

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**AA6061-T6 ISIL İŞLEMLİ AL ALAŞIMLARININ ULTRASONİK
TALAŞLI DELİNMESİNDE KONVANSİYONEL YÖNTEME
GÖRE KUVVET VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN ANALİZİ**

ESER YARAR

KOCAELİ 2016

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

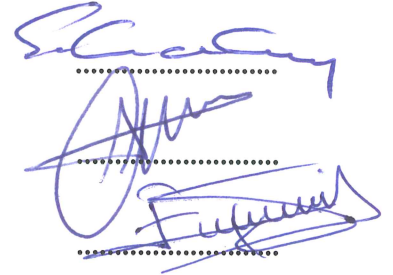
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AA6061-T6 ISIL İŞLEMLİ AL ALAŞIMLARININ
ULTRASONİK TALAŞLI DELİNMESİNDE
KONVANSİYONEL YÖNTEME GÖRE KUVVET VE YÜZEY
ÖZELLİKLERİNİN ANALİZİ

ESER YARAR

Prof.Dr. Sedat KARABAY
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Doç.Dr. A. Armağan ARICI
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Yrd.Doç.Dr. Erdal KARADENİZ
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi



Tezin Savunulduğu Tarih: 21.06.2016

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Talaşlı şekil verme yöntemleri arasında en çok kullanılan yöntem delme yöntemidir. Delme, havacılık, uzay ve otomotiv endüstrilerinde oldukça yaygın kullanım alanı olan bir imalat işlemidir. Delik delme operasyonlarında; takım ömrü, yüzey kalitesi, kesme kuvvetleri ve çapak oluşumu en önemli parametrelerdir. Bu parametreleri daha verimli hale getirebilmek için ultrasonik titreşimli delme prosesleri geliştirilmiştir.

Uzay ve havacılık gibi yüksek yüzey kalitesi ve hassasiyet gerektiren endüstrilerde kullanımı her geçen gün daha da artan alüminyum alaşımları delme prosesleri için uygun malzemelerdir. Bu çalışma, alüminyumun optimum delinme parametrelerini ve ultrasonik titreşim uygulamasının delme prosesine etkilerini araştırmak için yapılmıştır.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında ve tüm aşamalarında büyük emeği geçen, çıkmaza girdiğim her noktada bana yol gösteren ve cesaretlendiren değerli danışmanım Prof. Dr. Sedat KARABAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Teknopark İleri Malzemeler Laboratuvarı bünyesinde yaptığım deneysel çalışmalarım için yardımlarını esirgemeyen Yrd.Doç.Dr. Şenol ŞAHİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Kocaeli Üniversitesi bünyesinde yaptığım atölye çalışmalarında yardımlarından dolayı teknisyen Abdulkadir YAYLA'ya ve çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen mesai arkadaşlarım Arş.Gör. Erhan BALCI ve Arş.Gör. M. Said BAYRAKLILAR'a teşekkürlerimi sunarım.

SEM çekimlerinde yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Muzaffer ZEREN ve Uzm. Serap GÜMÜŞ'e, deney sonuçlarının analizinde yardımcı olan Arş.Gör. Ali İhsan BOYACI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Beni bugüne getiren değerli aileme ve çalışmalarım süresince her konuda bana destek olan değerli eşim Oytun YARAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs - 2016

Eser YARAR

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR	viii
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
GİRİŞ	1
1. TALAŞLI ÜRETİM	3
1.1. Genel Bilgiler	3
1.2. Talaşlı Üretimin Avantajları.....	4
1.2.1. İş parçalarının çeşitliliği.....	4
1.2.2. Parça şekillerde ve geometrik özelliklerde çeşitlilik.....	4
1.2.3. Boyutsal doğruluk	5
1.2.4. Pürüzsüz yüzey.....	5
1.3. Talaşlı Üretimin Dezavantajları	5
1.3.1. Malzeme israfı.....	5
1.3.2. Zaman tüketimi	5
1.4. Talaşlı Üretim Çeşitleri	5
1.5. Kesici Takım	6
1.6. Takım Tezgahları	7
2. TALAŞLI İMALATTA TALAŞ OLUŞUMU VE KESME KUVVETLERİ.....	8
2.1. Ortogonal Kesme Modeli	8
2.2. Gerçek Talaş Oluşumu	9
2.2.1. Talaş türleri	10
2.2.1.1. Süreksiz talaş.....	10
2.2.1.2. Sürekli talaş	10
2.2.1.3. Yiğma kenarlı sürekli talaş.....	11
2.2.1.4. Tırtıklı (testere ağızlı) talaş	11
2.3. Metal Kesmede Kuvvet Oluşumu	11
2.4. Merchant Eşitliği	15
3. DELİK DELME OPERASYONU	16
3.1. Delik Delme Operasyonunda Kesme Şartları	16
3.2. Matkap Tezgahları.....	19
3.3. Takım Geometrisi.....	19
3.4. Takım Malzemeleri	21
3.5. Yüksek Hız Çelikleri	23
3.6. Takım Ömrü	24
3.6.1. Takım aşınması	24
3.7. Delmenin Mekaniği.....	25
3.7.1. Radyal Kesme Ağzı.....	26
3.7.2. Kesme Ağzı.....	27

3.8. Delik Delme Operasyonu Hakkında Literatür Çalışması.....	33
4. ALÜMİNYUMUN GENEL ÖZELLİKLERİ	36
4.1. Alüminyumun Diğer Metallere Göre Avantajları	36
4.2. Alüminyum'un Kullanım Alanları	37
4.3. Alüminyum Alaşımları.....	38
5. ULTRASONİK TİTREŞİM HAKKINDA GENEL BİLGİLER	39
5.1. Ultrasonik Sesler Hakkında Genel Bilgiler	39
5.2. Ultrasonik İşleme	40
5.3. Ultrasonik Destekli Delme	40
5.3.1. Ultrasonik titreşimli delme hakkında literatür çalışması	41
6. DENEYSEL ÇALIŞMA	44
6.1. Deney Ekipmanlarının Tanıtımı	46
6.2. Deneylein Yapılması.....	50
6.3. Deney Sonuçları	56
6.4. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi	57
6.4.1. AA6061-T6'nın konvansiyonel yönteme göre delinmesinde kesme kuvveti analizleri.....	58
6.4.2. AA6061-T6'nın konvansiyonel yönteme göre delinmesinde yüzey pürüzlülüğü analizleri	59
6.4.3. AA6061-T1'in konvansiyonel yönteme göre delinmesinde kesme kuvveti analizleri	60
6.4.4. A6061-T1'in konvansiyonel yönteme göre delinmesinde yüzey pürüzlülüğü analizleri.....	62
6.4.5. AA6061-T6'nın ultrasonik titreşimli delinmesinde kesme kuvveti analizleri	63
6.4.6. 6061-T6'nın ultrasonik titreşimli delinmesinde yüzey pürüzlülüğü analizleri.....	64
6.4.7. AA6061-T1'in ultrasonik titreşimli delinmesinde kesme kuvveti analizleri	66
6.4.8. AA6061-T1'in ultrasonik titreşimli delinmesinde yüzey pürüzlülüğü analizleri.....	67
6.4.9. AA6061-T6'nın HSS-G kesici takım ile delinmesinde elde edilen delme momentleri.....	68
6.4.10. Takım aşınmalarının değerlendirilmesi	69
6.4.11. Delme sırasında oluşan talaş yapılarının değerlendirilmesi	78
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	85
7.1. Sonuçlar.....	85
7.2. Öneriler.....	86
KAYNAKLAR	88
EKLER	92
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	95
ÖZGEÇMİŞ	96

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Malzeme kaldırma işlemi sınıflandırılması	3
Şekil 1.2.	(a) kesme işleminin kesit görünümü (b) negatif talaş açısı	4
Şekil 1.3.	Talaşlı imalatta en çok uygulanan dört tür (a) tornalama (b) delik delme (c) çevresel frezeleme (d) alın frezeleme	6
Şekil 2.1.	Ortogonal kesme (a) 3 boyutlu işleme olarak (b) iki boyuta indirgenmiş hali	8
Şekil 2.2.	Birincil ve ikincil kesme bölgeleri	10
Şekil 2.3.	Metal kesmede oluşan talaş tipleri (a) süreksiz (b) sürekli (c) yapışan köşe (d) tırtıklı	11
Şekil 2.4.	Metal kesmede kuvvetler (a) ortogonal kesimde talaşa etkileyen kuvvetler (b) takıma etki eden ölçülebilen kuvvetler	13
Şekil 2.5.	Takıma etki eden kuvvetler arasındaki geometrik ilişkileri gösteren kuvvet diyagramı	14
Şekil 3.1.	Delik delmenin gösterimi	16
Şekil 3.2.	İki delik tipi (a) açık delik (b) kör delik	18
Şekil 3.3.	Dik sütunlu matkap	19
Şekil 3.4.	Helisel matkabın standart geometrisi	20
Şekil 3.5.	Helisel matkap geometrisi	26
Şekil 3.6.	Helisel matkabın mekanik modeli	28
Şekil 3.7.	Helisel matkap ucunda oyuk kesme ağız kesişim düzleminin üstten görünüşü	29
Şekil 3.8.	Kesme kuvvet doğrultuları	33
Şekil 6.1.	Deney numunelerinin kesilmesi işlemi	45
Şekil 6.2.	Deney numunelerinin genel görünümü	45
Şekil 6.3.	Deneylerde kullanılan matkap uçları	47
Şekil 6.4.	Kistler 9272 piezoelektrik dinamometre	47
Şekil 6.5.	Kistler 5070 A amplifikatör	48
Şekil 6.6.	Ultrasonik titreşim ekipmanlarının genel görünümü	49
Şekil 6.7.	ADS-1022B Dijital Osiloskop	49
Şekil 6.8.	SKF Microlog Vibrometer	50
Şekil 6.9.	Mitutoyo 178-954-4A yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı	50
Şekil 6.10.	Delme dinamometresinin matkap tablasına bağlanması	51
Şekil 6.11.	Ultrasonik titreşim platformunun delme dinamometresinin üzerine bağlanması	52
Şekil 6.12.	Deney ekipmanlarının genel görünümü	52
Şekil 6.13.	Deney düzeneğinin şematik gösterimi	53
Şekil 6.14.	Konvansiyonel delme için sebep sonuç diyagramı	54
Şekil 6.15.	Sabit genlikli titreşim dalgaları (a) 7,5 Khz (b) 15 KHz (c) 22,5 Khz	55
Şekil 6.16.	Ultrasonik titreşimli delme için sebep sonuç diyagramı	56
Şekil 6.17.	Delinen deney numunelerine ait bir fotoğraf	56
Şekil 6.18.	AA6061-T6'nın konvansiyonel yöntemle göre delinmesinde kesme kuvveti etki grafiği	58

