



**ALÜMİNYUM LEVHA KOMPOZİTLERİN MİKRO
DELİNEBİLİRLİĞİNİN DENEYSEL İNCELEMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali YÜKSEL

Danışman

Prof. Dr. Bekir YALÇIN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Kasım 2023

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ALÜMİNYUM LEVHA KOMPOZİTLERİN MİKRO
DELİNEBİLİRLİĞİNİN DENEYSEL İNCELEMESİ**

Ali YÜKSEL

Danışman
Prof. Dr. Bekir YALÇIN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Kasım 2023

TEZ ONAY SAYFASI

Ali YÜKSEL tarafından hazırlanan “Alüminyum Levha Kompozitlerin Mikro Delinebilirliğinin Deneysel İncelemesi” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 17 / 11 / 2023 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 : Doç. Dr. Berkay ERGENE
Pamukkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği

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

Üye : Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ
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.

17 / 11 / 2023

Ali YÜKSEL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ALÜMİNYUM LEVHA KOMPOZİTLERİN MİKRO DELİNEBİLİRLİĞİNİN DENEYSEL İNCELEMESİ

Ali YÜKSEL

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bekir YALÇIN

Alüminyum kompozitler; otomotiv, savunma ve yapı mühendisliği gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında, arasında düşük yoğunluklu polietilen bulunan (PE) 2 adet 3105 serisi alüminyum levhanın birleştirilmesiyle oluşan alüminyum kompozit panellerin mikro delinebilirliği üzerine deneysel çalışmalar yapılmıştır. Alüminyum-polietilen kompozit panelin (Al-PE) mikro delme işlemi sonrasında kesme kuvvetlerini, çıkışta meydana gelen çapak oluşumunu, mikro matkaplarda ki çap değişimlerini ve panel üzerine açılan deliklerin çapları araştırılmıştır. Mikro delme testi parametreleri, Taguchi'nin L16 ($4^2 2^3$) ortogonal dizisi kullanılarak tasarlanmış olup beş kontrol parametresi ile gerçekleştirilmiştir. Bunlar dört seviyeli kesme hızı (10 m/dk, 20 m/dk, 30 m/dk, 40 m/dk), dört seviyeli ilerleme hızı (0,5 $\mu\text{m}/\text{dev}$, 1 $\mu\text{m}/\text{dev}$, 2 $\mu\text{m}/\text{dev}$, 4 $\mu\text{m}/\text{dev}$), iki seviyeli takım çapı (700 μ , 1000 μ), 2 seviyeli kaplama durumu (AlTiN kaplamalı, kaplamasız) ve iki seviyeli (100°, 140°) takım ucu açısıdır. Varyans analizi (ANOVA) için maksimum delme kuvveti (F_z), maksimum çapak yüksekliği ve hem matkap takımı hem de delik çaplarındaki meydana gelen değişimler ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar alüminyum tabaka delinirken delme kuvvetinin maksimum seviyede olduğunu, polietilen tabakada delinirken ise delme kuvveti minimum düzeyde olduğunu göstermiştir. Matkap uç açısının delme kuvveti üzerinde en etkili parametre olduğu görülmüştür. Takım çapındaki değişim üzerinde en önemli etkiye matkap çapı (%26,15) sahipken, uç açısının takım aşınması üzerinde %25,79'luk etkisinin olduğu belirlenmiştir. Delik çapındaki değişimde en büyük etkiye matkap çapı

(%36,67) ve kesme hızı (%25,15) sahiptir. Kesme hızının ve ilerleme hızının arttırılması da delik çapı değişimini azaltmıştır. Delme parametrelerinden ilerlemenin delik çapı değişimine etkisi %16,13'tür. AlTiN kaplamanın etkisi %12,38 iken takım uç açısının etkisinin (%0,64) ihmal edilebilir düzeyde olduğu söylenebilir. Delik çıkışındaki çapak yüksekliği üzerinde en büyük etkiye uç açısı (%67,80) sahip olup, AlTiN kaplama kompozitin orta katmanındaki polietilenin yumuşamasına sebep olmuş ve oluşan sıvanma ile birlikte delik çıkışındaki çapak yüksekliğinde artış gözlenmiştir.

2023, xiii + 90 sayfa

Anahtar Kelimeler: Alüminyum kompozit panel, Mikro delme, Kesme kuvvetleri, Taguchi analizi

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MICRO DRILLABILITY OF ALUMINUM SHEET COMPOSITES

Ali YÜKSEL

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Bekir YALÇIN

Aluminium composites are widely used in sectors such as automotive, defence and structural engineering. In this thesis, experimental studies were carried out on the micro-drillability of aluminium composite panels formed by joining two 3105 series aluminium sheets with low density polyethylene (PE) in between. After micro drilling of aluminium-polyethylene composite panel (Al-PE), cutting forces, burr formation at the exit, diameter changes in micro drills and diameters of the holes drilled on the panel were investigated. The micro drilling test parameters were designed using Taguchi's L16 ($4^2 2^3$) orthogonal array with five control parameters. These are four levels of cutting speed (10 m/min, 20 m/min, 30 m/min, 40 m/min), four levels of feed rate (0.5 $\mu\text{m}/\text{rev}$, 1 $\mu\text{m}/\text{rev}$, 2 $\mu\text{m}/\text{rev}$, 4 $\mu\text{m}/\text{rev}$), two levels of tool diameter (0.7 mm, 1 mm), two levels of coating status (AlTiN coated, uncoated) and two levels of tool tip angle (100° , 140°). For the analysis of variance (ANOVA), the variations in maximum drilling force (F_z), maximum burr height and both drill tool and hole diameters were measured. The results showed that the drilling force was maximum when drilling through the aluminum sheet, while the drilling force was minimum when drilling through the polyethylene sheet. The drill bit angle is the most effective parameter on the drilling force. Drill diameter has the most significant effect on the change in tool diameter (26,15%), while the bit angle has an effect of 25,79% on tool wear. Drill diameter (36.67%) and cutting speed (25.15%) have the greatest effect on the change in hole diameter. Increasing the cutting speed and feed rate also decreased the hole diameter change. Among the drilling parameters, the effect

of feed rate on hole diameter change is 16.13%. However, the effect of AlTiN coating is 12.38% while the effect of tool tip angle (0.64%) is negligible. The tip angle had the greatest effect (67.80%) on the burr height at the hole exit, and the AlTiN coating caused softening of the polyethylene in the middle layer of the composite and the resulting plastering caused an increase in the burr height at the hole exit.

2023, xiii + 90 pages

Keywords: Aluminium composite panel, Micro drilling, Cutting force, Taguchi analysis.



TEŞEKKÜR

Her şeyden önce tüm evrenin yaratıcısına teşekkür etmek istiyorum. Çünkü o istemeden hiçbir şey mümkün değil.

Öğrencisi olarak beni kabul eden, sonsuz desteklerini hiç esirgemeyen, akademik olarak beni yetiştiren yeri geldiğinde ağabeyim olan danışman hocam Prof. Dr. Bekir YALÇIN' a, bilgi ve tecrübeleriyle deneylerimi gerçekleştirmemde büyük katkısı olan Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ hocama, kendi yoğun çalışmalarının arasında deneyleri gerçekleştirmem için benim çalışmalarına her ihtiyacım olduğunda vakit ayırıp yardımcı olan Öğr. Gör. Ahmet HASÇELİK hocama ve arada mesafeler olsa bile desteğini esirgemeyen Öğr. Gör. Uçan KARAKILINÇ hocama teşekkür ediyorum.

4 çocuk büyütüp bizleri yetiştirmek için daima kendinden fedakarlık yapan, güzel annem Naciye YÜKSEL'e ve babam Mehmet YÜKSEL'e , ilkokul arkadaşım, hayat yoldaşım, oğlumun annesi Özge YÜKSEL' e bu satırlar asla yeterli gelmeyecek...

Bana kattığınız, öğrettiğiniz, paylaştığımız her şey için teşekkür ederim.

Ayrıca tezime katkı sağlayan ASAŞ firmasına teşekkürlerimi sunarım.

Ali YÜKSEL

Afyonkarahisar 2023

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	3
2.1 Kompozit Malzemeler	3
2.1.1 Kompozit Malzeme Nedir	3
2.1.2 Kompozit Malzemelerin Özellikleri	4
2.1.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	5
2.1.3.1 Tanecik Takviyeli Kompozitler.....	6
2.1.3.2 Lif Takviyeli Kompozitler.....	7
2.1.3.3 Metalik Kompozitler	8
2.1.3.4 Seramik Kompozitler	9
2.1.3.5 Polimer Kompozitler	10
2.1.3.6 Tabakalı Kompozitler.....	11
2.1.4 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	12
2.1.4.1 Havacılık/ Uzay/ Savunma Sanayi	12
2.1.4.2 Ev Aletleri ve İş Ekipmanları.....	13
2.1.4.3 Tarım Gıda Sektörü	14
2.1.4.4 Yapı Sektörü.....	15
2.1.4.5 Denizcilik	16
2.1.4.6 Elektrik/ Elektronik Sektörü.....	17
2.1.4.7 Tüketim Malları/ Spor/ Eğlence	17
2.1.4.8 Askeri Uygulamalar	18
2.1.4.9 Korozyona Dayanımlı Ürünler.....	19
2.1.4.10 Taşımacılık ve Otomotiv	19
2.1.5 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları	20
2.1.6 Metal Matriksli Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri	22

2.1.6.1 Sıcak Presleme Yöntemi ile Kompozit Malzeme Üretimi	22
2.1.6.2 Toz Metalurjisi Yöntemi ile Kompozit Malzeme Üretimi.....	23
2.1.6.3 Sıvı Metal Emdirme Yöntemi İle Kompozit Malzeme Üretimi.....	24
2.1.6.4 Elektroliz Yöntemi ile Kompozit Malzeme Üretimi	25
2.1.6.5 Buhar Çökertme Yöntemi ile Kompozit Malzeme Üretimi	26
2.1.6.6 Haddeleme Yöntemi ile Kompozit Malzeme Üretimi	26
2.2 Alüminyum Özellikleri	26
2.2.1 Genel Bilgiler	26
2.2.2 Alüminyum Kompozit Levhaların Özellikleri	27
2.3 Delme İşlemi.....	28
2.3.1 Temel Tanımlar	30
2.3.2 Delik Tipleri	32
2.3.3 Delik Delme Takımları	33
2.3.4 Delik Delme İşleminin Önemi	36
2.3.5 Mikro Delme İşlemi	37
2.3.5.1 Mikro Delme Takımları.....	40
2.3.5.2 Mikro Matkaplarda Kırılma	41
2.3.5.3 Mikro Matkaplarda Takım Geometrisi.....	42
2.3.5.4 Mikro Delme İşleminde Kesme Kuvvetinin Etkisi ve Çapak Oluşumu	43
2.3.5.5 Mikro Delme İşleminde Yüzey Kalitesi ve Takım Aşınması	45
3. MATERYAL ve METOD	47
3.1 Taguchi Metolojisi	50
3.2 Deney Tasarımı.....	52
3.3 Kullanılan Malzeme ve Ekipmanlar	54
3.3.1 Alüminyum Kompozit Panel.....	54
3.3.2 Mikro Matkap Uçları.....	56
4. BULGULAR	58
4.1 Delme Kuvveti	58
4.2 Mikro Delik ve Matkap Çapındaki Değişim.....	66
4.3 Delme Parametrelerinin Çapak Oluşumuna Etkisi	70
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	78
6. KAYNAKLAR.....	80

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Vc	Kesme hızı
Fz	Diş başına düşen ilerleme
F	İlerleme miktarı
WC	Tungsten karbür
Co	Kobalt
Ti	Titanyum
Al	Alüminyum
A	Alfa
B	Beta
N	Devir
°C	Sıcaklık birimi (Santigrat derece)
TiAlN	Titanyum alüminyum nitrür
C	Karbon
Fe	Demir
O	Oksijen

Kısaltmalar

AKÜ	Afyon Kocatepe Üniversitesi
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
SEM	Scanning Electron Microscopy
SDÜ	Süleyman Demirel Üniversitesi
N	Newton
kN	Kilonewton
Nm	Newton metre
µm	Mikronmetre
TUAM	Teknoloji Uygulama Araştırma Merkezi
AL-PE	Alüminyum-Polietilen
MMK	Metal Matris Kompozit

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Kompozitlerin sınıflandırılması.	5
Şekil 2.2 Tanecik takviyeli kompozit örnekleri	7
Şekil 2.3 Elde edildikleri malzemeye göre lif türleri	8
Şekil 2.4 Metal matrisli kompozitlerden bazılarının şematik gösterimi.	9
Şekil 2.5 Karbon fiberle üretilen seramik matrisli kompozitin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü.....	10
Şekil 2.6 Fiber takviyeli polimer matris kompozitler	11
Şekil 2.7 Tabakalı kompozitin şematik gösterimi	12
Şekil 2.8 Boeing 787 uçaklarda kompozit malzeme kullanım oranı.....	13
Şekil 2. 9 CNG kompozit yakıt tankı	14
Şekil 2.10 Kompozit fiber glass silolar	14
Şekil 2.11 İnşaat sektöründe kullanılan kompozit kaplama malzemesi.....	15
Şekil 2.12 Kompozit tekne konsolu	16
Şekil 2.13 Kompozit silikon izolatörler	17
Şekil 2.14 Koruyucu kompozit askeri miğfer	19
Şekil 2.15 Kompozit borular	19
Şekil 2.16 Tüm gövdesi karbon fiberden imal edilen BMW i3 model otomobil.....	20
Şekil 2.17 Sıcak presleme yöntemi ile kompozit malzeme üretimi	23
Şekil 2.18 Toz metalürjisi yöntemi ile kompozit malzeme üretimi.	24
Şekil 2.19 Sıvı metal emdirme yöntemi	25
Şekil 2.20 Elektroliz yöntemi ile malzeme üretimi.....	25

Şekil 2.21 Haddelme yöntemi ile malzeme üretimi	26
Şekil 2.22 Aynı rijitlikte malzemelerin kalınlık ve ağırlık mukayesesi.	27
Şekil 2.23 Kesme hızı ve ilerleme hızı.....	31
Şekil 2.24 Delme mekaniği	31
Şekil 2.25 Delik delme tipleri.....	33
Şekil 2.26 Matkapın kısımları	34
Şekil 2.27 Matkap ucunun boşluk ve kesici kenar açısı.....	34
Şekil 2.28 Matkap üretimi	36
Şekil 2.29 Enjektör üzerinde bulunan mikro yağ püskürtme delikleri.....	37
Şekil 2.30 Mikro delme deneyinde kullanılan deney düzeneği.....	38
Şekil 2.31 Mikro delik delme yöntemi kullanılan iş parçası.....	39
Şekil 2.32 Mikro boyutlarda matkap uçları.....	40
Şekil 2.33 Mikro matkaplarda takım geometrisi	42
Şekil 2.34 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	44
Şekil 2.35 Devir sayısının matkap aşınmasına etkisi	45
Şekil 2.36 İlerleme hızının matkap aşınmasına etkisi	46
Şekil 2.37 14 Delik sayısının matkap aşınmasına etkisi	46
Şekil 3.1 Deney ekipmanları	48
Şekil 3.2 İş parçası, mikro matkap ve fener mili.....	48
Şekil 3.3 Kistler - 9119AA1 mini dinamometre	48

Şekil 3.4 Taramalı elektron mikroskobu	49
Şekil 3.5 Mikro matkaba ait SEM görüntüsü	49
Şekil 3.6 (a) Alüminyum kompozit panel üretim hattı ve (b) kompozit panel tabakaları	55
Şekil 3.7 (a) Deneyde kullanılan bazı mikro matkap uçları (b) 140° TiAlN kaplamalı 0,7 mm matkap ucu	56
Şekil 3.8 Mikro matkap uçları (0,7 mm ve 1 mm)	57
Şekil 4.1 Delme kuvveti verileri	58
Şekil 4.2 Delme kuvveti verileri	59
Şekil 4.3 Üst Al tabaka için ana etki grafiği ve delme parametlerinin SN oranı grafiği (a) Ana etkiler grafiği ve (b) matkap parametrelerinin üst tabakanın delinmesi sırasında delme kuvvetine etkisinin S/N oranı grafiği (matkabin girdiği durumda)	60
Şekil 4.4 Alt Al tabaka için ana etki grafiği ve delme parametlerinin SN oranı grafiği (a) Delme parametrelerinin deliğin çıkışına yakın olduğu zaman kompozitin alt tabakasının delme kuvveti üzerindeki ana etkiler grafiği ve (b) SN oranı grafiği.	62
Şekil 4.5 PE tabaka için ana etki grafiği ve delme parametrelerinin SN oranı grafiği; (a) Delme parametrelerinin kompozitin PE çekirdek tabakasını delme işleminde delme kuvveti üzerindeki ana etkiler grafiği ve (b) SN oranı grafiği.	63
Şekil 4.6 Her tabakanın mikro delme işleminde delme kuvveti için olasılık grafikleri.	66
Şekil 4.7 (a) Tüm deneyler için mikro matkap çapı değişimi ve (b) delme değişkenlerinin takım çapındaki değişim üzerindeki ana etkileri	68
Şekil 4.8 (a) Tüm mikro delme testlerinde açılan deliklerin çap değişimi, (b) delme parametrelerinin delik çapındaki değişim üzerindeki ana etkisi	70

- Şekil 4.9** (a) Tüm testler için delik çıkışındaki çapak yüksekliği ve (b) delme değişkenlerinin çapak yüksekliği üzerindeki ana etkileri..... 72
- Şekil 4.10** Tüm sonuçlar arasından seçilen SEM görüntüleri: çıkış çapağı örneği (a-d), delik çapı değişiklikleri (e,f) ve matkap takımı üzerine talaş yapışması (g,h). 77
- Şekil 4.11** Yedinci deneyde, ana kesme kenarı ve burun bölgesindeki aşırı talaş yapışmasını gösteren için SEM görüntüsü. 77



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Kistler -9119AA1 mini dinamometre teknik özellikleri	49
Çizelge 3.2 Taguchi deney tasarımı parametreleri	53
Çizelge 3.3 Taguchi L16 deney tasarımı	54
Çizelge 3.4 3105 serisi alüminyum kimyasal bileşimi	56
Çizelge 4.1 Üst Al tabakanın delinmesi sırasında delme kuvveti için varyans analizi ..	64
Çizelge 4.2 PE tabakanın delinmesi sırasında delme kuvveti için varyans analizi	64
Çizelge 4.3 Alt Al tabakanın delinmesi sırasında delme kuvveti için varyans analizi ..	64
Çizelge 4.4 Takım çapı aşınması için varyans analizi	67
Çizelge 4.5 Delik çapı değişimi için varyans analizi	69
Çizelge 4.6 Delik çıkışındaki çapak yüksekliği için varyans analizi	70

1. GİRİŞ

Sanayi devriminin beraberinde getirdiği makineleşme çağı, insanoğluna yeni araştırma alanlarının kapısını aralamıştır. Teknolojide yaşanan hızlı ilerleme geleneksel malzemelere kıyasla daha üstün özelliklere sahip yeni malzemeler üretilmesine olanak sağlamıştır. Kompozit malzemeler yeni üretilen malzemelerden biridir. Kompozit malzemeler, farklı iki veya daha fazla malzemenin bir araya gelerek oluşturduğu yeni bir malzeme sınıfını temsil etmektedir. Bu malzemeler, içerdikleri bileşenlerin tek başına sergileyemeyeceği birçok özelliği bir arada sunarak, çeşitli uygulama alanlarında daha avantajlı çözümler sunmaktadırlar (Mevlüt ve Mutuk 2019). Kompozit malzemeler, takviye ve matris olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır (Bulut ve Erdoğan 2011). Kompozit malzemelerde, takviye elemanları lifler, partiküller veya tabakalar şeklinde bulunabilirler ve bu takviye elemanları, matris malzemesi tarafından bir arada tutulurlar. Matris malzemesi aynı zamanda kompozit yapının fiziksel, kimyasal, termal özelliklerini şekillendirir ve malzemenin mukavemetini belirlemektedir (Yatımoğlu ve Özkan 2017). Alüminyumun hafif olması, yüksek mukavemet ve süneklik özellikleri tercih edilmesinin ana sebeplerindendir. Tokluğunun ve korozyon direncinin yüksek olması, takviye malzemesi ile sağlam bir bağ kuvvetine sahip olması gibi özellikleri, kompozit malzemelerde yaygın olarak tercih edilen bir matris malzemesi olarak alüminyumu öne çıkarmaktadır. Savunma sanayisi, havacılık, otomotiv, gemi yapımı, elektronik ve daha birçok endüstri alanına geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır (Okay ve Islak 2021).

Alüminyum kompozit paneller, ileri teknoloji kullanılarak tasarlanmış bir yapı malzemesidir ve temel olarak boyalı iki alüminyum levhanın arasına düşük yoğunluklu polietilen çekirdeğin yapıştırılmasıyla oluşturulmaktadır. Polietilen dolgu malzemesi, erimiş halde kalıp içinde homojen bir şekilde dağıtılırken, üst ve alt alüminyum levhalarla polimer yapıştırıcı birleştirilir. Bu işlem, belirli bir sıcaklık, basınç ve kuvvet altında gerçekleştirilmektedir. Panel kalınlığı bu aşamada ayarlanır ve bu değer sürekli üretim boyunca sabit kalmaktadır. Alüminyum kompozit paneller, mükemmel boyutsal kararlılık, hafiflik, zarif ve parlak bir görünüm gibi özellikleri ile iç ve dış mekan uygulamalarında ideal bir malzeme olarak öne çıkmaktadır (Albond 2015). Kompozit malzeme pazarında alüminyum kompozit paneller ciddi bir pay almıştır ve giderek

pazardaki payını arttıracakđı düşünölmektedir. Alüminyum kompozit panel pazar büyüklüğünün 2022 yılında 6,96 Milyar ABD doları değesinde olduğu ve 2030 yılına kadar 11,7 Milyar ABD dolarına ulaşacakđı düşünölmektedir. Kompozit panel pazarının 2024'ten 2030'a kadar %6,73'lük bir bileşik büyüme oranı ile büyüyeceği tahmin edilmektedir (İnt Kyn. 1). Pazarda öngörölen artış büyüklüğüne rağmen alüminyum kompozit levhaların mikro delme optimizasyonu üzerine literatürde çok fazla çalışma bulunmamaktadır. En yaygın kullanılan işleme tekniklerinden biri olan delme, eski Mısır döneminden günümüze kadar kullanılmaktadır. Yalnızca ABD endüstrisinde yılda 250 milyon matkap ucunun kullanıldığđı tahmin edilmektedir (Figueroa vd. 2014). Mikro delme ihtiyacı ilk olarak 1940'larda fark edilmiş ve daha sonra yüksek kalitede mikro matkaplar üretmek için girişimlerde bulunulmuştur (Wagner 1945). 1958'de Levin torna tezgahı yardımıyla 0,015 mm kadar küçük bir delik açmış olup bu işlem mikro delme gerçekleştirmeye yönelik ilk girişim sayılabilir (Sugawara ve Inagaki 1982). 1960-1970 yılları arasında Japonya ve ABD'de mikro delme çalışmaları yapılmıştır (Hasan vd. 2017). Uç açısı mikro matkabın keskinliğini belirlemekte olup delme başlangıcında önemli bir rol oynamaktadır. Uygun uç açısı kullanımı ile delme sırasında oluşan kesme kuvveti en aza indirilebilmektedir (Wong vd. 2008). Mikro matkaplara en uygun uç açısını incelemek için çeşitli deneyler yapılmış olup 120° ve 130° uç açılarının takım ömrü açısından daha iyi performansa sahip olduğunu bulmuşlardır (Heinemann vd. 2006).

Al-PE kompozit paneller ile ilgili literatür araştırması yapıldığında, çekme dayanımı (Duka vd. 2022), şekillendirilebilirliği (Can 2008, Wapande 2019) ve balistik koruma malzemesi olarak kullanımı (Torun vd 2020) üzerine çalışmaların yapıldığđı ancak AL-PE kompozitlerin delinebilirliği üzerine literatürde herhangi bir çalışma bulunmadığđı tespit edilmiştir. Al-PE kompozitlerin pazar payını 8 yıl içerisinde neredeyse 2 ye katlayacakđı düşünöldüğünde hayatımızda ve endüstride oldukça fazla yer alacaktır. Bu çalışma Al-PE kompozitlerin mikro delinebilirliği üzerine literatürde ki öncü çalışmalardan biri olup Al-PE kompozit panelin mikro delme işlemi sırasında delme kuvvetlerini, çıkışta meydana gelen çapak oluşumunu, mikro matkaplarda oluşan çap değışikliklerini ve panel üzerine açılan deliklerin çapları araştırılmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Kompozit Malzemeler

2.1.1 Kompozit Malzeme Nedir

Binlerce yıl önce kompozit malzemelerin kullanımı saman takviyeli kerpiç bloklar şeklinde ev yapımında görülmüştür. Günümüzde, geleneksel malzemelerin sınırlarını aşmak veya özelliklerini geliştirmek amacıyla farklı özellikleri bir araya getiren yenilikçi malzemeler olarak kompozit malzemeler değerlendirilmektedir. Endüstriyel uygulamalar açısından, kompozit malzemeler hala malzeme tasarımı, şekillendirme ve davranışları açısından anlaşılması gereken, nispeten yeni ve ileri teknoloji ürünü malzemeler olarak kabul edilebilir. Modern kompozit malzemelerin üretimi, Amerika'da 1930'larda cam elyafın keşfi ile başlamış olup, cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler dünya pazarında önemli bir yer edinmiştir (Kaya 2016).

Mühendislik uygulamalarındaki hızlı gelişme, malzeme bilimi, enerji, iletişim, ulaşım, savunma ve uzay teknolojileri gibi birçok temel sanayi dalında yeni malzemelere olan büyük bir ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Bu ihtiyaç, istenilen malzeme özelliklerine sahip kompozit tasarımların ve üretim koşullarının değiştirilmesiyle üstün özelliklere sahip kompozit malzemelerin geliştirilmesi gerekliliğini doğurmuştur (Şenel vd. 2017). Mühendislik malzemeleri seçiminde, esneklik, sağlamlık, çevresel dayanıklılık, hafiflik, tokluk gibi temel özelliklerin yanı sıra zamana bağlı yorulma, darbe direnci, çatlama, eğilme dayanımı, kimyasal dayanıklılık gibi değerler de dikkate alınmalıdır. Ancak tüm bu özellikleri tek bir malzemede bir araya getirmek oldukça nadir bir durumdur. 1950'li yıllardan itibaren geliştirilen kompozit malzemeler, farklı özellikleri tek bir yapıda birleştirerek, malzeme seçimindeki zorlukları çözmeye yönelik önemli bir çözüm sunmuştur (Bulut ve Erdoğan 2011).

Kompozit malzemeler, farklı kimyasal özelliklere sahip iki veya daha fazla bileşenin bir araya getirilmesiyle oluşan malzemelerdir. Üretilen kompozit malzemeler, her bir bileşenin tek başına elde edilemeyen özelliklerin birleşimiyle sonuçlanmaktadır. Bu

sayede belirli bir uygulama için gereken özelliklere sahip yeni bir malzemenin tasarlanması ve üretilmesi mümkün hale gelmektedir (Kalemtaş 2014). Daha farklı bir ifadeyle her bir malzemenin kendi başına sahip olduğu eksiklikleri veya zayıf yönleri telafi ederek üstün özellikler elde etmeyi amaçlamaktadır (Işık 2008). Araştırmacılar, endüstriyel malzemelerin dayanıklılık özelliklerini sürekli olarak geliştirmek ve artan beklentilere yanıt vermek amacıyla çalışmalarına devam etmektedirler. Bu çalışmaların birçoğu, kompozit malzemelerin geliştirilmesine odaklanmıştır. Kompozit malzemeler, genellikle fiber, kılcal kristal, pulcuk, parçacık gibi takviye elemanlarının metal, seramik ve plastik gibi geleneksel malzeme gruplarına ilave edilmesiyle oluşturulan karma yapıli malzemelerdir. Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri, ana fazın hal durumuna bağıli olarak sıvı, katı ve katı-sıvı halleri olmak üzere üç ana kategoride sınıflandırılabilir (Nas vd. 2013).

2.1.2 Kompozit Malzemelerin Özellikleri

Kompozit malzemelerin tanımı, farklı gruplardan veya aynı gruplardan iki veya daha fazla malzemenin bir araya gelerek yeni bir malzeme oluşturmasını ifade etmektedir. İyi tasarlanmış bir kompozit malzeme kullanılan malzemelerin en iyi özelliklerini bir araya getirir ve bu özellikler aşağıda sıralanan bazı önemli faktörleri içermektedir.

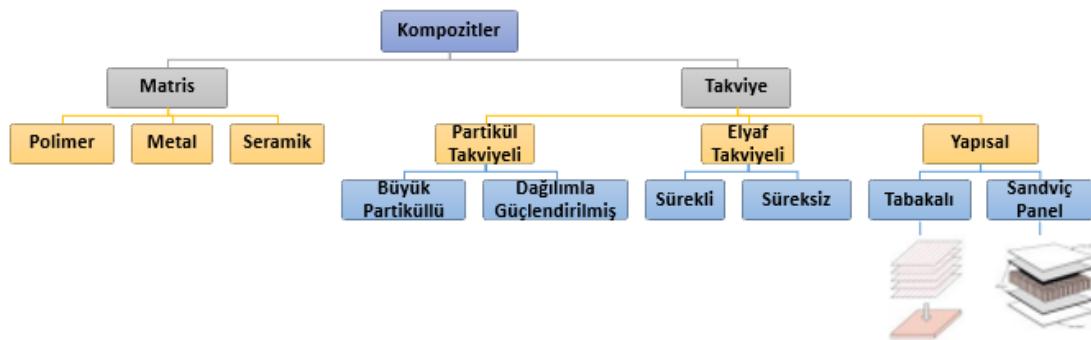
- Elastiklik: Malzemenin şekil değiştirdikten sonra orijinal formuna geri dönme yeteneğı.
- Korozyon Direnci: Malzemenin çevresel koşullara dayanıklılığı, paslanma ve korozyona karşı direnç.
- Aşınma Direnci: Malzemenin sürtünmeye, yıpranmaya ve aşınmaya karşı dayanıklılığı.
- Ağırlık: Malzemenin hafifliğı veya yoğunluğu, taşıma ve uygulama kolaylığı için önemlidir.
- Yorulma Ömrü: Malzemenin uzun süre boyunca tekrarlayan yükler altında nasıl davrandığı.
- Sıcaklığa Bağlı Davranış: Malzemenin sıcaklık değişimlerine karşı nasıl tepki verdiği ve davranışının sıcaklıkla ne kadar değişebileceğı.

- Termal İzolasyon: Isı iletimini engelleme yeteneği.
- Termal İletkenlik: Isı iletimi yeteneği.
- Akustik İzolasyon: Ses yalıtımı yeteneği.
- Kırılma Tokluğu: Malzemenin darbelere veya yüksek streslere dayanıklılığı.
- Elektrik İletkenliği: Elektrik akımını iletebilme yeteneği veya izole edebilme yeteneği.
- Rijitlik: Malzemenin bükülme veya deforme olma direnci.
- Estetik Görünüm: Malzemenin görünümü ve estetik kalitesi.
- Fiyat: Malzemenin maliyeti ve ekonomiklik (Can 2008).

Kompozit malzemeler bu özelliklerin bir kombinasyonunu sağlayarak çeşitli uygulama alanlarında avantaj sağlamaktadır.

2.1.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, mekanik dayanımını sağlayan farklı geometrik yapıya sahip parçalardan (lif vb.) ve bu parçaları bir arada tutan polimerik, metalik veya seramik gibi malzemelerle birleşmesiyle oluşmaktadır. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması pek çok farklı yöntemle yapılabilir ancak en yaygın ve temel sınıflandırma, bu malzemelerin yapısında bulunan matris ve takviye malzemesine göre gerçekleştirilmektedir (Kaya 2016). Şekil 2.1’de kompozit sınıflandırması gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Kompozitlerin sınıflandırılması (Saçak 2015, Çobanoğlu 2021).

Kompozit malzemelerin sınıflandırılmasında kullanılan, takviye malzemesi ve matris türüne dayalı sınıflandırma, kompozit malzemelerin yapıları ve özellikleri hakkında

önemli bilgiler sağlamaktadır. Takviye malzemesi açısından kompozitlerin sınıflandırılması ise, takviye malzemesinin geometrik şekline göre yapılmaktadır. Bu yaklaşıma göre kompozitler, genellikle tanecik takviyeli kompozitler ve lif takviyeli kompozitler olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadırlar (Saçak 2015).

