placement and Tape Laying Methods: A Review, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 31(12), 1676-1725.
- Yazman Ş, Köklü U, Urtekin L, Morkavuk S, 2020, Experimental Study on the Effects of Cold Chamber Die Casting Parameters on High-Speed Drilling Machinability of Casted AZ91 Alloy, *Journal of Manufacturing Processes*, 57, 136-152.
- Yıldızhan H, 2008, Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Yücel E, Çicek A, 2011, İmalat Alanında Yaygın Olarak Kullanılan Mikro İşleme Teknikleri, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(1), 46-59.
- Yüksel A, 2023, Alüminyum Levha Kompozitlerin Mikro Delinebilirliğinin Deneysel İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Afyon.
- Zhang H, Wang X, Pang S, 2014, A Mathematical Modeling to Predict the Cutting Forces in Microdrilling, *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 543298, 1-11.
- Zhang J, Chevali V S, Wang H, Wang C H, 2020, Current Status of Carbon Fibre and Carbon Fibre Composites Recycling, *Composites Part B: Engineering*, 193, 108053.

Zhang J, Lin G, Vaidya U, Wang H, 2023, Past, Present and Future Prospective of Global Carbon Fibre Composite Developments and Applications, Composites Part B: Engineering, 250, 110463.

Zhou J, Yu J, 2021, Chisel Edge Wear Measurement of High-Speed Steel Twist Drills Based on Machine Vision, Computers in Industry, 128, 103436.