Şekil 6.19. AA6061-T6'nın konvansiyonel yönteme göre delinmesinde yüzey pürüzlülüğü etki grafiği.....	59
Şekil 6.20. AA6061-T1'in konvansiyonel yönteme göre delinmesinde kesme kuvveti etki grafiği	60
Şekil 6.21. AA6061-T1'in konvansiyonel yönteme göre delinmesinde yüzey pürüzlülüğü etki grafiği	62
Şekil 6.22. AA6061-T6'nın ultrasonik titreşimli delinmesinde kesme kuvveti etki grafiği.....	63
Şekil 6.23. AA6061-T6'nın ultrasonik titreşimli delinmesinde yüzey pürüzlülüğü etki grafiği	64
Şekil 6.24. AA6061-T1'in ultrasonik titreşimli delinmesinde kesme kuvveti etki grafiği.....	66
Şekil 6.25. AA6061-T1'in ultrasonik titreşimli delinmesinde yüzey pürüzlülüğü etki grafiği	67
Şekil 6.26. AA6061-T6'nın HSS-G kesici takım ile konvansiyonel yönteme göre delinmesinde elde edilen delme momenti grafikleri.....	68
Şekil 6.27. AA6061-T6 malzemesinin HSS-G kesici takım ile ultrasonik titreşimli delinmesinde elde edilen delme momenti grafiği	69
Şekil 6.28. Kesici takımların kullanılmadan önceki SEM görüntüleri (a) HSS-G (b) HSS-G TiN	70
Şekil 6.29. HSS-G için SEM görüntüleri (a) konvansiyonel delme (b) ultrasonik titreşimli delme	70
Şekil 6.30. HSS-G TiN için SEM görüntüleri (a) konvansiyonel delme (b) ultrasonik titreşimli delme	71
Şekil 6.31. (a) HSS-G TiN için konvansiyonel delmede takım ucunda oluşan adhesif aşınma (b) adhesif aşınmada SEM ile görüntülenen malzeme içerikleri	72
Şekil 6.32. (a) HSS-G TiN için ultrasonik titreşimli delmede takım ucunda oluşan adhesif aşınma (b) adhesif aşınmada SEM ile görüntülenen malzeme içerikleri	73
Şekil 6.33. (a) HSS-G TiN için konvansiyonel delmede birinci kesme kenarında oluşan adhesif aşınma (b) adhesif aşınmada SEM ile görüntülenen malzeme içerikleri	74
Şekil 6.34. (a) HSS-G TiN için ultrasonik titreşimli delmede birinci kesme kenarında oluşan adhesif aşınma (b) adhesif aşınmada SEM ile görüntülenen malzeme içerikleri	75
Şekil 6.35. (a) HSS-G TiN için konvansiyonel delmede ikinci kesme kenarında oluşan adhesif aşınma (b) adhesif aşınmada SEM ile görüntülenen malzeme içerikleri	76
Şekil 6.36. (a) HSS-G TiN için ultrasonik titreşimli delmede ikinci kesme kenarında oluşan adhesif aşınma (b) adhesif aşınmada SEM ile görüntülenen malzeme içerikleri	77
Şekil 6.37. Talaş şekillerinin sınıflandırılması.....	78
Şekil 6.38. AA6061-T6'nın 535 dev/dak dönme hızında konvansiyonel yönteme göre delinmesinde oluşan talaş yapıları	79
Şekil 6.39. HSS-G TiN matkap ucu ile konvansiyonel delme sırasında oluşan talaş sarılması	80
Şekil 6.40. AA6061-T1'in 535 dev/dak dönme hızında konvansiyonel yönteme göre delinmesinde oluşan talaş yapıları	81

Şekil 6.41. AA6061-T6'nın 535 dev/dak dönme hızında ve 0,1 mm/dev ilerleme oranında delinmesiyle oluşan talaş yapıları.....	82
Şekil 6.42. AA6061-T1'in 535 dev/dak dönme hızında ve 0,1 mm/dev ilerleme oranında delinmesiyle oluşan talaş yapıları.....	83



TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. Kesici takım malzemelerinin uygun kesme hızları ve yaklaşık ilk kullanım tarihleri	21
Tablo 3.2. Çeşitli takım malzemelerinin tipik sertlik değerleri ve enine kopma dayanımları	22
Tablo 3.3. Yüksek hız çelik içerisindeki alaşım elementlerinin fonksiyonları ve tipik içerikleri	23
Tablo 4.1. Alüminyum alaşımlarının alaşım elementlerine göre sınıflandırılması	38
Tablo 5.1. Seslerin frekanslarına göre sınıflandırılması	39
Tablo 6.1. AA6061 kimyasal bileşimi	44
Tablo 6.2. AA6061-T6 ve AA6061-T1 fiziksel özellikleri.....	44
Tablo 6.3. AA6061-T6 ve AA6061-T1 mekanik özellikleri.....	45
Tablo 6.4. Matkap tezgahının teknik özellikleri	46
Tablo 6.5. Deneylerde kullanılan kesici takımların özellikleri	46
Tablo 6.6. Konvansiyonel delme için kesme parametreleri	53
Tablo 6.7. Ultrasonik titreşimli delme için kesme parametreleri.....	55
Tablo 6.8. Konvansiyonel delme için oluşturulan kontrol faktörleri ve seviyeleri	57
Tablo 6.9. Ultrasonik titreşimli delme için oluşturulan kontrol faktörleri ve seviyeleri.....	57
Tablo 6.10. AA6061-T6'nın konvansiyonel yöntemle göre delinmesinde kesme kuvvetlerinin varyans analizi.....	59
Tablo 6.11. AA6061-T6'nın konvansiyonel yöntemle göre delinmesinde yüzey pürüzlülüğü değerlerinin varyans analizi	60
Tablo 6.12. AA6061-T1'in konvansiyonel yöntemle göre delinmesinde kesme kuvvetlerinin varyans analizi.....	61
Tablo 6.13. AA6061-T1'in konvansiyonel yöntemle göre delinmesinde yüzey pürüzlülüğü değerlerinin varyans analizi	63
Tablo 6.14. AA6061-T6'nın ultrasonik titreşimli delinmesinde kesme kuvvetlerinin varyans analizi	64
Tablo 6.15. AA6061-T6'nın ultrasonik titreşimli delinmesinde yüzey pürüzlülüğü değerlerinin varyans analizi.....	65
Tablo 6.16. AA6061-T1'in ultrasonik titreşimli delinmesinde kesme kuvvetlerinin varyans analizi	67
Tablo 6.17. AA6061-T1'in ultrasonik titreşimli delinmesinde yüzey pürüzlülüğü değerlerinin varyans analizi.....	68

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

A	: Yaklaşma mesafesi, (mm)
A_{ch}	: Radyal kesme ağzı anlık girinti bölgesi alanı, (mm^2)
A_s	: Kesme yüzeyinin alanı, (mm^2)
b	: Kesilmiş talaş kalınlığı, (mm)
c	: İlerleme oranı (mm/dev)
d	: Delik derinliği, (mm)
D	: Takım çapı, (mm)
f	: İlerleme oranı, (mm/dev)
F	: Sürtünme kuvveti, (N)
F_c	: Kesme yönünde oluşan kesme kuvveti, (N)
F_n	: Kesme kuvvetine dik normal kuvvet, (N)
f_r	: İlerleme hızı, (mm/dk)
F_s	: Kesme kuvveti, (N)
F_t	: Kesme kuvvetine dik itme kuvveti, (N)
h	: Kesilmemiş talaş kalınlığı
H_B	: İş parçasının Brinell sertlik değeri
i	: Eğim açısı
K_{fc}	: Eksenel kesme kuvvet sabiti, (N/mm^2)
K_{rc}	: Radyal kesme kuvvet sabiti, (N/mm^2)
K_{tc}	: Teğetsel kesme kuvvet sabiti, (N/mm^2)
L_p	: Helisin sabit hatvesi
l_s	: Kesme düzlemi uzunluğu, (mm)
N	: Normal kuvvet, (N)
N_{im}	: İş milinin dönme hızı, (dev/dk)
\emptyset	: Kesme düzlemi açısı
R	: Bileşke kuvvet, (N)
R	: Takım yarı çapı, (mm)
r	: Talaş kalınlık oranı
R_{MR}	: Malzeme kaldırma debisi, (kg/s)
S	: Kesme mukavemeti, (N/mm^2)
t	: İş parçası kalınlığı, (mm)
t_0	: İlk talaş kalınlığı, (mm)
t_c	: Son talaş kalınlığı, (mm)
T_m	: Delik delme süresi, (dk)
V	: Kesme hızı, (mm/dk)
w	: Ortogonal kesme genişlik boyutu
z	: Kot farkı
α	: Talaş açısı
α_f	: Efektif talaş açısı
β	: Sürtünme açısı
β_0	: Helis açısı
μ	: Sürtünme katsayısı
θ	: Matkap uç açısı

κ_t	: Sivrilme açısı
τ	: Kesme gerilimi, (N/mm ²)
ψ_c	: Radyal kesme ağzı açısı

Kısaltmalar

AA	: Aluminum Alloy (Alüminyum Alaşımı)
Al	: Aluminum (Alüminyum)
AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir-Çelik Enstitüsü)
BUE	: Built-Up Edge (Ağız Birikimi Oluşumu)
Co	: Cobalt (Kobalt Alaşımı)
Cr	: Chrome (Krom)
Cu	: Copper (Bakır)
G	: Ground (Taşlanmış)
HSS	: High Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği)
Hz	: Hertz
KHz	: KHz
Mg	: Magnesium (Magnezyum)
Mn	: Manganese (Mangan)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
Si	: Silisium (Silisyum)
Ti	: Titanium (Titanyum)
TiN	: Titanium Nitride (Titanyum Nitrür kaplama)
Zn	: Zinc (Çinko)

AA6061-T6 ISIL İŞLEMLİ AL ALAŞIMLARININ ULTRASONİK TALAŞLI DELİNMESİNDE KONVANSİYONEL YÖNTEME GÖRE KUVVET VE YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan talaşlı imalat yöntemlerinden birisi olan delme işlemine ultrasonik titreşim uygulayarak hibrit bir imalat yöntemi geliştirilmiştir. Ultrasonik titreşim bir fonksiyon jeneratörü ve dönüştürücü aracılığıyla iş parçasına uygulanmıştır. Bu hibrit işlemde daha önce yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda ultrasonik titreşimler kesici takıma uygulanmıştır. Aynı titreşim tekniğinin iş parçasına uygulanması konularında literatürde pek fazla çalışma bulunmamaktadır. Çalışmanın amacı iş parçasına uygulanan ultrasonik titreşimlerin kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü üzerindeki etkilerini araştırmaktır.

Çalışmada, havacılık, uzay, bilgisayar ve sağlık gibi bir çok alanda kullanımı artan alüminyum alaşımı (AA6061) seçilmiştir. Deneylerde kaplamalı ve kaplamasız HSS (high speed steel) matkap türü kullanılmıştır. Farklı ilerleme oranı ve farklı kesme hızlarında, farklı frekanslarda ve sabit genlikte deneyler titreşimli ve titreşimsiz olarak gerçekleştirilmiştir. Toplamda 72 farklı deney yapılmıştır.

Kesme kuvvetleri matkap tezgahına sabitlenmiş dinamometre aracılığı ile ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ise her numune için delik iç yüzeyinde 3 farklı noktadan ölçülmüş ve ortalaması alınarak elde edilmiştir. Yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar Minitab 17 paket programı aracılığıyla tam faktöriyel deney tertibinde değerlendirilmiş ve farklı kesme parametrelerinin etki grafikleri elde edilmiştir. Ayrıca Anova tablosu oluşturularak sonuçlar varyans analizi ile yorumlanmıştır. Takım aşınmalarını inceleyebilmek için ise SEM görüntüleri kullanılmıştır.

Deney sonuçlarına göre, kaplamasız takımın kaplamalı takıma göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Titreşim olmadan yapılan deneylerde ilerleme oranının artmasıyla kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğünde artış gözlemlenmiştir. Ultrasonik titreşim uygulanarak yapılan deneylerde ise yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerinde titreşimsiz delmeye göre daha iyi sonuçlar kaydedilmiştir. Kesme kuvvetlerinin, titreşimsiz delmede dönme hızının değişmesinden dikkate değer ölçüde etkilenmediği belirlenmiştir. Ultrasonik titreşimin takım üzerinde BUE oluşumunu azaltma etkisinin olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: AA6061, Kesme Kuvveti, Takım Aşınması, Ultrasonik Delme, Yüzey Pürüzlülüğü.

ANALYSIS OF CUTTING FORCES AND SURFACE PROPERTIES ON ULTRASONIC ASSISTED DRILLING OF AA6061-T6 ALLOY

ABSTRACT

In this study, a hybrid manufacturing method was developed by applying ultrasonic vibrations to the drilling process. Ultrasonic vibrations were applied to the workpiece via ultrasonic generator and transducer. Ultrasonic vibration widely has been applied to the drill in the previous studies. There are few studies in the literature about the topics of vibration applied to the workpiece with same techniques. The aim of the study is to investigate the effect of cutting forces, tool life and surface roughness on surface quality of workpiece by applying ultrasonic vibrations.

In the study, aluminum alloy (AA6061-T6) was selected because of increasing use in many areas such as aviation, aerospace, computers and health. Coated and uncoated HSS (high speed steel) drill type was used in the experiments. Experiments were performed at different feedrates and different rotation speeds, at different frequencies and constant amplitude. 72 different experiment were performed totally.

Cutting forces were measured by the dynamometer fixed on the drilling machine. The surface roughness was measured at three different points on the hole inner surface for each sample and was obtained by averaging. The experiment results were evaluated in Minitab 17 software package according to the full factorial method and obtained effect of different cutting parameters graphs. Moreover, the results have been interpreted by creating the (ANOVA) analysis of variance table. The SEM images were used to examine the tool wear.