2.1.3.1 Tanecik Takviyeli Kompozitler

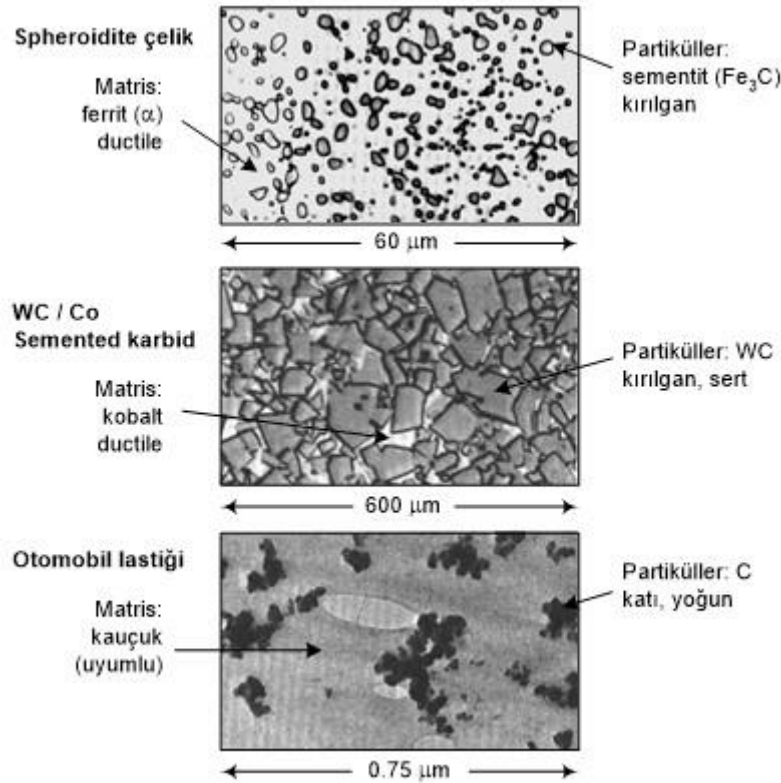
Tanecikli takviye malzemeleri ve polimer matrisi bir araya geldiğinde, tanecik takviyeli polimerik kompozit adını almaktadırlar. Bu kompozit malzemeler, karbonatlar, kil, mika, silikatlar, mikroküreler, tarımsal atıklar, metal tozları veya parçaları, pudra gibi çeşitli tanecikli malzemelerin polimer matris içinde dağılmasıyla oluşmaktadır. Tanecikli takviye ediciler, ekonomik açıdan uygun maliyetleriyle dikkat çekmektedir. Ayrıca, bu kompozit malzemelerin üretimi oldukça kolaydır ve karmaşık geometrili ürünlerin üretiminde sorun oluşturmamaktadır (Türedi 2015).

Tanecikli kompozitler, bir malzeme içinde farklı bir malzemenin tanecikler halinde dağıldığı malzemelerdir. Bu kompozitler, yapısal olarak izotropik bir tepki göstermektedir ve malzeme özellikleri her yönde aynıdır. Bu nedenle malzeme sahip olduğu özellikler açısından benzer bir tepki sergilemektedir. Mukavemetleri, kullanılan taneciklerin sertliğiyle yakından ilişkilidir. Plastik bir matris içinde metal parçacıkları içeren kompozitler elektriksel ve ısı iletkenlik sağlamaktadır. Ayrıca metal matris içinde seramik parçaları içeren kompozitler, yüksek sıcaklık dayanıklılığına sahip olurken aynı zamanda yüksek sertliğe sahiptirler. Bu özellikler uçak motor parçaları gibi endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmalarını sağlamaktadır. Ayrıca tanecikler nanometre ölçeğinde ise, bu kompozitler nanokompozitler olarak adlandırılmaktadır (Kandemir 2017). Şekil 2.2’de tanecik takviyeli kompozitlere ait örnekler verilmiştir. Tanecik takviyeli kompozit malzemeler, matris malzemesi içerisinde farklı bileşenlere sahip tanecikleri barındırırlar. Bu tanecikler, hem metalik hem de metalik olmayan malzemelerden oluşabilir. Bu bağlamda, dört temel bileşim kombinasyonu tanımlanabilir:

- Metalik olmayan matris içinde metalik olmayan tanecikler bulunan kompozit malzemeler.

- Metalik olmayan matris içinde metalik tanecikler içeren kompozit malzemeler.
- Metal matris içinde metal tanecikleri barındıran kompozit malzemeler.
- Metal matris içinde metal olmayan taneciklerden meydana gelen kompozit malzemeler.

Tanecik takviyeli kompozitlerde kullanılan takviye tanecikleri, farklı şekil ve boyutlara sahip olabilmektedir (Şen vd. 2010).

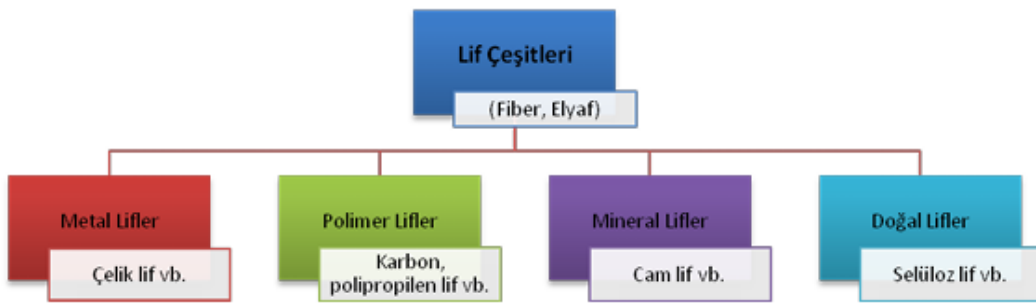


Şekil 2.2 Tanecik takviyeli kompozit örnekleri (İnt. Kyn. 2).

2.1.3.2 Lif Takviyeli Kompozitler

Lifler, makroskobik düzeyde incelediğimizde homojen, uzun ve esnek malzemelerdir. Boyu kesitinin en az 100 katı uzunluğunda olmaktadır. Bu uzun lifler, çeşitli kaynaklardan elde edilen malzemeler arasında cam, karbon, aramit gibi farklı kökenlere sahip olabilirler. Şekil 2.3’de elde edildikleri malzemeye göre lif türleri gösterilmektedir. Bu lifler, kompozit malzemelerde yapıyı güçlendirmek ve dayanıklılığı artırmak amacıyla kullanılmaktadırlar. Bu tür polimer matrisi ve liflerden oluşan kompozitlere, lif takviyeli

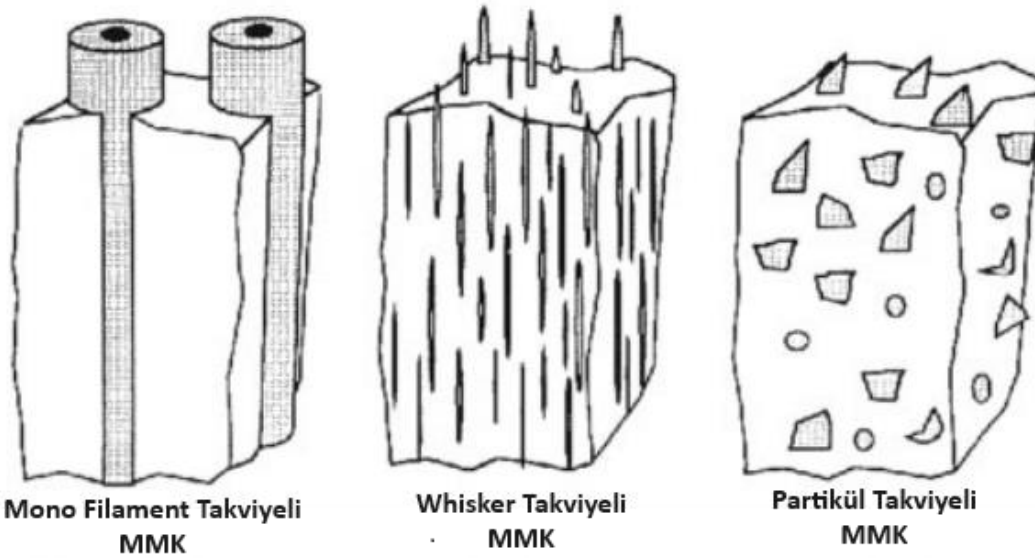
polimerik kompozit adı verilir (Saçak 2015). Lif takviyeli kompozit malzemelerde, dışarıdan gelen yüklerin yapıya iletilmesi büyük ölçüde lif-matris arayüzeyi tarafından gerçekleştirilir. Bu nedenle arayüzeyin yapısı ve özellikleri, kompozit malzemenin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Özellikle arayüzey kayma mukavemeti, kompozit malzemenin dayanıklılığı ve rijitliğini kontrol etmek açısından kritik bir parametredir. İyi mekanik özelliklere sahip bir kompozit malzeme üretmek ve liflerin sağladığı avantajları en iyi şekilde kullanmak için arayüzeyde optimal bir yapışma sağlanmalıdır (Bulut ve Erdoğan 2011).



Şekil 2.3 Elde edildikleri malzemeye göre lif türleri (Topsakal ve Özel 2018).

2.1.3.3 Metalik Kompozitler

Bu kompozitler, genellikle hafif metaller ve alaşımların matris olarak kullanıldığı, aynı zamanda karbon, boron ve bazı metal elyaf, parçacık, plakacık veya whisker yapılarını içeren takviye fazlarını barındıran yapılar olarak tanımlanabilmektedir (Turhan 2007). Şekil 2.4’de metal matrisli kompozitlerden bazılarına ait şematik gösterime yer verilmiştir. Kompozit malzemeler, metalik fazın belirli takviye malzemeleri ile güçlendirilmesi için vakum emdirme, dökme, karıştırma, elektrolizle kaplama, sıcak presleme, haddeleme ve difüzyon kaynağı gibi çeşitli yöntemler kullanılarak üretilmektedirler. Genellikle matris malzemesi olarak demir, alüminyum, titanyum, magnezyum, bakır ve çelik gibi metaller tercih edilmektedir. Bu kompozitler, yüksek sıcaklıklarda bile oksitlenme riski yüksek ortamlarda kullanılabilecek dayanıklılığa sahiptir. Üretim süreci zorlu ve maliyetlidir ancak özellikle uzay ve havacılık sektörlerinde yaygın olarak tercih edilmektedirler (İnt. Kyn. 3).



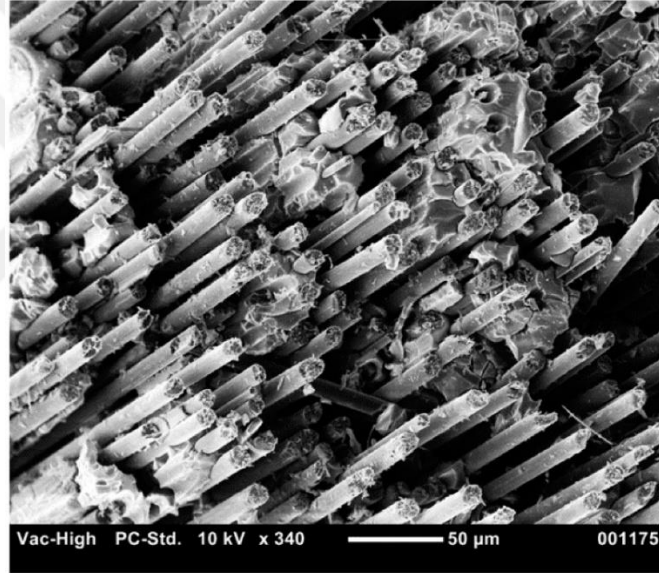
Şekil 2.4 Metal matrisli kompozitlerden bazılarının şematik gösterimi (Kainer 2006).

Metal Matris Kompozitler (MMK), sert takviye fazının metalik matrisle birleşmesi sonucu oluşan mühendislik malzemelerdir. MMK'ler, yüksek dayanıklılık, sertlik gibi özelliklerinin yanında aynı zamanda daha düşük yoğunluğa sahip malzemelerdir. Matris malzemesi olarak alüminyum, magnezyum, bakır ve çeşitli alaşımlar gibi metaller içermektedirler. Takviye elemanları ise sürekli elyaf veya sürekli olmayan elyaf/partikül şeklinde seramik malzemelerden, örneğin alumina, silisyum karbür veya bor nitrür gibi malzemelerden oluşmaktadır. Matris malzemesi, hem takviye elemanlarına uygulanan gerilimi dağıtarak hem de kompozit malzemeye şekil vererek işlev görmektedir (Kayabaşı 2016).

2.1.3.4 Seramik Kompozitler

Seramik matris malzemeleri, Al_2S_3 , Ni_3N_4 , SiC gibi seramik veya metal takviyeleri içeren özel bir malzeme sınıfını ifade etmektedir. Bu tür malzemeler, olağanüstü termal dayanıklılık ve sağlamlık özellikleri ile tanınmaktadırlar. Seramikler, insanların yüzyıllar boyunca ürettiği en eski yapım malzemelerinden biridir ve geçmişte önemli görevler üstlenmiştir. Ancak seramiklerin modern uygulamaları ve potansiyelleri ancak İkinci Dünya Savaşı sonrasında daha geniş bir şekilde keşfedilmiştir. Seramik terimi, tarih boyunca sadece sıhhi seramik, çimento, geleneksel seramik ve cam gibi malzemeleri içermekte iken günümüzde seramik kavramı, nükleer enerjiden lazer teknolojilerine kadar

uzanan özel alanları kapsar hale gelmiştir. Bu özel seramik türleri, yüksek teknoloji sektöründe vazgeçilmez bir rol oynamaktadır (Kayabaşı 2016). Seramik fazın takviye malzemeleri ile güçlendirilmesi, bu malzemelerin özel özelliklerini elde etmek için yaygın bir yöntemdir. Bu malzemeler, genellikle metal veya metalik özelliklere sahip olmayan elementlerin birleşmesiyle üretilirler. Yapıları itibariyle kırılgan olmalarına rağmen, yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren koşullarda karbon, cam, metal ve seramik fiberlerle birleştirilerek kullanılmaktadırlar. Bu malzemeler, zırhlar, askeri ekipmanlar ve uzay araçları gibi yüksek dayanıklılık gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (İnt. Kyn. 3). Şekil 2.5’de Karbon fiberle üretilen seramik matrisli kompozitin kırılma yüzeyini gösteren SEM görüntüsü verilmiştir.



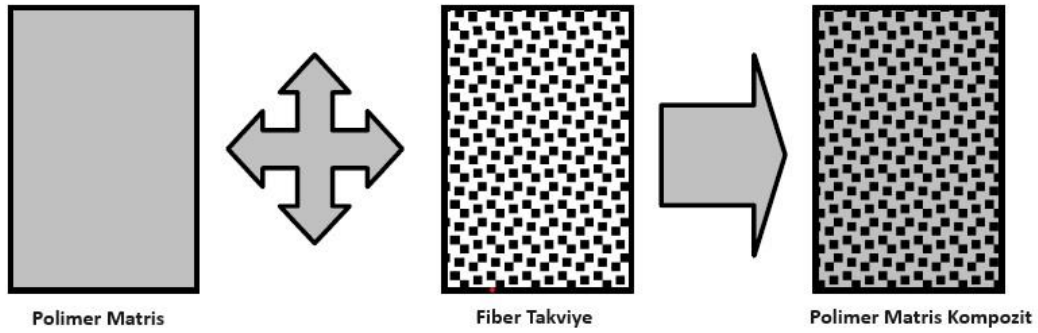
Şekil 2.5 Karbon fiberle üretilen seramik matrisli kompozitin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü (Jiménez vd. 2018) .

2.1.3.5 Polimer Kompozitler

Kompozit malzemelerin büyük bir kısmı polimer esaslı matrislerle üretilmektedir. Şekil 2.6’da fiber takviyeli polimer matris kompozit şematik olarak gösterilmiştir. Bu kompozitlerin günümüzde yaygın olarak kullanılan örneği, cam elyaflarla takviye edilmiş poliester esaslı reçinelerle üretilen "fiberglas" malzemelerdir. Ayrıca ileri kompozitler sınıfında daha gelişmiş fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip elyaflar kullanılmaktadır. Bu malzemeler, yüksek çekme ve basma dayanımı, yüksek elastik

modül ve yüksek darbe dayanıklılığı gibi üstün özelliklere sahiptirler (Örs 2014).

Üretim kolaylığı ve maliyetinin düşük olması nedeniyle polimer matrisli kompozitler genel endüstride en yaygın kullanılan kompozit türleridir. Burada matris fazı olarak adlandırılan ana yapı polimerik reçine türevlerinden oluşmaktadır. Polimerik reçineler, sahip oldukları bağa göre termoplastik ve termoset gruplarına ayrılmaktadır. Termosetler çapraz bağa sahiptir, ısıtıldıklarında sert, rijit hal alırlar. Isıyla yalnızca bir kez şekillendirilmektedirler. Termoplastiklere göre daha gevrek özellik göstermektedirler (Köymen 2021).



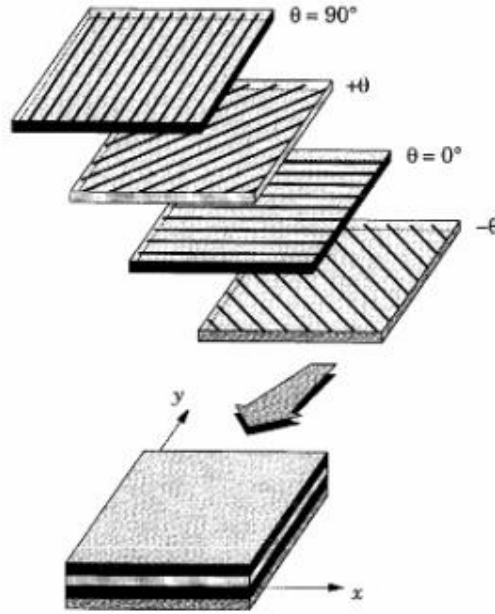
Şekil 2.6 Fiber takviyeli polimer matris kompozitler (Doreswamy 2013).

2.1.3.6 Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozitler Şekil 2.7’de gösterildiği üzere farklı malzemelerin, katmanlar halinde bir araya getirilerek oluşturulduğu bir malzeme sınıfını temsil etmektedir (İmak 2015). Bu katmanlar, ince filmler veya levhalar şeklinde düzenlenir ve malzemenin kalınlığına göre tekrarlı bir şekilde yerleştirilmektedir (Sabancı 2005).

Günümüzde tabakalı kompozit malzemeler, yüksek dayanım/ağırlık oranı ve direnç/ağırlık oranı gibi avantajları nedeniyle uzay yapıları, ulaşım araçları, elektrik, kimya, konstrüksiyon ve gıda endüstrilerinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Plastik malzemelerin çeşitli takviye elemanları ile güçlendirilmesi, metal veya seramikle birleştirilmesi sayesinde, son derece dayanıklı, hafif ve sağlam malzemeler elde etmek mümkün hale gelmiştir. Bu kompozit malzemeler, içerdikleri plastik sayesinde kolayca şekillendirilebilirler ve aynı zamanda takviye elyafların katkısıyla son derece sağlam, sert

ve hafif olmaktadır (Solmaz ve Gür 2007).



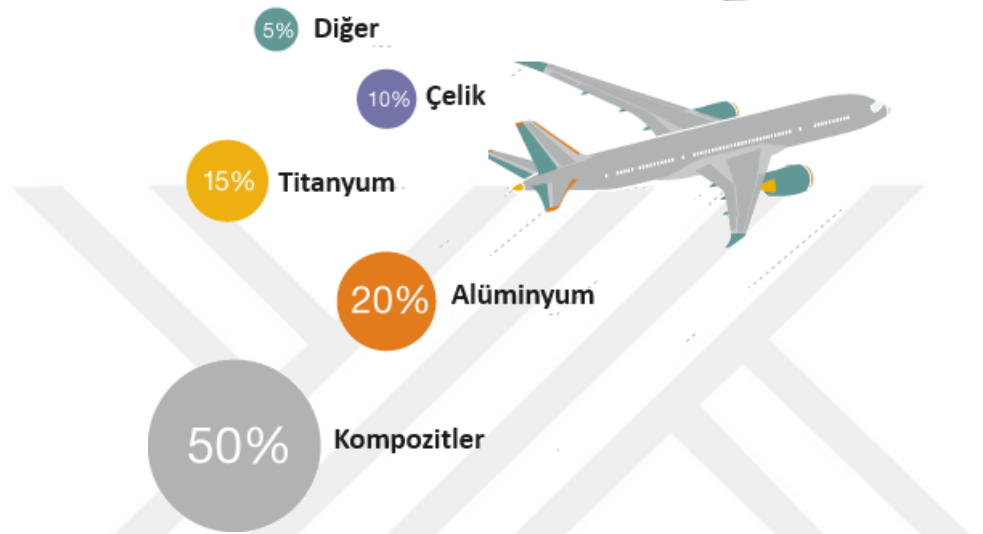
Şekil 2.7 Tabakalı kompozitin şematik gösterimi (Topalak 2012).

2.1.4 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

2.1.4.1 Havacılık/ Uzay/ Savunma Sanayi

Havacılık sektöründe kompozit malzemelerin ilk uygulamaları radar kubbeleri ile başlamış olup, 1950’lerde uçak pervanelerinin kompozit malzemelerden üretilmesiyle devam etmiştir. Günümüzde ise uçak endüstrisinde kompozit malzeme kullanımı oldukça yaygınlaşmış olup, kullanım oranları %30’un üzerine çıkmıştır. Örneğin, General Dynamics firması tarafından üretilen F-111 uçaklarının gövdelerinde bor-epoksi çifti kullanılmıştır. Aynı şekilde, Northrop F5 uçaklarının gövdelerinde grafit-epoksi çifti tercih edilmiştir. Grumman F-14 ve McDonnell Douglas F-15 gibi uçaklarda da bor-epoksi kompozitleri kullanılırken, General Dynamics'e ait YF-16 uçaklarında ise karbon-epoksi esaslı kompozit malzemeler tercih edilmektedir (Eryıldız ve Akdoğan 2015). Uzay sanayisinde gelişmiş polimer matrisli kompozit malzemeler ile alüminyum yapıların kullanımı karşılaştırıldığında %25 ila %40 arasında ağırlık tasarrufu sağlanabilmektedir. Bu durum kilogram başına 50 ila 500 dolar arasında tasarruf anlamına gelmektedir. Uzay araçları için ağırlık kritik bir faktör olduğundan, mümkün olduğunca her parçada

kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Örneğin, itici gaz tankları genellikle karbon fiber takviyeli PEEK matrisli kompozitlerden üretilirken, gaz çıkış nozulları karbon fiber takviyeli fenolik reçinelerden veya karbon-karbon kompozitlerden yapılmaktadır (İnt. kyn. 4). Wright kardeşler tarihi uçuşunda ahşap ve alüminyum alaşımı gibi hafif malzemeler kullanmıştır. Bugün NASA'nın uzay mekiği, itici roketler için alüminyum tozu kullanılmaktadır (Askeland vd. 2011).



Şekil 2.8 Boeing 787 uçaklarda kompozit malzeme kullanım oranı (İnt. Kyn. 5).

Şekil 2.8’de gösterildiği üzere Boeing 787’nin, stabilizatörler, kanatlar ve gövde dahil olmak üzere yapısal ağırlığının %50’si kompozit malzemelerden imal edilmiştir. Airbus’ın öncü A350 XWB modeli ise %53 oranında kompozit malzemeler içermekte olup, bu özellik sayesinde yakıt tüketiminde %25 tasarruf sağlanmıştır (İnt. Kyn. 6).

2.1.4.2 Ev Aletleri ve İş Ekipmanları

Kompozit malzemeler, çeşitli endüstriyel ve tüketici ürünlerinin imalatında önemli bir rol oynamaktadır. Bu malzemeler, birçok farklı sektörde kullanılmaktadır. Örneğin, buzdolapları, dondurucular, mikrodalga fırınlar, küçük ev aletleri gibi beyaz eşyaların üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Aynı zamanda motorlu aletler, fırınlı ocaklar, dikiş makinesi parçaları gibi alet ve makine imalatlarında da tercih edilmektedirler. Hesap makineleri, bilgisayarlar, fotokopi makineleri gibi elektronik cihazların gövdeleri ve kapakları için de kompozit malzemeler sıkça kullanılmaktadır.

Şekil 2.9’da iç gövdesi gaz geçirmez özel PE’den üretilen CNG kompozit yakıt tankı gösterilmektedir.



Şekil 2. 9 CNG kompozit yakıt tankı (İnt. Kyn. 24).

2.1.4.3 Tarım Gıda Sektörü

Kompozit malzemeler, tarım ve endüstriyel sektörlerde de önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle, silolar, sulama boruları ve gıda depolama tankları gibi tarım ekipmanlarının üretiminde bu malzemeler sıkça kullanılmaktadır. Bu çözümler, dayanıklılık, düşük bakım maliyeti ve uzun ömür gibi avantajlarıyla tarım işletmeleri için idealdir. Ayrıca, salamura tankları, yem tesisi gereçleri, balık çiftlikleri ve çiftlik ekipmanları gibi tarım ve hayvancılık sektörünün ihtiyaçlarını karşılamak için kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Bu malzemeler, kimyasal dirençleri sayesinde yemlerin ve gıdaların güvenli depolanmasını sağlamaktadır. Taşıma kapları ve pulverizatör imalatı gibi endüstriyel uygulamalarda da kompozit malzemeler kullanılmaktadır (Işık 2008). Şekil 2.10’da fiber glass kompozit silolar gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Kompozit fiber glass silolar (İnt. Kyn. 7).

2.1.4.4 Yapı Sektörü

Kompozit malzemeler, yapısal güçlendirme ve estetik iyileştirmeler için inşaat sektöründe sıkça kullanılmaktadır. Özellikle yaya köprüleri, kompozit malzemeden üretilen pultrüzyon profiller kullanılarak inşa edilmektedir. Ayrıca, boru hatları için kullanılan farklı çaplarda borular, menholler, rögar kapakları, mazgallar ve dokunulabilir yüzeyler gibi birçok altyapı ve üstyapı ürünü, kompozit malzemeler kullanılarak üretilmektedir (İnt Kyn. 8). Banyo küvetleri, lavabolar, banyo tezgahları gibi ürünlerin imalatında kompozit malzemeler yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Ayrıca, yağmur suyu taşıma sistemleri için kullanılan yağmur olukları ve su indirme boruları da kompozit malzemelerle üretilmektedir. Bu malzemeler, hafiflikleri ve dayanıklılıklarıyla suyun doğru şekilde yönlendirilmesini sağlamaktadır. Yüzme havuzları, soğutma kuleleri, beton kalıpları, sera panelleri gibi birçok yapı ve inşaat uygulamasında kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Prefabrik binalar ve modüler kabinler gibi yapılarda bu malzemelerin hızlı montajı ve dayanıklılığı sayesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.11’de binaların dış cephe kaplamalarında kullanılan alüminyum kompozit paneller gösterilmiştir.



Şekil 2.11 İnşaat sektöründe kullanılan kompozit kaplama malzemesi (İnt Kyn. 9).

2.1.4.5 Denizcilik

Fiber takviyeli polimer (FRP) kompozit malzemenin denizcilik sektöründeki ilk uygulamaları, II. Dünya Savaşı'nın hemen ardından tekne yapımıyla başlamıştır. Tekne üreticileri, ahşap malzemenin giderek daha nadir ve pahalı hale gelmesi, deniz suyu ve deniz organizmaları nedeniyle ahşap teknelerin hızla bozulması ve ardından maliyetli tamirler gerektirmesi gibi nedenlerle geleneksel ahşap yerine FRP kompozitleri kullanmaya başlamıştır. FRP kompozitlerle tekne gövdeleri üretimi için ilk adımlar, 1947'de ABD Donanması için on iki küçük sörf teknesinin üretildiği dönemde atılmıştır. FRP kompozitlerin deniz taşıtlarında kullanılması, öncelikle hafif, dayanıklı, korozyona karşı dirençli askeri gemilere duyulan ihtiyaçtan kaynaklanmıştır. Bu ilk uygulamaların çoğu, çelik veya alüminyum alaşımlarında yaşanan korozyon sorunlarının veya ahşabın maruz kaldığı çevresel bozulmanın üstesinden gelme ihtiyacından kaynaklanmıştır. Ayrıca, gemilerin üst kısımlarındaki ağırlığı azaltma gerekliliği gibi diğer nedenlere kompozit malzeme kullanımını teşvik etmiştir (Manohar 2019). Şekil 2.12' de fiber glass malzemeden üretilen tekne konsolu gösterilmiştir.



Şekil 2.12 Kompozit tekne konsolu (İnt. Kyn. 10).

2.1.4.6 Elektrik/ Elektronik Sektörü

Elektrik ve aydınlatma sektöründe birçok önemli ürünün imalatında kompozit malzemeler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. İzolatörler, antenler, baskılı devre panelleri, devre kesiciler, sigorta panel kutuları gibi elektrikle ilgili ürünlerin imalatında bu malzemelerin tercih edilmesi oldukça yaygındır. Bu ürünler, kompozit malzemelerin hafifliği ve dayanıklılığı sayesinde elektrik sistemlerinin güvenli ve etkili bir şekilde çalışmasını sağlamaktadırlar. Şekil 2.13’de kompozit malzemedan üretilen silikon izolatör gösterilmiştir. Ayrıca, aydınlatma gövdeleri, elektrik ve aydınlatma direkleri, elektrik direk bazaları, devre kesici kutuları, sokak lamba gövdeleri gibi ürünlerin üretiminde de kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemeler uzun ömürlüdür ve dış etkilere karşı dayanıklıdır. Bu nedenle açık hava uygulamaları için idealdir. Rüzgar jeneratörleri ve kablo taşıyıcıları gibi enerji üretimi ve iletimiyle ilgili önemli bileşenlerde de kompozit malzemeler sıkça kullanılmaktadır. Son olarak, sayaç panoları, projektörler ve benzeri ürünlerin imalatında kompozit malzemelerin kullanılması, bu malzemelerin çok yönlü ve geniş bir uygulama yelpazesine sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.13 Kompozit silikon izolatörler (İnt. Kyn. 11).

2.1.4.7 Tüketim Malları/ Spor/ Eğlence

1997 yılında spor malzemeleri üretiminde kompozit malzeme kullanımı 50.000 tonu aşmıştır. Kompozit malzemenin spor ekipmanları sektöründe yer edinebilme

sebeplerinden bazıları şunlardır: Öncelikle, golf sopalarında olduğu gibi spor ekipmanlarının hafif olması önemlidir. Ayrıca, spor ekipmanları yüksek sönümleme kapasitesine sahip olmalı ve çeşitli belirsiz yükler altında dengeyi korumalıdır. Bu gereksinimleri karşılamak için yüksek elastikiyet modülüne sahip kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Ayrıca kompozitlerin kalıplanma yetenekleri çeşitli ileri teknolojilerle optimize edilmiştir. Bu durum üreticilere minimum maliyetle ve hızlı üretim imkanı sağlamaktadır (Gunale ve Sarang 2019). Kompozit malzemeler, farklı eğlence ve spor ekipmanlarının imalatında da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Örneğin, yüzme havuzları ve bu havuzlarda kullanılan ekipmanlar, su kaydırakları ve fiskiyeli süs havuzları gibi suyla ilgili ürünler, kompozit malzemelerle üretilmektedir. Bu malzemeler, suya dayanıklılık, hafiflik ve dayanıklılık sağlamaktadır. Olta kamışları, kayaklar/snowboardlar, müzik aletleri, tenis raketleri gibi spor ekipmanları da kompozit malzemelerle üretilmektedir. Bu malzemeler, sporcuların performansını artırmak için kullanılır ve hafif, esnek ve dayanıklı olmaları gerekmektedir. Ayrıca, kasklar, motorlu kıyaklar, bowling aletleri, bisikletler, egzersiz aletleri gibi farklı spor ve eğlence ürünlerinde de kompozit malzemeler tercih edilmektedir. Bu malzemeler, güvenlik, hız ve dayanıklılık gibi önemli özelliklere sahip olmaları nedeniyle tercih edilirler. Tüm bu farklı eğlence ve spor ekipmanları, kompozit malzemelerin çok yönlülüğünü ve avantajlarını yansıtmaktadır. Bu malzemeler, kullanıcıların daha güvenli ve performans odaklı deneyimler yaşamalarını sağlar ve bu nedenle birçok spor ve eğlence alanında tercih edilmektedir.

2.1.4.8 Askeri Uygulamalar

Miğferlerden balistik koruyucu panellere, taşıt araçlarının parçalarından istihkam malzemelerine kadar birçok farklı uygulama alanında kompozit malzemelerin kullanımı yaygındır. Bu malzemeler, yüksek mukavemetleri ve hafiflikleri nedeniyle savunma ve güvenlik sektöründe tercih edilmektedirler. Silah ve roket parçaları gibi askeri ekipmanlardan, mayın avlama gemileri ve sahil koruma botları gibi denizcilik uygulamalarına kadar, kompozit malzemeler kullanılmaktadır (Işık 2008). Şekil 2.14’de kompozit askeri miğfer gösterilmiştir.



Şekil 2.14 Koruyucu kompozit askeri miğfer (İnt. Kyn. 12).

2.1.4.9 Korozyona Dayanımlı Ürünler

Boru ve bağlantı parçalarından endüstriyel tanklara, pompa gövdelerinden kanallara kadar birçok endüstriyel ekipman ve yapı kompozit malzemelerden üretilmektedir. Bu malzemeler, kimyasal dayanıklılık, hafiflik ve mükemmel mukavemet gibi özellikleri nedeniyle endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedirler. Fan kanatları, arıtma tesisleri ekipmanları, yer ızgaraları ve kimyasal işlem tankları gibi tesislerin imalatında kompozit malzemelerin kullanımı oldukça yaygındır. Su ve su atık boruları ile baca arıtma cihazları gibi su ve hava kalitesini iyileştiren önemli ekipmanlar da kompozit malzemelerle üretilmektedirler (Işık 2008). Şekil 2.15’de PPRC kompozit borular gösterilmiştir.



Şekil 2.15 Kompozit borular (İnt. Kyn. 13)

2.1.4.10 Taşımacılık ve Otomotiv

Otomotiv endüstrisi, başta polimer matrisli kompozitler olmak üzere gelişmiş kompozit malzemelerin en fazla kullanıldığı endüstri olarak görülmektedir. Polimer matrisli kompozitlerin otomotiv sektöründe kullanımına teşvik eden durumlar arasında daha iyi

yakıt verimliliği için ağırlığın azaltılması, sürüş kalitesinin iyileştirilmesi ve korozyon direnci yer almaktadır. Kompozitlerin otomobil gövde yapılarında yaygın kullanımının, imalat yöntemleri ve geri dönüşüm gibi yeni endüstrilerin oluşması üzerinde önemli etkileri olmaktadır (Manohar 2019). Ayrıca karayolu işaretleri, güzergahlarımızı belirlememize yardımcı olan önemli unsurlardır. Tampon ve çamurluklar, araçların güvenliği ve görünürlüğü için kritik parçalardır. Kaporta parçaları, araçların dış görünüşünü korur ve estetik açıdan önemlidir. Makaslar ve şaftlar, endüstriyel makinelerin işleyişini sağlayan temel bileşenlerdir. Kamyonet kabinleri, sürücülerin konfor ve güvenliklerini sağlayan alanlardır. Rüzgar deflektörleri, yakıt verimliliğini artırmaya yardımcı olurken, treyler gövde panelleri yük taşımacılığında önemli bir rol oynamaktadır. Banliyö trenleri araç koltukları ve tutamakları, toplu taşıma sistemlerinde konforlu bir seyahat sağlamakta olup yolcuların güvende olmasına katkıda bulunmaktadır. Söz konusu tüm bu malzemeler kompozitlerden üretilmiştir. Şekil 2.16’da gösterilen elektrikli BMW i3 model otomobilin tüm gövdesi karbon fiberden imal edilmiştir.



Şekil 2.16 Tüm gövdesi karbon fiberden imal edilen BMW i3 model otomobil (İnt. Kyn. 14).

2.1.5 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozit malzemeler, düşük özgül ağırlıkları sayesinde hafif konstrüksiyonlarda büyük bir avantaj sunmaktadır. Bu özellikleri sayesinde kompozit malzemeler, otomobil gövdeleri ve tamponlarından deniz teknelerine, binaların cepheleri ve panolarından komple banyo ünitelerine, ev eşyalarından tarım araçlarına kadar birçok endüstriyel

alanda sorunları çözmek için ideal bir malzemedir (Türedi 2015).

Kompozit malzemeler, yüksek teknoloji alanında giderek daha fazla kullanılmakta olup, farklı uygulamalarda belirli özelliklere sahip olmaları talep edilmektedir. Bu özellikler arasında çekme, basma, eğilme, akma, yorulma, mukavemet, sertlik, tokluk, rijitlik, aşınma direnci gibi mekanik özellikler bulunmaktadır. Ayrıca, elektriksel iletkenlik veya yalıtkanlık, manyetik özellikler, yoğunluk gibi fiziksel özellikler ile kararlılık ve korozyon direnci gibi kimyasal özellikler de dikkate alınmalıdır. Malzeme seçimi ve tasarım sürecinde, bu özelliklerin yanı sıra malzemenin birim maliyeti, kolay bulunabilirliği, işlenebilirliği ve şekillendirilebilirliği gibi faktörler de göz önünde bulundurulmalıdır (Can 2008).

Kompozit malzemelerin avantajları oldukça çeşitlidir. Örneğin, kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemeti birçok metalik malzemeden daha yüksektir, bu da dayanıklılık açısından büyük bir avantajdır. Ayrıca büyük ve karmaşık parçaları tek bir işlemlle kaplayabilme yetenekleri, üretim süreçlerini daha verimli hale getirmektedir. Büyük enerji nakil hatlarında kullanılabilme yetenekleri, kompozitleri iyi bir iletken veya yalıtkan malzeme olarak kullanma esnekliği sunmaktadır. Kimyevi madde tankları, borular, aspiratörler ve deniz araçları gibi uygulamalarda güvenle kullanılabilme özellikleri, kompozitlerin geniş bir endüstri yelpazesinde tercih edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, yüksek ısıya dayanıklılıkları sayesinde yüksek sıcaklık koşullarında kullanılabilirler ve pigmentler eklenerek istenen renkleri elde etmek mümkün olmaktadır. Süneklikleri nedeniyle titreşim sönümleme ve şok emme yetenekleri de kompozit malzemelerin önemli bir özelliğidir. Ancak kompozit malzemelerin dezavantajları da dikkate alınmalıdır. Örneğin, içlerindeki hava zerrecikleri malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz etkileyebilmektedir. Aynı malzeme için farklı doğrultularda farklı mekanik özellikler gösterebilmektedirler. Bu durum, mühendislik hesaplamalarını karmaşık hale getirebilmektedir. Delik delme veya kesme gibi operasyonlar liflerde açılmaya neden olabilir ve bu durum hassas imalat gerektiren uygulamalarda problem yaratabilmektedir. Malzemenin kalitesinde standartlaşmış bir kalite olmaması ve bazı kompozitlerin sınırlı raf ömürlerine sahip olmaları da dikkate alınması gereken faktörlerdir. Ayrıca, kırılgan bir malzeme olmaları nedeniyle kolayca zarar görebilirler

ve onarımları zor olabilmektedir. Bu nedenle, kompozit malzemelerin avantajları ve dezavantajları dikkatlice değerlendirilerek doğru uygulamalarda kullanılmalıdır (Türedi 2015).

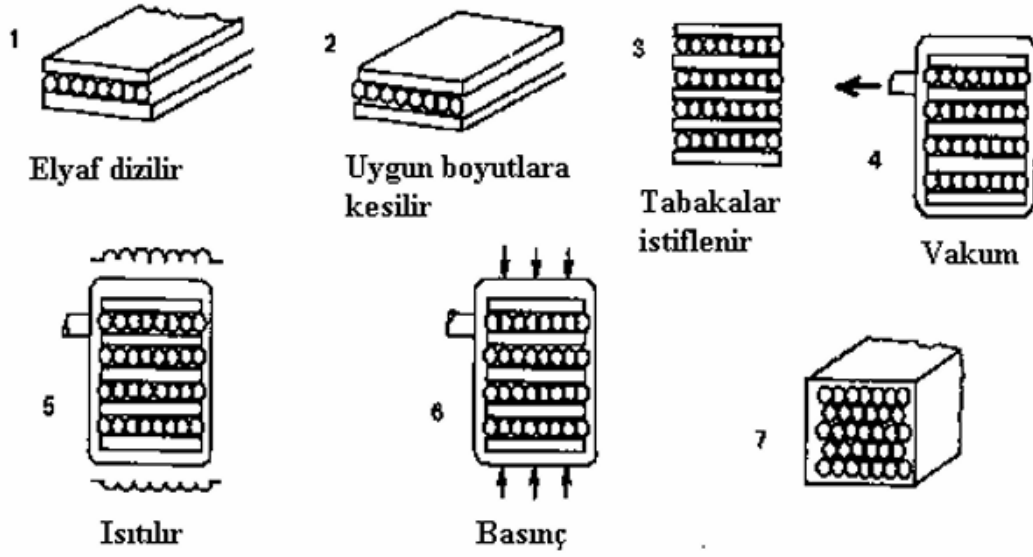
2.1.6 Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

Metal matrisli kompozitler, ana matris malzemesi olarak metal kullanan, seramik parçacıklar veya lifler gibi takviye elemanları ile oluşturulan kompozit malzemelerdir. Bu takviye elemanları, kompozitin yüksek sertlik, mukavemet ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi özellikler kazanmasına katkı sağlamaktadır. Metal matrisli kompozitler, çeşitli avantajlara sahiptir. Örneğin daha iyi aşınma ve sünme direnci, boyutsal kararlılık ve yanmazlık gibi özellikler sunmaktadır. Ancak yüksek ağırlık ve üretim maliyetleri gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu tür kompozitlerde kullanılan ana matris malzemeleri genellikle alüminyum, titanyum, magnezyum ve bakırdır. Takviye elemanları olarak ise silisyum karbür ve alümina gibi malzemeler yaygın olarak tercih edilmektedir. Metal matrisli kompozitlerin üretimi için kullanılan yaygın imalat işlemleri arasında toz metalurjisi teknikleri, buhar biriktirme, difüzyon bağlanması ve sıvı metalin basınç altında fiber demetleri içine sızması gibi yöntemler bulunmaktadır. Bu çeşitli imalat teknikleri, farklı uygulamalara uygun metal matrisli kompozitlerin üretilmesine olanak tanımaktadır (Şanlıtürk 2020).

2.1.6.1 Sıcak Presleme Yöntemi ile Kompozit Malzeme Üretimi

Şekil 2.17’ de sıcak presleme yöntemi gösterilmiştir. Sıcak presleme elyafların sabit bir pozisyonunu korumak için metal folyolar arasına yerleştirildiği bir işlemi içermektedir. Belirli bir sıcaklıkta, genellikle 80 ila 170 derece arasında, presleme işlemi gerçekleştirilir. Bu sıcaklık, kullanılan reçinenin özelliklerine bağlı olarak ayarlanmaktadır. Presleme sırasında, elyafın kaymasını engellemek için yüzeye püskürtülen ve pres operasyonu sırasında aktivasyonu sağlanan bir bağlayıcı madde kullanılır. Presleme işlemi sırasında uygulanan basınç, üretilecek kompozitin boyutlarına göre değişkenlik gösterir ve genellikle 0,5 ila 15 MPa arasında olabilmektedir. Bu yöntemle genellikle yassı mamuller üretilir ve saatte 15 ila 30 adet ürün elde

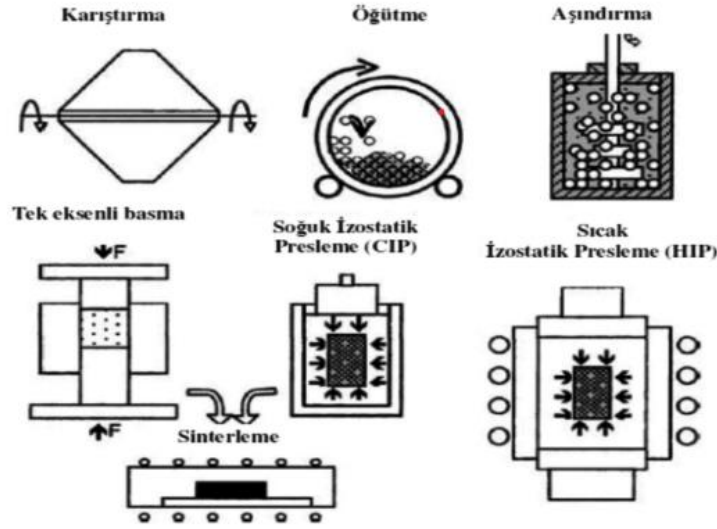
edilebilmektedir. Kullanılan ana metal matris malzemeleri arasında alüminyum, magnezyum, titanyum ve bunların alaşımları bulunmaktadır. Bu yöntem, metal matrisli kompozitlerin üretiminde kullanılan önemli bir tekniktir ve farklı uygulamalara uygun kompozit malzemelerin üretilmesine katkı sağlamaktadır (Kurtuluş 2017, Can 2008, Özer 2015).



Şekil 2.17 Sıcak presleme yöntemi ile kompozit malzeme üretimi (İnt. Kyn. 15).

2.1.6.2 Toz Metalurjisi Yöntemi ile Kompozit Malzeme Üretimi

Toz metalürji üretim tekniği, kelime anlamıyla toz boyutundaki malzemeleri çeşitli yöntemlerle bir araya getirerek ürünlerin oluşturulmasını içermektedir. Bu teknik, genellikle ürünlerin son hali veya son hale çok yakın boyutta, genellikle ikincil bir işleme ihtiyaç duymadan veya bu ihtiyacı azaltarak üretilebilmesini sağlamaktadır. Toz metalürji üretim tekniği, geleneksel malzeme tozlarını bir araya getirerek işe yarar ürünlerin elde edilmesinde kullanıldığı gibi, kompozit malzemelerin üretiminde de uygulanabilmektedir. Özellikle sementit karbür kesicilerin üretiminde kullanılan tek yöntemdir. Şekil 2.18’de toz metalurjisi ile kompozit malzeme üretimi gösterilmiştir. Şekil 2.18’de görüldüğü gibi, matris ve takviye fazı tozları karıştırılarak istenilen şekilde bir kalıba dökülür. Kalıba dökülen tozların bir araya tutturulması için presleme işlemi uygulanmaktadır (Nas vd 2013).

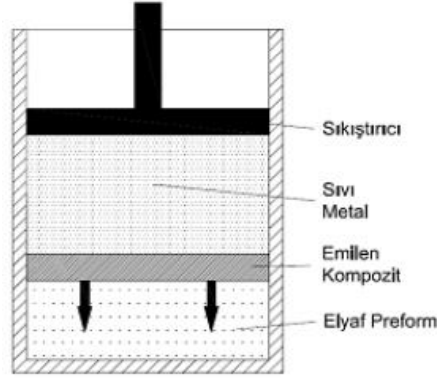


Şekil 2.18 Toz metalürjisi yöntemi ile kompozit malzeme üretimi (Nas vd. 2013).

2.1.6.3 Sıvı Metal Emdirme Yöntemi İle Kompozit Malzeme Üretimi

Alüminyum, magnezyum, titanyum ve bunların alaşımları gibi hafif metaller, metal matrisli kompozitlerin yaygın olarak kullanılan matris malzemeleridir. Bununla birlikte, bu tür matris malzemeleri ile geniş yüzey alanına sahip seramikler, bor ve karbon gibi takviye elemanları arasındaki ıslanabilirlik zayıf olabilmektedir ve matris-fiber arayüzündeki olumsuz reaksiyonlar, kompozitin mekanik mukavemetini azaltarak metal-metal kırılğan bileşiklerin oluşmasına neden olmaktadır. Geleneksel metalürji yöntemlerinde karşılaşılan ıslanma sorunlarını aşmak amacıyla sıvı metal emdirme tekniği geliştirilmiştir. Sıvı metal emdirme üretim tekniğinde, preform adı verilen yapı, içindeki takviye fazını tutarak gözenekli bir gövdeye sarılmaktadır. Ardından, gözenekler, ergimiş metal ile doldurularak kompozit malzeme elde edilmektedir. Bu üretim tekniğinde asal gaz, mekanik sistemler veya vakum kullanılabilmektedir. Şekil 2.19'da sıvı metal emdirme tekniği gösterilmiştir. Seramik preformlar, sıvı metal emdirme tekniğinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir, özellikle sıkıştırılmalı dökümde parçalanmanın engellenmesine yardımcı olmaktadır. Bu işlem, preformun içine ergimiş metalin itilmesini içermekte olup genellikle bir piston kullanılarak 50 ila 100 MPa arasında basınç uygulamaktadır. Ancak, bu tekniğin bazı sorunları vardır. Örneğin, preform içinde gaz hapsolması, mekanik özelliklere zarar verebilmekte ve metal-seramik

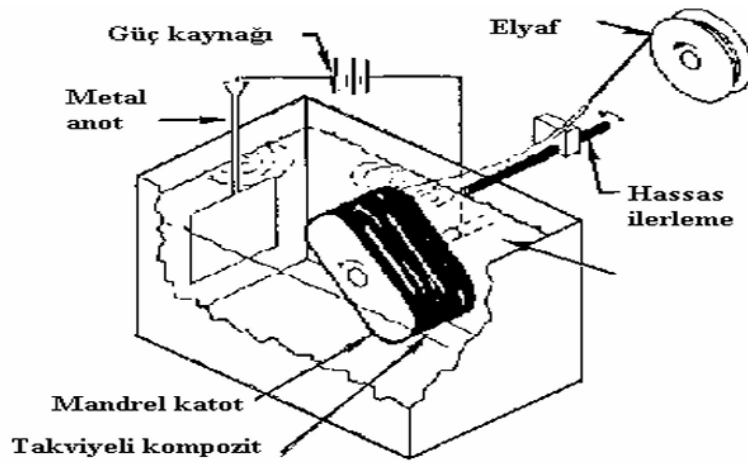
arayüzünde boşluklara neden olmaktadır. Yüksek basınç nedeniyle laboratuvar araştırmalarında büyük ve ağır ekipmanların kullanılması geliştirme sürecini zorlaştırabilmektedir (Kayabaşı 2016).



Şekil 2.19 Sıvı metal emdirme yöntemi (Kayabaşı 2016).

2.1.6.4 Elektroliz Yöntemi ile Kompozit Malzeme Üretimi

Bu metod, katot olarak kullanılan mandrel üzerindeki elyaflara elektroliz esnasında metal matrisin çökeltilmesi adımını içermektedir. Elektroliz tekniği, yüksek hacim oranlı kompozit malzemelerin üretilmesine imkan tanımaktadır. Son aşamada, elyaflar düşük sıcaklıklarda birleştirilmek üzere preslenmektedir. Bu düşük sıcaklık işlemleri, elyafların özelliklerini muhafaza etmek açısından kritik bir öneme sahiptir (Kurtuluş 2017). Şekil 2.20’de elektroliz yöntemi ile kompozit malzeme üretiminin şeması gösterilmiştir.



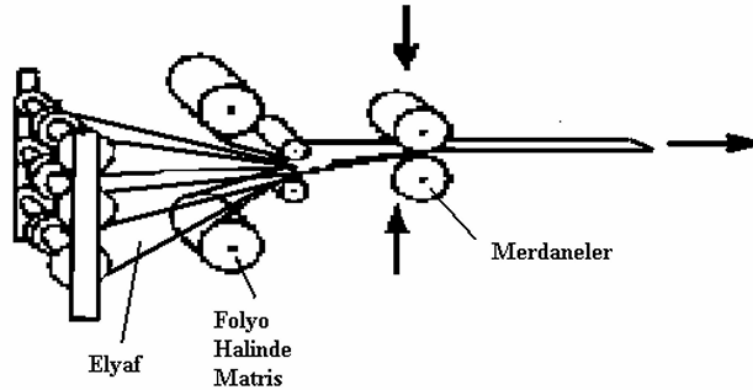
Şekil 2.20 Elektroliz yöntemi ile malzeme üretimi (İnt. Kyn. 15).

2.1.6.5 Buhar Çökertme Yöntemi ile Kompozit Malzeme Üretimi

Bu yöntemle üretilen kompozitlerde, buharlaştırılan matris malzemesi, takviye elemanının üzerine çökeltir ve takviye elemanını kaplamaktadır. Alüminyum ve nikel gibi metal matrisler, bu yöntemin yaygın olarak kullanıldığı materyallerdir. Üretim işleminin düşük sıcaklıklarda gerçekleşmesi bir avantaj sağlarken, yüksek maliyetler olumsuz bir durum olarak öne çıkmaktadır (Kurtuluş 2017, Özer 2015).

2.1.6.6 Haddeleme Yöntemi ile Kompozit Malzeme Üretimi

Haddeleme yöntemi, metal şeritleri ve elyafı bir arada basınç altında işleyerek sürekli ürünler üretmeyi sağlamaktadır. Matris malzemenin oksitlenmesini önlemek amacıyla, haddeleme işlemi sırasında vakumlama işlemi eş zamanlı olarak gerçekleştirilir. Oluşan malzemeler üst üste konarak nihai ürün kalınlığı artırılabilir (Özer 2015, Kurtuluş 2017). Şekil 2.21’de haddeleme işlemi ile kompozit üretiminin şeması verilmiştir.



Şekil 2.21 Haddeleme yöntemi ile malzeme üretimi (İnt. Kyn. 15).

2.2 Alüminyum Özellikleri

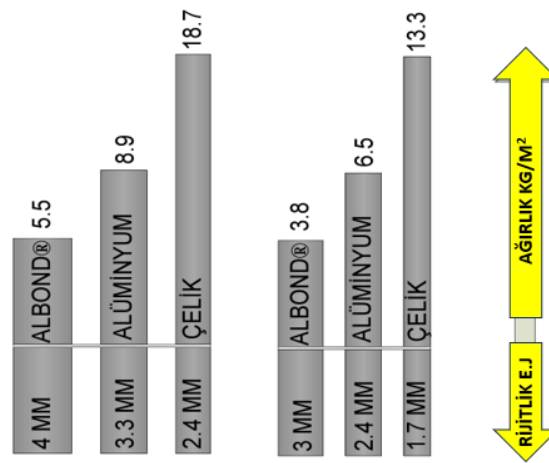
2.2.1 Genel Bilgiler

Alüminyum, dünya genelinde en bol bulunan metallerden biridir. Ancak yeryüzünde saf olarak bulunmamaktadır. Oksijen (%45,5) ve silisyumdan (%27,2) sonra en bol bulunan elementtir (%8,2). Saf alüminyumun doğada bileşikler halinde bulunması nedeniyle, saf

olarak üretimi 19. yüzyılın ortalarına kadar mümkün olmamıştır. Alüminyum, yüksek elektronegatifliğe sahip güçlü bir metaldir ve oksijene karşı büyük bir ilgi göstermektedir. 1880 yılında endüstriyel düzeyde alüminyum üretim yöntemlerini bulan Hall ve Heroult, ilerleyen yıllarda ekonomik düzeyde alüminyum üretimi için büyük bir katkı sağlamışlardır. Hall-Heroult prosesi, boksit cevherinden ekonomik bir şekilde alümina (Al_2O_3) üretiminde önemli bir rol oynamıştır. Alüminyum, boksit mineralinden çıkarılmaktadır. Boksit, Bayer prosesi ile alüminyum okside dönüştürülür ve ardından Hall-Heroult prosesi ve elektrolitik hücreler kullanılarak alüminyum metaline dönüştürülmektedir. Bu keşif, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının büyük ölçekte üretilmesine olanak tanımıştır (Grecu 2021).

2.2.2 Alüminyum Kompozit Levhaların Özellikleri

Alüminyum kompozit paneller, hafif alüminyum temelini koruyarak aynı zamanda sağlamlık sunan, üstün düzeyde yüzey düzgünlüğü, titreşimi emme kapasitesi, olağanüstü dayanıklılık ve bakım kolaylığı sunan bir yapı malzemesidir. Bu özellikleriyle kompozit paneller, mimarların ve tasarımcıların yaratıcı sınırları genişletip benzersiz tasarımların hayata geçirilmesine olanak tanımaktadır. Alüminyum kompozit panel, önceden işlenmiş boyalı iki alüminyum levhanın arasına düşük yoğunluklu polietilen çekirdeğin, ileri teknoloji yöntemleri kullanılarak yapıştırılmasıyla oluşturulan bir kompozit yapı malzemesidir (Albond 2015).



Şekil 2.22 Aynı rijitlikte malzemelerin kalınlık ve ağırlık mukayesesi (Albond 2015).

Alüminyum kompozit panel üretiminde, erimiş halde bulunan polietilen dolgu malzemesi, bir kalıp içerisine yerleştirilip, üst ve alt yüzeyleri kaplayacak şekilde polimer yapıştırıcı ile homojen bir şekilde dağıtılmaktadır. Ardından, üst ve alt alüminyum levha, belirli bir basınç, sıcaklık ve kuvvet altında bir araya gelmekte olup bu işlem sonucunda kompozit malzeme ilk formunu almaktadır. Panelin kalınlığı bu aşamada belirlenir ve bu belirlenen kalınlık değeri, sürekli üretim sırasında sabit kalmaktadır. Bu süreç, yüksek kaliteli ve tutarlı alüminyum kompozit panellerin üretilmesine olanak sağlamaktadır.

Kompozit panel sürekli laminasyon işleminde çeşitli çekirdek kalınlıklarında üretilmektedir ve daha sonra boyutlara göre özelleştirilmektedir. İki adet alüminyum levhası ve PE çekirdekten oluşan bir kompozit paneldir. Şekil 2.22’de aynı rijitlikte malzemelerin kalınlık ve ağırlık mukayesesi verilmiştir. Orta mukavemetli bir alaşımdır, atmosferik korozyona karşı çok iyi direnç, gelişmiş kaynak özellikleri, presleme ve rulo şekillendirme ile iyi şekillendirilebilirlik sunmaktadır (Bendarma 2018).

2.3 Delme İşlemi

Delik delme yöntemi, talaşlı imalat işlemleri arasında yaygın olarak kullanılmakta olup birçok parçada karşımıza çıkmaktadır. Örneğin uçak kanatlarında ve gövdelerindeki perçinlerin, motor blokları ve silindir kapaklarındaki cıvataların ve birçok tüketici ürününde oldukça fazla delik bulunmaktadır. Bu delikler genellikle bağlantı elemanlarıyla (örneğin, deliklerin cıvata, vida veya perçin gibi bağlantı elemanlarıyla birleştirilmesi gereken durumlarda) montaj işlemleri için kullanılmaktadır. Üretim sürecinde delik açma işlemi yaygın olarak kullanılan işlemlerden biridir ve matkap kullanarak delik açma, bu işlemi gerçekleştirmek için en sık kullanılan yöntemdir. Delik delme, birçok endüstriyel ve üretim uygulamasında temel bir adımdır ve birçok farklı malzeme türü üzerinde uygulanabilmektedir (Çiftçi ve Gökçe 2018).

Talaşlı imalat işlemlerinin tamamına bakıldığında, tornalama, frezeleme ve delme gibi işlemlerin hepsi önemli bir yere sahip olsa da, delik delme işlemi bu kategoride büyük bir paya sahiptir. Genel olarak talaşlı imalat işlemlerinin yaklaşık %33'lük bir kısmını oluşturmaktadır. Özellikle havacılık ve uzay sanayi gibi yüksek hassasiyet gerektiren

sektörlerde, bu oranın %40 ila %60'a kadar çıktığı rapor edilmiştir (Çiftçi ve Gökçe 2018). Talaş kaldırma işlemlerinde maliyeti düşürmek, performansı artırmak ve uygun işleme şartlarını elde etmek her zaman temel amaç olmuştur. Optimum işleme koşullarını belirlemek için öncelikle performansı etkileyen belirli özellikleri tanımlanması gerekmektedir. Bu özellikleri belirledikten sonra, performansı etkileyen faktörlerin dikkatlice analiz edilmesi gerekmektedir. Bu faktörlerin performans üzerindeki etkilerini incelemek ve en uygun kombinasyonu bulmak için deneyler yapılmaktadır. Bu deneyler sırasında kontrol edilemeyen faktörler de dikkate alınır. Deneyler sonucunda elde edilen performans göstergeleri değerlendirilir ve en iyi sonuçları elde edebilmek için optimum koşullar belirlenmektedir (Meral vd. 2011).

Talaş kaldırma işlemi, bir takım tezgahına bağlanan kesici takım aracılığıyla istenilen boyut ve şekilde parçaların üretildiği veya iş parçasından fazla malzemelerin talaş şeklinde kaldırıldığı bir üretim sürecini ifade etmektedir. Günümüzde delik delme işlemleri, talaş kaldırma işlemleri içinde önemli bir yer tutmaktadır. Birçok delik delme işlemi, kesici takımın kendi eksenini etrafında dönerek ve hareket eksenini boyunca ilerleyerek yapılan bir talaş kaldırma işlemine dayanmaktadır. Delik delme işlemi, genellikle metal kesme takımları kullanılarak iş parçasında silindirik delikler açma yöntemlerini içermektedir (Yıldız 2021).

Delik açma işlemi, kılavuz çekme, delik büyütme, raybalama gibi operasyonlar için vazgeçilmez bir adımdır ve bu tür işlemler öncesinde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, makine montaj ekipmanlarında kullanılan cıvata, perçin, pim gibi bağlantı elemanlarının yerleştirilmesi içinde delik açma işlemi kaçınılmazdır. Tüm bu uygulamalar, delik açma işleminin sıkça kullanılmasına neden olmuş ve bu işlemin önemini daha da artırmıştır. Delik açma işleminin zorluğunu artıran birkaç faktör bulunmaktadır. Bu işlem sırasında deliğin parça içinde kapalı bir bölgede olması, talaşın takım üzerinden helis kanallarıyla tahliye edilmesi gerekliliği, talaş sıkışmalarının takım kırılmalarına neden olabilmesi ve kesme sırasında yüksek sıcaklıkların oluşması gibi faktörler delik açma operasyonunu karmaşık ve zorlu bir hale getirmektedir (Okay ve Islak 2021).

Matkap ile delme işlemi, radyal ağzın iş parçasına temasıyla başlayıp, ana kesme ağızlarının aktif kesme işlemine katılmasıyla devam etmektedir. Talaşlar helisel kanallar aracılığıyla dışarıya atılmaktadır. Radyal ağız, matkabın hem dönme hem de ilerleme hareketleriyle iş parçasını sıkıştırarak kesici ağzın uygun bir açıyla ilerlemesini sağlamaktadır. Bu şekilde matkabın delme eksenine paralel bir ilerleme elde edilmektedir. Kesici ağız, matkabın ilerleme hareketi sırasında helisel bir yüzey oluşturarak iş parçasını kesmeye başlamaktadır. Kesme ağızlarının etki yönü, helisel yüzey boyunca hareket ettiğinden, matkabın etkili kesme açıları sürekli olarak değişmektedir (Bayraktar 2017).

2.3.1 Temel Tanımlar

Delme işleminde temel hareket, takımın ya da iş parçasının gerçekleştirdiği dönme hareketidir. Şekil 2.23'de kesme hızı ve ilerleme hızı gösterilmektedir. Delme işlemi için kesme hızı (V_c , m/dk), takımın çevresel hızını temel alarak hesaplanmaktadır. Matkap, D takım çapına sahipse, her bir dönüşte çevresel hızı $\pi \times D$ olan bir daire çizer. Takım çapı birimi milimetre cinsinden ifade ediliyorsa, kesme hızı m/dk biriminde elde edilmesi için sonuç 1000'e bölünür. İlerleme veya iş parçasına nüfuziyet hızı (V_f , mm/dev.), birim zamanda alınan yol olarak tanımlanır ve takımın iş parçasına göre ilerlemesi veya iş parçasının takıma göre ilerlemesi olarak düşünülmektedir. Bu aynı zamanda tezgahın veya tablanın ilerleme hızı olarak da adlandırılır. Devir başına ilerleme (f , mm/dev), ilerleme hızını hesaplamak için kullanılan bir parametredir ve takımın veya iş parçasının bir tam devirdeki ilerlemesini ifade etmektedir (Yıldız 2021).

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

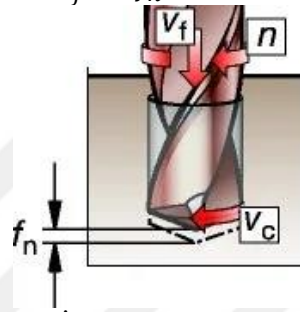
$$n = \frac{V_c \times 1000}{\pi \times D_c} \quad (2.2)$$

Devir başına ilerleme, (fn) µm/devir

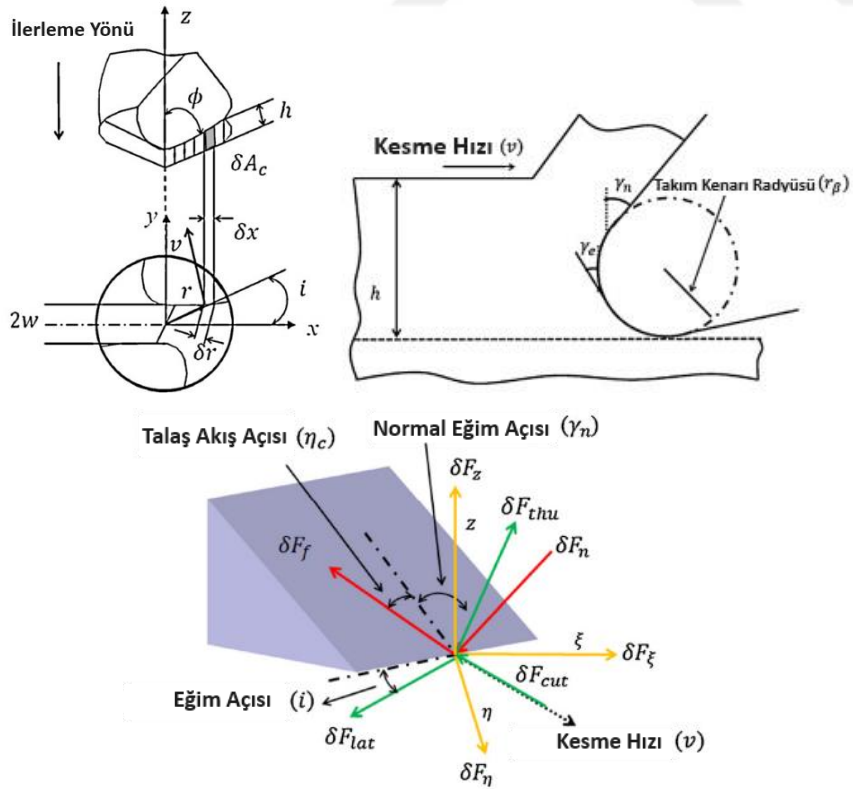
$$f_n = \frac{V_f}{n} \quad (2.3)$$

İlerleme hızı, Vf (µm/devir)

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



Şekil 2.23 Kesme hızı ve ilerleme hızı (İnt Kyn. 16).



Şekil 2.24 Delme mekaniği (Anand ve Patra 2017).