According to the results of the experiments, uncoated drill type had the better results in terms of coated drill. Surface roughness and cutting forces were increased with increasing feedrates in vibration free drilling. In experiments with ultrasonic vibration assistance, much better results were conducted in terms of the vibration-free drilling in surface roughness and cutting forces. Best surface smoothness was observed at high frequency. It is determined that the cutting forces don't affect significantly by the change of rotational speed in vibration-free drilling. Ultrasonic vibration was observed that the effect of reducing the BUE formation on the tool.

Keywords: AA6061, Cutting Forces, Tool Wear, Ultrasonic Assisted Drilling, Surface Roughness.

GİRİŞ

Talaşlı üretim (delme, frezeleme, tornalama vb.) oldukça geniş uygulama alanına sahip üretim yöntemlerinden birisidir. Malzeme çeşitliliğın artması, bilgisayarlı üretim yöntemlerinin kullanılmaya başlanması, geleneksel yöntemlerin verimini artıran bazı hibrit uygulamalar vb. gelişmeler talaşlı üretim proseslerinde kaliteli ürün ve ekonomikliğın artmasını sağlamıştır. Bu teknolojik gelişmeler talaşlı üretimde olan çalışma ilgisini artırmakta ve güncel çalışmalar devamlı ortaya çıkmaktadır [1,2,3].

Talaşlı şekil verme yöntemleri arasında en çok kullanılan yöntem delme yöntemidir [4]. Delme, havacılık, uzay ve otomotiv endüstrilerinde oldukça yaygın kullanım alanı olan bir imalat işlemidir. Ultrasonik imalat, elektrolitik imalat, aşındırıcı jet ile işleme ve lazer kesme gibi modern imalat yöntemleri üretim endüstrisinde geniş uygulama sahasına sahip olmasına rağmen, matkap ile delik delme ekonomikliğı ve basitliğinden dolayı hala en yaygın imalat yöntemlerinden biridir [5].

Delik delme operasyonlarında; takım ömrü, yüzey kalitesi, kesme kuvvetleri ve çapak oluşumu en önemli parametrelerdir [6]. Bu parametreleri daha iyi hale getirmek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalara 3. Bölümde değinilmiştir.

Yüksek mukavemetli ve ısıya dayanıklı, paslanmaz çelik ve alaşımları, titanyum, seramikler, alüminyum alaşımları gibi modern malzemeler geleneksel işleme yöntemleri için son derece uygun malzemelerdir. Günümüzde alüminyum alaşımları fiziksel ve kimyasal özelliklerinin elverişli olmasından dolayı en çok kullanılan malzemeler arasında çelikten sonra ilk sırada yer almaktadır [6,7]. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarından yapılan yapısal bileşenler uzay endüstrisi için hayati öneme sahiptir. Ayrıca uzun ömür, sağlamlık ve hafifliğın istendiğı diğer taşıma ve inşaat alanlarında da büyük önem taşımaktadır [5].

Alüminyum alaşımlarının işlenmesi sırasında çapak oluşumu ve yüzey tabakasında bozulmalar görülebilir. Bu durumlar yüzey kalitesinin düşmesine ve kesme

kuvvetlerinin artmasına yol açar. Ayrıca bakır ve alüminyum gibi yumuşak malzemelerin işlenmesinde iş parçası malzemesi kesme takımına yapışabilir. Bu durum da iş parçasının yüzey kalitesini düşürürken kesici takımın doğal takım ömründen daha kısa sürede kullanılamaz hale gelmesine sebep olabilir. Tüm bu durumlar maliyeti artırırken üretimde elde edilen verimi de düşürmektedir.

Bu istenmeyen durumların ortadan kaldırılabilmesi için kesme işlemini hibrit bir prosese dönüştürmek mümkündür. Kesme takımının kesici kenarlarına veya iş parçasına düşük genlikli ve yüksek frekanslı ultrasonik titreşimler uygulanarak delme prosesi, hibrit titreşim destekli hibrit bir yönteme dönüştürülebilir. Literatürde bu uygulamalarla yapılan çalışmalara 5. Bölümde değinilmiştir.

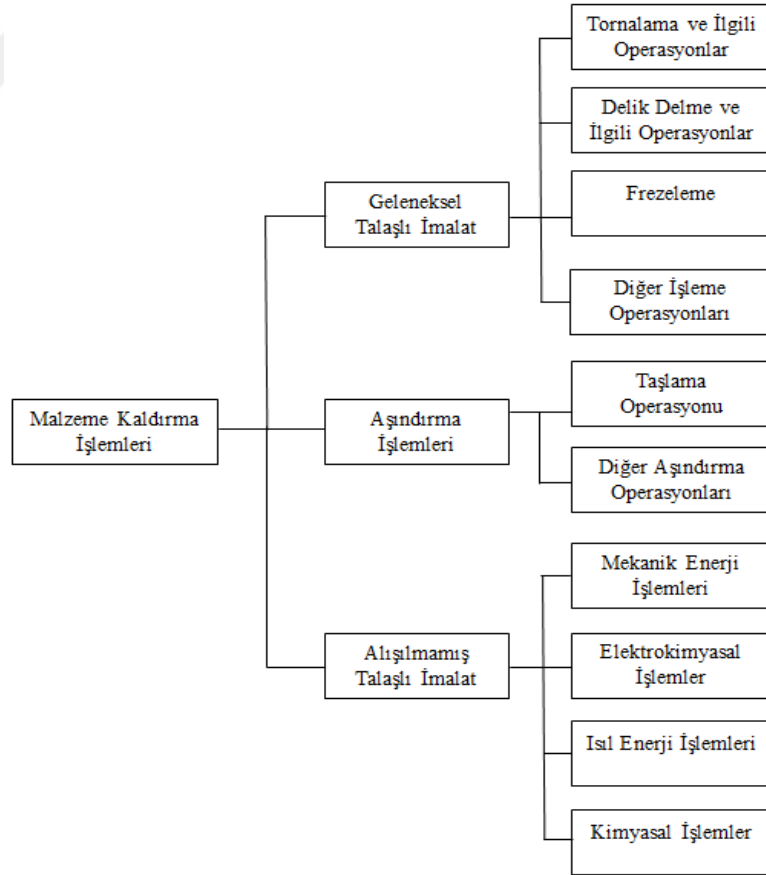
Bu çalışma geleneksel bir yöntem olan delik delme ve ultrasonik titreşim uygulama yönteminin ürün işleme esnasında beraber kullanılmasıyla ortaya çıkmıştır. Deneyle AA6061-T6 ve AA6061-T1 malzemelerinden üretilmiş numuneler kullanılmıştır. Sabit genlik ve farklı frekanslarda oluşturulan ultrasonik titreşimler delme esnasında iş parçasına uygulanmış ve oluşan kesme kuvvetleri, talaş yapıları, takım aşınması ve yüzey kalitesi incelenmiştir. Deneyle iki aşamalı olarak planlanmıştır. Birinci aşamada titreşim uygulaması olmadan konvansiyonel yönteme göre deneyle yapılmıştır. Bunun sebebi AA6061 malzemesinin konvansiyonel yönteme göre delinmesinde literatürde yeterince çalışma yapılmamış olmasıdır. İkinci aşamada ise ultrasonik titreşimler uygulanarak deneyle gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada elde edilen optimum kesme parametreleri ışığında deneyle ikinci aşaması planlanmıştır. Birinci aşamada farklı kesme parametrelerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne olan etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. İkinci aşamada ise yine farklı kesme parametrelerinde ultrasonik titreşim uygulamasının kesme kuvvetlerine ve yüzey pürüzlülüğüne olan etkileri araştırılmıştır. Ultrasonik titreşimin takım aşınmasına etkilerini gözlemleyebilmek için SEM görüntüleri alınmış ve takım aşınmaları incelenmiştir.

Deneyle sonunda elde edilen sonuçlar tam faktöriyel deney tasarımı yöntemiyle değerlendirilmiş ve sonuçlar bu yöntemle elde edilen grafiklere göre yorumlanmıştır. Ayrıca kesme parametrelerinin etkilerini gözlemleyebilmek için varyans analizleri (ANOVA) yapılmıştır.

1. TALAŞLI ÜRETİM

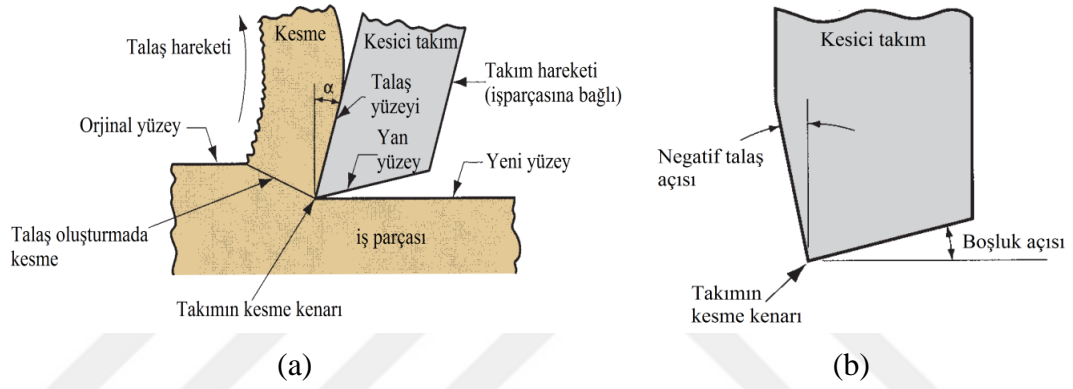
1.1. Genel Bilgiler

Talaşlı üretim işlemi en önemli üretim yöntemlerinden biridir. Döküm, dövme, haddeme ve diğer şekillendirme yöntemleriyle üretilmiş mühendislik malzemelerinin kullanıma hazır hale getirilmesi için çoğunlukla talaşlı imalat işlemleri gereklidir. Talaşlı imalat işleminde iş parçasını (yarı mamul, döküm, dövülmüş, haddelenmiş) istenilen geometriye getirmek için üzerindeki fazlalıklar uygun takım tezgâhı (torna, freze, matkap) ve kesici takım kullanılarak talaşlar şeklinde uzaklaştırılıp, istenilen boyutlar ve yüzey kalitesi sağlanır [8,9]. Şekil 1.1’de talaş kaldırma işleminin sınıflandırması yapılmıştır [10].



Şekil 1.1. Malzeme kaldırma işlemi sınıflandırılması [10]

Talaşlı üretim tek bir işlem değil bir grup işlem den oluşur. Ortak özelliği kesici takım ile iş parçasından talaş kaldırılmasıdır. Operasyonun uygulanması için takım ile iş arasında bağıl harekete ihtiyaç duyulur. Birçok talaş kaldırma operasyonunda kesme hızı olarak adlandırılan birincil hareket ve ilerleme olarak adlandırılan ikincil hareket ile gerçekleştirilir. Kesici takımın şekli ve iş parçasının yüzeyinden içeri girmesi (kesme derinliği) bağıl hareket ile birleşerek bitmiş iş parçasının istenilen geometrisini üretirler. Talaşlı üretimde, hakim olan kesme eylemi, iş parçasının kayma deformasyonu ile talaş oluşturulması ve talaş çıkarılıp atıldıkça yeni yüzeylerin açığa çıkmasıdır. Bu işlem Şekil 1.2’de gösterilmiştir [10].



Şekil 1.2. (a) kesme işleminin kesit görünümü (b) negatif talaş açısı [10]

1.2. Talaşlı Üretimin Avantajları

1.2.1. İş parçalarının çeşitliliği

Talaşlı üretimin uygulama alanı oldukça çeşitli iş parçası malzemelerden oluşmaktadır. Hemen hemen bütün katı metaller işlenebilmektedir. Plastik ve plastik kompozitleri de talaş kaldırma ile işlenebilir [11,12].

1.2.2. Parça şekillerde ve geometrik özelliklerde çeşitlilik

Talaşlı üretim düz yüzey, dairesel delikler ve silindirler gibi düzenli geometrilerde kullanılabilir. Çeşitli takım şekilleri ve yolları ile (vida dişi ve t kanal gibi) düzensiz geometriler yaratılabilir. Farklı talaş kaldırma işlemlerinin sırayla uygulaması ile sınırsız karmaşıklıkta ve çeşitlilikteki şekiller elde edilebilir [10].

1.2.3. Boyutsal doğruluk

Talaşlı üretimde tolerans sınırları içerisinde kalma oranı oldukça yüksektir. Oldukça hassasiyet gerektiren bazı iş parçalarının, talaşlı üretim yöntemlerinde istenilen toleranslar içerisinde üretimi sağlanabilmektedir [10].