Şekil 2.24’de delme mekaniği üzerine şekiller verilmiştir. Ana kesici kenar eleman sayısına bölünmüştür. Ana kesme kenarının temel kesici talaş alanı Eşitlik 2.5 ile verilmektedir. Burada i , r radyal mesafede kesici kenarın eğim açısıdır. $\emptyset$ matkap uç açısının yarısı. δx eleman genişliği ve h deforme olmamış talaş kalınlığını ifade etmektedir (Anand ve Patra 2017).

$$\delta A_c = h \delta x \cos i / \sin \emptyset \quad (2.5)$$

Eşitlik 2.6’da verilen denklemden yola çıkarak deforme olmamış talaş kalınlığı (h), ilerlemeden (f) ve matkap uç açısının yarısı ($\emptyset$) elde edilmektedir.

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

Eşitlik 2.7’de verilen denklemden yola çıkarak konik bir matkap için eğim açısı; gövde kalınlığı ($2w$) ile uç açısı ($2\emptyset$) arasındaki açıdan şu şekilde belirlenmektedir.

$$i = \sin^{-1}(w \sin \emptyset / r) \quad (2.7)$$

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

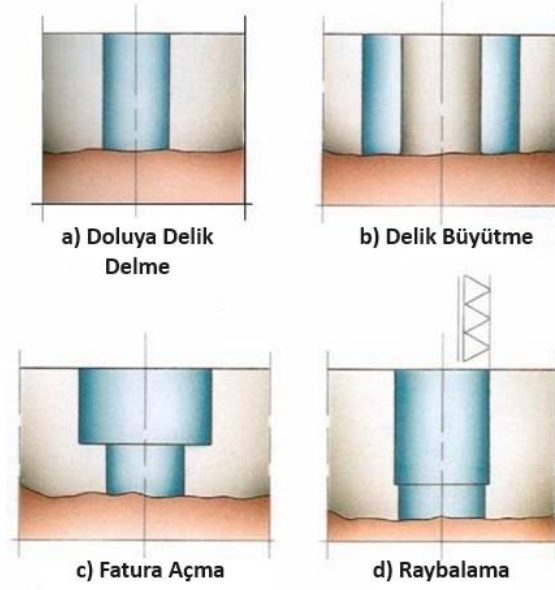
$$\delta F_{thu} = \delta F_f \cos n_c \cos \gamma_e - \delta F_n \sin \gamma_e \quad (2.8)$$

$$\rho = \sin^{-1}(w/r) \quad (2.9)$$

$$\delta F_z = \delta F_{thu} \frac{\cos \rho \sin \emptyset}{\cos i} - \delta F_{lat} \frac{\cos \emptyset}{\sin i} \quad (2.10)$$

2.3.2 Delik Tipleri

Delik delme işlemleri; doluya delik delme, delik büyütme, kademeli delik delme ve raybalama olmak üzere dört başlık altında incelenebilir.



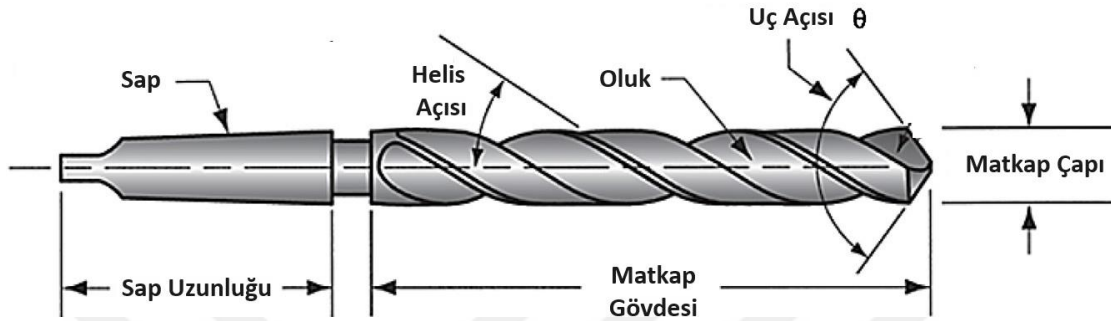
Şekil 2.25 Delik delme tipleri (Yıldız 2021).

Katı bir malzemeye tek seferde belirli bir çapta delik açmak için doluya delik delme (Şekil 2.25a) yöntemi kullanılmaktadır. Daha büyük delik çapları elde etmek için ise delik büyütme yöntemi tercih edilir. Bu yöntem, doluya delik delme kadar çok kuvvet gerektirmemektedir. Delik büyütme (Şekil 2.25b) takımı, sadece deliğin kenarından talaş alıp merkezdeki malzemeyi boş bırakmaktadır. Bu yöntem, delik içinde başka işlemler yapılacaksa uygundur. Fatura açma yönteminde (Şekil 2.25c) ise, mevcut deliği genişletmek için çok talaş kaldıran özel bir takım kullanılmaktadır. Raybalama (Şekil 2.25d) ise, mevcut deliğin yüzey kalitesini ve toleransını arttırmak için yapılan son işlemdir (Kaplan 2010).

2.3.3 Delik Delme Takımları

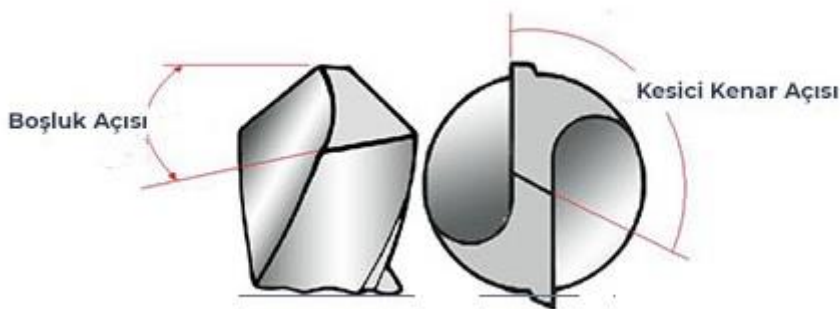
Delik delme operasyonlarında kullanılan kesici araçlara "matkap" adı verilmektedir. Matkaplar, talaşlı üretim süreçlerinde oldukça yaygın olarak kullanılan kesici takımlardan biridir. Bir matkap, işlevini yerine getirirken kendi eksenini etrafında dönme hareketi yapar ve aynı zamanda ileri doğru hareket ederek malzemeyi keser. Bu kesme işlemi, genellikle matkapların iki kesici kenarıyla gerçekleşir. Farklı metallerin işlenmesinde kullanılmak üzere pek çok farklı matkap türü bulunmaktadır ve her bir tür, belirli bir işleme ihtiyacını karşılamak amacıyla özel olarak tasarlanmıştır. Örneğin, yumuşak ve sert metaller için

farklı matkap türleri tercih edilir. Matkaplar genellikle uç, gövde ve sap olmak üzere üç temel bölümden oluşmaktadır (Şekil 2.26). Matkapların uç kısmı, kesici ağızlarının bulunduğu kısım olup, malzemeyi keserek talaşların oluşmasını ve deliklerin açılmasını sağlar. Genellikle matkaplar 2 kesici ağıza sahiptir ancak 3 ağızlı matkaplarda kullanılmaktadır.



Şekil 2.26 Matkabın kısımları (Aamir vd. 2020).

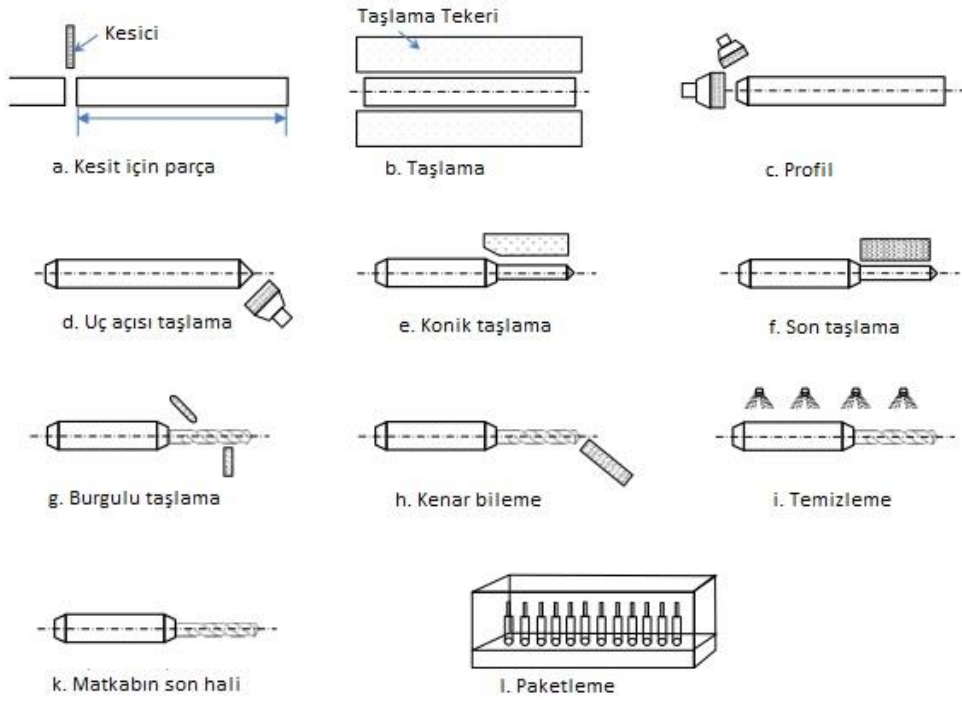
Şekil 2.27’de matkap ucunun boşluk ve kesici kenar açısı gösterilmiştir. Yüksek Si içerikli alüminyumların işlenmesinde 115° - 120° uç açısı tercih edilmekteyken, Si içeriği düşük alüminyumlarda 130° - 140° uç açısı tercih edilmektedir. Genellikle helis açısı uygulamaya bağlı olarak 12° - 38° aralığında seçilirken, standart uygulamalarda 30° olarak tercih edilmektedir. Büyük uç açısı ve büyük helis açısı yığıntı talaş oluşumunu azaltmada etkilidir. Yan boşluk açısı alüminyum malzemeyi delmede etkili olurken 12° - 13° aralığında seçilmelidir (Çobanoğlu 2021).



Şekil 2.27 Matkap ucunun boşluk ve kesici kenar açısı (İnt. Kyn. 17).

Matkapların gövde kısmı, matkabın kesici ucu ile başlayıp sapına kadar uzanan helisel kanallar içermektedir. Bu kanallar, kesilen talaşların dışarı atılmasını sağlayarak kesme işlemini verimli bir şekilde gerçekleştirmektedir. Helisel oluk sayısı, genellikle kesici

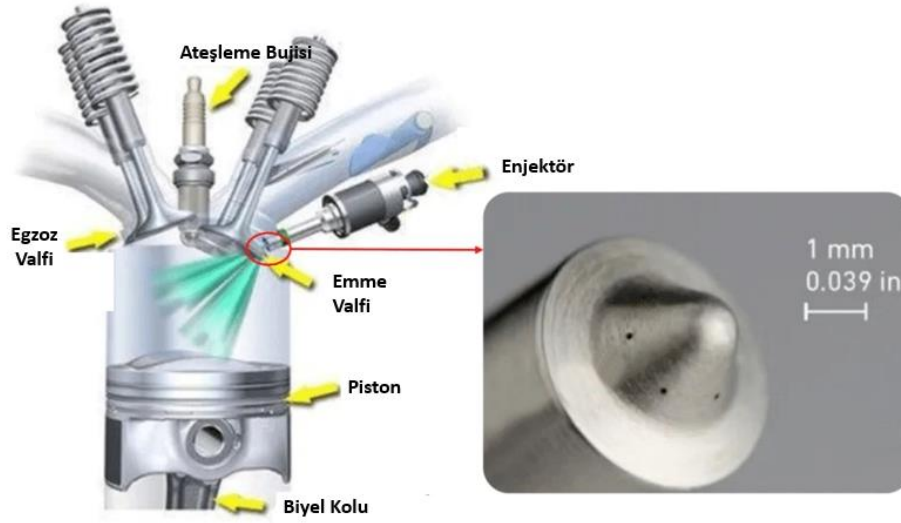
ağız veya kesici kenar sayısı ile aynıdır. Olukların helis açısı kesici kenarların talaş açılarını belirlemektedir. Gövde üzerindeki düzenlemeler, matkabın zırh kısımlarını oluşturarak matkabın dönerken talaş kaldırma esnasında delik yüzeylerine sürtünmesini önlemektedir. Matkabın gövdesi, belirli bir konik açıda imal edilir ve bu koniklik matkabın malzeme içine girerken sıkışmasını önler. Helisel oluklar arasında kalan bölge "matkabın özü" olarak adlandırılır ve bu bölge matkap ucundan sapına doğru konik olarak genişlemektedir. Bu koniklik matkabın dönme sırasında kesme kuvvetlerine dayanabilmesini sağlamaktadır. Son olarak sap kısmı, matkabın tezgaha veya makineye bağlanmasını kolaylaştırmaktadır. Genellikle saplar, belirli bir matkap çapına kadar silindirik bir şekle sahiptir ancak büyük çaplı matkaplarda saplar konik olarak tasarlanabilmektedir. Bu tasarım özellikleri, matkapların verimli bir şekilde çalışmasını sağlayarak endüstriyel işlemlerde olumlu sonuçlar alınmasını sağlamaktadır (Yıldız 2021). Şekil 2.28' de matkabın üretim adımlarının şematik gösterimi yer almaktadır. Toz metalürjisinden üretilen WC çubuğu, Şekil 2.28(a)'da gösterildiği gibi istenen boyutlarda parçalar halinde kesilmektedir. Boş çubuğun dış çapını şekillendirmek için Şekil 2.28(b)'de gösterildiği gibi taşlama işlemi yapılmaktadır. Çubuğun enine kesitinde kesme sırasında oluşmuş olabilecek çapakları gidermek için Şekil 2.28(c)'de gösterildiği gibi profil taşlama işlemi yapılır. Bu aşamada çubuğun bir ucunda pah kırma işlemi yapılmaktadır ve pah açısı, üreticinin tasarımına bağlı olarak 45-60° arasında değişmektedir. Matkap ucunu oluşturmak için Şekil 2.28(d)'de gösterildiği gibi uç açılı taşlama işlemi gerçekleştirilir. Tasarıma göre farklılık gösterse de genellikle 120° uç açısı yapılmaktadır. Bir sonraki adım gövde uzunluğu olarak da bilinen kesme parçasını oluşturmaktır. Şekil 2.28(e)'de gösterildiği gibi, kesilen parçayı taşlamak için konik taşlama taşı kullanılır. Kesme parçasının çok hassas olması gerektiğinden, hassas bir taşlama taşı kullanılmalıdır. Şekil 2.28(f)'de son taşlama işlemi, Şekil 2.28(g)'de burgulu taşlama işlemi, Şekil 2.28(h)'de kenar bileme işlemi ve sonraki aşamalarda temizleme ve paketleme işlemleri gerçekleştirilmektedir. Mikro matkapların üretiminde birçok adım olması nedeniyle, mikro matkapları üretmek uzun zaman almaktadır. Bu durum üretim oranının düşük olmasına ve daha yüksek işçilik maliyetine neden olmaktadır. Ayrıca işletimi ve bakımı pahalı olan çok sayıda makine üretim sürecinde kullanılmaktadır. Bu nedenle mikro matkap için yenilikçi bir üretim yönteminin geliştirilmesi hem üreticiler hem de kullanıcılar için maliyeti azaltabilir (Hasan vd. 2017).



Şekil 2.28 Matkap üretimi (Hasan vd. 2017).

2.3.4 Delik Delme İşleminin Önemi

Kesici takımların optimum şekilde kullanılmaması üretim maliyetlerini artırmaktadır. Delik delme sürecinde, işlenen malzeme ve kesici takım maliyetleri, imalat maliyetlerini belirleyen önemli faktörlerdir. Bu nedenle kesici takımların performansını etkileyen faktörler, işleme kalitesi ile birlikte dikkatlice analiz edilmelidir. Bu faktörler arasında malzemenin özellikleri, kesici takımın geometrisi, kesici takım malzemesi, kullanılan soğutma ve kesme sıvısı gibi parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler sadece maliyeti etkilemekle kalmaz, aynı zamanda deliklerin ölçülerini, dairesellikten sapmayı, yüzey pürüzlülüğünü ve kesici takımın aşınmasını da etkilemektedir. Bu faktörler, kesici takıma uygulanan kuvvetleri ve momentleri değiştirmekte ve bu durum kesici takımın ömrünü ve diğer maliyetleri etkilemektedir (Yağmur 2011). Bunun yanı sıra, delme işlemi talaş kaldırma işlemleri içindeki kritik bir aşamadır ve talaş kaldırma işlemlerinin yaklaşık olarak üçte birini oluşturmaktadır (Üstün ve Turgut 2020). Delme işlemi genellikle talaş kaldırma süreçlerinin son aşamasını temsil etmektedir. Şekil 2.29'da enjektör üzerinde bulunan mikro boyutlarda işlenmiş yağ püskürtme delikleri gösterilmiştir.



Şekil 2.29 Enjektör üzerinde bulunan mikro yağ püskürtme delikleri (İnt. Kyn. 18).

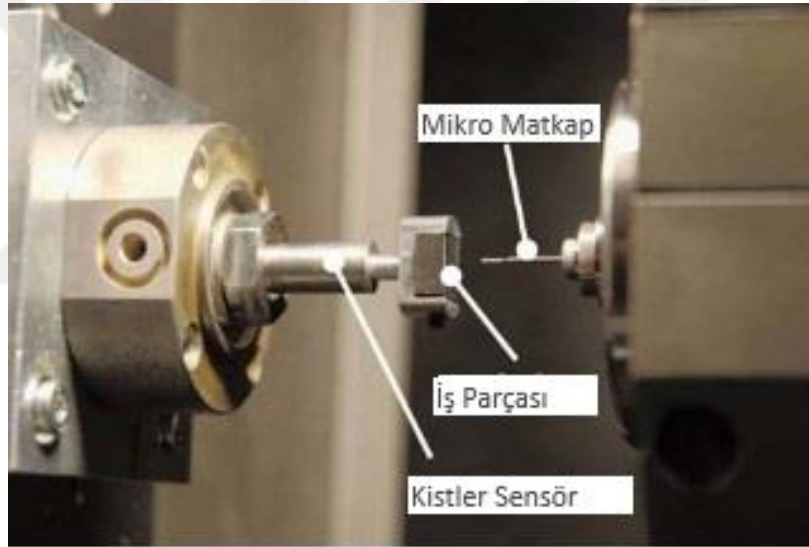
Tornalama, frezeleme ve delme işlemleri, kinematik ve dinamik yapıları benzer olduğu için talaş akışı ve kesme sıcaklığı dağılımı açısından benzerlikler taşımaktadır. Ancak, delme işlemi özel bir dikkat gerektirmektedir. Talaş oluşumu kapalı bir alanda gerçekleştiği için dışarıdan kolayca gözlemlenemez. Talaş akışını sınırlayan faktör genellikle matkapta oluşan talaş kalınlığıdır. Takım ve iş parçası arasındaki sürtünme faktörü büyük öneme sahiptir. Ayrıca, yüzeyden akan sıcaklığın yetersiz olması ve dönme eksenini boyunca kesme hızının sıfır olması gibi faktörler, delme işleminde karşılaşılan ana problemlerden biridir (Bayraktar vd. 2017). Bu nedenle matkap ve uygulanacak işlemler, kullanıldığı tezgaha ve iş parçasına uygun şekilde özelleştirilmelidir.

2.3.5 Mikro Delme İşlemi

Sanayideki hızlı gelişmeler, yüksek hassasiyetli üretim talebini artırmıştır. Özellikle mikro işleme endüstrisi hızla büyümekte kaynak ve zaman kullanımında yüksek verim sağlanmaktadır. Otomotiv, makine, havacılık gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılan delik delme işlemleri, endüstriyel ilerlemenin kaçınılmaz bir sonucudur (Terzioğlu vd. 2020).

Mikro işleme, yaklaşık 60 milyar dolar işlem hacmi ile dünya genelinde hızla büyüyen bir endüstri haline gelmiştir. Bu büyüme, makro ölçek ile mikro ve nano ölçekli parçaların üretimine artan ilgiden kaynaklanmaktadır. Şekil 2.30'da mikro delme işleminin yapıldığı

tezgah gösterilmiştir. Kobalt bağlayıcılı sementit tungsten karbür mikro matkaplar yüksek kesme hızlarında çalıştırıldıklarında düşük kesme verimliliği ve kısa takım ömrü sorunuyla karşılaşabilmektedirler. Bu nedenle mikro matkapların imalatı nispeten maliyetli olduğundan, takım ömrünü ve performansını artırmak önemlidir. Bu amaçla mikro matkaplara kaplama işlemi sıklıkla uygulanmaktadır. Mikro matkapların performansını etkileyen bir faktör de delme işlemi sırasında meydana gelen titreşimlerdir. Takım ömrünü ve performansını artırmak için, mikro matkaplarda titreşim değerleri düşürülmeli ve delme işlemi sırasında sürekli olarak bu değerler kontrol edilmelidir. Ayrıca, mikro delme işlemi etkileyen önemli bir diğer faktör de kesme sıvılarıdır. Yüksek hızlardan kaynaklanan talaşın deliklerde sıkışmasını önlemek için mineral yağlar ve kimyasal yağlayıcılar kullanılmaktadır (Yücel ve Çiçek 2011).



Şekil 2.30 Mikro delme deneyinde kullanılan deney düzeneği (Klocke vd. 2009).

Araştırmacılar ve üreticiler mikro delmeyi farklı şekilde tanımlamaktadır. İsviçreli mikro matkap üreticisi Sphinx, mikro matkaplarını 0,20 mm'den 2 mm'ye kadar değişen çaplarda üretmekte iken (İnt. Kyn. 19) mikro matkap üreticisi Seco, mikro matkaplarını 0,1 mm den 2 mm'ye kadar değişen çaplarda üretmektedir (İnt. Kyn. 20). Bir başka üretici olan Sandvik 0,3 mm ile 3 mm arasında matkaplar üretmektedir (İnt. Kyn. 21). Zhuang çapı 3,175 mm'den küçük olanları mikro matkap ucu olarak tanımlamıştır (Zhuang 2013). Tibar mikro matkapları 1 mm'den daha küçük bir çapa sahip olarak tanımlamıştır (Szalay vd. 2013). Mikro delme tanımının üreticiler ve araştırmacılar arasında farklılıklar

göstermektedir. Bu nedenle, farklı görüşler arasındaki belirsizliği önlemek için genel bir tanımı takip edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada matkap çapı 1 mm'ye eşit veya altında olan matkaplar kullanılmıştır. Boyut etkileri nedeniyle, bir mikro matkabın çapı 1 mm'ye eşit veya altında olduğunda mikro matkaplar genellikle kırılma sorunu yaşarken, daha büyük çaplı matkaplar herhangi bir kırılma meydana gelmeden önce aşınmaya maruz kalmaktadırlar (Hasan vd. 2017).

Mikro matkaplar, mikro boyutta deliklerin açılmasında kullanılan kesici takımlardır. Bu mikro boyuttaki delikler, biyomedikal, elektronik, uzay endüstrisi gibi çeşitli sektörlerde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Genellikle 10μ - 1mm aralığındaki delikleri açabilen matkaplar mikro delme işlemleri için kullanılır. Ancak, mikro matkapların kesit alanı oldukça küçük olduğu için mukavemetleri düşüktür ve bu nedenle matkap uçları sıkça kırılabilir (Kudla 2006). Şekil 2.31'de mikro matkapla, iş parçası üzerine açılan mikro boyutlarda ki delikler gösterilmiştir.



Şekil 2.31 Mikro delik delme yöntemi kullanılan iş parçası (İnt. Kyn. 22).

Geleneksel delme işlemine kıyasla, mikro delme işlemi daha karmaşık ve zordur. Mikro delme işlemi, hızlı takım aşınması, yüksek en boy oranı, yüksek sıcaklık ve titreşim gibi zorluklar içermektedir. Mikro matkapların çapının küçük olması nedeniyle takım aşınmasını tespit etmek zor olabilir ve bu durum işleme sırasında ani kırılmaların gözlemlenmesine neden olmaktadır. İşlem sırasında oluşan talaşlar da takım ucunda yüksek yanal kuvvetlere yol açmaktadır. Bu yanal kuvvetler matkap ucunun yanal hareket etmesine ve bunun sonucunda delme pozisyonundan sapmaya, delik şekli ve boyutlarında bozulmalara ve artan kuvvetle birlikte takımın kırılmasına neden olabilmektedir. Bu

faktörler, mikro matkaplarla yapılan işlemlerin karmaşıklığını arttırmakta ve işlemin kontrolünü zorlaştırmaktadır (Perçin 2015).

2.3.5.1 Mikro Delme Takımları

Mikro delme takımları, Şekil 2.32’de gösterildiği gibi son derece küçük boyutlarda deliklerin açılmasında kullanılan özel tasarlanmış kesici araçlardır. Bu takımlar genellikle 10 µm ile 1 mm arasındaki delik çaplarını üretme kapasitesine sahip olup özellikle mikro işleme endüstrisinde ve ileri teknoloji alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Hasan vd. 2017). Mikro delme işlemleri, mikro boyutlardaki parçaların üretimi ve detaylı işlenmesi gereken uygulamalarda büyük önem taşır. Biyomedikal cihazların, elektronik bileşenlerin, hassas mekanizmaların ve mikro optik sistemlerin üretimi gibi alanlarda mikro delme takımları kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca uzay endüstrisinde ve mikroelektronik üretimde de mikro delme işlemleri önemli bir yere sahiptir (Huang vd. 2023).



Şekil 2.32 Mikro boyutlarda matkap uçları (İnt. Kyn. 23).

Mikro delikleri oluşturmak için lazer işleme ve kıvılcım deşarj (elektro erozyon) gibi birçok yöntem mevcuttur. Bununla birlikte, pratikte en hızlı ve yaygın olarak kullanılan yöntem, matkaplar aracılığıyla mekanik delik açma işlemidir. Özellikle cihazların minyatürleşmesi ile birlikte, devre kartlarının delinmesi veya küçük çaplı deliklerin açılması gibi uygulamalarda mikro matkaplar sıkça tercih edilmektedir (Yücel ve Çiçek 2011). Ancak, mikro delik delme işleminde kullanılan matkapların ömrü oldukça kısadır. Bu takımların boyutları nedeniyle mukavemetleri düşüktür ve bu durum, delme işlemi sırasında kolayca kırılmalarına yol açabilmektedir (Perçin 2015). Mikro matkapların ömürlerini tahmin etmek zordur. Ayrıca, işlem sırasında kırılan matkap uçlarının delikten çıkarılması zor olabilir ve iş parçasına kalıcı zararlar verebilmektedir (Acer 2023). Delme

işlemi sırasında kullanılan tezgahlar, titreşimleri mümkün olduğunca bastırmak ve sönümlemek için tasarlanmalıdır. Mikro işleme, matkapların kırılma eğilimi, kısa ömürleri ve titreşim gibi zorlukları da içermektedir. Bu zorlukların üstesinden gelmek için takım tasarımı, işleme koşulları ve tezgah tasarımı gibi faktörlerin dikkatlice optimize edilmesi gerekmektedir (Yücel ve Çiçek 2011). Mikro delme işlemleri genellikle yüksek hız çeliği veya tungsten karbür (WC) matkapların kullanıldığı kesici takımlarla gerçekleştirilir. Yüksek hız çeliği çabuk aşınmaktadır, karbür ise aşınmaya karşı daha dayanıklıdır. Elmas takımlar ise geliştirilme aşamasındadır (Jackson vd. 2013). Tungsten karbür matkaplar, kobalt bağlayıcılı sementit içerdiği bileşimi nedeniyle kesme hızının yüksek olduğu durumlarda genellikle kısa bir takım ömrüne sahiptirler. Özellikle mikro mekanik kesme işlemleri için geniş bir sıcaklık aralığında kullanılabilirler. Mikro delme işleminde, en fazla 1 mm çapa sahip matkapların mukavemeti yetersiz olabilir. Bu durum, takım kırılmalarının sıkça yaşanacağı anlamına gelmektedir. Mikro matkapların ömürlerini artırmak ve performanslarını iyileştirmek amacıyla sıklıkla kaplama işlemi uygulanır. Ancak takımlara yapılan kaplamaların her zaman takım ömürleri artırmayabileceği unutulmamalıdır (Dornfeld 2006). Özellikle Ti alaşımları işlenirken, TiAlN kaplamalar yüksek performans sergilemektedir. Bu kaplamanın sertlik özelliği sayesinde takım ömrü artırılırken, TiN kaplı matkaplar sıcak sertlik özelliğinin yetersiz olması nedeniyle tatmin edici bir takım ömrü sağlayamamaktadır (Heinemann vd. 2006). Sonuç olarak, mikro delme işlemleri yüksek hassasiyet ve performans gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Kesici takımların seçimi ve kaplama işlemleri, takım ömrü ve işleme kalitesi üzerinde büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle doğru malzeme seçimi ve kaplama yöntemleri ile mikro delme işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi sağlanabilir.

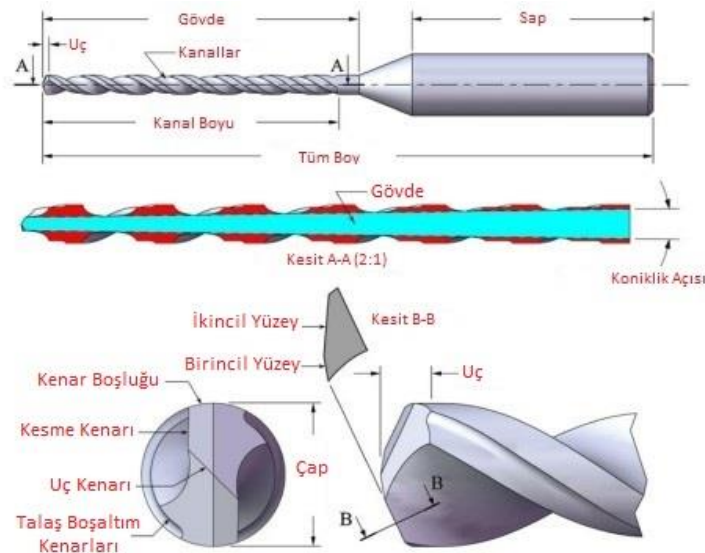
2.3.5.2 Mikro Matkaplarda Kırılma

Mikro matkaplar için kısa takım ömrü ciddi bir sorundur. Mikro matkaplar kolayca kırılabilen ve tahmin edilemez matkap ömrüne sahiptir. Bu durum matkap üzerine etki eden yüke göre dayanıklılığın düşük olmasından kaynaklanmaktadır (Kudla 2006). Bu nedenle bükülme, burulma ve diğer karmaşık yüklere karşı mikro matkapların dayanıklılığı büyük önem taşımaktadır. Özellikle çapı 3.5 mm'den küçük olan

matkaplarda aksiyel gerilmeler kritik bir faktör olabilmektedir, çünkü daha küçük boyutlu sarmal matkaplar aksiyel yönde daha az dayanıklıdır (Spur ve Masuha 1981). Büyük matkaplarla karşılaştırıldığında, mikro matkapların burulma dayanıklılığı daha düşüktür. Bu düşük burulma dayanıklılığı, yüksek en/boy oranına sahip mikro deliklerde bükmeye ve burkulmaya daha yatkın olmalarına yol açmaktadır. Bu durum mikro matkapların erken kırılmasının nedenlerinden biridir. Bu nedenle farklı kesme parametreleri kullanarak kesme kuvvetlerini stabilize etmek ve azaltmak mikro matkapların dayanıklılığını artırmak için gereklidir (Imran 2010).

2.3.5.3 Mikro Matkaplarda Takım Geometrisi

Küçük çaplı delikler açarken, mikro matkapların performansını belirlemekte takım geometrisi ve keskinliği kritik bir rol oynamaktadır. Ancak mikro matkaplar kolayca kırıldığından, yüksek takım dayanıklılığına özellikle dikkat edilmelidir. Kudla, burulma dayanıklılığının matkap çapı, kesit profili, kesme bölümünün uzunluğu ve malzeme özellikleri ile ilişkili olduğunu bulmuştur (Kudla, 2006). Şekil 2.33’de mikro matkaplarda takım geometrisi gösterilmiştir. Genellikle delme işleminde, kesme koşulları (kesme hızı, ilerleme hızı), takım geometrisi (uç açısı), takım kaplaması ve malzeme özelliği gibi faktörler çapak boyutunu etkilemektedir.



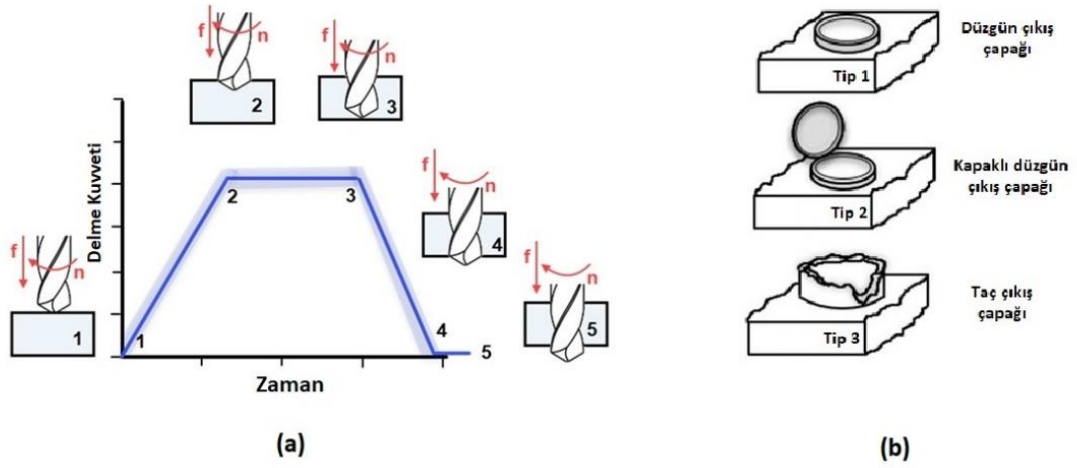
Şekil 2.33 Mikro matkaplarda takım geometrisi (Chang vd. 2014).

Bazı araştırmacılar çapak oluşumu için analitik bir model tasarlamış olup 19° - 30° aralığında sarmal açısı ve 135° uç açısı kullanarak bu modeli doğrulamışlardır (Kim ve Dornfeld 2002). Makro ölçekli delme işleminde, çapak boyutu, uç açısı (118° - 140° aralığı) ve sarmal açısı (25° - 40° aralığı) arttıkça azalmaktadır. Ancak nikel alaşımlarında bu durum özellikle mikro matkaplarla delme işleminde, çapak oluşumu sorununu daha da karmaşık hale getirmektedir. Nikel bazlı süper alaşımların işlenmesi, üstün malzeme özellikleri nedeniyle zorlu bir süreçtir ve bu durum mikro boyutlu delikler açarken zorlayıcı olmaktadır. Bu nedenle, farklı takım geometrilerinin takım aşınması, çapak oluşumu ve kesme performansı üzerindeki etkileri daha fazla incelenmesi gerekmektedir. Mikro boyutlu delik açma işleminde, matkap geometrisinin kontrolü, yüksek hassasiyetli delik açma işlemlerini başarılı bir şekilde gerçekleştirmek için hayati bir öneme sahiptir (Imran 2010).

2.3.5.4 Mikro Delme İşleminde Kesme Kuvvetinin Etkisi ve Çapak Oluşumu

Mikro delme işleminde kesme kuvvetleri, işlem performansını değerlendirmek ve optimize etmek için önemli bir rol oynamaktadır. Kesme kuvvetleri takım aşınması, çapak oluşumu, yüzey kalitesi ve boyut hassasiyeti gibi işlemlerin sonuçlarına etki edebilmektedir. Kesme kuvvetleri genellikle işleme koşulları, takım geometrisi ve malzeme özelliklerine bağlıdır. Mikro delme işlemi, kesme kuvvetlerinin geleneksel delme işlemine göre önemli ölçüde farklılık gösterebileceği bir süreçtir (Yang vd. 2004). Bu farklılık, boyut etkisi, yüzey/hacim oranının artması ve malzeme özelliklerinin değişmesi gibi faktörlerden kaynaklanabilmektedir. Mikro delme işlemi sırasında ortaya çıkan kesme kuvvetleri, takım aşınması, takım kırılması ve iş parçası deformasyonu gibi sorunları belirlemek ve anlamak için kullanılmaktadır (Kudla 2001). Kesme kuvvetleri ayrıca delme performansını değerlendirmek ve işleme koşullarını optimize etmek için de kullanılmaktadır. Kesme kuvvetlerini ölçmek ve analiz etmek, mikro delme işleminin anlaşılmasına ve iyileştirilmesine katkıda bulunabilmektedir. Kesme kuvvetlerinin azaltılması, mikro delme işleminin performansını artırabilir, takım aşınmasını azaltabilir, iş parçası deformasyonunu minimize edebilir ve yüzey kalitesini iyileştirebilmektedir. Bu nedenle, mikro delme işlemi sırasında kesme kuvvetlerini ölçmek ve kontrol etmek

oldukça önemlidir (Imran 2010). Yapılan bir çalışmada matkap üzerindeki tüm kesme elemanlarının kuvvetlerini kapsamlı bir şekilde özetlenmiştir. Toplam delme kuvveti (F_1), matkap üzerindeki tüm kesme kenarlarının kuvvetlerini toplayarak hesaplanmıştır (Zhang vd. 2014). Mikro delmede meydana gelen tipik bir delme kuvveti profiline Şekil 2.34a 'da yer verilmiştir. 3. konumda ana kesme kenarlarının tamamen iş parçasına girdiğini ve tüm mikro matkabın delme kuvveti uyguladığını, 1 ve 2. konumlarda matkap kenarlarının kademeli olarak deliğe girdiğini ve kesime başladığını, 4 ve 5. konumlarda ise takımın delik çıkışına yaklaştığını ve talaş oluşumu aşamasına karşılık geldiği gösterilmiştir.



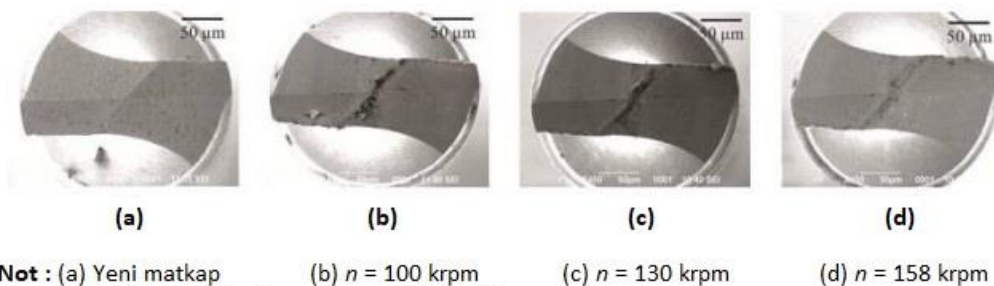
Şekil 2.34 Mikro delme işleminde delme kuvveti ve çıkış talaşı karşılaştırması (a) Mikro delme işleminde ana kesme kenarlarına etki eden delme kuvveti profili, (b) düzgün çıkış çapağı, kapaklı düzgün çıkış çapağı ve taçlı çıkış çapağının şematik gösterimi (Yalçın vd. 2023).

Delik çıkışındaki çapakları en aza indirmek veya ortadan kaldırmak, yüksek kaliteli delikler elde etmek için oldukça önemlidir. Çapak oluşumu, iş parçası malzemesinin özellikleri, mikro matkap geometrisi ve malzemesi ile kesme koşulları gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Yapılan bir araştırmada, çapak oluşumunun malzemenin sünekliliğiyle arttığını ve mikro matkap geometrisinin de çapak boyutlarını etkilediğini bulmuşlardır. Çapak kalınlığı ve yüksekliği, uç ve helis açıları arttıkça azalmıştır. Ayrıca, ilerleme hızı ve kesme hızındaki artışlar daha büyük talaş oluşumlarına neden olmuştur (Hashimura vd. 1999). Üç temel çapak şekli türü vardır. Şekil 2.34b'de gösterildiği üzere düzgün çıkış çapağı, kapaklı düzgün çıkış çapağı ve taçlı çıkış çapağıdır (Min vd. 2001, Yazman vd. 2020). Düzgün çıkış çapaklarının, delik çevresinde nispeten küçük, tutarlı

bir yüksekliği ve kalınlığı vardır ve ideal olarak bunların oluşumu en aza indirgenmelidir. Bu çapaklar ilk kırılmanın deliğin merkezinde meydana geldiği durumda oluşmaktadır. Geçici çapaklar söz konusu olduğunda, kırılma deliğin merkezinde ve çıkış çevresinde aynı anda meydana gelmektedir. Taçlı çapaklar ise daha büyük boyutta ve çıkış deliği etrafında düzensiz bir şekle sahiptirler (Kim vd. 2001).

2.3.5.5 Mikro Delme İşleminde Yüzey Kalitesi ve Takım Aşınması

Mikro delme işlemi sırasında meydana gelen yüzey pürüzlülüğü, iş parçasının kullanılabilirliğini ve kalitesini etkileyebilmektedir. Yüzey pürüzlülüğü delme işlemi parametreleri, takım geometrisi ve malzeme özellikleri gibi çeşitli faktörlerden etkilenebilmektedir. Mikro delme işleminde yüzey kalitesini iyileştirmek için, uygun kesme koşullarının belirlenmesi, kesici takım seçiminin yapılması ve kesme parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Mikro delme işleminde yüzey kalitesini geliştirmek için farklı yaklaşımların incelenmesi ve uygulanması büyük önem taşımaktadır. Takım aşınması, mikro delme işleminin başarısını ve takım ömrünü etkileyen kritik bir faktördür. Mikro boyutta delikler açarken, takım aşınması daha belirgin hale gelmekte olup takım ömrünü kısaltabilmektedir. Takım aşınması delme işlemi parametreleri, takım geometrisi, kesme koşulları ve malzeme özellikleri gibi faktörlerden etkilenebilir. Bu aşınma, kesme performansını ve iş parçasının kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir (Klocke vd. 2009). Takım aşınmasını yönetmek ve azaltmak için, uygun kesme koşullarının seçilmesi, takım geometrisinin optimizasyonu ve kesme parametrelerinin ayarlanması önemli bir faktördür (Imran 2010).

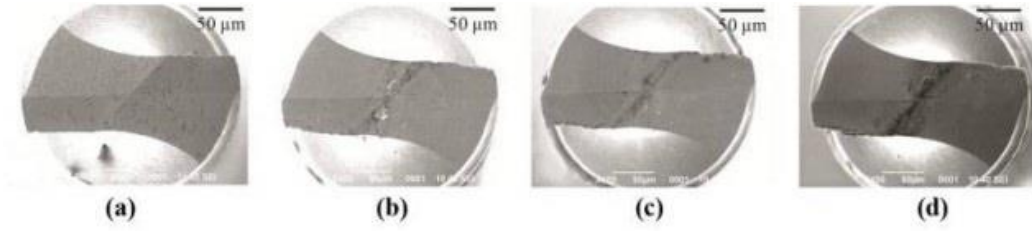


Şekil 2.35 Devir sayısının matkap aşınmasına etkisi (Zheng vd. 2016).



Not: (a) Yeni matkap (b) $v_f = 15 \text{ mm/s}$ (c) $v_f = 30 \text{ mm/s}$ (d) $v_f = 45 \text{ mm/s}$
($D = 0.25 \text{ mm}$, $n = 158 \text{ krpm}$, $v_r = 300 \text{ mm/s}$)

Şekil 2.36 İlerleme hızının matkap aşınmasına etkisi (Zheng vd. 2016).



Not: (a) Yeni matkap (b) 1.000 delik (c) 2.000 delik (d) 3.000 delik
($D = 0.25 \text{ mm}$, $n = 158 \text{ krpm}$, $v_f = 30 \text{ mm/s}$, $v_r = 300 \text{ mm/s}$)

Şekil 2.37 14 Delik sayısının matkap aşınmasına etkisi (Zheng vd. 2016).

Bir çalışmada ilerleme hızı, devir sayısı ve delik miktarlarının takım aşınması üzerine etkisi araştırılmıştır. Şekil 2.35' de devir sayısı arttıkça takımın daha çok aşındığı, Şekil 2.36'da ilerleme hızının artmasıyla birlikte takım aşınmasının da arttığını ayrıca şekil 2.37'de delik sayısı ile aşınmanın orantılı olduğunu tespit etmişlerdir (Zheng vd. 2016).

3. MATERYAL ve METOD

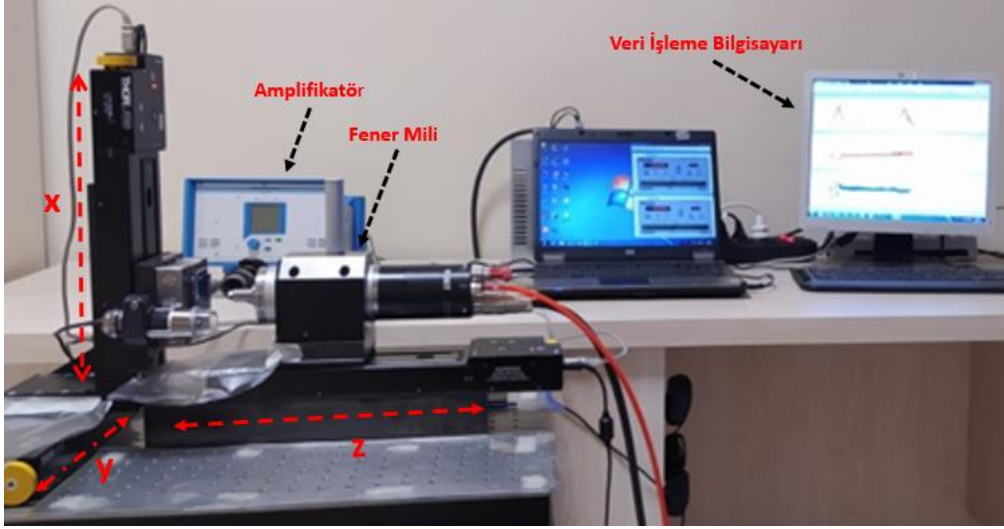
Afyon Kocatepe Üniversitesinde bulunan mikro işleme laboratuvarı kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney ekipmanları Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Yüksek hassasiyet gerektiren mikro delme deneyleri, iş milinin maksimum 60.000 rpm dönüş hızına, 0,1 µm eksen hassasiyetine ve 0,4 µm tekrarlanabilirlik hassasiyetine sahip yatay, üç eksenli bir işleme merkezi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu deney düzeneği, yüksek hızlarda ve yüksek hassasiyetle işlemlerini gerçekleştirmek için özel olarak tasarlanmıştır.

Eksen hareketleri step motorlarla desteklenmiş "THORLABS" marka lineer kızaklarla sağlanmaktadır. Deneylerde, Şekil 3.2’de gösterilen kendi yazılımıyla kontrol edilen "IMT" marka fener mili kullanılmıştır.

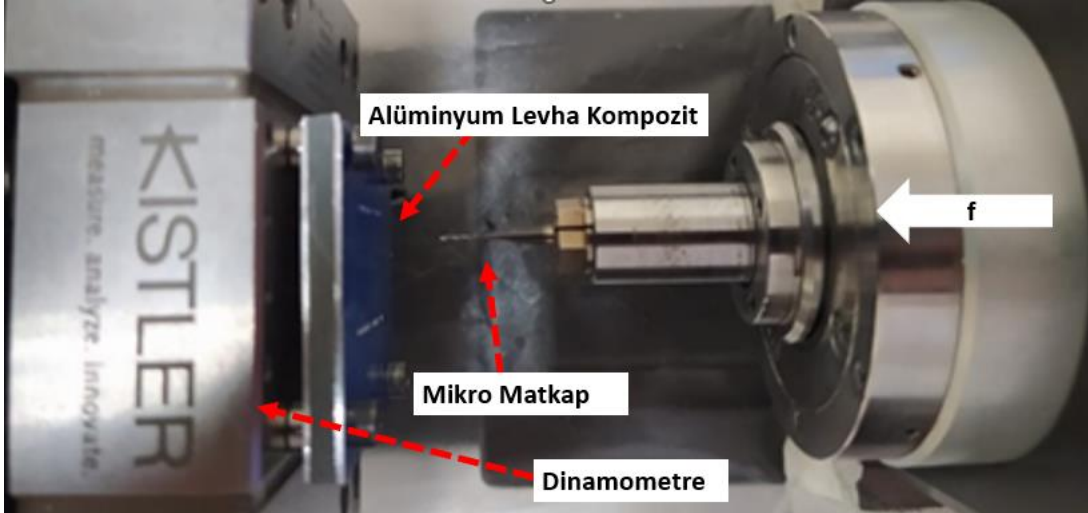
Kesme kuvveti değerlerini ölçmek için Şekil 3.3’de gösterilen ‘Kistler-9119AA1’ mini dinamometre kullanılmıştır. Mini dinamometreye ait teknik bilgiler Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Kesme kuvveti sinyallerini kuvvet ölçümlerine dönüştürmek için bir amplifikatör kullanılmış ve veriler Dynoware yazılımı kullanılarak kaydedilmiştir. Deney düzeneği titreşimsiz optik bir tabla üzerine kurulmuş olup deneyler kuru kesme şartlarında gerçekleştirilmiştir. Değişken kesme hızları ve ilerleme hızlarında deneyler gerçekleştirilerek işleme koşullarının etkisi incelenmiştir.

Delme deneyleri sonrasında iş parçası ve mikro matkaplar Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde bulunan Şekil 3.4’de gösterilen LEO 1430 VP model taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiştir. Mikro matkaplarda meydana gelen aşınma, iş parçasının çıkışında meydana gelen çapak durumları ve delme işlemi sonrasında açılan delik çapları SEM’de ölçülmüştür. Şekil 3.5’de 1mm çapında mikro matkaba ait SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.1 Deney ekipmanları



Şekil 3.2 İş parçası, mikro matkap ve fener mili



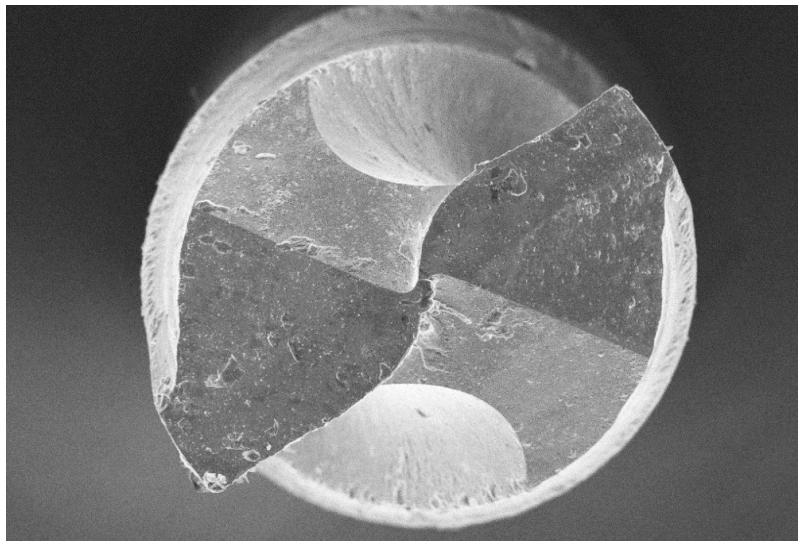
Şekil 3.3 Kistler - 9119AA1 mini dinamometre

Çizelge 3.1 Kistler -9119AA1 mini dinamometre teknik özellikleri (Perçin 2015).

Ölçme aralığı	Fx, Fy, Fz	kN	-4 ... 4
	Mx, My,	N-m	-125 ... 125
	Mz	N-m	-250 ... 250
Kalibre edilmiş ölçme aralığı			
100 %	Fx, Fy, Fz	N	0 ... 4000
10%	Fx, Fy, Fz	N	0 ... 400
1%	Fx, Fy, Fz	N	0 ... 40
Doğal Frekans	fn(x)		
	fn(y)	kHz	≈6,0
	fn(z)	kHz	≈6,4
Hassaslık	Fx,Fz	kHz	≈6,3
	Fy	pC/N	≈-26
		pC/N	≈-13
Çalışma Sıcaklığı		°C	-20...70



Şekil 3.4 Taramalı elektron mikroskobu



Şekil 3.5 Mikro matkaba ait SEM görüntüsü

3.1 Taguchi Metolojisi

Geleneksel faktöriyel deney tasarımı araştırmacılar, genellikle girdi-çıkı ilişkilerini belirlemenin zorluğu, endüstriyel ve bilimsel araştırmalarda zaman ve maliyet kısıtlamaları nedeniyle optimizasyon amaçlı tercih etmemektedirler. Deney sayısı arttıkça, zaman ve maliyet açısından daha yüksek yükler ortaya çıkmaktadır. Taguchi, süreç performansını etkileyen farklı parametrelerin incelenmesi ve bu parametrelerin optimize edilmesi amacıyla deney tasarım yöntemi geliştirmiştir. Taguchi'nin deneysel tasarımı, ana süreç değişkenlerini ve yanıt parametrelerinin seviyelerini belirlemek için ortogonal dizilerin kullanılmasını öngörmektedir. Bu girdi parametreleri, sürecin performansını etkileyen değişkenlerdir. Girdi parametreleri için ortogonal dizilerin tasarımı, her deney için koşulların sayısını belirlemektedir. Ortogonal dizilerin seçimi, her parametre için varyasyon seviyelerinin sayısına bağlıdır. 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 (Woolf 2009). 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'nin deney tasarımı için geliştirilen mühendislik programları, girdi parametreleri ve seviyelerine uygun ortogonal dizileri kullanmayı sağlamaktadır. Dizi seçici, her parametre için aynı sayıda seviye olduğunu varsaymaktadır. Ancak bu durum her zaman

geçerli değildir. Örneğin, deney planında dört girdi parametresi (P4) ve her biri için üç alt seviye (S3) olduğunda program uygun bir ortogonal dizi olan L9 deney tasarımını oluşturmaktadır. Öte yandan, beş parametrelili bir durumu ele alırsak (A, B, C, D ve E), A ve B için dört seviye ve C, D ve E için iki seviye olduğunda bu duruma uygun bir ortogonal dizi olan L16, girdi parametrelerinin sayısı (P5) ve en yüksek seviye sayısı (4) belirtilerek seçilebilmektedir (Yıldırım 2011). 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 (Dutta ve Kumar 2021). 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 (Mojaver vd. 2021, Rizal vd. 2020).

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

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

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

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

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

ANOVA, 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

fazla açıklayıcı faktörle ilişkilendirilmektedir. Bu F istatistiği kullanılarak elde edilen p-değeri, farkın anlamlı olup olmadığını görmek için hesaplanmaktadır (Min vd. 2001). 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 (Yıldırım 2011, Bahrami 2022, Akıncıoğlu 2021). P-değerinin 0,10 - 0,05 aralığında, olduğunda ise sınırda bir anlamlılık olduğu anlamına gelmektedir (Yaka 2019).

Taguchi yönteminde R^2 değerinin %85 ila %99 arasında olması istenmektedir. Ayrıca, R^2 (pred) değeri, modelin yeni gözlemlere yönelik ne kadar iyi tahmin yaptığını göstermektedir. Bu değer ne kadar büyükse, modelin tahmin yeteneği o kadar iyi olarak kabul edilmektedir (Bahrami 2022). Sinyal gürültü oranı tablosunda sıfıra yakın olan değer, en etkili parametre olarak değerlendirilmektedir (Kadirvel ve Hariharan 2014).

3.2 Deney Tasarımı

Bu çalışmada Minitab yazılımı kullanılarak L16 taguchi ortogonal deney tasarımı hazırlanmıştır. Taguchi deney tasarımı, mühendislik ve istatistik alanlarında kullanılan bir deneysel tasarım yöntemidir. Bu yöntem, işlemleri veya ürünleri optimize etmek, kaliteyi artırmak veya istenen sonuçları elde etmek amacıyla yapılan deneyleri düzenlemek ve analiz etmek için kullanılmaktadır. Taguchi deney tasarımı, Genichi Taguchi tarafından geliştirilmiştir ve kalite iyileştirme ve süreç optimizasyonu konularında oldukça etkili bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Taguchi deney tasarımı, geleneksel deneysel tasarım yöntemlerinden farklı olarak faktörlerin ve etkilerin birbirinden bağımsız olduğunu varsaymaktadır. Bu nedenle, her faktörün etkisini diğer faktörlerden izole etmeyi amaçlamaktadır. Temel olarak, deney tasarımını minimum sayıda deneme ile maksimum bilgi elde etmeye odaklanmaktadır.

Bu çalışmada literatür taramaları yapıldıktan sonra, takım çapının, matkap uç açısının ve kaplamanın itme kuvveti ve çapak oluşumu üzerindeki genel eğilimi anlamak için iki seviyenin yeterli olduğu belirlenmiştir. Ancak, ilerleme hızı ve kesme hızı, işleme süresi ve maliyetin yanı sıra kesme kuvveti ve delme kuvvetini doğrudan etkileyen temel mikro

delme parametreleri olduğundan, bu parametreler için dört seviye tercih edilmiştir. Burada ki amaç Al-PE'nin mikro delme işleminde meydana gelen delme kuvveti ve çapak oluşumu etkisini optimize etmektir. Deney tasarımı hazırlandıktan sonra, farklı çap ve özelliklere sahip tungsten karbür matkaplar kullanılarak 16 farklı koşul altında mikro delme testleri gerçekleştirilmiştir. Her deney koşulu, değerlerin doğruluğu teyit etmek amaçlı beş kez tekrarlanmıştır.

Mikro delme deney parametreleri, Taguchi'nin L16 ($4^2 2^3$) ortogonal dizisi kullanılarak tasarlanmış olup beş kontrol parametresi ile gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.2 de gösterildiği üzere dört seviyeli kesme hızı (10 m/dk, 20 m/dk, 30 m/dk, 40 m/dk), dört seviyeli ilerleme hızı (0,5 $\mu\text{m}/\text{dev}$, 1 $\mu\text{m}/\text{dev}$, 2 $\mu\text{m}/\text{dev}$, 4 $\mu\text{m}/\text{dev}$), iki seviyeli takım çapı (0,7 mm, 1 mm), 2 seviyeli kaplama durumu (AlTiN kaplı, kaplamasız) ve iki seviyeli (100° , 140°) takım ucu açısıdır. Varyans analizi (ANOVA) için maksimum delme kuvveti (Fz), maksimum çapak yüksekliği ve hem matkap takımı hem de delik çaplarındaki değişiklikler ölçülmüştür. Elde edilen Taguchi L16 deney tasarımı Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Taguchi deney tasarımı parametreleri

Semboller	Mikro Delme Parametreleri	Seviyeler			
		1	2	3	4
A	Matkap Çapı (mm)	0,7	1	-	-
B	Uç Açısı ($^\circ$)	100	140	-	-
C	Kaplama	TiAlN	Kaplamasız	-	-
D	İlerleme Hızı ($\mu\text{m}/\text{rev}$)	0,5	1	2	4
E	Kesme Hızı (m/min)	10	20	30	40

Delik çapaklarının karakterizasyonu, çapakların şeklinin ölçülmesini, analiz edilmesini ve yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak maksimum boyutlarının belirlenmesini içermektedir. Çapak yüksekliği, deliğe dik olarak yandan bir SEM görüntüsü alınarak ölçülmüştür. Toplanan tüm veriler, "daha küçük daha iyidir" fonksiyonuna sahip ANOVA analizi kullanılarak delme kuvvetini optimize etmek ve çapak oluşumunu en aza indirmek için kullanılmıştır.

Çizelge 3.3 Taguchi L16 deney tasarımı

	A-Matkap Çapı (mm)	B-Uç Açısı (°)	C-Kaplama	D-İlerleme Hızı (µm/dev)	E-Kesme Hızı (m/dk)
1	0,7	100	Kaplamalı	0,5	10
2	0,7	100	Kaplamalı	0,5	20
3	1	140	Kaplamasız	0,5	30
4	1	140	Kaplamasız	0,5	40
5	0,7	140	Kaplamasız	1	10
6	0,7	140	Kaplamasız	1	20
7	1	100	Kaplamalı	1	30
8	1	100	Kaplamalı	1	40
9	1	100	Kaplamasız	2	10
10	1	100	Kaplamasız	2	20
11	0,7	140	Kaplamalı	2	30
12	0,7	140	Kaplamalı	2	40
13	1	140	Kaplamalı	4	10
14	1	140	Kaplamalı	4	20
15	0,7	100	Kaplamasız	4	30
16	0,7	100	Kaplamasız	4	40

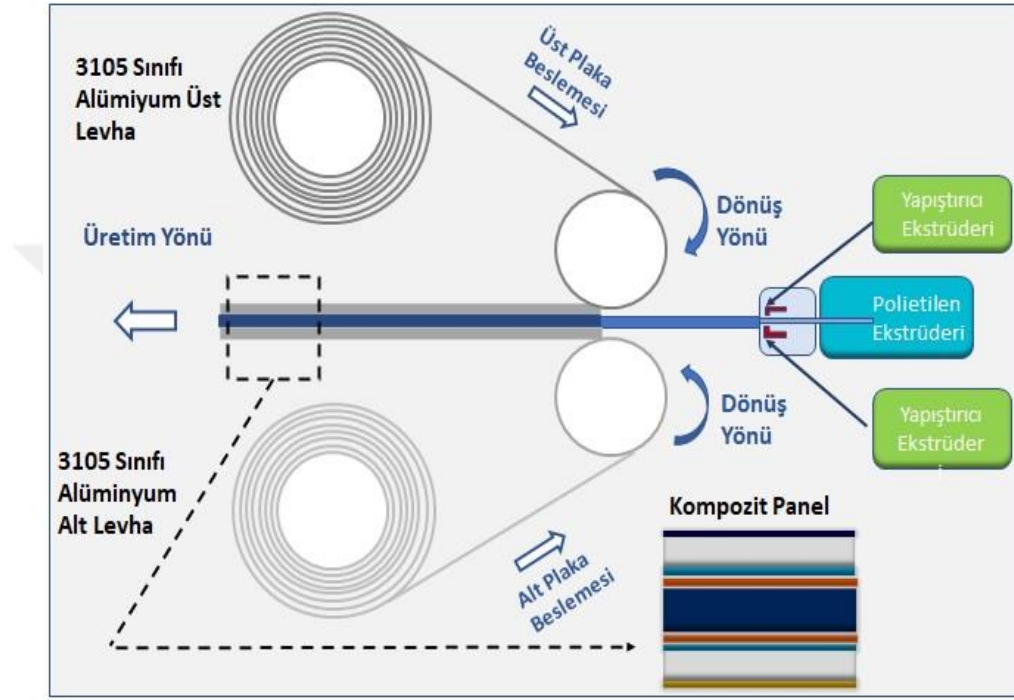
ANOVA analizinden elde edilen bilgiler arasında, delme kuvveti ve çapak oluşumu için ana etki grafikleri, tahmin edilen eğriler, tahmine dayalı modelleme, yüzey grafikleri, artık grafikler ve SN oranları yer almaktadır. Bu sonuçlar mevcut literatürle karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

3.3 Kullanılan Malzeme ve Ekipmanlar

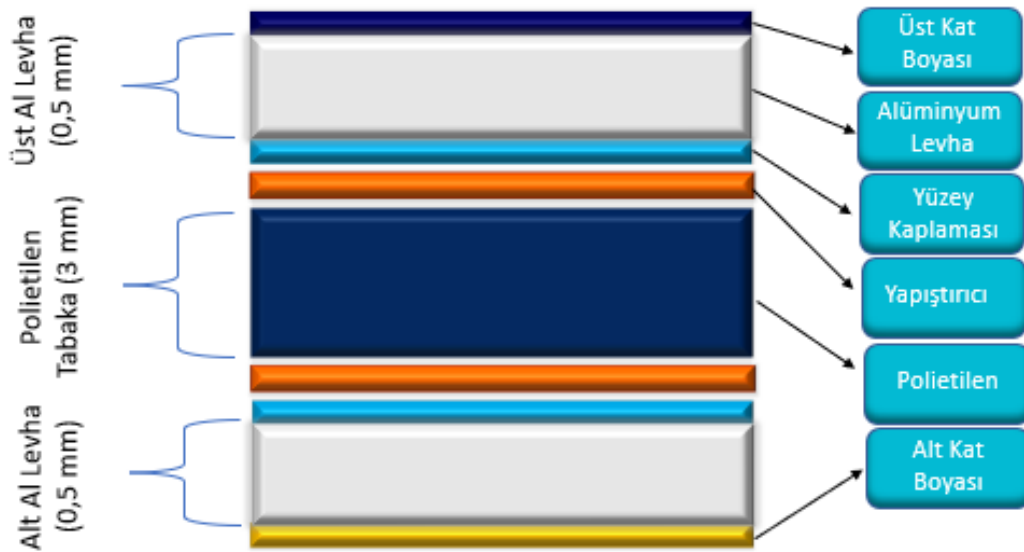
3.3.1 Alüminyum Kompozit Panel

Alüminyum kompozit panel, arasında düşük yoğunluklu polietilen (PE) bulunan 2 adet 3105 serisi alüminyum levhanın birleşmesiyle oluşmuş olup Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş (ASAŞ) firmasından tedarik edilmiştir. Mikro delme testinde kullanılan Al-PE kompozitler, ASAŞ firması tarafından bir kompozit üretim hattında, Şekil 3.6a’da gösterildiği gibi haddeleme işlemine benzer bir süreçle üretilmiştir. Şekil 3.6b ‘de kompozit levhayı oluşturan katmanlara yer verilmiştir. Alüminyum levha üzerinden boya tabakası bulunmakta olup polietilen tabaka ile arasında yapıştırıcı yer almaktadır. Üretim süreci gösterilen Al-PE kompozit panel mikro delme deneylerimizde iş parçası olarak kullanılmıştır. Al-PE kompozit panel 4 mm kalınlığında olup, kompozitin çekirdeğindeki

PE katmanının kalınlığı 3 mm, alt ve üst alüminyum levhaların kalınlığı ise 0,5 mm'dir. EN AW-3105 serisi 0,5 mm kalınlığında ki alüminyumun ortalama elastiklik modülü 54 GPa, ortalama çekme dayanımı 212 MPa ve ortalama akma dayanımı 202 MPa'dır. Çizelge 3.4'de kompozitin üst ve alt levhalarında kullanılan EN AW-3105 serisi alüminyumun kimyasal bileşimini göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.6 (a) Alüminyum kompozit panel üretim hattı ve (b) kompozit panel tabakaları

Çizelge 3.4 3105 serisi alüminyum kimyasal bileşimi

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
0.6	0.7	0.3	0.3–0.8	0.2–0.8	0.2	-	0.4	0.1

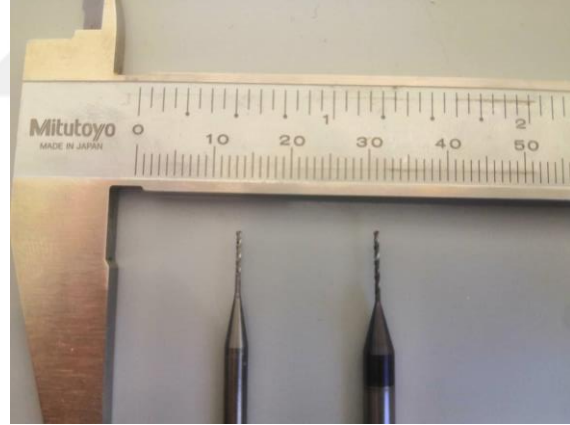
3.3.2 Mikro Matkap Uçları

Mikro matkaplar 0,7 mm ve 1 mm çaplarında tercih edilmiştir. Kaplamanın etkisini tespit etmek için her bir matkap ucunun TiAlN kaplamalı olanları da imal ettirilmiştir. Ayrıca takım üreticilerine göre, yumuşak malzemelerde sıklıkla 90°'lik bir açı kullanılırken, daha sert malzemeler için 120° ila 130° arasında uç açıları tercih edilmektedir.