1.2.4. Pürüzsüz yüzey

Talaşlı üretimde pürüzsüz (dümdüz) yüzeyler oluşturulabilir. Geleneksel talaşlı üretim operasyonlarında 0.4 mikrondan daha düşük pürüzlülük değerleri elde edilebilmektedir [10].

1.3. Talaşlı Üretimin Dezavantajları

1.3.1. Malzeme israfı

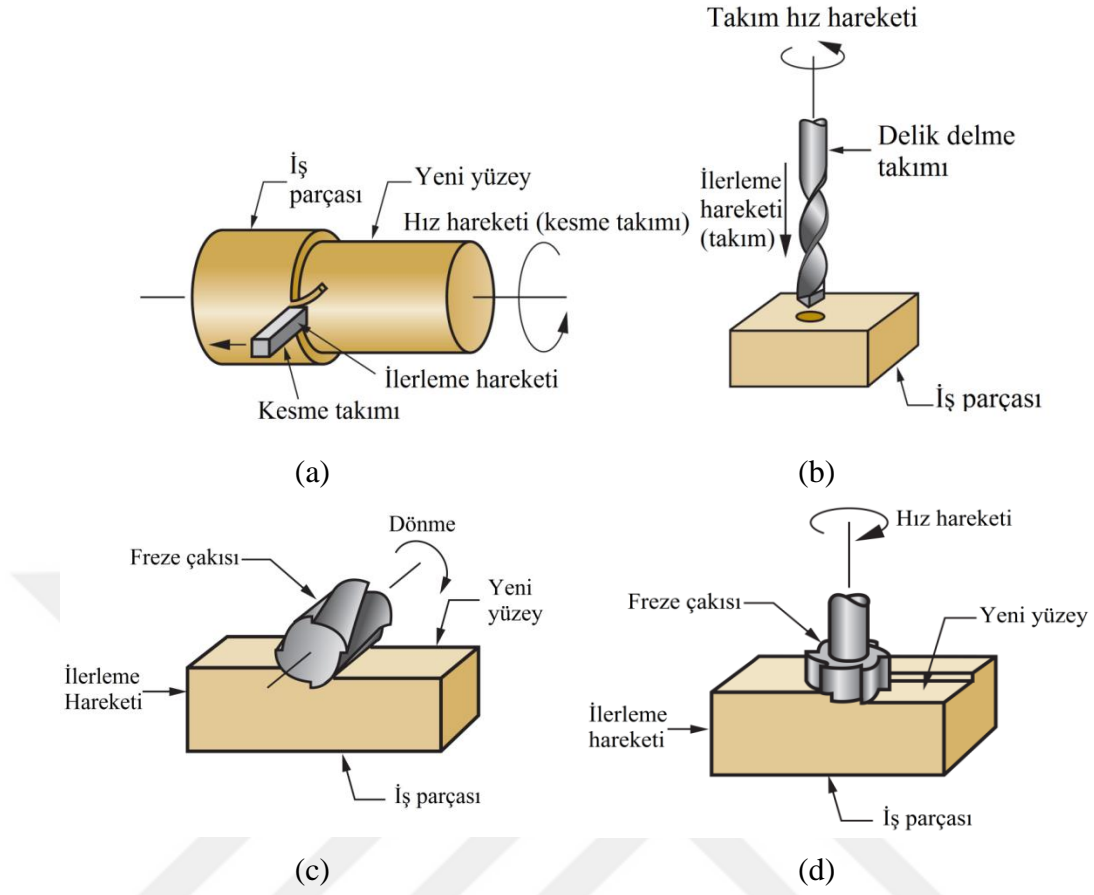
Talaş kaldırma uygulanma tekniği gereğince malzeme israfı oluşturur. Talaş, talaş kaldırma işlemi sonucu oluşan atık malzemedir. Ancak oluşan talaşlar çoğu zaman geri kazanılabilmektedir [10].

1.3.2. Zaman tüketimi

Talaşlı üretim yöntemleri döküm ve dövme gibi diğer üretim tekniklerine göre daha uzun süreler gerektirir [10].

1.4. Talaşlı Üretim Çeşitleri

Her biri kendine has bir geometri ve yüzey dokusu üretebilen çok çeşitli talaşlı imalat işlemleri bulunmaktadır. Şekil 1.3'te bazı yaygın olarak kullanılan talaşlı şekil verme yöntemleri gösterilmiştir [10].



Şekil 1.3. Talaşlı imalatta en çok uygulanan dört tür (a) tornalama (b) delik delme (c) çevresel frezeleme (d) alın frezeleme [10]

Diğer geleneksel talaşlı üretim işlemleri planyalama, raybalama, testere ile kesmedir. Taşlama ve benzer aşındırma işlemleri de genellikle talaş kaldırma kategorileri içerisinde. Bu işlemler geleneksel talaş kaldırma işlemlerini takip eder ve iş parçasından daha yüksek yüzey kalitesini elde etmede kullanılır.

1.5. Kesici Takım

Kesici takım tek veya birden fazla kesici kenarlara sahiptir ve iş parçası malzemesinden daha sert bir malzemeden üretilmesi gerekmektedir. Kesici kenarlar talaş iş parçasından ayırır (Şekil 1.3). Kesici kenar talaş yüzeyi ve yan yüzey adı verilen yüzeylerin birleşim kenarıdır. Talaş yüzeyi, doğrudan yeni oluşan talaşın aktığı yüzeydir ve talaş açısı verilen belli bir açıyla yönelmiştir. Talaş açısı iş parçasına bağlı dikey eksene göre ölçülür. Talaş açısı pozitif veya negatif olabilir. Yan yüzey, kesici takım ile yeni oluşturulan iş yüzeyi arasında bir açıklık (boşluk) sağlar ve böylece yüzeyi kazınmadan korunur ve dolayısıyla yüzeyin pürüzlenmesini engeller. Yan yüzeyin yönlendirdiği açıya kesme açısı denir [10].

1.6. Takım Tezgahları

Tezgah iş parçasını tutmak için, hız, ilerleme ve ayarlanmış olan derinliğe göre işleme işlemi için güç sağlar. İş, kontrol ve kesme şartlarına göre, tezgahlar 0.025 mm ve daha iyi toleranslarda, büyük doğruluk ve tekrarlanabilirlik ile parçalar yapılabilir. Tezgah terimi taşlama dahil olmak üzere, bir işleme işlemi gerçekleştiren herhangi bir güç tahrikli makine için de geçerlidir [10].

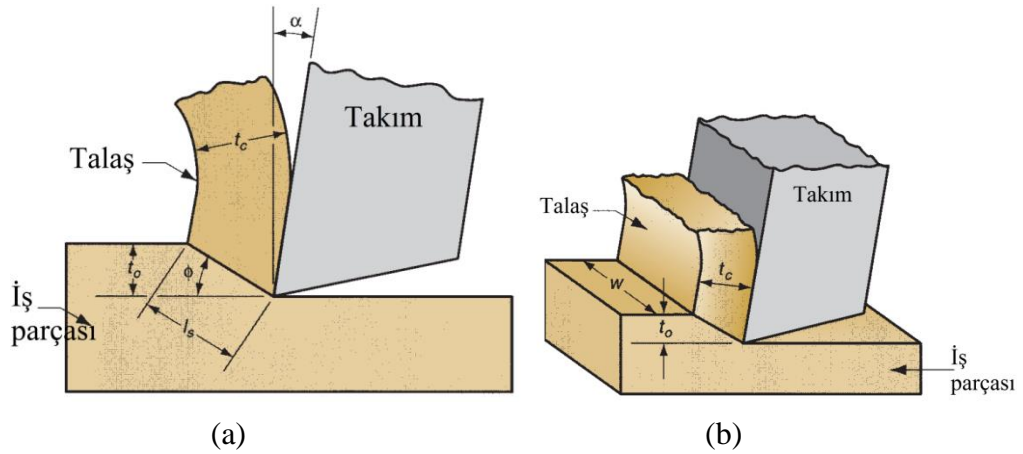


2. TALAŞLI İMALATTA TALAŞ OLUŞUMU VE KESME KUVVETLERİ

En pratik talaşlı işlemlerinin çoğunun geometrisi biraz karmaşıktır. Talaşlı imalatın basitleştirilmiş modeli geometrik karmaşıklıkları ihmal eder ancak işlemin mekaniğini işlemleri oldukça iyi tanımlayabilir. Buna ortogonal kesme modeli denir ve şekil de görülmektedir. Gerçekte bir talaşlı imalat 3 boyutlu olmasına rağmen, ortogonal kesme modeli analizde aktif rol oynayan 2 boyuta sahiptir [10].

2.1. Ortogonal Kesme Modeli

Ortogonal kesmede, kesme yüzeyi tarafından iş parçasından ayrılan malzemeye talaş denilir. Talaş kesme doğrultusuna dik bir şekilde iş parçasından kaldırılır [1,6]. Takım malzemeye kuvvet uyguladığı için kesme düzlemi adı verilen ve iş parçası yüzeyiyle ϕ açısı yapan düzlem boyunca kesme deformasyonu ile talaş şekillenir. Malzeme şekillendirilirken ana malzemeden talaş kaldırmanın sonucu olarak sadece takımın keskin kesici kenarında bozulma olur. Kesme düzlemi boyunca mekanik enerji harcanarak malzeme plastik deformasyona uğrar [10].



Şekil 2.1. Ortogonal kesme (a) 3 boyutlu işleme olarak (b) iki boyuta indirgenmiş hali

Ortogonal kesmede takım geometrisi sadece iki elemana sahiptir. Talaş açısı (α) iş parçasından çıkan talaşın doğrultusunu tanımlar. Boşluk açısı ise takım yan yüzeyi ile yeni oluşan yüzey arasındaki küçük boşluğun oluşturduğu açıdır [10].

Kesme esnasında, takımın kesici kenarı orijinal iş yüzeyinin altında belirli bir mesafede konumlandırılmıştır. Bu talaş oluşumundan önceki kalınlığa (t_0) karşılık gelir. Kesme düzlemi boyunca şekillenen talaşın kalınlığı t_c 'ye kadar artar. t_0 ve t_c 'nin oranına talaş kalınlık oranı veya talaş oranı (r) denir [10].

$$r = \frac{t_0}{t_c} \quad (2.1)$$

t_c daima t_0 'dan büyük olacağı için r 'nin değeri 1'den küçük olacaktır.

t_0 'a ek olarak ortogonal kesme genişlik (w) boyutuna sahiptir (Şekil 2.1 (a)). Ancak bu boyut ortogonal kesme analizinde çok etkili değildir [10].

Ortogonal kesme modelinin geometrisi talaş kalınlık oranı, talaş açısı ve kesme düzlem açısı arasında önemli bir bağlantı oluşturulmasını sağlar. Bu bağlantıyı oluşturmak için l_s kesme düzlem uzunluğu olarak alınır ve $t_0 = l_s \sin \phi$ ve $t_c = l_s \cos(\phi - \alpha)$ değişiklikleri yapılır [10]. Buna göre;

$$r = \frac{l_s \sin \phi}{l_s \cos(\phi - \alpha)} = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (2.2)$$

Bu eşitlikten, ϕ 'yi elde etmek için;

$$\tan \phi = \frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha} \quad (2.3)$$

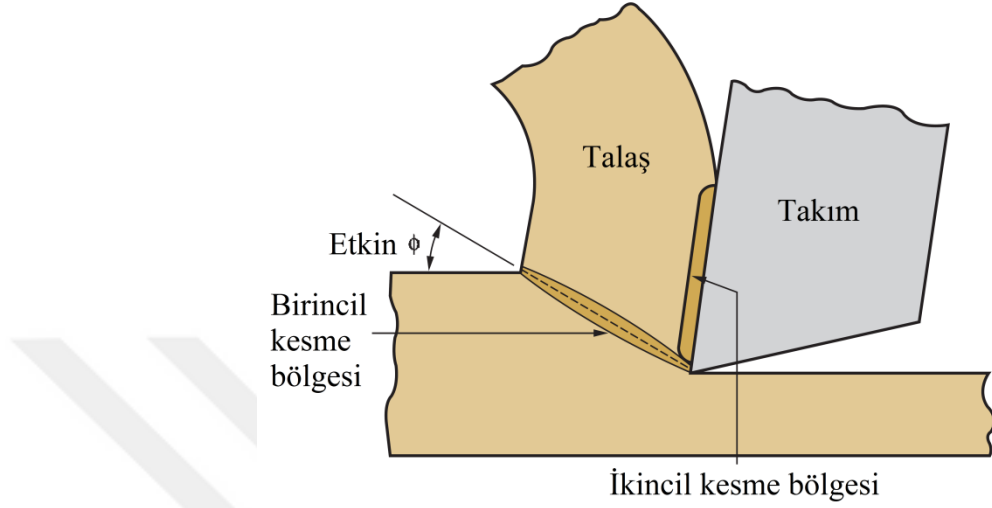
Eşitliğine ulaşılır [10].