Bu çalışmada uç açısının etkisini incelemek için 100° ve 140° uç açısına sahip matkaplar kullanılmıştır. Şekil 3.7 ve Şekil 3.8' de mikro delme deneylerinde kullandığımız mikro matkap uçları gösterilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.7 Deneyde kullanılan bazı mikro matkap uçları (a) 140° TiAlN kaplamalı 0,7 mm matkap ucu (b) Kaplamasız 140° (solda) ve TiAlN kaplamalı (sağda) mikro matkaplar (1 mm).



(a)



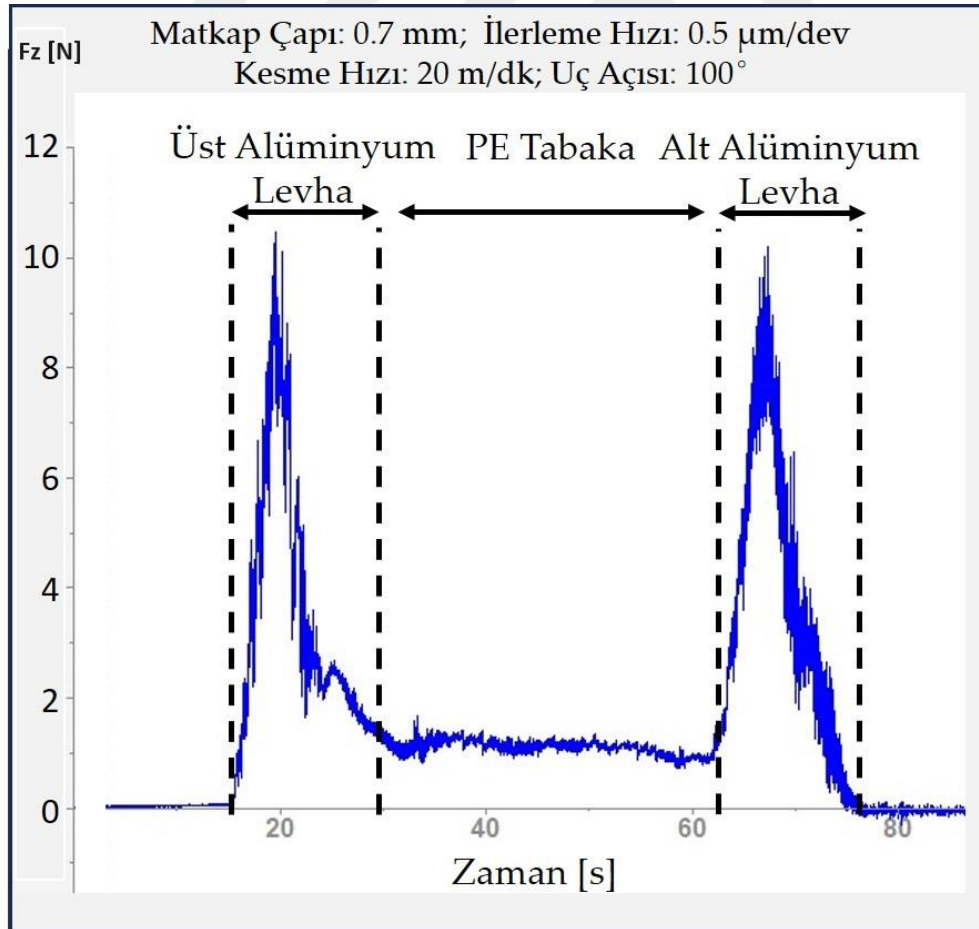
(b)

Şekil 3.8 Mikro matkap uçları (0,7 mm ve 1 mm) (a) 1 mm çapında mikro matkap uçları (b) 0,7 mm çapında mikro matkap uçları.

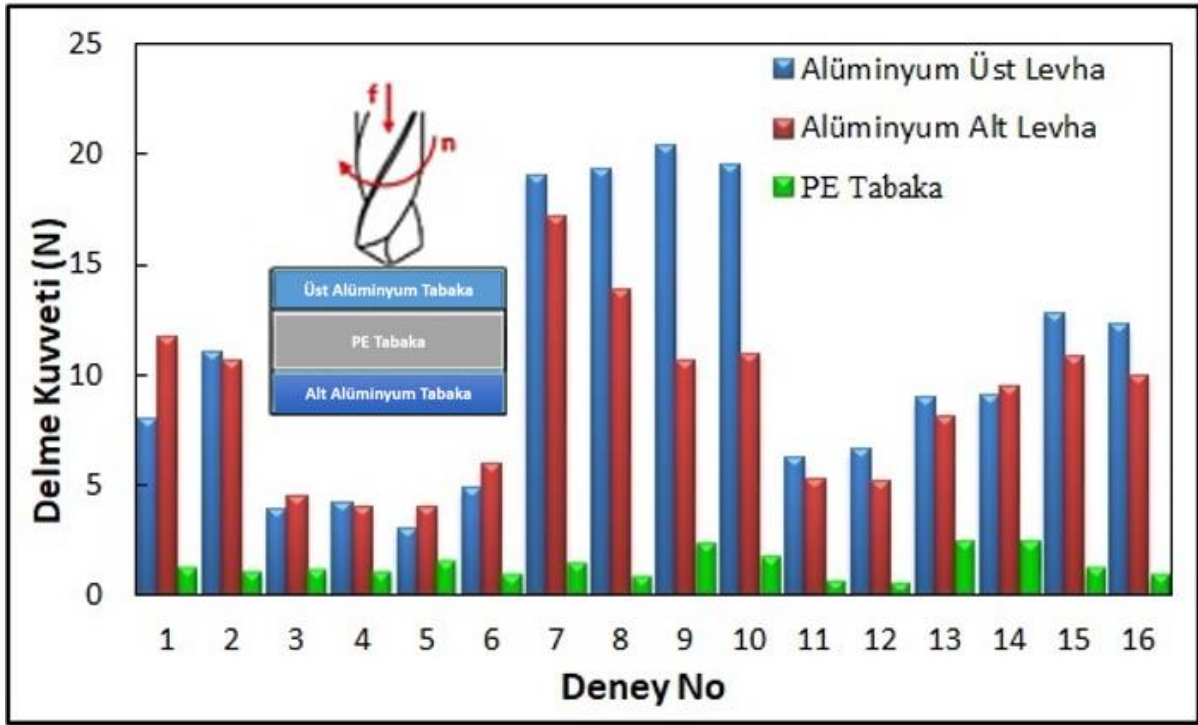
4. BULGULAR

4.1 Delme Kuvveti

Mikro takım, delme işlemine ilk olarak Al-PE kompozitin üstündeki Al tabakasını delerek başlamaktadır. Sonrasında PE tabakaya girmekte ve en son altta bulunan Al tabakayı iç yüzeyden delerek, delme işlemini sonlandırmaktadır. Bu deneyde geleneksel malzemelerde gözlemlenen durumlardan farklı olarak delme kuvvetinde farklı değişimler ortaya çıkmıştır. Şekil 4.1'de 2 numaralı deney için zaman içindeki delme kuvveti değişimini göstermektedir. Şekil 4.1'de gösterildiği üzere kesici takım kesme işlemine ilk başladığında kuvvet 9,5 N ile zirveye ulaşmakta olup matkap PE çekirdek tabakaya doğru ilerledikçe, delme kuvveti keskin bir şekilde 1,5 N'a düşmektedir. Takım alt Al katmanını delmeye başladığında, delme kuvveti bir kez daha artmakta ve son aşamada matkabın çıktığı noktada 0 N'ye düşmektedir.



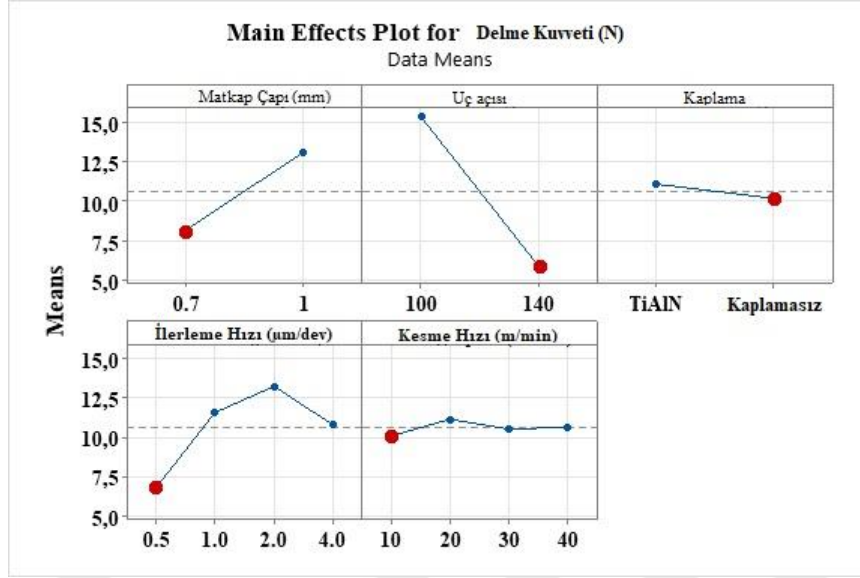
Şekil 4.1 Delme kuvveti verileri (2. Deney).



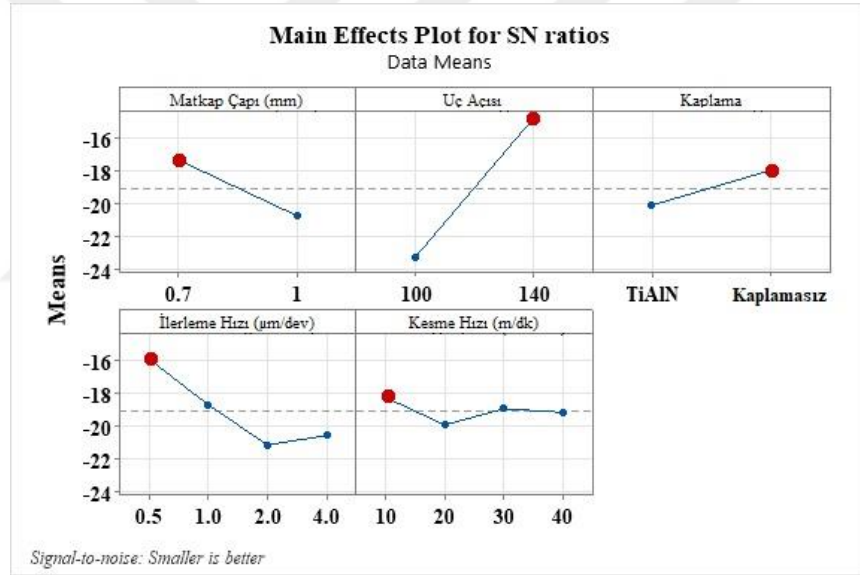
Şekil 4.2 Delme kuvveti verileri (16 Deneyin Tamamı).

Şekil 4.2’de, kompozitin üst ve alt alüminyum tabakalarının ve PE çekirdek tabakasının maksimum delme kuvveti değerleri verilmiştir. Şekil 4.2’de görüldüğü üzere 7, 8, 9 ve 10 numaralı deneylerde meydana gelen maksimum delme kuvvetleri diğer deneylere göre daha yüksek olmuştur. Bu deneylerde gözlemlenen yüksek delme kuvvetlerinin sebebi olarak küçük uç açısı (100°) ve 1 mm matkap çapı olabileceği değerlendirilmektedir.

Benzer bir durum deney 1, 2, 15 ve 16’da da gözlemlenmektedir. Genel olarak, uç açısının azalması, delme kuvvetinin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, uç açısı, takım çapı, kaplama, kesme hızı ve ilerleme hızı gibi çeşitli delme parametrelerinin Al-PE lamine kompozitin mikro delme üzerindeki etkisini belirlemek için varyans analizi yoluyla delme kuvveti etkileri grafiği oluşturulmuştur. Sonuçlar Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 ’te gösterilmiştir.



(a)



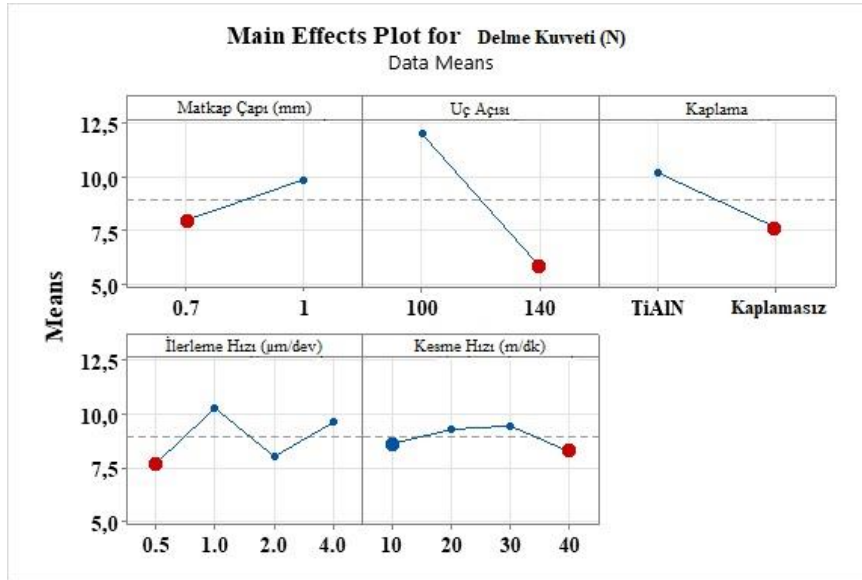
(b)

Şekil 4.3 Üst Al tabaka için ana etki grafiği ve delme parametrelerinin SN oranı grafiği (a) Ana etkiler grafiği ve (b) matkap parametrelerinin üst tabakanın delinmesi sırasında delme kuvvetine etkisinin S/N oranı grafiği (matkabın girdiği durumda).

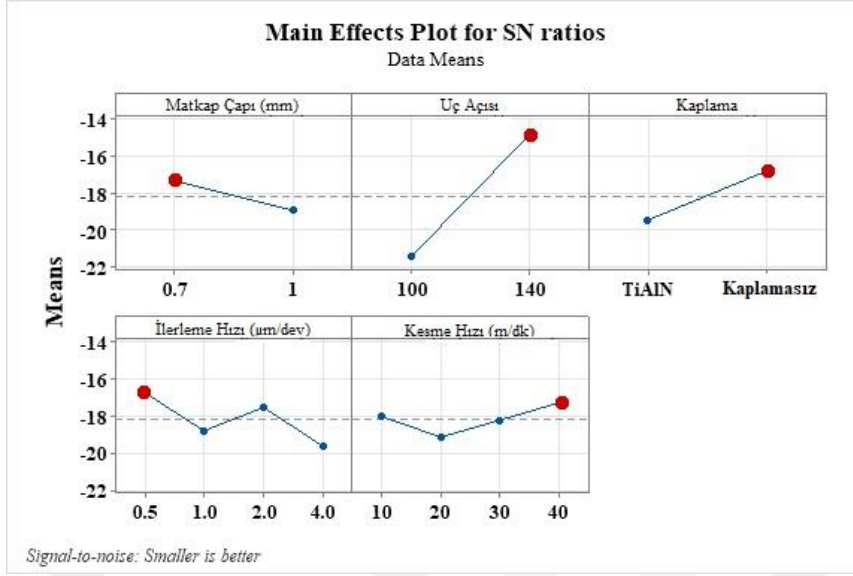
Şekil 4.3 delme parametrelerinin matkabın girdiği kompozitin üst katmanındaki delme kuvveti üzerindeki ana etki grafiğini ve SN oranlarını göstermektedir. Şekil 4.3a'ya göre, matkap uç açısı, matkabın delme işlemi sırasında üst tabakada meydana gelen delme kuvveti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Uç açısı 100°'den 140°'e arttığında, delme kuvvetleri azalmaktadır. 118° ve 130° uç açısının kullanıldığı bir çalışmada, uç açısının artması ve takıma yapılan kaplama ile birlikte oluşan kuvvetlerde azalma tespit edilmiştir

(Kaynak 2006). Ayrıca 118° - 124° - 130° derece uç açılarıyla yapılan çalışmada en yüksek kuvvetler 118° uç açısında gerçekleşmiştir (Aslan 2022). Bu durum uç açısında ki azalmanın talaş kalınlığını artırarak delme kuvvetini artırmasından kaynaklanmaktadır (Ke vd. 2006). Matkap çapı delme kuvvetini önemli ölçüde etkilemektedir. Matkap çapı 0.7 mm'den 1 mm'ye çıktığında delme kuvvetleri artmaktadır. Başka bir çalışma da bu bulgular desteklenmiş ve takım çapı arttıkça delme kuvvetinin de arttığını gözlenmiştir (Zitoun vd. 2010).

İlerleme hızı, $0,5 \mu\text{m/dev}$ ile $2 \mu\text{m/dev}$ arasında delme kuvvetleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ancak bu etki $4 \mu\text{m/dev}$ ilerleme hızında hafifçe azalmaktadır. Yapılan bir çalışmada ilerleme miktarı arttıkça delme kuvvetinin arttığı görülmüştür (Özsoy vd. 2023). Başka bir çalışma, ilerleme hızının en çok ana kesme kuvvetini ve yüzey pürüzlülüğünü etkilediğini bulmuştur (Yalçın 2015). Delme kuvvetini azaltmak ve stabil kesme için yüksek uç açısı ve $0,5$ - $1 \mu\text{m/dev}$ ilerleme hızının tercih edilmesi gerektiği sonucuna varılabilir. Şekil 4.3b'de gösterilen SN oranı grafikleri, en düşük delme kuvvetinin 140° uç açısı, $0,5 \mu\text{m/dev}$ ilerleme hızına yakın, 10 m/dak kesme hızı ve 0,7 mm matkap çapı ile mikro delme işleminden elde edilebileceğini göstermektedir.



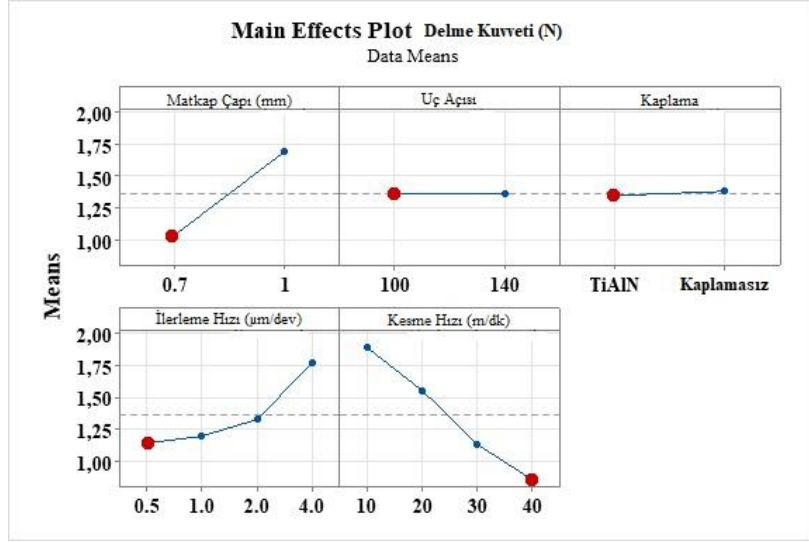
(a)



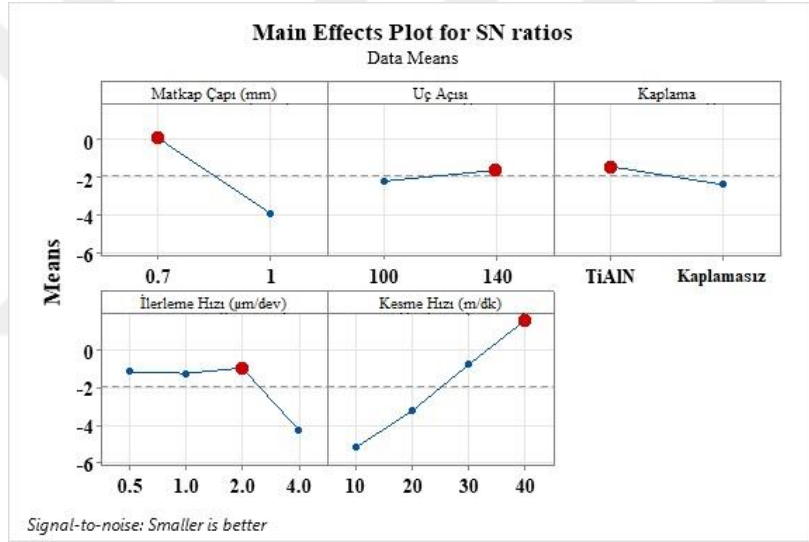
(b)

Şekil 4.4 Alt Al tabaka için ana etki grafiği ve delme parametrelerinin SN oranı grafiği (a) Delme parametrelerinin deliğin çıkışına yakın olduğu zaman kompozitin alt tabakasının delme kuvveti üzerindeki ana etkiler grafiği ve (b) SN oranı grafiği.

Şekil 4.4 kompozitin alt tabakasından çıkan matkabın, delme kuvveti üzerindeki delme parametrelerinin ana etkiler grafiğini ve SN oranı grafiklerini göstermektedir. Ayrıca, kompozitin PE çekirdek katmanının delinmesi sırasında delme parametrelerinin delme kuvveti üzerindeki ana etki grafiği Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Şekil 4.4a'ya göre uç açısı, üst tabakanın delinme işlemi sırasında meydana gelen duruma benzer bir eğilim sergilemektedir. Tüm parametreler arasında alt tabakanın delme işlemi sırasında delme kuvveti üzerindeki en önemli etki, uç açısının 100° den 140°'a çıktığı durumda gözlemlenmektedir. Sonuç olarak Al plakada gerçekleştirdiğimiz deneylerde matkap uç açısının azaltıldıkça delme kuvvetini artmaktadır. Kaplamasız bir matkap kullanmanın deliğin çıkışındaki delme kuvveti üzerindeki etkisi, üst tabakadakinden daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Bu tür bir kompozit yapının mikro delme işlemi için kaplamasız bir matkap önerilmektedir. Matkap çapının artmasıyla delme kuvvetinde yukarı yönlü bir eğilim gözlemlenmektedir. Kesme hızının artmasıyla delme kuvvetinde hafif bir azalma eğilimi gözlenmektedir. Yapılan bir araştırma, polimer esaslı kompozitlerin mikro delme işlemi sırasında kesme hızının artmasıyla delme kuvvetinin azaldığını göstermiştir (Rahamathullah ve Shunmugam 2013). SN oranı grafiklerine göre en düşük delme kuvveti 0.5 µm/dev ilerleme hızına yakın, 40 m/dak kesme hızı, 140° uç açısı ve 0.7 mm kaplamasız matkap çapı ile elde edilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.5 PE tabaka için ana etki grafiği ve delme parametrelerinin SN oranı grafiği; (a) Delme parametrelerinin kompozitin PE çekirdek tabakasını delme işleminde delme kuvveti üzerindeki ana etkiler grafiği ve (b) SN oranı grafiği.

Şekil 4.5’de gösterildiği üzere kesme hızının PE çekirdek tabakasının delinme işlemi sırasında büyük bir etkisi vardır. Kesme hızı 10 m/dk ile 40 m/dk arasında arttıkça, delme kuvveti azalmaktadır. Bunun aksine, ilerleme hızının artmasıyla özellikle 0,5 µm/dev ile 4 µm/dev arasında delme kuvvetlerinin arttığı görülmüştür. GLARE laminantın delinme işlemi üzeri yapılan bir çalışmada delaminasyonsuz, daha iyi bir yüzey kalitesi ve delme kuvvetini minimize etmek için yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme hızının önerildiğini belirtmişlerdir (Park vd. 2018). SN grafikleri 2 µm/dev ilerleme hızı, 40 m/dk kesme hızı, 140° uç açısı ve kaplamalı 0,7 mm matkap çapını optimal delme parametresi olarak

önermektedir. Her katmanın mikro delme sırasında meydana gelen delme kuvveti için varyans analizleri sırasıyla Çizelge 4.1, 4.2 ve 4.3’de sunulmuştur.

Çizelge 4.1 Üst Al tabakanın delinmesi sırasında delme kuvveti için varyans analizi.

Parametreler	DF	Seq SS	Katkı Oranı	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	p-Değeri
Matkap Çapı (mm)	1	97,719	17,68%	97,719	97,719	123,82	0,000031
Uç Açısı (°)	1	356,817	64,54%	356,817	356,817	452,12	0,000001
Kaplama	1	3,326	0,60%	3,326	3,326	4,21	0,085890
İlerleme Hızı (µm/dev)	3	88,063	15,93%	88,063	29,354	37,19	0,000285
Kesme Hızı (m/dk)	3	2,195	0,40%	2,195	0,732	0,93	0,483003
Hata	6	4,735	0,86%	4,735	0,789		
Toplam	15	552,857	100,00%				

Çizelge 4.2 PE tabakanın delinmesi sırasında delme kuvveti için varyans analizi.

Parametreler	DF	Seq SS	Katkı Oranı	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	p-Değeri
Matkap Çapı (mm)	1	1,73224	31,93%	1,73224	1,73224	38,63	0,000801
Uç Açısı (°)	1	0,00021	0,00%	0,00021	0,00021	0,0047	0,947546
Kaplama	1	0,00488	0,09%	0,00488	0,00488	0,11	0,752618
İlerleme Hızı (µm/dev)	3	0,96071	17,71%	0,96071	0,32024	7,14	0,020933
Kesme Hızı (m/dk)	3	2,45882	45,32%	2,45882	0,81961	18,28	0,002019
Hata	6	0,26902	4,96%	0,26902	0,04484		
Toplam	15	5,42589	100,00%				

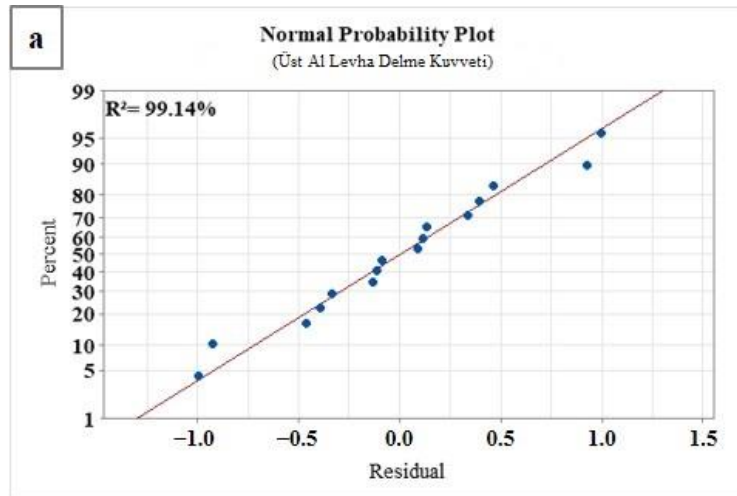
Çizelge 4.3 Alt Al tabakanın delinmesi sırasında delme kuvveti için varyans analizi.

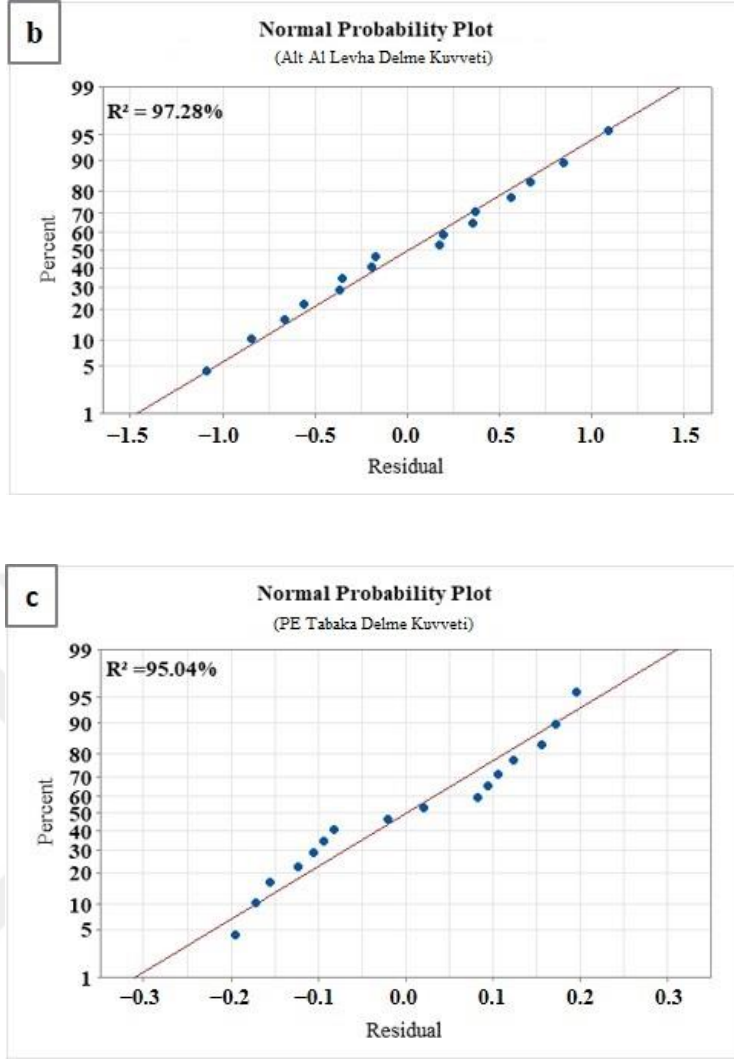
Parametreler	DF	Seq SS	Katkı Oranı	Adj SS	Adj MS	F-Değer	p-Değer
Matkap Çapı (mm)	1	14,489	6,56%	14,489	14,489	14,48	0,008909
Uç Açısı (°)	1	152,386	68,95%	152,386	152,386	152,32	0,000017
Kaplama	1	26,196	11,85%	26,196	26,196	26,18	0,002184
İlerleme Hızı (µm/dev)	3	18,190	8,23%	18,190	6,063	6,06	0,030133
Kesme Hızı (m/dak)	3	3,743	1,69%	3,743	1,248	1,25	0,372784
Hata	6	6,003	2,72%	6,003	1,000		
Toplam	15	221,006	100,00%				

Çizelge 4.1 'e göre uç açısı %64,54 ile en önemli etkiye sahipken, matkap çapı %17,68 ve ilerleme hızı %15,93 katkı oranıyla onu takip etmektedir. Ayrıca kaplamanın delme kuvvetine katkısı %0,6'dır. PE tabaka için kesme ve ilerleme hızının delme kuvvetine

katkıları sırasıyla %45,32 ve %17,71 olup, Çizelge 4.2 'de gösterildiği gibi matkap çapıyla (%31,93) birlikte en önemli 3 parametreyi temsil etmektedir. Diğer parametrelerden olan uç açısı ve kaplamanın delme kuvvetine üzerinde anlamlı bir katkısı olmamıştır. Çizelge 4.3 'de belirtildiği gibi matkap delik çıkışına yaklaştığında, uç açısı delme kuvvetinin %68,95'ini, kaplama %11,85'ini, ilerleme hızı %8,23'ünü oluşturmaktadır. Yapılan analizler matkap çapı parametresinin PE çekirdek katmanının delinmesi sırasındaki delme kuvveti üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Her bir katmanın delme kuvvetine ilişkin olasılık grafikleri Şekil 4.6'da verilmiştir.

Taguchi yönteminde R^2 %85 ve %99 aralığında olduğu zaman tasarımın ve analizin güvenilirliğini ve kabul edici derecede olduğunu göstermektedir (Bahrami 2022). Şekil 4.6a üst katmanın delinmesi için normal olasılık yüzdesinin %99,14 olduğunu, Şekil 4.6b'de alt katmanın delinmesi için normal olasılık yüzdesinin %97,8 olduğunu, Şekil 4.6c'de PE çekirdek katmanı için olasılık yüzdesinin %95,04 olduğu gözükmemektedir. Bu sonuçlar, delme işleminin farklı aşamalarında uç açısı, ilerleme hızı ve kesme hızı gibi bireysel faktörlerin kritik önemini doğrulamaktadır. Matkap farklı malzeme özelliklerine sahip katmanlar arasında geçiş yaparken, delme parametrelerinde meydana gelen dinamik etkileşim, bu tür operasyonların karmaşıklığını göstermektedir. Ayrıca polimer tabakasını delirken matkap çapının etkisinin önemli ölçüde artması dikkat çekicidir. Bu durum kuvvet kontrolünü optimize etmek için bu parametrenin dikkatli bir şekilde seçilmesi ve ayarlanması ihtiyacını ortaya koymaktadır (Mudhukrishnan vd. 2019).