2.2. Gerçek Talaş Oluşumu

Ortogonal model ile gerçek talaşlı üretim arasında farklılıklar vardır. Şekil 2.2'de birincil ve ikincil kesme bölgeleri gösterilmiştir [10].

- Kesme (kayma) deformasyonu işlemi bir düzlem boyunca olmaz ve gerçekte bir bölgede oluşur [10].

- Kesme bölgesinin dışında talaş oluştuktan sonra ikinci bir bölgede daha kesme deformasyonu meydana gelir. Bu sonradan oluşan kesmeye ikincil kesme denir ve talaş ve kesme arasında oluşan sürtünmeden kaynaklanır [10].
- Talaşın oluşumu kesilen malzeme ve kesme koşullarına bağlıdır [10].



Şekil 2.2. Birincil ve ikincil kesme bölgeleri [10]

2.2.1. Talaş türleri

2.2.1.1. Süreksiz talaş

Daha kırılğan malzemeler (dökme demir gibi) düşük kesme hızlarında işlendiği zaman, talaşlar ayırık parçalar halinde oluşur. Bazı durumlarda bu talaş parçacıkları birbirine gevşekçe bağlıdır. Bu işlenmiş yüzeyin düzensiz bir şekil olmasına sebep olur. Yüksek kesme, takım-talaş sürtünmesi ve büyük ilerleme ve kesme derinliği süreksiz talaş oluşumunu artırır [10].

2.2.1.2. Sürekli talaş

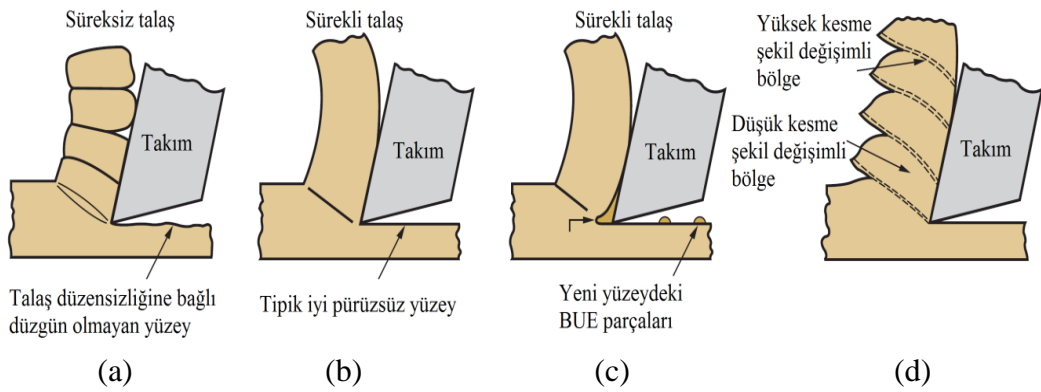
Sünek malzemeler yüksek hızda ve düşük ilerleme ve kesme derinliğinde uzun sürekli talaşlar oluşmaktadır. Bu tarz talaş pürüzsüz düz bir yüzey oluşumuna neden olur. Keskin kesici kenar ve takım talaş arasında düşük sürtünme sürekli talaşın oluşumunu artırır. Uzun sürekli talaşlar talaşın uzaklaştırılması ve kesme takımına dolanması gibi problemlere yol açar [10].

2.2.1.3. Yığıma kenarlı sürekli talaş

Sünek malzemeler düşük-orta kesme hızlarında işlendiğinde, takım-talaş ara yüzeyindeki sürtünme, talaş yüzeyinin kesici kenara yakın kısımlarına iş parçasının belli oranda yapışmasına sebep olur. Buna yığıma kenar (built-up edge, BUE) adı verilir. Yığıma kenar oluşumu bir çevrim şeklinde gerçekleşir. Oluşur, büyür, takımla arasındaki bağ zayıflar ve kopar. Sonra bu tekrarlanan bir çevrime dönüşür. Kopan yığıma kenarın büyük kısmı talaşla birlikte ortamdan uzaklaşır. Bazen yığıma kenar koparken, kesici takımın kenarından malzeme koparabilir. Bu da takımın körelmesine ve ömrünün azalmasına yol açar. Bir diğer sakınca ise, yığıma kenarın belli bir kısmı iş parçası yüzeyine yapışır ve yüzey kalitesini düşürür [10].

2.2.1.4. Tırtıklı (testere ağızlı) talaş

Yarı-sürekli talaş olarak tanımlanabilir. Malzemenin yüksek ve düşük kesme şekil değişimine çevrimsel olarak maruz kalması durumunda oluşur. Titanyum alaşımları, nikel esaslı süper alaşımlar ve üstelik paslanmaz çelikler gibi kesilmesi zor malzemeler yüksek kesme hızında işlendiğinde görülür. Diğer malzemelerde de yüksek kesme hızlarında bu tip talaş görülebilir [10].



Şekil 2.3. Metal kesmede oluşan talaş tipleri (a) süreksiz (b) sürekli (c) yapışan köşe (d) tırtıklı [10]

2.3. Metal Kesmede Kuvvet Oluşumu

Dikey kesme modelinde değişik kuvvetler tanımlanmıştır. Bu kuvvetlere bağlı olarak kesme gerilmeleri, sürtünme katsayıları ve diğer bağıntılar oluşmaktadır.

Şekil 2.4'te gösterilen ortogonal kesme işleminde, talaşa etki eden kuvvetler gösterilmiştir. Takım tarafından talaşa uygulanan kuvvetler iki dikey bileşene ayrılır [10]:

- 1) Sürtünme kuvveti (F): Talaşın talaş yüzeyinde takımın hareketine mukavemetinin sürtünme kuvvetidir.
- 2) Sürtünmeye dik olan (normal) kuvvet (F): Sürtünme kuvvetinin dikeyidir.

Bu iki bileşen takım ile talaş arasındaki sürtünme katsayısını belirlemede kullanılır [10];

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (2.4)$$

Sürtünme kuvveti ve onun dik kuvveti normal kuvvet bileşke kuvvet R'ye vektörel olarak eklenebilir, R kuvveti β açısıyla etki eder ve β 'ya sürtünme açısı denir. Sürtünme açısı ile sürtünme katsayısı arasındaki ilişki [10];

$$\mu = \tan \beta \quad (2.5)$$

Ayrıca talaşa etki eden takım kuvvetleri, iki bileşenli kuvvettir [10];

- 1) Kesme kuvveti (F_s): Kesme yüzeyinde kesme deformasyonuna neden olan kuvvettir.
- 2) Kesme kuvvetine dik normal kuvvet (F_n): Kesme kuvvetinin dikeyidir.

Kesme kuvvetine bağlı olarak, iş parçası ile talaş arasındaki kesme yüzeyindeki kesme gerilimi [10];

$$\tau = \frac{F_s}{A_s} \quad (2.6)$$

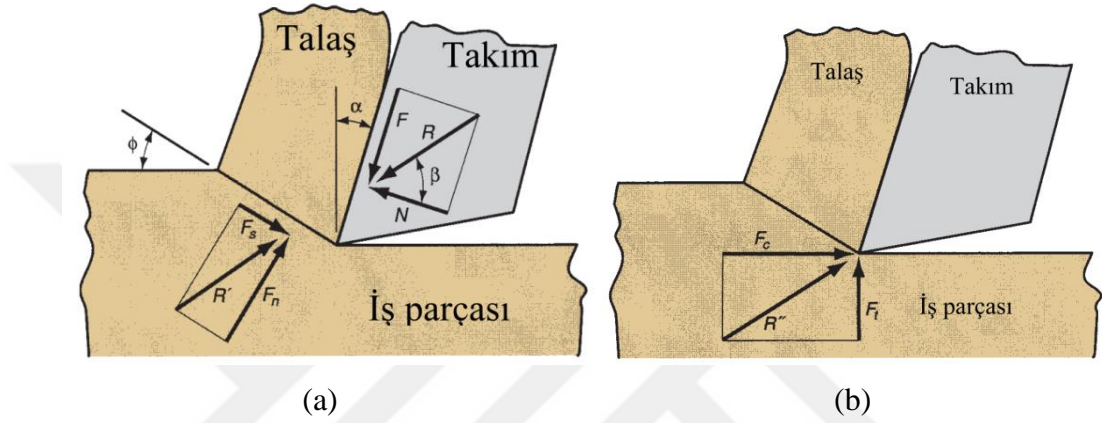
A_s = Kesme yüzeyinin alanıdır. Kesme yüzeyinin alanı [10];

$$A_s = \frac{t_0 w}{\sin \phi} \quad (2.7)$$

ile bulunur.

Eşitlik (2.6)'daki kesme gerilimi talaş kaldırma işlemini gerçekleştirmek için gerekli gerilmenin seviyesini göstermektedir. Bu nedenle, gerilme kesmenin gerçekleştiği koşullar altında işlenen malzemenin kesme mukavemetine eşittir ($\tau = S$) [10].

F_s ve F_n kuvvetlerinin vektörel sonucu R' bileşke kuvvetidir. Talaşa etki eden kuvvetlerin dengede olması gerektiği için, R' bileşke kuvvetinin büyüklüğü, ters yönlü aynı doğrultudaki R bileşkesine eşit olmalıdır [10].



Şekil 2.4. Metal kesmede kuvvetler (a) ortogonal kesimde talaşa etkiyen kuvvetler (b) takıma etki eden ölçülebilir kuvvetler [10]

Bu dört kuvvet bileşeninden (F , N , F_s , F_n) hiçbiri talaş kaldırma işleminde doğrudan ölçülemez, çünkü uygulandığı yönler, takım geometrilerine ve kesme koşullarına bağlı olarak farklıdır. Fakat, kesme takımına etki eden kuvveti ölçmek dinamometre aleti ile mümkündür, böylece takıma etki eden iki ek kuvvet doğrudan ölçülebilir [10];

- 1) Kesme kuvveti (F_c): Kesme yönündedir ve v kesme hızı ile aynı doğrultudadır.
- 2) İtme kuvveti (F_t): Kesme kuvvetine dik doğrultudadır ve kesme öncesi talaş kalınlığı (t_0) ile ilişkilidir.

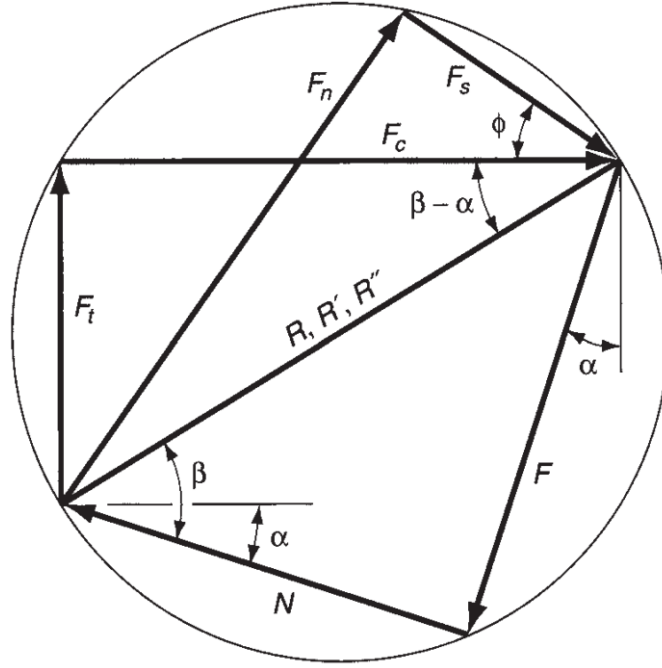
Kesme kuvveti, itme kuvveti ve bileşke kuvveti (R'') Şekil 2.4 (b)'de gösterilmiştir. Bu kuvvetlerin kendi yönleri bilinmektedir, böylece dinamometredeki kuvvet transformatörleri buna göre hizalanabilir. Ölçülemeyen dört kuvvet bileşeni için eşitlikler ölçülebilir iki kuvvetten türetilmiştir. Şekil 2.5'te verilen kuvvet diyagramı kullanılarak, aşağıdaki trigonometrik ilişkiler türetilmiştir [10].

$$F = F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha \quad (2.8)$$

$$N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \quad (2.9)$$

$$F_s = F_c \cos \phi - F_t \sin \phi \quad (2.10)$$

$$F_n = F_c \sin \phi + F_t \cos \phi \quad (2.11)$$



Şekil 2.5. Takıma etki eden kuvvetler arasındaki geometrik ilişkileri gösteren kuvvet diyagramı

Eğer kesme kuvveti ve itme kuvveti biliniyorsa, bu dört eşitlikten kesme kuvveti, sürtünme kuvveti ve sürtünmenin normal kuvveti yaklaşık değerleri hesaplanabilir. Bu kuvvet değerlerine bağlı olarak, kesme gerilmesi ve sürtünme katsayısı belirlenebilir. Ortogonal kesmede, talaş açısı $\alpha = 0$ olduğu özel durumda Eşitlik (2.8) ve Eşitlik (2.9)'un $F = F_t$ ve $N = F_c$ 'ye dönüştüğü görülmektedir. Bu özel durumda, sürtünme kuvveti ve onun normal kuvveti dinamometre ile doğrudan ölçülebilir [10].