Şekil 4.6 Her tabakanın mikro delme işleminde delme kuvveti için olasılık grafikleri; (a) üst tabaka, (b) alt tabaka, (c) PE tabaka.

4.2 Mikro Delik ve Matkap Çapındaki Değişim

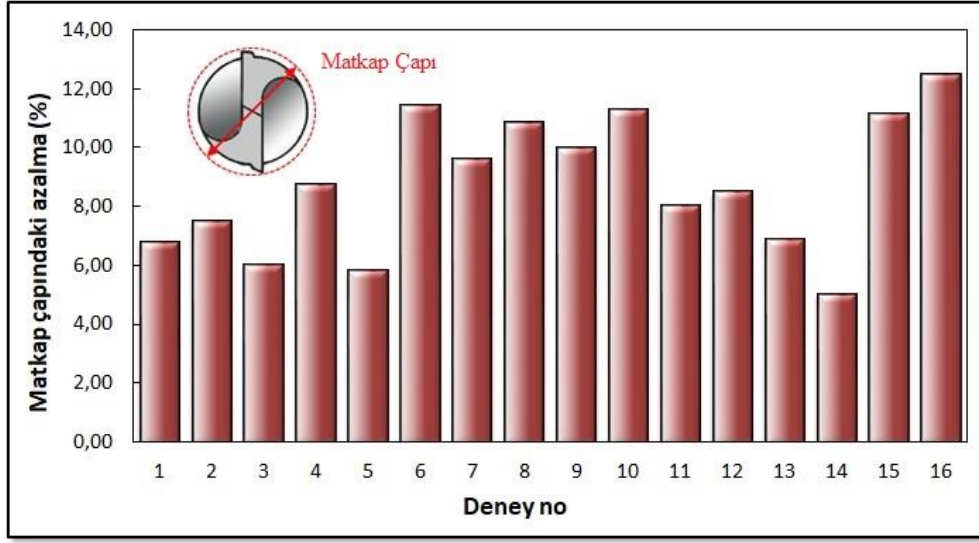
Mikro delik delme işleminde delik kalitesi iş malzemesinin türü, kesme hızı, ilerleme hızı ve takım geometrisi gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. İşlem sırasında delik çapında meydana gelen değişiklikler, aşındırıcı aşınma mekanizması nedeniyle takım çapındaki değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada benzer kesme koşulları altında deneyler yapıldıktan sonra taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak takım çapındaki değişiklikler ölçülmüştür. ANOVA’da (varyans analizi) kullanılan veriler, tekrarlı deneyler sonrasında takım ve delik çaplarının beş ölçümünün ortalama değeridir. Şekil 4.7a, matkap çapındaki azalmayı göstermektedir. Sonuçlar, en az çap değişiminin

3., 5. ve 14. deneylerde meydana geldiğini, en büyük aşınmanın ise 6., 10. ve 16. deneylerde görüldüğünü ortaya koymaktadır. Maksimum takım aşınması, daha küçük uç açısına sahip kaplanmamış kesici takımlarda meydana gelme eğilimindedir. 90°, 118° ve 130° uç açısının kullanıldığı bir çalışmada takım aşınması açısından en uygun işleme şartının 130° uç açısında sağlandığı bulunmuştur (Tosun vd. 2004). Şekil 4.7b, bu gözlemi doğrulayarak düşük uç açısının takım aşınmasını artırdığını göstermektedir.

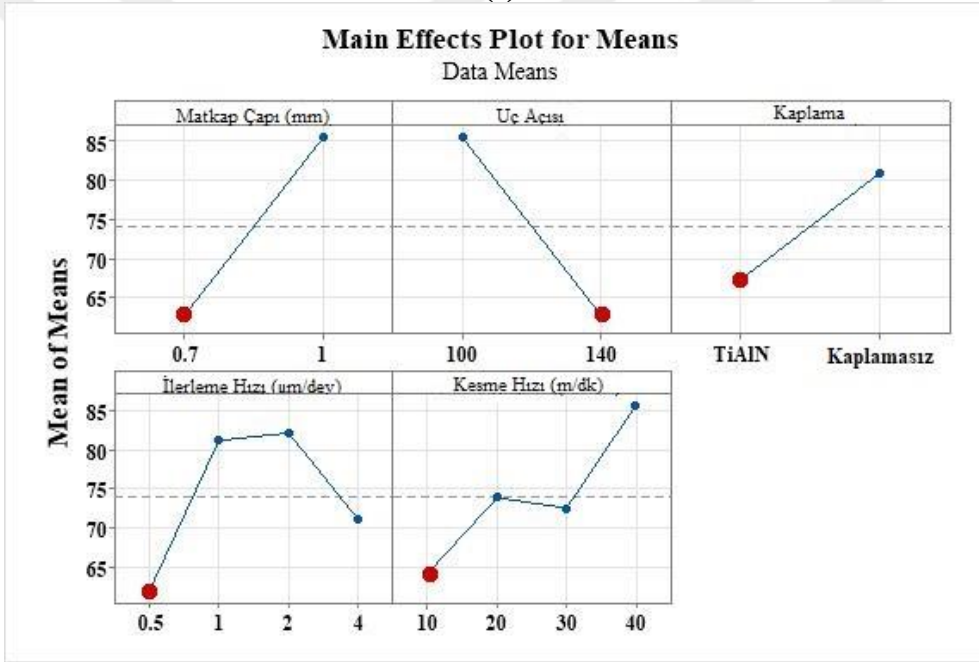
Çizelge 4.4 Takım çapı aşınması için varyans analizi.

Parametreler	DF	Seq SS	Katkı Oranı	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	p-Değeri
Matkap Çapı (mm)	1	2060,0	26,15%	2060,0	2060,0	12,09	0,013
Uç Açısı	1	2031,5	25,79%	2031,5	2031,5	11,92	0,014
Kaplama	1	731,8	9,29%	731,8	731,8	4,30	0,084
İlerleme Hızı (µm/rev)	3	1094,9	13,90%	1094,9	365,0	2,14	0,196
Kesme Hızı (m/min)	3	936,4	11,89%	936,4	312,1	1,83	0,242
Hata	6	1022,2	12,98%	1022,2	170,4		
Toplam	15	7876,9	100,00%				

Delme parametrelerinin takım çapı aşınması üzerindeki etkisini anlamak için ANOVA analizi yapılmış olup sonuçlar Çizelge 4.4'de gösterilmiştir. Bu tabloya göre matkap çapı (%26,15) ve takım ucu açısı (%25,79) takım çapı aşınması üzerinde en önemli etkiye sahip parametrelerdir. Ana etki grafikleri incelendiğinde matkap çapının artmasıyla takım aşınması artmıştır. Ayrıca matkap kaplamasının ve yüksek uç açısının matkap aşınması üzerindeki olumlu bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. 16. deneyde 0,7 mm matkap çapı, 100° uç açısı ve kaplamasız bir takım kullanıldığında daha yüksek aşınma görülürken, 14. deneyde 1 mm takım çapı, 140° uç açısı ve kaplamalı bir takım ile daha düşük aşınma gözlenmiştir.



(a)



(b)

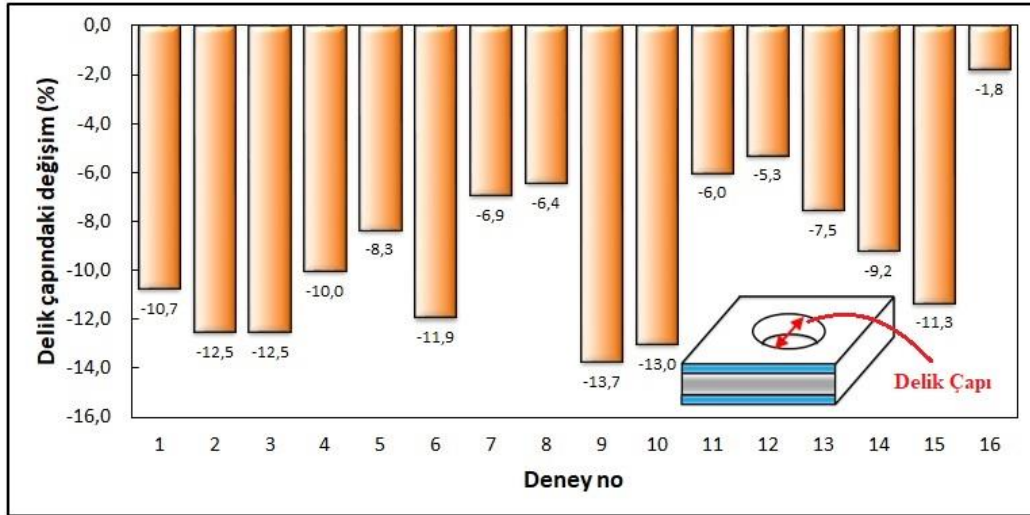
Şekil 4.7 (a) Tüm deneyler için mikro matkap çapı değişimi ve (b) delme değişkenlerinin takım çapındaki değişim üzerindeki ana etkileri.

Bu çalışmada delik çapındaki sapma SEM ölçümleri ile değerlendirilmiştir. D_h delik çapını, D ise matkap çapını temsil etmektedir. Şekil 4.8’de delik çapındaki değişim temel bir sapma oranı (D_h/D) kullanılarak hesaplanmış ve bu ölçümlere dayalı varyans analizleri Çizelge 4.5’de gösterilmiştir. Çizelge 4.5’de gösterildiği üzere delme parametreleri arasında matkap çapı (%36,67) ve kesme hızı (%25,15), delik çapı değişimi üzerinde en önemli iki parametredir. Ayrıca, kesme hızı ve ilerleme hızındaki artış delik çapı değişiminde azalmaya yol açmıştır. Kesme hızı ve ilerleme hızının artırılmasıyla

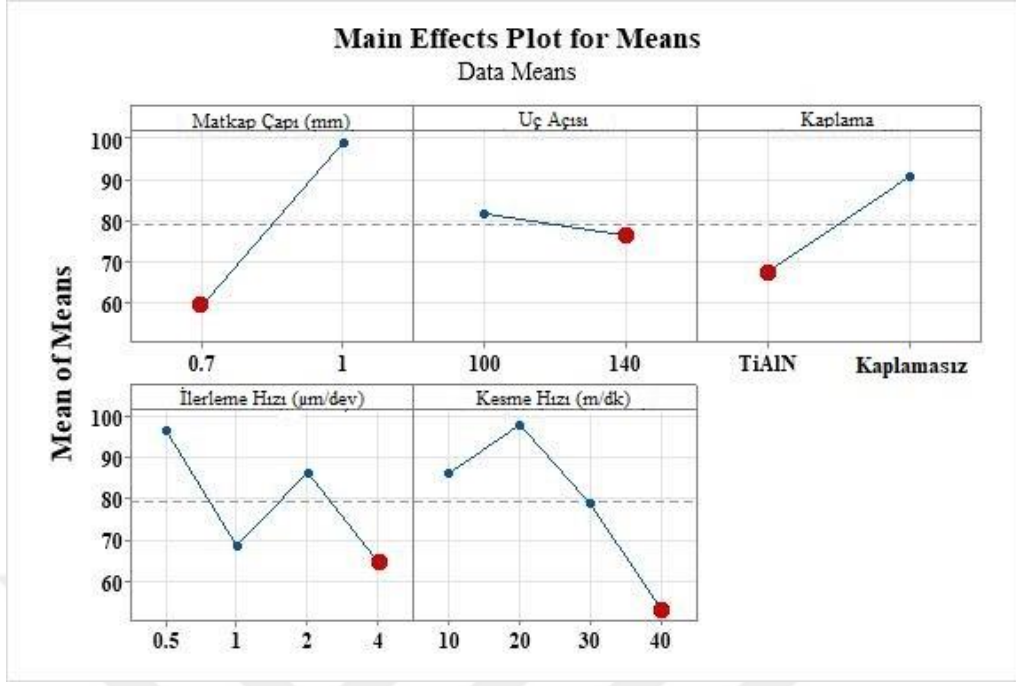
daha kısa sürede delik delme imkanı sağlandığından, delik çapındaki değişim en aza indirilmiştir. Çizelge 4.5'de görüldüğü üzere uç açısının delik çapı değişimi üzerindeki etkisi minimum düzeydedir ve anlamsızdır. Şekil 4.8b incelendiğinde kaplamalı takım kullanılması delik çapı değişiminde azalmaya neden olurken, matkap çapındaki artış delik çapı sapma miktarında artışa neden olmuştur. Bir çalışmada takım çapındaki artışla birlikte delik çapı sapmasında artış gözlemlenmiştir. Aynı çalışmada, ilerleme hızı ve kesme hızındaki artışla birlikte minimum delik çapı değişimi rapor edilmiştir (Waqar vd. 2017). Sonuç olarak Al-PE malzemenin mikro koşullar altında delinmesinden elde edilen bulguların mevcut literatürle uyumlu olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.5 Delik çapı değişimi için varyans analizi.

Parametreler	DF	Seq SS	Katkı Oranı	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	p-Değeri
Matkap Çapı (mm)	1	6275,4	36,67%	6275,4	6275,4	24,36	0,003
Uç Açısı	1	109,6	0,64%	109,6	109,6	0,43	0,538
Kaplama	1	2119,0	12,38%	2119,0	2119,0	8,23	0,028
İlerleme Hızı ($\mu\text{m}/\text{dev}$)	3	2760,0	16,13%	2760,0	920,0	3,57	0,086
Kesme Hızı (m/dk)	3	4305,2	25,15%	4305,2	1435,1	5,57	0,036
Hata	6	1545,6	9,03%	1545,6	257,6		
Toplam	15	17114,7	100,00%				



(a)



(b)

Şekil 4.8 (a) Tüm mikro delme testlerinde açılan deliklerin çap değişimi, (b) delme parametrelerinin delik çapındaki değişim üzerindeki ana etkisi.

4.3 Delme Parametrelerinin Çapak Oluşumuna Etkisi

Mikro Delme işleminde çıkış çapak yüksekliği, giriş çapak yüksekliğinden çok daha büyüktür (Sorrentino vd. 2022, Waqar vd. 2017). Bu nedenle çalışmada çıkış çapak yüksekliği ele alınmıştır. Her kesme koşulundan sonra SEM görüntüleri elde edilmiş ve çapak yüksekliği ölçülmüştür. Bu ölçümlerin ortalama değerleri ANOVA analizinde kullanılmıştır. ANOVA varyansları çizelge 4.6 'da sunulmuştur.

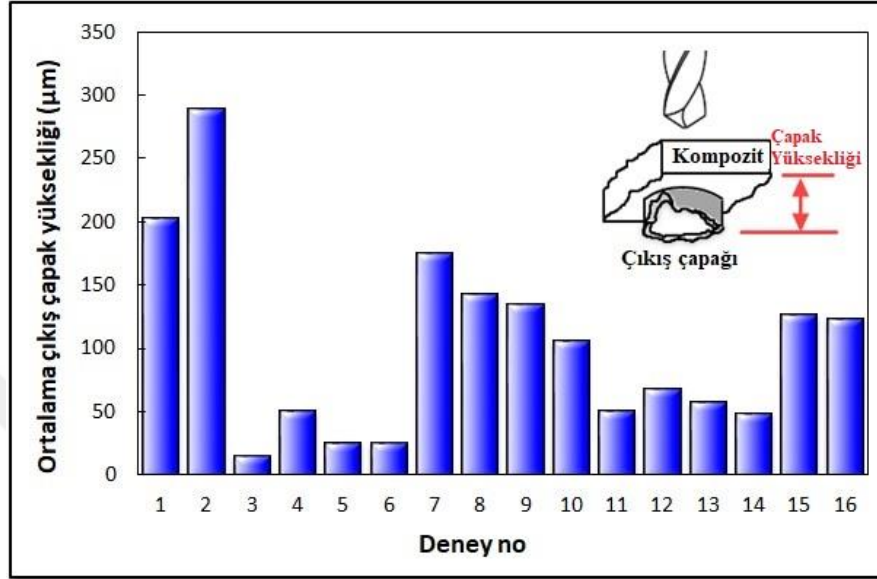
Çizelge 4.6 Delik çıkışındaki çapak yüksekliği için varyans analizi.

Parametreler	DF	Seq SS	Katkı Oranı	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	p-Değeri
Matkap Çapı (mm)	1	2047	2.41%	2047	2047,0	2,36	0,17538
Uç Açısı (°)	1	57,627	67,80%	57,627	57,627	66,44	0,00018
Takım Kaplaması	1	11,352	13,36%	11,352	11351,6	13,09	0,01113
İlerleme Hızı (µm/rev)	3	7224	8,50%	7224	2408,1	2,78	0,13278
Kesme Hızı (m/min)	3	1539	1,81%	1539	513,1	0,59	0,64290
Hata	6	5204	6,12%	5204	867,3		
Toplam	15	84,993	100,00%				

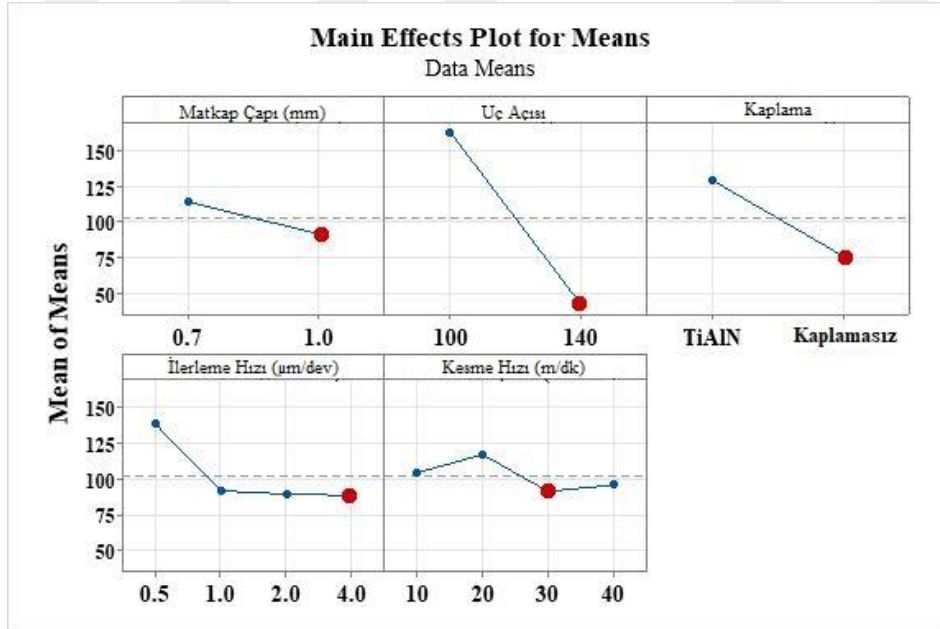
Çizelge 4.6'ya göre, uç açısı delik çıkışındaki çapak yüksekliği üzerinde en etkili parametredir. AlTiN kaplama ise Şekil 4.9'da gösterildiği üzere çapak oluşumunu olumsuz etkilemiştir. Farklı takım çapları çapak yüksekliği üzerinde anlamlı bir etki oluşturmamıştır. Şekil 4.9a'da 16 deneyin her biri için ortalama çapak yüksekliğini göstermektedir. En yüksek çapak oluşumu gözlenen 2. deney koşulları aşağıdaki gibidir: 0.7 mm matkap çapı, 100° uç açısı, 0,5 µm/dev ilerleme hızı ve AlTiN kaplamalı. Ayrıca en küçük çapak oluşumunun gözlemlendiği 3. deney koşulları 1 mm matkap çapı, 140° uç açısı, 0,5 µm/dev ilerleme hızı ve kaplamasızdır. Bu nedenle, delik çıkışında çapak oluşumunu en aza indirmek için, kaplamasız bir matkap ucu ve uç açısında artış avantaj sağlayabilir. Yapılan bir çalışmada yüksek hızlı kesme ve düşük ilerlemeli işlemenin, malzemedeki herhangi bir delaminasyon / ayrılma izlerinden sorumlu olan kesme kuvvetinin Fz bileşeninde önemli bir azalmaya sağladığını bildirmiştir (Sorrentino vd. 2022). Ayrıca, GLARE kompozitin delinmesinde iş mili hızının düşmesi ve yüksek ilerleme hızı, takım ucu sıcaklığına neden olarak polimerik kompozit malzemelerde daha yüksek kesme kuvveti ve kritik reçine sıcaklığı sorunlarına yol açmaktadır (Sorrentino vd. 2022, Wang vd. 2015).

Çizelge 4.6'da daha önce belirtildiği gibi, uç açısının delik çıkışındaki çapak yüksekliği üzerinde önemli bir etkisi vardır. Uç açısının azalması talaş kalınlığının azalmasına neden olmaktadır bu durum talaş kırılmasını zorlaştırarak çapak oluşumunu arttırmaktadır. Yapılan bir araştırma kesme işleminde uygun olmayan bir uç açısının çıkış yüzeyinde olumsuz bir kayma deformasyon bölgesinin oluşumunu teşvik ettiğini ve böylece çıkış çapağını artırdığını göstermiştir (Chen vd. 2021). Bu nedenle, uç açısının artırılması çapak oluşumunu azaltabilmektedir. AlTiN kaplamanın çapak oluşumu üzerine olumsuz bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Kaplama malzemesi termal bir bariyer görevi gördüğünden, kesme bölgesinden daha fazla ısı iş parçasına aktarılmaktadır. Bu durum iş parçasının termal olarak yumuşamasına ve dolayısıyla çapak oluşumunun artmasına neden olmaktadır. Benzer etkiler yapılan başka çalışmalarda da görülmüştür. İş parçasının termal yumuşaması nedeniyle çapak yüksekliği ve genişliğinin arttığı gözlemlenmiştir (Platt vd. 2020). İlerleme hızındaki artış da çapak yüksekliğinde azalmaya neden olmuştur. Artan ilerleme hızı daha fazla talaş kalınlığına yol açarak talaş kırılmasını kolaylaştırır ve daha küçük çapaklara neden olur. Bir başka bulgu da kesme hızı ve takım

çapının çapak oluşumu üzerindeki etkilerinin oldukça az olmasıdır. Şekil 4.9b'de sunulan sonuçlara dayanarak, delik çıkışında çapak oluşumunu en aza indirmek için kaplamasız matkap ucu, yüksek ilerleme hızı ve yüksek uç açıları kullanılması gerekmektedir.



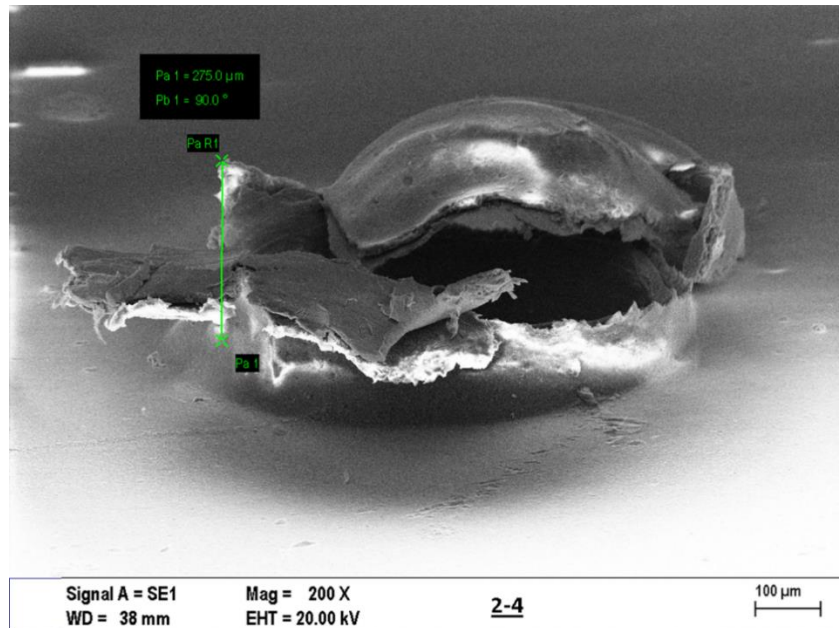
(a)



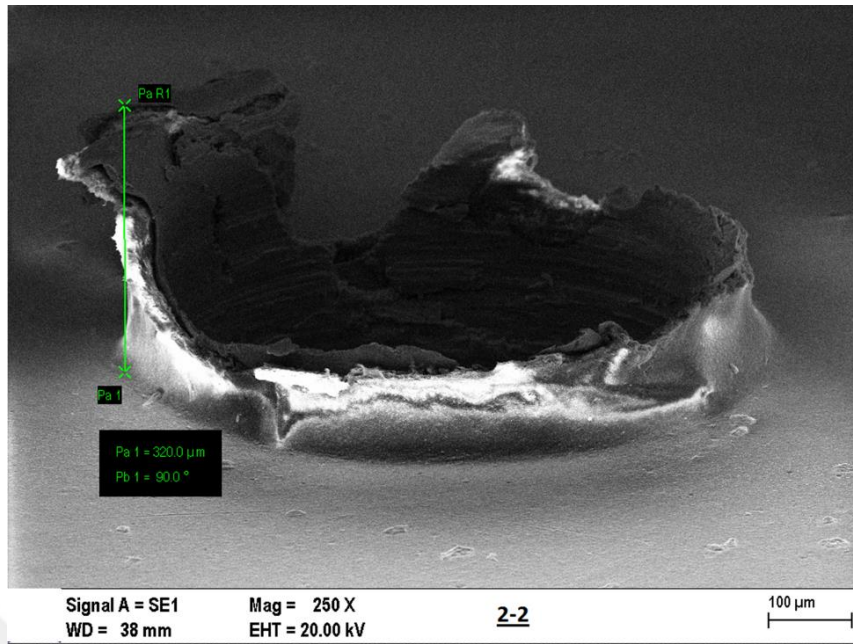
(b)

Şekil 4.9 (a) Tüm testler için delik çıkışındaki çapak yüksekliği ve (b) delme değişkenlerinin çapak yüksekliği üzerindeki ana etkileri.

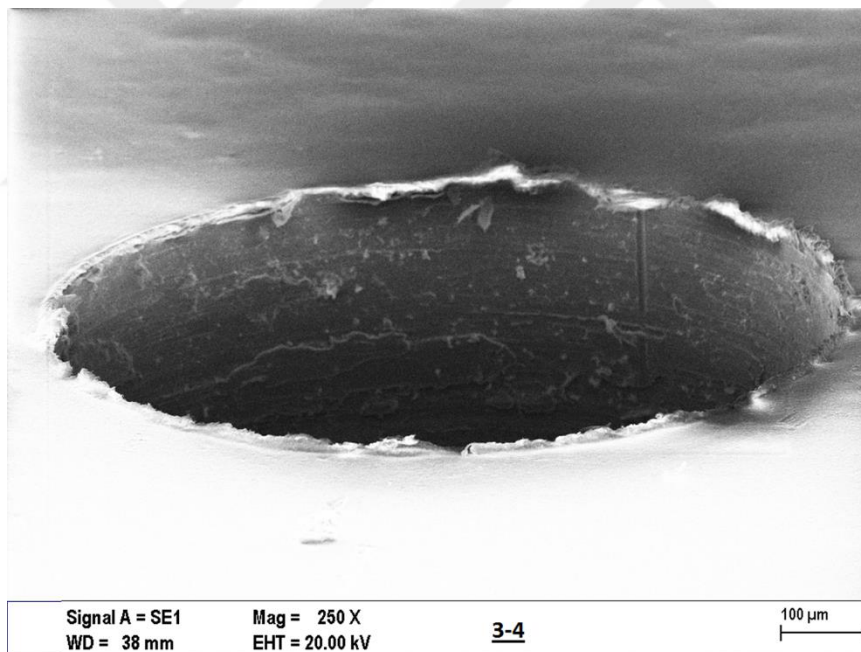
Şekil 4.10'da 16 deney arasından seçilen SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.10a,b, ikinci mikro delme deneyinde beş numune içerisinde ölçülen en yüksek çapak yüksekliklerini göstermektedir. Görüldüğü üzere delik çıkışı temiz değildir ve oldukça çapaklıdır. Bu nedenle, laminat kompozitin mikro delinmesinden sonra çapak giderme işlemine ihtiyaç bulunmaktadır. Şekil 4.10c, üçüncü mikro delme koşulunda delik çıkışında meydana gelen en düşük çapak oluşumunu göstermektedir. Bu örnekte delik çıkışı temizdir ve neredeyse çapak giderme işlemine gerek bulunmamaktadır. Şekil 4.10d, en yüksek delme kuvvetinin meydana geldiği deliği göstermektedir. Şekil 4.10e, tüm deliklere uygulanan delik çapı ölçümünün bir örneğini göstermektedir. Her deney koşulu için beş delme işlemi yapılmış olup ortama delik çapı bulunmuştur. Takım çapında meydana gelen aşınmaya bağlı olarak delik çapı matkap çapından daha düşüktür. Bu durum Şekil 4.10f'de örnek olarak gösterilmiştir. Şekil 4.10g'de gösterildiği üzere ikinci deney koşulunda çapak maksimum seviyede oluşmuş ve mikro matkaba talaş yapışması gözlenmiştir. Öte yandan, Şekil 4.10h'de delme işleminde mikro takımın çekirdek çapı ve burun bölgesinde talaş yapışma yoğunlaşması görülmüştür. Bu durum matkabın kompozit yapı içerisinde ilerlemesini engelleyerek delme kuvvetini artırmaktadır. Benzer durum, Şekil 4.11'de delme kuvvetinin maksimum olduğu deneylerden biri olan yedinci koşulda da ana kesici kenar ve burun bölgesinde son derece yüksek bir talaş yapışması (Şekil 4.11'de kırmızı noktalı daire) gözlemlenmiştir.



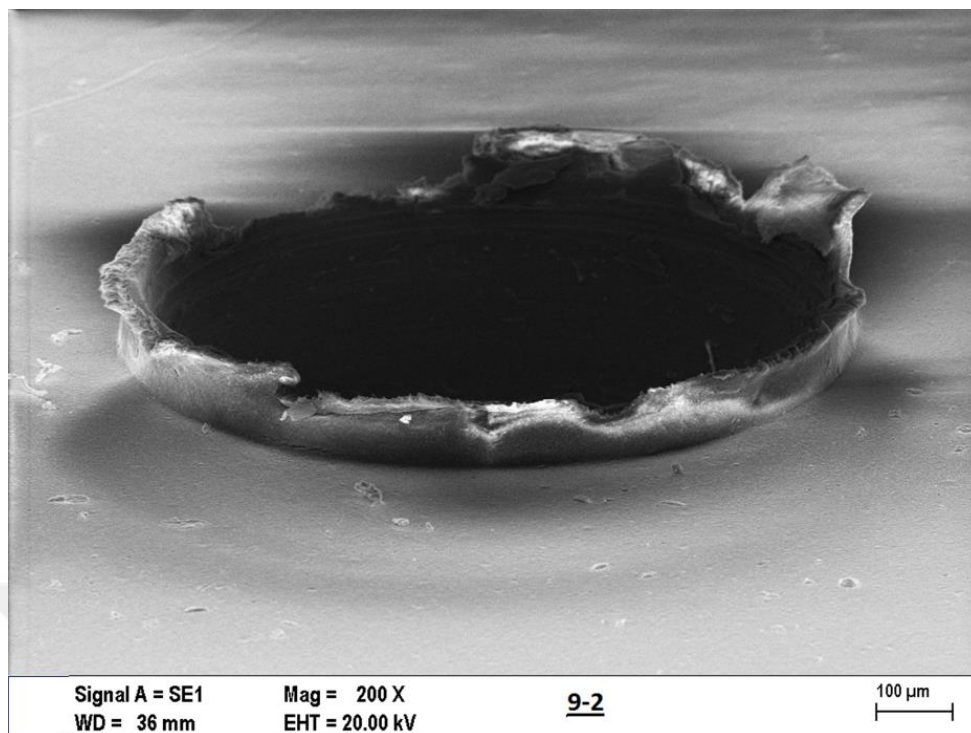
(a)



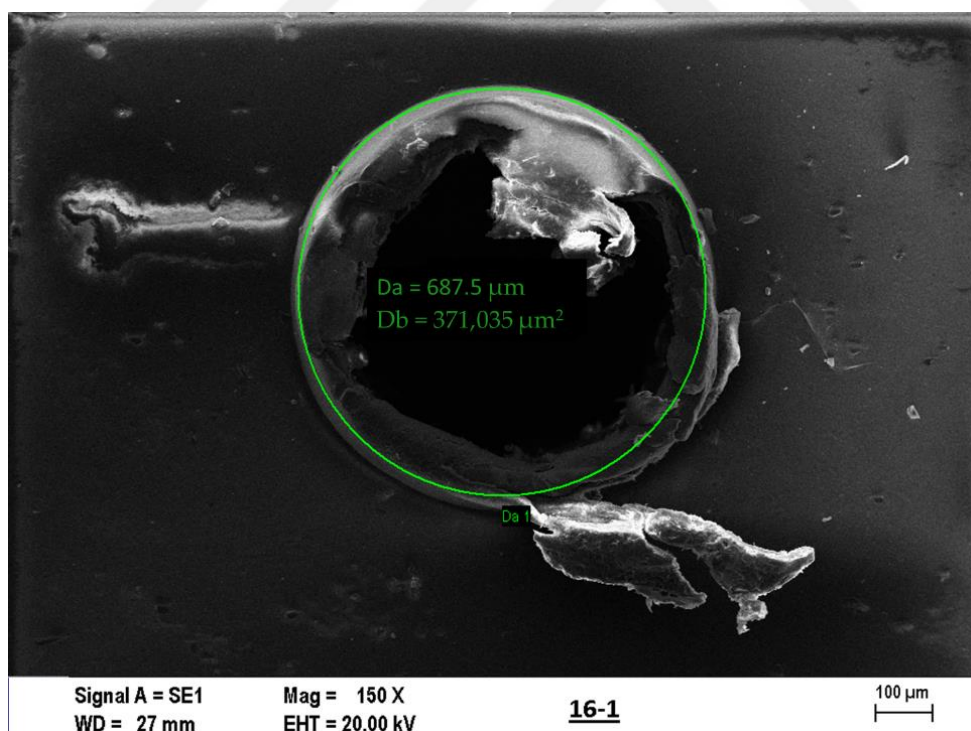
(b)



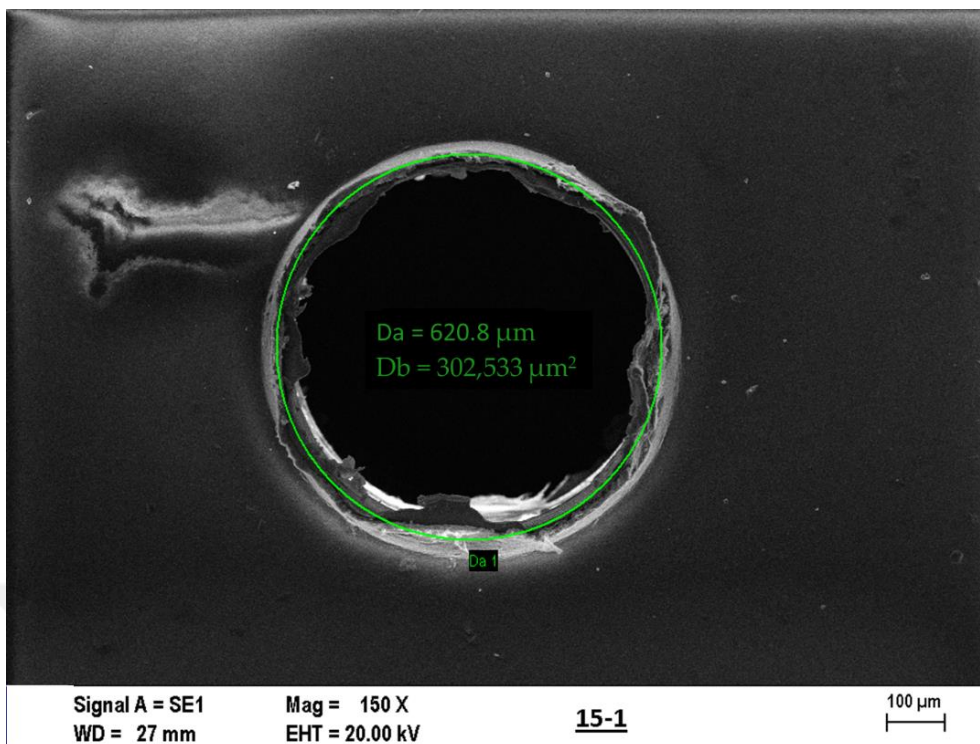
(c)



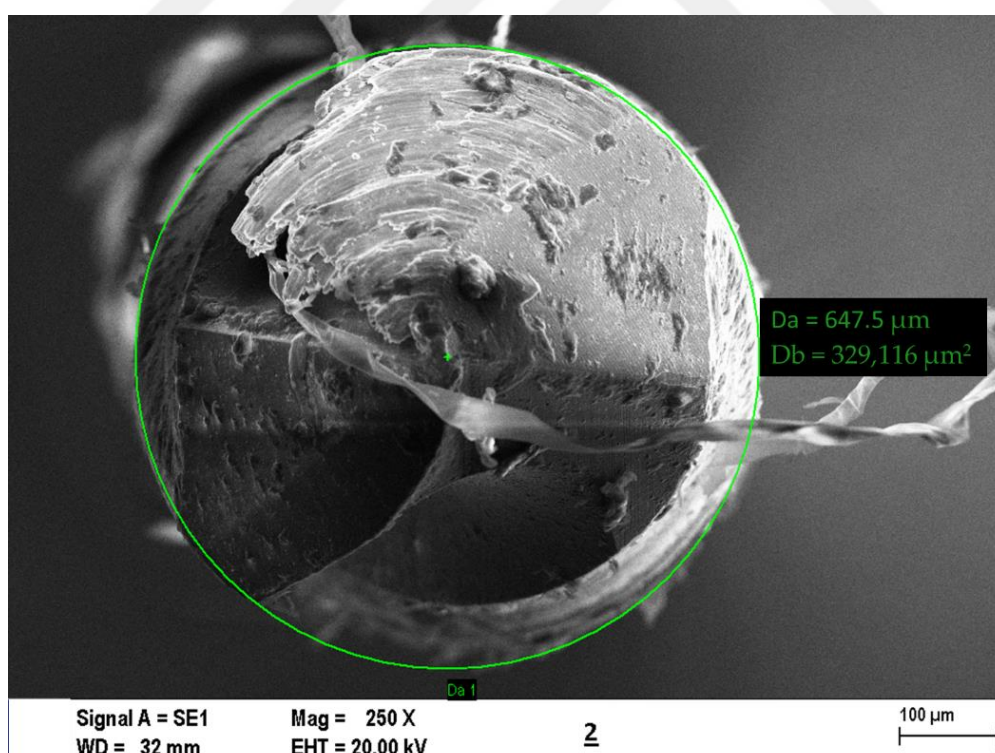
(d)



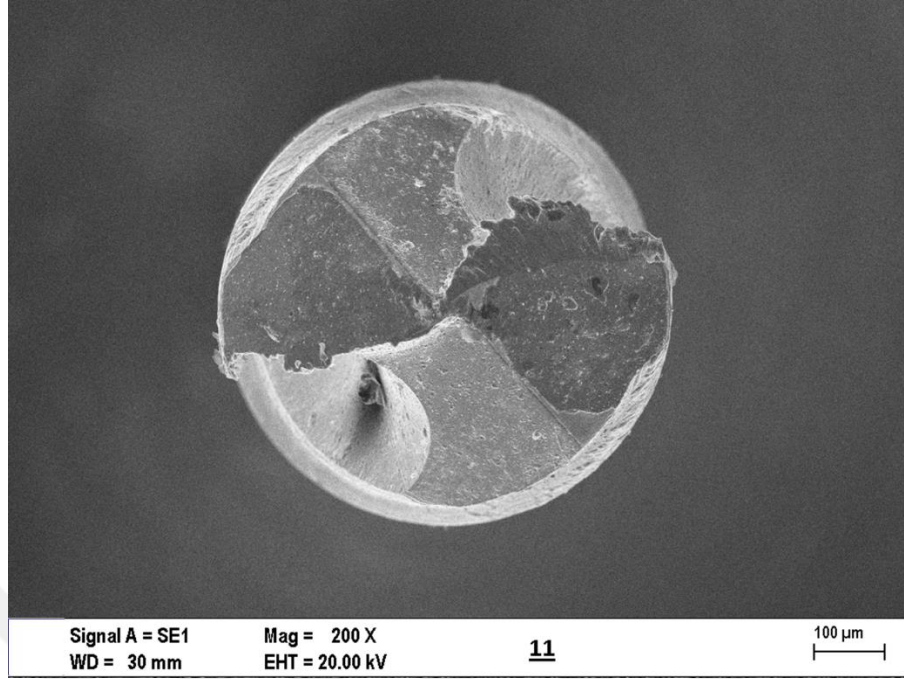
(e)



(f)

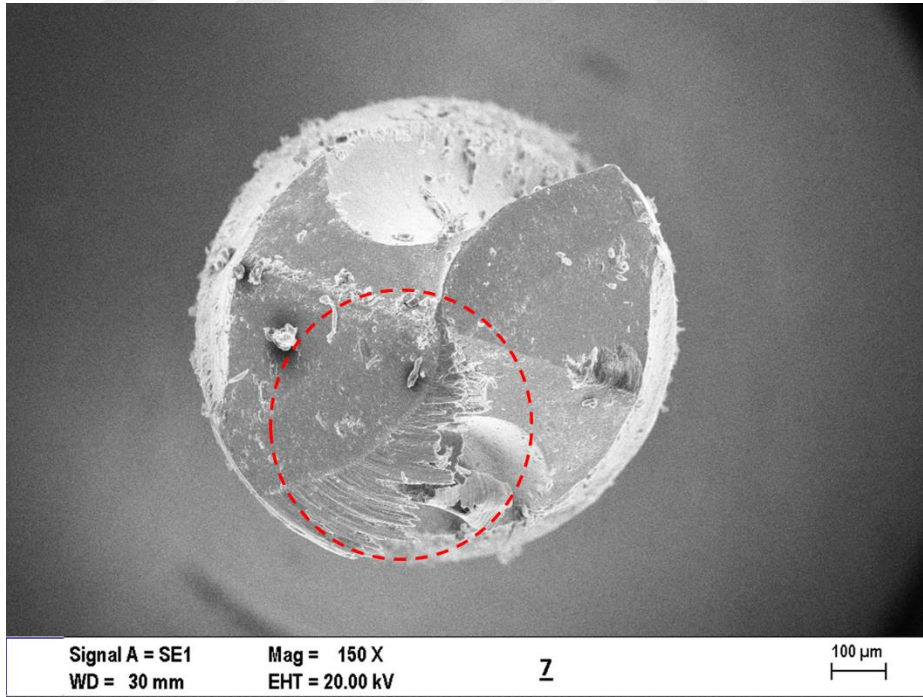


(g)



(h)

Şekil 4.10 Tüm sonuçlar arasından seçilen SEM görüntüleri: çıkış çapağı örneği (a-d), delik çapı değişiklikleri (e,f) ve matkap takımı üzerine talaş yapışması (g,h).



Şekil 4.11 Yedinci deneyde, ana kesme kenarı ve burun bölgesindeki aşırı talaş yapışmasını gösteren için SEM görüntüsü.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmanın amacı, Al-PE laminat kompozitlerin mikro delme eğilimlerini araştırmaktır. Mikro delme testleri Taguchi L16 ortogonal dizi ve ANOVA analizleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu analizler delme kuvveti, çıkış çapak yüksekliği, delici takım çapı ve delinen delik çapı ölçümlerini içermiştir. Deneylerden elde edilen veriler 5 ölçümün ortalama sonuçlarıdır. Deneysel sonuçlara dayanarak aşağıdaki bulgular elde edilmiştir:

Al-PE malzemede delme işlemi başladığında, ilk ve son temas noktası olan alüminyum levhalarda maksimum delme kuvveti elde edilirken, PE malzemedeki delme kuvveti minimumdur. Bu durum kesme parametreleri ve takım geometrisi ile değişmemektedir.

Takımın uç açısı, delme kuvveti üzerinde en önemli etkiye (%64,54) sahiptir. Sonrasında matkap çapı (%17,68) ve ilerleme hızının (%15,93) delme kuvveti üzerinde en etkili parametrelerdir. Takım kaplaması ise %0,6'lık bir etkiye sahiptir.

Uç açısı (%25,79), matkap çapından (%26,15) sonra takım çapındaki değişim üzerinde en etkili parametredir. İlerleme hızının takım aşınması üzerinde %13,9'luk bir etkisi vardır. Kaplamalı takımın, takım aşınmasını azaltmasına rağmen, çap değişimi üzerinde en az etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

Kesme hızı (%25,15), matkap çapından (%36,67) sonra delik çapındaki değişim üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Kesme hızının ve ilerleme oranının artırılması da delik çapı değişimini azaltmıştır. İlerleme hızının delik çapı değişimi üzerindeki etkisi %16,13'tür. Bununla birlikte, AlTiN kaplamanın etkisi %12,38 'dir.

Uç açısı, delik çıkışındaki çapak yüksekliği üzerinde en büyük etkiye (%67,80) sahiptir ve AlTiN kaplama çapak yüksekliğinin artmasına neden olmuştur. Bu, kesme bölgesindeki ısının iş parçasına aktarıldığını ve iş parçasında termal yumuşama meydana geldiğini göstermektedir.

Sonuçlar ışığında, minimum delme kuvveti, çapak yüksekliği ve minimum çap değişimi açısından ideal kesme koşulunun beşinci deney olduğu söylenebilir.

Mikro deliklerin ($d < 1\text{mm}$) yüzey pürüzlülüğü ve boyut tamlığını kesit alarak ölçme zorluğundan dolayı yeni metodolojilerin geliştirilmesi tavsiye edilmektedir.



6. KAYNAKLAR

- Aamir M, Giasin K, Tolouei-Rad M, Vafadar A, 2020, A review: drilling performance and hole quality of aluminium alloys for aerospace applications, In Journal of Materials Research and Technology, 9(6), 12484–12500.
- Acer S, 2023, Elektron ışını ergitme yöntemi ile üretilmiş ti-6al-4v malzemenin mikro delme işleminde kesici takımı etkileyen kuvvet ve titreşimin analiz edilmesi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 74s, İstanbul.
- Akıncıoğlu S, 2021, Taguchi metodu ve gri ilişkisel analizi kullanılarak 1,2316 paslanmaz çeliğin (r65) mikro-elektro erozyon delme kabiliyetinin değerlendirilmesi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9(2) 646-660.
- Anand R S, Patra K, 2017, Mechanistic cutting force modelling for micro-drilling of CFRP composite laminates, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 16, 55-63, ISSN 1755-5817, <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.07.002>.
- Albond. 2015, Alüminyum kompozit panel teknik katalog.
- Askeland D R, Fulay P, Wright W J, Prepared S E, Bhattacharya D K, 2011, The Science And Engineering Of Materials SI Edition (6th Edition), Cengage Learning, 896s, USA.
- Aslan E, 2022, Alüminyum 7050 alaşımının delinmesinde uç açısının etkilerinin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle araştırılması, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 64s, Ankara.
- Bahrami T, 2022, Ürün tasarımı geliştirmesinde taguchi deney tasarımının uygulanması, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85s, Ankara.
- Bayraktar Ş, Siyambaş Y, Turgut Y, 2017, Delik delme prosesi: bir araştırma, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21(2), 124–124.
- Bendarma A, 2018, Dynamic behavior and failure of aluminum-polyethylene sandwich structure, Poznan university of technology. Doktora Tezi, 155s, Polonya.
- Bulut Y, Erdoğan Ü H, 2011, Selüloz esaslı doğal liflerin kompozit üretiminde takviye materyali olarak kullanımı, Tekstil ve Mühendis Dergisi, 18(82), 26–35.
- Can V, 2008, Kompozit sandviç panellerin şekillendirilebilirliğinin incelenmesi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 57s, Kütahya.
- Chang W T, Chuang S F, Tsai Y S, Tang G R, Shiou F J, 2014, A vision-aided automation system for destructive web thickness measurement of microdrills, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 71(5–8), 983–1003. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5509-5>

- Chen Z, Wu X, Zeng K, Shen J, Jiang F, Liu Z, Luo W, 2021, Investigation on the exit burr formation in micro milling, *Micromachines*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/mi12080952>
- Çiftçi İ, Gökçe H, 2018, Ti6Al4V Titanyum alaşımının delinmesinde delme yönteminin aşınmaya etkisinin incelenmesi, *Journal of Polytechnic*, 0900(3), 627–631. <https://doi.org/10.2339/politeknik.450289>
- Çobanoğlu T, 2021, Havacılık sektöründe kompozit metal malzeme kombinasyonlarında delik delme prosesinin iyileştirilmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 148s, Ankara.
- Doreswamy, 2013, Knowledge discovery system for fiber reinforced polymer matrix composite laminate, Post-Graduate Department of Studies and Research in Computer Science Mangalore University Karnataka, ArXiv, abs/1301.0173, India
- Dornfeld D, Min S, Takeuchi Y, 2006, Recent advances in mechanical micromachining, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55(2), 745–768.
- Duka E, Beqiraj E, Molla X, Xhexhi K, 2022, Comparative analyze of thermal and tension strength properties of Alpolic and Durabond aluminum composite panels, *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*, 9 (2), 15132-15137.
- Dutta S, Kumar S, 2021, Optimizing turning parameters in the machining of AM alloy using Taguchi methodology, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108340>
- Eryıldız E, Akdoğan E A, 2015, Savunma sanayinde kullanılan ileri kompozit malzemeler ve uygulama alanları, *International Journal of Engineering Research and Development*, 7(4), 1st International Defense Industry Symposium Special Issue <https://doi.org/10.29137/umagd.379785>
- Feng K, Zhang F, Wang W, 2022, The micro-drilling process fine modeling with the strain characteristics of undeformed chip considered, *Journal of Mechanical Science and Technology* 36 (2), 883-895. <https://doi.org/10.1007/s12206-022-0136-4>
- Figuerola M, García E, Muhl S, Rodil S, 2014, Preliminary tribological study and tool life of four commercial drills, *Tribology Transactions*, 57(4), 581–588. <https://doi.org/10.1080/10402004.2014.887166>
- Grecu I, 2021, Soğuk haddelenmiş A3105 saclarda termal analizle yeniden kristallenme kinetiğinin incelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 56s, Sakarya.
- Gunale R B, Sarang J. 2019, Applications of composite material in various fields, In *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 6(3), 528–540.
- Hasan M, Zhao J, Jiang Z, 2017, A review of modern advancements in micro drilling techniques, *Journal of Manufacturing Processes*, 29, 343–375. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.08.006>

- Hashimura M, Hassamontr J, Dornfeld, D A, 1999, Effect of in-plane exit angle and rake angles on burr height and thickness in face milling operation, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 121, 13-19.
- Heinemann R, Hinduja S, Barrow G, Petuelli G, 2006, The performance of small diameter twist drills in deep-hole drilling, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128(4), 884–892. <https://doi.org/10.1115/1.2335859>
- Huang X, Jiang F, Wang Z, Wu X, Huang S, Liu Y, vd. 2023, A review on the balancing design of micro drills, In *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 126(11–12), 4849–4871. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11496-w>
- Imran M, 2010, Feasibility and process development of mechanical micro drilling for nickel based super alloys, University of Manchester, Faculty of Engineering and Physical Sciences, Doktora Tezi, 209s, Manchester.
- İşık, A, 2008, Kompozit malzemeden imal edilmiş bir takviye elemanının eğilme ve burulma yükü altında deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 92s, İstanbul.
- İmak A, 2015, Tabakalı hibrit kompozit malzemelerin yorulma davranışlarının analizi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 64s, Elazığ.
- Jackson M J, Novakov T, Mosiman K, 2013, Micro-cutting: fundamentals and applications, First Edition, Edited by Kai Cheng and Dehong Huo, John Wiley & Sons, Ltd.227-273s.
- Jiménez M, Samie A, Gadow R, Kern F, Bill J, 2018, Siloxane precursor-based protective coatings for high modulus carbon fibers in ceramic matrix composites, *Ceramics*, 1(1):128-138. <https://doi.org/10.3390/ceramics1010011>
- Kadirvel A, Hariharan P, 2014, Optimization of the die-sinking micro-edm process for multiple performance characteristics using the taguchi-based grey relational analysis, *Material in Technologies*, 48(1), 27-32.
- Kalemtaş A, 2014, Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış, *Putech&Composites*, 22, 18-30.
- Kainer K U, 2006, Metal matrix composites: custom-made materials for automotive and aerospace engineering, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co ISBN: 3-527-31360, doi:10.1002/3527608117
- Kandemir Ö, 2017, Kompozit kaplamalı dış cephe sistemlerinin üretimi ve uygulamasında dikkat edilmesi gerekenlerin incelenmesi, Haliç Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 117s, İstanbul.

- Kaplan Y, 2010, Delik delmede farklı parametrelerin kesme kuvveti, moment, titreşim, yüzey pürüzlülüğü, aşınma ve çapak oluşumuna etkileri, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 108s, Ankara.
- Kaya A, 2016, Kompozit malzemeler ve özellikleri, Putech & Composites, 29, 38-45.
- Kayabaşı İ, 2016, Metal matrisli kompozit malzeme üretim sistemi imalatı ve performansının incelenmesi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 70s, Karabük.
- Kaynak Y, 2006, Matkap ile delik delme esnasında kesme parametrelerinin kesme kuvveti ve sıcaklığın değişimine etkisinin deneysel olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 145s, İstanbul.
- Ke F, Ni J, Stephenson D A, 2006, Chip thickening in deep-hole drilling. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46(12-13), 1500-1507. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.09.022>
- 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. <https://doi.org/10.1115/1.1429937>
- Kim J, Min S, Dornfeld D A, 2001, Optimization and control of drilling burr formation of AISI 304L and AISI 4118 based on drilling burr control charts, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 41(7), 923-936. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(00\)00131-0](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(00)00131-0)
- Klocke F, Gerschwiler K, Abouridouane M, 2009, Size effects of micro drilling in steel, Production Engineering, 3(1), 69-72. <https://doi.org/10.1007/s11740-008-0144-y>
- Köymen Çağar P, 2021, Endüstriyel ürünlerin tasarımında yaygın yer edinen polimer matrisli kompozit malzemelerin özellikleri, TJFDM, 3(2), 79-88.
- Kudla L, 2001, Influence of feed motion features on small holes drilling process, Journal of Materials Processing Technology, 109(3), 236-241. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00804-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00804-9)
- 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. <https://doi.org/10.1243/095440505X69346>
- Kurtuluş O, 2017, Kendinden takviyeli polipropilen esaslı termoplastik kompozit levhalarda delik etkisinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 77s, Bursa
- Manohar M D, 2019, Applications of composites introduction, polymer composites engineering, Module 6, 1-22.

- Meral G, Sarıkaya M, Dilipak H, 2011, Delme işlemlerinde kesme parametrelerinin taguchi yöntemiyle optimizasyonu, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 27(4), 332–338.
- Mevlüt G, Mutuk T, 2019, Karbon esaslı malzeme takviyeli titanyum kompozitler ve grafen üzerine yeni eğilimler, Mühendis ve Makine, 60(695), 101–118.
- 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. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00589-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00589-1)
- Mojaver M, Azdast, T, Hasanzadeh R, 2021, Assessments of key features and Taguchi analysis on hydrogen rich syngas production via gasification of polyethylene, polypropylene, polycarbonate and polyethylene terephthalate wastes, International Journal of Hydrogen Energy, 46(58), 29846–29857. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.161>
- Mudhukrishnan M, Hariharan P, Palanikumar K, 2019, Delamination analysis in drilling of carbon fiber reinforced polypropylene (cfr-pp) composite materials, Materials, International Conference on Advances in Materials, Manufacturing and Applied Sciences (ICAMMAS'17), 16, 792–799.
- 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.
- Okay F, Islak S, 2021, Alüminyum matrisli bor karbür takviyeli kompozit malzemeye uygulanan delik delme işleminde kesme parametrelerinin etkileri, İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları 2(1), 14-22
- Özer S, 2015, Sürekli cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 106s, Bursa.
- Özsoy M, Turgut Y, Özsoy N, Ekşi S, 2023, AISI 1050 çeliğinin delinmesinde itme kuvveti optimizasyonu, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(3), 905-911
- Örs S, 2014, Farklı karbon tekstilleriyle ve reçinelerle oluşturulan karbon kompozitlerin karakterizasyonu, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 123s, İstanbul
- Park S Y, Choi W J, Choi C H, Choi H S, 2018, Effect of drilling parameters on hole quality and delamination of hybrid GLARE laminate, Composite Structures, 185, 684–698. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.073>
- Perçin M, 2015, Mikro delik delme işleminde Ti6Al4V alaşımı için kesme şartlarının etkisinin araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 65s, Afyonkarahisar.

- Platt T, Meijer A, Biermann D, 2020, Conduction-based thermally assisted micromilling process for cutting difficult-to-machine materials, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(2), 34. <https://doi.org/10.3390/jmmp4020034>
- Rahamathullah I, Shunmugam M S, 2013, Analyses of forces and hole quality in micro-drilling of carbon fabric laminate composites, *Journal of Composite Materials*, 47(9), 1129–1140. <https://doi.org/10.1177/0021998312445594>
- Rizal S, Abdullah C K, Olaiya N G, Aprilia N A S, Zein I, Surya I, Khalil, H P S A, 2020, Preparation of palm oil ash nanoparticles: Taguchi optimization method by particle size distribution and morphological studies, *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(3), 985. <https://doi.org/10.3390/app10030985>
- Sabancı Ş, 2005, Fiber takviyeli polimer matriksli kompozitlerin enjeksiyon yöntemi ile üretimi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 79s, İstanbul.
- Saçak M, 2015, *Polimer Teknolojisi* (5th ed.). Gazi Kitabevi, 461s, Ankara.
- 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.
- Şen F, Palancıoğlu H, Aldaş K, 2010, Polimerik nanokompozitler ve kullanım alanları, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1), 111–118.
- Şenel M C, Gürbüz M, Koç E, 2017, The fabrication and characterization of graphene reinforced aluminum composites, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(8), 974–978. <https://doi.org/10.5505/pajes.2017.65902>
- Şanlıtürk S, 2020, Al katmanlar kullanılarak üretilmiş fiber metal tabakalı kompozitlerin delinmesinin araştırılması, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 76s, Batman
- Sorrentino L, Turchetta S, Parodo G, 2022, Drilling of glare laminates: effect of cutting parameters on process forces and temperatures, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(1–2), 645–657. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08612-z>
- Spur G, Masuha J R, 1981, Drilling with twist drills of different cross section profiles, *CIRP Annals*, 30(1), 31–35. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60890-7](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60890-7)
- Sugawara A, Inagaki K, 1982, Effect of workpiece structure on burr formation in micro-drilling, *Precision Engineering*, 4(1), 9-14.
- Szalay T, Patra K, Farkas B Z. Experimental investigation of tool breakage in micro drilling of EN AW-5083 aluminium, *Key Engineering Materials*, 581, 119-124.

- Terzioğlu H, Yalçın G, Neşeli S, 2020, Mikro delik delme tezgahı z ekseninin bilgisayarla kontrolü, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Özel Sayı*, 498-503.
- Türedi H E, 2015, Epoksi/ MWCNT ve Epoksi / BN kompozit malzemeler, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 68s, Konya
- Topalak M, 2012, Tabakalı kompozit levhalarda cıvata ve kör perçinlerin birleşmeye olan etkisinin deneysel olarak incelenmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 67s, Afyonkarahisar.
- Topsakal A, Özel C, 2018, Lif takviyeli polimer kompozit malzemelerde lif türü ve oranının fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi, *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5(1), 107-116
- Torun A R, Kaya Ş H, Choupani N, 2020, Evaluation of recycled Al–LDPE–Al sandwich panels as ballistic protection material, *Green Materials*, 8(4), 194-202
- Tosun G, Muratoğlu M, 2004, The drilling of an al/sicp metal-matrix composites, part 1: microstructure, *Composites Science and Technology*, 64(2), 299-308.
- Üstün T, Turgut Y, 2020, Farklı delik delme işlemlerinde maliyet hesabı için program geliştirme, *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fen Bilimleri Dergisi*, 36(3), 491–503.
- Wagner W R, 1945, An experimental micro-drill. *Science*, 101(2614), 127–128. <https://doi.org/10.1126/science.101.2614.127>
- Wapande S H, 2019, Formability analysis of 3105 aluminium composite panels by means of the multi-point forming process, *Türk Alman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 100s, İstanbul.
- Wang C Y, Chen Y H, An Q L, Cai X J, Ming W W, Chen M, 2015, Drilling temperature and hole quality in drilling of CFRP/aluminum stacks using diamond coated drill, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16(8), 1689–1697. <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0222-y>
- Waqar S, Asad S, Ahmad S, Abbas C A, Elahi H, 2017, Effect of drilling parameters on hole quality of Ti-6Al-4V titanium alloy in dry drilling, *Materials Science Forum*, 880, 33–36. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.880.33>
- Wong F, Sharif S, Kamdani K, Rahim E, 2008, The effect of drill point geometry and drilling technique on tool life when drilling titanium alloy, Ti-6Al-4V. *International Conference on Mechanical & Manufacturing Engineering (ICME2008)*, 21– 23 May 2008, 8s, Malaysia
- Woolf P J, 2009, Chemical process dynamics and controls, *University of Michigan Engineering Controls Group*, 1400s, Michigan.

- Yağmur S, 2011, Delik delme işlemlerinde kesme parametrelerine bağlı olarak oluşan sıcaklığın deneysel olarak incelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi. 109s, Ankara.
- Yaka M, 2019, AISI 1040 çeliğinin tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün istatistiksel incelenmesi, Amasya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 52, Amasya.
- Yalçın B, 2015, Surface roughness and cutting forces in turning of tool steel with mixed ceramic and cubic boron nitride cutting tools, In Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering 39(2), 323-336.
- 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(13), 4528. <https://doi.org/10.3390/ma16134528>
- 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. <https://doi.org/10.1177/095440540421801208>
- Yatımoğlu F, Özkan A, 2017, Tekrarlanan yükler altında kompozit malzemelerin yapılarının incelenmesini amaçlayan deney aygıtı tasarımı, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 5(1), 56–66.
- Yazman Ş, Köklü U, Urtekin L, Morkavuk S, Gemi L, 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.
- Yıldırım S, 2011, Ürün Tasarımı Geliştirilmesi Taguchi Tasarımı, Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 56s, Ankara.
- Yıldız A, 2021, Delik delme işleminin simülasyonu ve delik delme işlemlerinden kesme parametrelerine bağlı mekanik gerilmelerin incelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 108s, Ankara.
- Yücel E, Çicek A, 2011, İmalat alanında yaygın olarak kullanılan mikro işleme teknikleri, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 15(1), 46–59. <https://doi.org/10.16984/saufbed.89891>
- 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. <https://doi.org/10.1155/2014/543298>
- Zheng L, Wang C, Zhang X, Huang X, Song Y, Wang K, Zhang L, 2016, The tool-wear characteristics of flexible printed circuit board micro-drilling and its influence on micro-hole quality, Circuit World, 42(4), 162–169. <https://doi.org/10.1108/CW-08-2015-0040>

Zhuang Y, 2013, Optimizing the economic efficiency by microdrill life improvement-during deep hole drilling in the 212 valve manufacturing process, Mechanical Engineering. Massachusetts Institute of Technology, 67.

Zitoun R, Krishnaraj V, Collombet F, 2010, Study of drilling of composite material and aluminium stack, Composite Structures, 92(5), 1246–1255.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.010>

İnternet Kaynakları

- 1- <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/aluminum-composite-panels-market>, 16.11.2023
- 2- https://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_47.html, 16.11.2023
- 3- <https://www.serdarkorkut.com/2017/01/22/kompozit-malzemeler>, 14.11.2023
- 4- <https://acikders.ankara.edu.tr/mod/resource/view.php?id=139205>, 14.11.2023
- 5- http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_06/article_04_2.htm, 14.11.2023
- 6- <https://kalkinmaguncesi.izka.org.tr/index.php/2021/08/04/havacilik-sektorunde-kompozit-malzeme-kullanimi>, 14.11.2023
- 7- <https://tempateknik.com/cts-kompozit-silo.php>, 20.11.2023
- 8- <http://kompozithayalleri.com/kompozit-malzemelerin-kullanim-alanlari>, 20.11.2023
- 9- <https://www.asastr.com/grup-faaliyetleri/aluminyum-kompozit-panel>, 01.12.2023
- 10- <https://www.akakompozit.com/deniz-araclari>, 01.12.2023
- 11- <https://www.pratek.com/tr/detay/urunler/100-kn-40-kn-kompozit-silikon-izolatorler/204185>, 01.12.2023
- 12- <https://www.silyonaskerigiyim.com/koruyucu-kompozit-baslik-migfer-kask-haki-renk>, 01.12.2023
- 13- <https://www.firat.com/sicak-soguk-su-boru-sistemleri/pp-r-kompozit-boru-ve-ek-parcalari>, 01.12.2023
- 14- <https://kalkinmaguncesi.izka.org.tr/index.php/2021/06/17/otomotiv-sektorunde-kompozit-malzeme-kullanimi>, 01.12.2023
- 15- <https://web.itu.edu.tr/~arana/IML212-N9.pdf> Ahmet Aran- Metal matrisli kompozit malzemeler- Ders Sunumu, 01.12.2023
- 16- <https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/knowledge/machining-formulas-definitions/drilling-formulas-definitions>, 01.12.2023

- 17- <https://atateknik.com.tr/blog/parca-imalatinda-kullanilan-matkap-ucu-cesitleri>, 01.12.2023
- 18- <https://www.meetyoucarbide.com/tr/150-%CE%BCmden-daha-az-mikro-isleme-icin-yontem-verimli-ve-guvenilir>, 01.12.2023
- 19- <https://sphinx-tools.ch/en/catalog-products-eshop/drilling-and-reaming/micro-deep-hole-drill>, 01.12.2023
- 20- https://www.secotools.com/article/m_7162?language=en, 01.12.2023
- 21- <https://www.sandvik.coromant.com/tr-tr/tools/drilling-tools/solid-carbide-drills/corodrill-862>, 01.12.2023
- 22- <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/press/the-new-generation-of-micro-drills>, 01.12.2023
- 23- <https://www.eternaltools.com/carbide-micro-drills>, 01.12.2023
- 24- <http://www.santekcng.com/index.php/tr/cng/cng-kompozit-tanklari-tip-iv.html>, 01.12.2023