Eşitlik (2.6) Şekil 2.5'de verilen kuvvet diyagramından türetilirse [10];

$$F_c = \frac{St_0 w \cos(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} = \frac{F_s \cos(\beta - \alpha)}{\cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (2.12)$$

ve

$$F_t = \frac{S_t w \sin(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} = \frac{F_s \sin(\beta - \alpha)}{\cos(\phi + \beta - \alpha)} \quad (2.13)$$

elde edilir. Eşitlik (2.12) ve (2.13), kesme kuvvetini ve itme kuvvetini eğer iş parçasının kesme dayanımı biliniyorsa ortogonal kesme işleminde tahmin etmeye yardımcı olur [10].

2.4. Merchant Eşitliği

Metal kesmede önemli bir ilişki Eugene Merchant tarafından türetilmiştir [10]. Bu türetme Ortogonal kesme varsayımına dayanmaktadır, fakat genel geçerliliği üç boyutlu talaş kaldırma işlemlerine genelleştirilebilir. Merchant kesme gerilmesi Eşitlik (2.6) ve (2.7) ve (2.10) birleştirilerek şu şekilde ifade edilebilir [10,13];

$$\tau = \frac{F_c \cos \phi - F_t \sin \phi}{(t_0 w / \sin \phi)} \quad (2.14)$$

Merchant, kesme takım ucundan oluşan kesme deformasyonunun meydana gelebileceği bütün açılardan bir tanesinin baskın olduğunu ifade etmiştir. Bu açıda, kesme gerilmesi iş parçasının kesme dayanımına eşittir ve böylece kesme deformasyonu bu açıda gerçekleşir. Bütün diğer olası kesme açıları için, kesme gerilmesi kesme dayanımından daha küçüktür, böylece talaş oluşumu diğer açılarda gerçekleşmez. Aslında, işlenen malzeme kesme düzlemi açısına göre seçilirse bu enerjiyi en aza indirger. Bu açı, Eşitlik (2.14)'deki kesme gerilmesini S 'nin ϕ açısına göre alınan türevinin 0'a eşitlenmesi ile belirlenebilir. ϕ 'ü için çözersek, Merchant adıyla anılan ilişki elde edilir [10, 13];

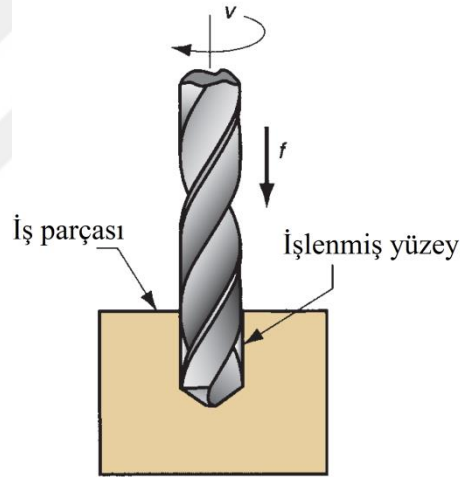
$$\phi = 45 + \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2} \quad (2.15)$$

İş parçası kesme dayanımının sabit olduğu ve şekil değiştirme miktarından, sıcaklıktan ve diğer faktörlerden etkilenmediği Merchant eşitliği varsayımları arasındadır. Bu varsayım pratik talaşlı imalat uygulamalarında geçerli olmadığı için

$\phi = 45 + \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2}$ kesin bir matematiksel bir eşitliği değil yaklaşık bir ilişki olarak kabul edilmelidir [10,13].

3. DELİK DELME OPERASYONU

Şekil 3.1’de görüldüğü üzere delik delme bir iş parçasında yuvarlak bir delik oluşturmak için kullanılan bir talaşlı üretim yöntemidir. Delik delme genellikle çalışan ucunda iki kesme kenarına sahip, dönen bir silindirik kesme takımı ile yapılır. Kesme takımından kasıt matkap ve matkap ucudur. Delik delmede, dönen matkap sabit iş parçasına ilerletilir ve matkap çapına eşit bir çapa sahip delik oluşturulur. En yaygın kullanılan matkap helisel (spiral) matkaptır. Son yıllarda takım malzemeleri konusundaki gelişmeler matkaplara da yansımış ve şekil ve malzeme açısından çok değişik matkaplar geliştirilmiştir [10,14].



Şekil 3.1. Delik delmenin gösterimi [10]

3.1. Delik Delme Operasyonunda Kesme Şartları

Bir delik delme işleminde kesme hızı matkap ucunun dış çapındaki yüzey hızıdır. Aslında neredeyse tüm kesme işlemi gerçekte dönme eksenine yakın daha düşük hızlarda olsa da kesme hızının matkabın dış yüzeyinde tanımlanması hesaplamalarda kolaylık sağlaması içindir. Delik delmeyi istenen kesme hızında gerçekleştirebilmek için matkabın dönme hızını belirlemek gerekir. Eğer N_{im} iş milinin dönüş hızını (devir/dk) gösterirse [10];

$$N_{im} = \frac{v}{\pi D} \quad (3.1)$$

v = Kesme hızı (mm/dk)

D = Matkap çapı (mm)

Delik delmede ilerleme oranı f (mm/dev) olarak tanımlanmıştır. Bu ilerlemeler matkap çapı ile orantılıdır. Yüksek çaplı matkaplarda daha büyük ilerlemeler kullanılır. Genellikle, matkabin iki kesme kenarı olduğundan, her bir kesici kenar tarafından alınan kesilmemiş talaş kalınlığı ilerlemenin yarısı kadardır. İlerlemenin ilerleme hızına dönüşümünü ifade eden eşitlik [10];

$$f_r = N_{im} f \quad (3.2)$$

f_r = İlerleme hızı (mm/dk)

Delinen delikler Şekil 3.2'de görüldüğü gibi açık veya kör olabilir. Açık deliklerde, matkap iş parçasının karşı kenarından çıkar, kör deliklerde ise çıkmaz. Bir açık deliği delmek için gereken işleme süresi aşağıdaki eşitliklerle belirlenebilir [10];

$$T_m = \frac{t + A}{f_r} \quad (3.3)$$

T_m = Delik delme süresi (dk)

t = İş parçası kalınlığı (mm)

f_r = İlerleme hızı (mm/dk)

A , Şekil 3.2'de gösterilen matkabin uç açısını dikkate alan ve matkabin tam delik çapına ulaşmadan iş parçasına girmesi için gereken ilerleme mesafesini temsil eden yaklaşma mesafesidir ve şu eşitlikle hesaplanabilir [10];

$$A = 0,5D \tan\left(90 - \frac{\theta}{2}\right) \quad (3.4)$$

A = Yaklaşma mesafesi (mm)

θ = Matkap uç açısı (derece)

Bir açık delik delmede, genellikle ilerleme hareketi iş parçasının karşı yüzeyini az bir miktar geçer. Bu fazla ilerleme kesmenin gerçek süresinin Eşitlik (3.3)'te hesaplanan T_m 'den biraz fazla olmasına yol açar [10].

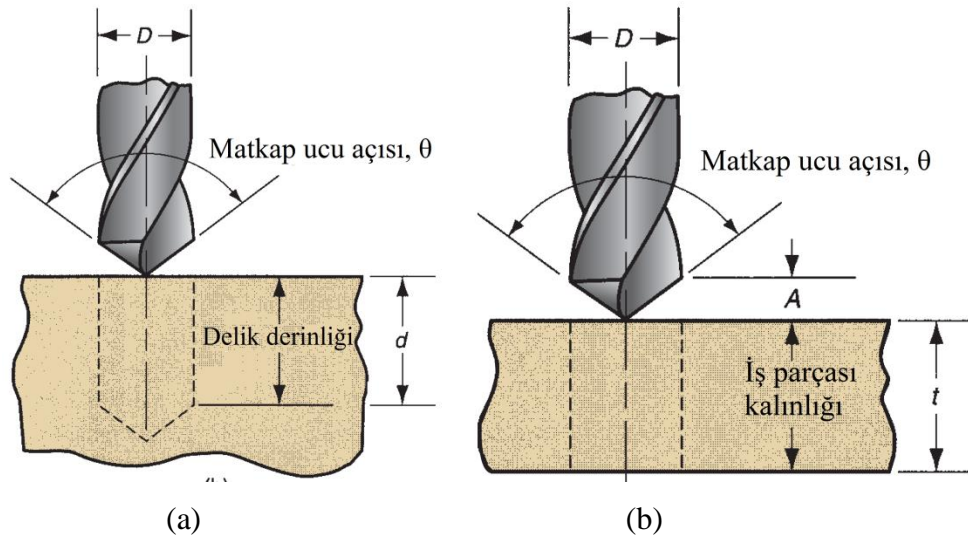
Bir kör delikte, delik derinliği (d) Şekil 3.2 (b)'de görüldüğü gibi iş parçasının yüzeyinden tam çapın derinliğine kadar olan mesafe olarak tanımlanır. Bu durumda, bir kör delik için işleme süresi aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır [10];

$$T_m = \frac{d + A}{f_r} \quad (3.5)$$

Delik delme işleminde malzeme kaldırma debisi matkabin kesit alanı ile ilerleme hızının çarpımı ile belirlenir [10];

$$R_{MR} = \frac{\pi D^2 f_r}{4} \quad (3.6)$$

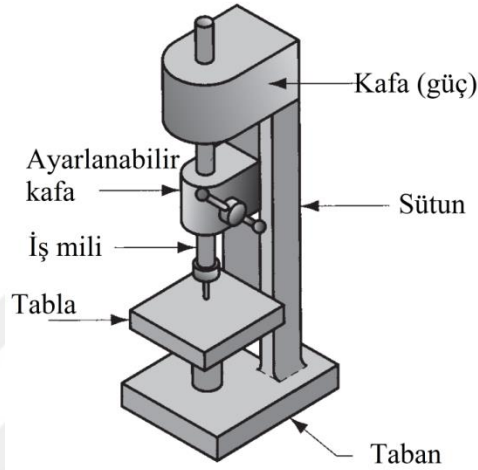
Eşitlik (3.6) sadece matkap delik delmede tam çapa ulaştıktan sonra geçerlidir ve matkabin iş parçasına ilk yaklaşmasını dikkate almaz.



Şekil 3.2. İki delik tipi (a) açık delik (b) kör delik [10]

3.2. Matkap Tezgahları

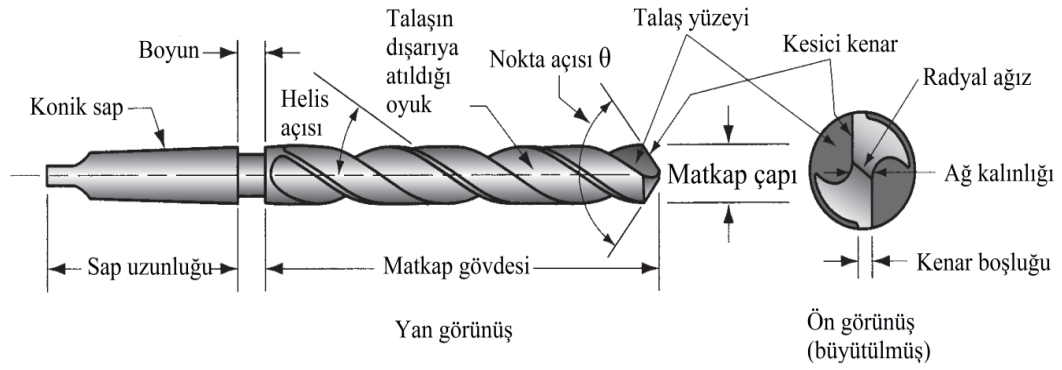
Delik delmede kullanılan standart makine matkap tezgahıdır. Matkap tezgahlarının değişik tipleri bulunmaktadır. En basit olanı ve deneylerde de kullanılacak olan matkap çeşidi Şekil 3.3'te gösterilen sütunlu matkapdır. Sütunlu matkap yer üzerinde durmaktadır ve iş parçasını tutan bir tabla, matkap için tahrikli iş milini barındıran delme kafası ve destek için taban ve sütundan oluşmaktadır [10].



Şekil 3.3. Dik sütunlu matkap [10]

3.3. Takım Geometrisi

Kesici takım geometrisi işlenecek malzemenin cinsine ve elde edilmek istenen delik boyutu ve kalitesine uygun olmalıdır. Kesme takımları tek kesici kenarlı veya çok kesme kenarlı olabilir. Tek kesici uçlu takımlar tornalama, delik işleme ve planyalamada kullanılır. Çok kesme kenarlı takımlar ise delik delme, raybalama, diş açma, frezeleme, tığ çekme ve testere ile kesmede kullanılır. Deneylerde helisel matkap kullanılmıştır ve helisel matkapların standart geometrisi Şekil 3.4'te verilmiştir [10].



Şekil 3.4. Helisel matkabın standart geometrisi [10]

Standart helisel matkap geometrisinde gövde iki adet spiral talaş kanalı sahiptir. Spiral talaş kanallarının açısına helis açısı adı verilir, yaygın olarak değeri 30° 'dir. Delme sırasında çıkan talaş bu kanallardan geçmektedir. Kanalların talaş için açıklıklarının yüksek olması istenmesine rağmen matkap gövdesinin uzunluğu boyunca desteklemesi gerekmektedir. Bu destek talaş kanalları arasındaki matkap kalınlığı olan gövde tarafından sağlanır [10].

Helisel matkapların uçları konik şekildedir. Yaygın kullanılan matkap uç açısı 118° 'dir. Uç farklı tiplerde tasarlanmakta olup, en genel tasarım Şekil 3.4'te gösterilen ağız tasarımıdır. Ağıza bağlı kanallara uzanan iki adet kesme kenarı (dudak, lips) vardır. Talaş kanalının kesme kenarına bitişik olan kısımları talaş yüzeylerini oluşturur [10].

Helisel matkabın kesme işlemi karmaşıktır. Delme ucunun dönmesi ve ilerlemesi, kesici kenarlar ve iş parçası arasında talaşı oluşturan göreceli harekete yol açar. Kesici kenarlarda kesme hızı dönme merkezine olan uzaklığa bağlı olarak farklılaşmaktadır. Buna bağlı olarak kesme verimi değişmektedir. Verim, dış çapta en yüksek ve merkezde en alt seviyesine ulaşmaktadır [10].

Talaşın taşınması delme operasyonunda problem olabilmektedir. Kesme olayı delik içinde en altta gerçekleşir ve talaş kanalı uzunluğu boyunca talaşın dışarı atılmasına izin verecek kadar açıklık sağlamalıdır. Talaş iş parçasının yüzeyine doğru çıkarken kanal yüzeylerine kuvvet uygular. Sürtünme iki şekilde işleri daha da kötüleştirir. Talaş ve matkabın talaş yüzeyi arasındaki sürtünmeye ek olarak matkabın dış çapı ile yeni oluşan delik yüzeyi arasında da sürtünme meydana gelir. Bu matkabın ve iş parçasının sıcaklığını artırır. Sürtünmeyi ve ısınmayı azaltmak için delme bölgesine

kesme sıvısının verilmesi matkabın ilerlemesine zıt yönde hareket eden talaş nedeniyle zordur. Talaşın boşaltılabilmesi ve sıcaklık sebebiyle, normalde helisel matkabın açabileceği deliğin boyu çapının dört katı ile sınırlanmıştır. Bazı helisel matkaplar kesme sıvısını delme noktasına direkt engelsiz bir şekilde taşıyan uzunluğu boyunca iç deliklere sahiptir [10].

Helisel matkaplar genellikle yüksek hız çeliklerinden yapılmaktadır. Matkap geometrisi oluşturulduktan sonra sadece matkap dış kabuğunun sertleştirilmesi için ısıtma işlemi uygulanır. Bu sayede takımın iç kısmı tokluğunu korur. Matkap ucunun şekillendirilmesi ve kesici kenarların keskinleştirilmesi için taşlama işlemi uygulanır [10].

3.4. Takım Malzemeleri

Delme operasyonun en önemli noktalarından birisi kesici takımın özellikleridir. Uzun yıllar boyunca metallerin işleme süreci araştırmacıların yoğunlaştığı konulardan birisi olmuştur. Şuan kullanılan kesici takımlar çok fazla çeşitlilik göstermektedir. Tablo 3.1’de çeşitli takım malzemelerinin ortaya çıktığı yılları ve kullanılabilir oldukları en yüksek kesme hızları gösterilmektedir [10].

Tablo 3.1. Kesici takım malzemelerinin uygun kesme hızları ve yaklaşık ilk kullanım tarihleri [10]

Takım Malzemesi	Kullanılmaya Başladığı Yıl	Uygun Kesme Hızı	
		Çelik Olmayan Kesim m/dk	Çelik Kesim m/dk
Yalın karbon çeliği	1800'ler	10'un altında	5'in altında
Yüksek hız çeliği	1900	25-65	17-33
Döküm kobalt alaşımları	1915	50-200	33-100
Sinterlenmiş karbürler	1930	330-650	100-300
Sermetler (TiC)	1950'ler		165-400
Seramikler (Al ₂ O ₃)	1955		330-650
Sentetik elmaslar	1954, 1973	390-1300	
Kübik bor nitrür	1969		500-800
Kaplamalı karbür	1970		165-400

Tablo 3.2’de ise çeşitli takım malzemelerinin tipik sertlik değerleri ve enine kopma dayanımları gösterilmektedir [10].

Tablo 3.2. Çeşitli takım malzemelerinin tipik sertlik değerleri ve enine kopma dayanımları [10]

Malzeme	Sertlik
Yalın karbon çeliği	60 HRC
Yüksek hız çeliği	65 HRC
Döküm kobalt alaşımı	65 HRC
Sinterlenmiş karbür (WC)	
Düşük Co içeriği	93 HRA, 1800 K
Yüksek Co içeriği	90 HRA, 1700 K
Sermet (TiC)	2400 HK
Alüminyum oksit (Al_2O_3)	2100 HK
Kübik bor nitrür	5000 HK
Polikristal elmas	6000 HK
Doğal elmas	8000 HK

Kesme işlemlerinde kullanılacak takımın verimli şekilde kullanılabilmesi için üç önemli özelliğe ihtiyacı vardır. Bunlar;

- 1) Tokluk: Takımın kırılarak ömrünün tamamlanmasından önce iş göremez hale gelmesini engellemek için takım malzemelerin yüksek tokluğa sahip olması gerekmektedir. Tokluk malzemenin bozulmadan enerji absorbe etme kapasitesidir. Genellikle malzemenin mukavemetinin ve sünekliğinin bir kombinasyonu olarak tanımlanır [10].
- 2) Sıcak Sertlik: Malzemenin yüksek sıcaklıklarda sertliğini koruyabilme kabiliyetidir [10].
- 3) Aşınma Direnci: Sertlik takımın kazıma aşınma direnci için başlıca en önemli özelliğidir. Tüm kesme takımlarının malzemeleri sert olmalıdır. Ancak talaşlı imalat sırasında olan farklı takım aşınma mekanizmalarından dolayı aşınma direnci sertlikten fazlasına sahip olmalıdır. Aşınma direncini etkileyen başlıca diğer özellikler takımın yüzey pürüzlülüğü (pürüzsüz yüzey düşük sürtünme katsayısı ile ifade edilebilir), takım ve iş parçası arasında kimyasal uyumluluk ve kesme sıvısı kullanıp kullanılmadığıdır [10].

Ülkemizde kolaylıkla ulaşılabilen ve yukarıdaki tablolar değerlendirildiğinde yüksek hız çeliklerinin, alüminyum alaşımlarının işlenmesinde verimli olduğu görülmektedir. Yapılan birçok çalışma da alüminyum alaşımlarının delinmesinde

yüksek hız çelikleri kullanılmıştır [2,6,15,16,17]. Bu veriler göz önüne alındığında, yapılacak olan deneylerde kullanılan takım malzemesi yüksek hızlı çelikler olarak seçilmiştir.

3.5. Yüksek Hız Çelikleri

Yüksek hız çeliği, yüksek karbonlu düşük alaşımlı çeliklere göre yüksek sıcaklıklarda sertliğini daha iyi koruyabilen yüksek alaşımlı bir takım çeliğidir. Yüksek hız çeliklerinin yüksek sıcaklık sertliğine sahip olması takımın yüksek kesme hızlarında kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu sebeple yüksek hız çelikleri olarak adlandırılmaktadır [10]. Çok değişik tipte yüksek hız çelikleri mevcuttur ancak genel olarak iki ana tipte gruplamak mümkündür.

- 1) Tungsten tipi (AISI tarafından belirlenen adıyla T tipi)
- 2) Molibden tipi (AISI tarafından belirlenen adıyla M tipi)

Yüksek hız çeliklerinde kullanılabilen alaşım elementleri ve bunların fonksiyonları Tablo 3.3'te gösterilmiştir [10].

Tablo 3.3. Yüksek hız çelik içerisindeki alaşım elementlerinin fonksiyonları ve tipik içerikleri [10]

Alaşım Elementi	HSS içindeki ağırlık olarak yüzdesi	Yüksek Hız Çeliğine Yaptığı Katkılar
Tungsten	T-type HSS: 12-20	Sıcak sertliği artırır.
	M-type HSS: 1.5-6	HSS içinde sert karbür oluşturarak kazıma direncini artırır.
Molibdenyum	T-type HSS: none	Sıcak sertliği artırır.
	M-type HSS: 5-10	HSS içinde sert karbür oluşması yoluyla kazıma direncini geliştirir.
Krom	3.75-4,5	Isıl işlem sırasında derinlemesine sertleşme sağlar.
		HSS içinde sert karbür oluşturması ile kazıma direncini geliştirir.
Vanadyum	1 - 5	Korozyon direnci sağlar. Daha iyi tokluk sağlamak için tanelerin büyümesini geciktirir.

Tablo 3.3.(Devam) Yüksek hız çelik içerisindeki alaşım elementlerinin fonksiyonları ve tipik içerikleri [10]

Kobalt	0-12	Sıcak sertliği artırır.
Karbon	0,75-1,5	Aşınma direnci için diğer alaşım elementleri ile karbür oluşturmak için gereken karbonu sağlar.

Yüksek hız çeliklerinden yapılan takımlar, özellikle delme işleminde kullanılan takımlar, çeşitli alaşımlardan yapılan ince bir tabakayla kaplanmakta ve kesme performansında önemli artışlar sağlamaktadır [10].

3.6. Takım Ömrü

Talaşlı imalat sırasında oluşan yüksek kesme kuvvetleri ve sıcaklıklar takımların kullanım ömrüne etki eden başlıca etkenlerdir. Eğer kesme kuvveti çok yüksek değere ulaşırsa takım kırılır. Kesme sıcaklığının artması ise takım malzemesinin yumuşamasına sebep olur ve takım verimliliğini kaybeder. Eğer takımda kırılmaya ve yumuşamaya neden olan kesme kuvveti ve sıcaklık artışı olmaz ise kesici takım doğal aşınmaya uğrar ve sonuç olarak yine iş göremez hale gelir [10].

Kırılma ve sıcaklık bozulmaları kesme takımının doğal ömründen daha önce kullanılamaz hale gelmesine sebep olur. Kesme takımının daha uzun süre kullanılabilmesi için sürekli ve yavaş bir aşınma ile bozulması tercih edilir. Kesme takımının uzun süre kullanılabilmesi üretim maliyetlerin azalmasını sağlayan önemli bir konudur [10].

3.6.1. Takım aşınması

Takım aşınması talaşlı imalat teknolojilerinde ve delme operasyonunda kaçınılmaz bir durumdur. Kesici takımlarda sürekli bir doğal aşınma olur. Bu doğal aşınmalara sebep olan unsurlar aşağıda gruplandırılmıştır [10].

- Kazıma: Kesilen parçada bulunan sert parçacıkların takımdan küçük parçaları oyduğu ve çıkarttığı mekanik aşındırma işlemidir. Kazıma takımın hem yan yüzey aşınmasında olur ve yan yüzey aşınmasının önemli bir nedenidir [10].

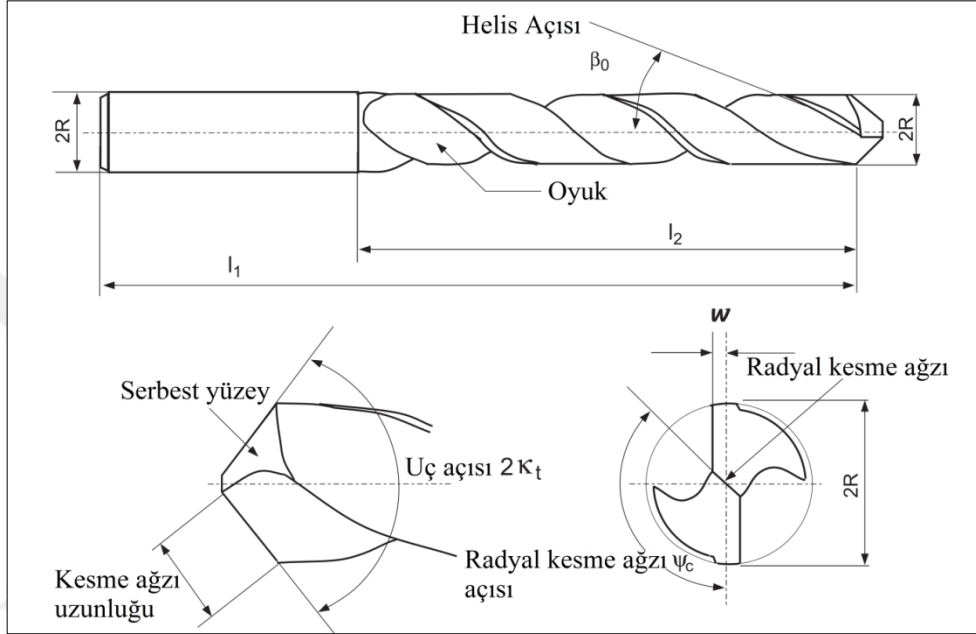
- **Yapışma:** İki metal yüksek basınç ve sıcaklık altında birbirleriyle temas etmeye zorlanınca aralarında yapışma veya kaynak oluşur. Yapışmayı oluşturan koşullar talaş ve kesme takımının talaş yüzeyinin arasında mevcuttur. Talaşlar talaşlı imalat sırasında takımın talaş yüzeyinden geçerken takım talaş yüzeyinden küçük parçacıklar kopar ve aşınmaya yol açar [10].
- **Difüzyon (Yayınım):** Yakın temas altında olan iki malzeme arasında atomların yer değiştirmesi işlemidir. Takım aşınmasında ise, difüzyon takım talaş ara yüzeyinde oluşur ve takım yüzeyinde bulunan ve takımın sertliğini sağlayan atomların azalmasına yol açar. Difüzyon devam ettikçe takım yüzeyi kazıma ve yapışmaya karşı daha elverişli bir duruma gelir. Difüzyonun krater aşınmasının asıl nedeni olduğu düşünülmektedir [10].
- **Kimyasal reaksiyonlar:** Yüksek sıcaklık ve temiz yüzeylerde takım-talaş ara yüzeyinde yüksek hızlı işleme sonucu takımın talaş yüzeyinde oksidasyon benzeri kimyasal reaksiyonlar meydana gelir. Kesme takım malzemesinden daha yumuşak olan oksit tabakası talaşlı imalat sırasında takım üzerinde oksitlenmeyi devam ettirecek yeni yüzeyler ortaya çıkararak takımdan ayrılır [10].
- **Plastik deformasyon:** Takım aşınmasına neden olan bir diğer etmen kesme kenarındaki plastik deformasyondur. Yüksek sıcaklıkta kesme kenarına uygulanan kesme kuvvetleri sonucu kesme kenar plastik deformasyona uğrar ve takım yüzeyi kazımaya karşı dayanıksız hale gelir. Plastik deformasyon esas olarak yan yüzey aşınmasına neden olur [10].

Takım aşınma mekanizmalarının çoğu yüksek kesme hızları ve sıcaklıklarda ivmelenir. Özellikle difüzyon ve kimyasal reaksiyon yüksek sıcaklıklara karşı duyarlıdır [10].

3.7. Delmenin Mekanikliği

Şekil 3.5'te bir helisel matkap ucunun teknik çizimi gösterilmiştir. Helisel matkabın en ucunda radyal kesme ağzı ve sivrilme açısına sahip (κ_1) iki helisel kesme ağzı vardır, bu ağzılar olukla β_0 helis açısıyla birleşir. Helisel oluklar kesme işlemi yapmaz ancak talaşın delinen bölgeden tahliyesini sağlarlar. Kesme kısmı $2w$ genişliğinde ve ψ_c kenar açısına sahiptir. Radyal kesme ağzından dolayı kesme ağzı

takım merkezinden bir miktar uzaktadır. Kesme ağızları sabit kalınlıkta (h) talaş kaldırarak deliği genişletir. Takım malzemeye c (mm/dev) ilerleme hızıyla batırılır. Bastırma kuvveti takımın malzemeye uyguladığı itme kuvvetini temsil eder ve oluşan bu kuvvetten dolayı delmenin mekaniğini belirleyen bir tork oluşur. Delmenin mekaniği radyal kesme ağızı ve kesme ağızı olmak üzere iki bölge için ayrı değerlendirilmiştir [1,6].



Şekil 3.5. Helisel matkap geometrisi [1]

3.7.1. Radyal Kesme Ağızı

Radyal kesme ağızı kesme yapmaz fakat girintili mekanizması sayesinde malzemeyi yanlara yayar. Kesme kanunlarını kullanmak yerine, girintinin mekaniği kullanılmalıdır. Eğer proses sertlik testi olarak basitleştirilirse, radyal kesme ağızındaki bastırma kuvveti aşağıdaki gibi basitleştirilebilir [1,6];

$$KUVVET_1 = F_{z,i} = A_{ch} H_B \quad (3.7)$$

Burada H_B iş parçasının Brinell sertlik değerini ve A_{ch} radyal kesme ağızının anlık girinti bölgesini ifade eder. A_{ch} radyal kesme ağızının uzunluğu ($2w / \sin(\pi - \psi_c)$) ve kesme ağızının malzemeye kontak kurduğu uzunluk ($c / (2 \cos \gamma_t)$) olarak değerlendirilmiştir. İki kesme uzunluğu dikkate alındığında girintiyi ifade eden alan elde edilir [1,6];

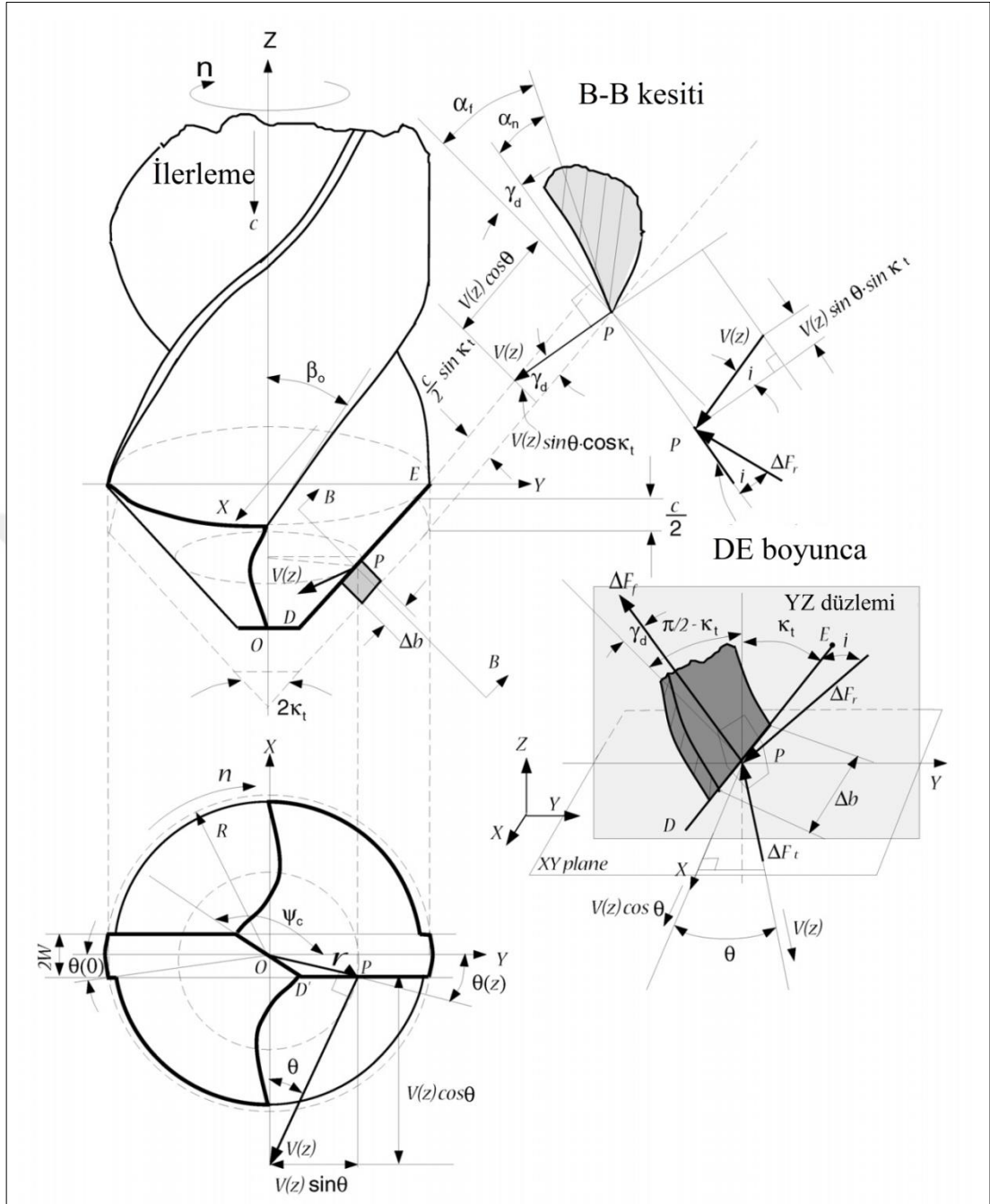
$$A_{ch} = \frac{2wc}{\sin(\pi - \psi_c) \cos \kappa_t} \quad (3.8)$$

Basit girinti metoduyla radyal kuvvete benzetme kesin çözüm için uygun değildir. Radyal kesme ağzı geometrisi ve girinti mekanizması daha komplekstir ve detaylı geometrik model ve deneysel olarak ampirik faktör değişkeninin kalibrasyonunu gerektirir [18]. Son zamanlarda takımın iş parçası üzerinde kaymasını engellemek için radyal ağız geometrisi takım üreticileri tarafından önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Pratik uygulamalar için radyal kuvvetler kesme kuvvetlerinin yüzde 10-15'i olarak kabul edilebilir ve radyal genişlik oldukça küçük olduğu için tork ihmal edilebilir [1,6].

3.7.2. Kesme Ağzı

Kesme ağzının geometrisi oldukça karmaşıktır. Ortogonal kesme-eğik kesme dönüşümü için helisin tanımlanması gerekir, talaş açısı ve eğim açısı kesme ağzı boyunca kesme noktasında oluşur. Radyal ağızdan kaynaklanan ofsetten ve değişken ölçülerden dolayı, helis, talaş ve eğim açısı değişir. Bu kısımda anlatılacak delme geometrisinin davranışı Galloway [19], Armarego ve Brown'un [20] çalışmalarına dayanmaktadır.

Şekil 3.6'da gösterilen helisel matkabın mekanik modeli eğik kesme modelini açıklamaktadır. Delme eksenini z eksenini olarak tayin edilmiş, kesme ağzı x eksenine paralel ve delme eksenini arasında radyal kesme ağzından dolayı ofset oluşmuştur. Kesme ağzının normalini y eksenine paralel olarak tanımlanmıştır. Takım ucu Kartezyen koordinat sisteminin orijini olarak tayin edilmiştir [1,6].

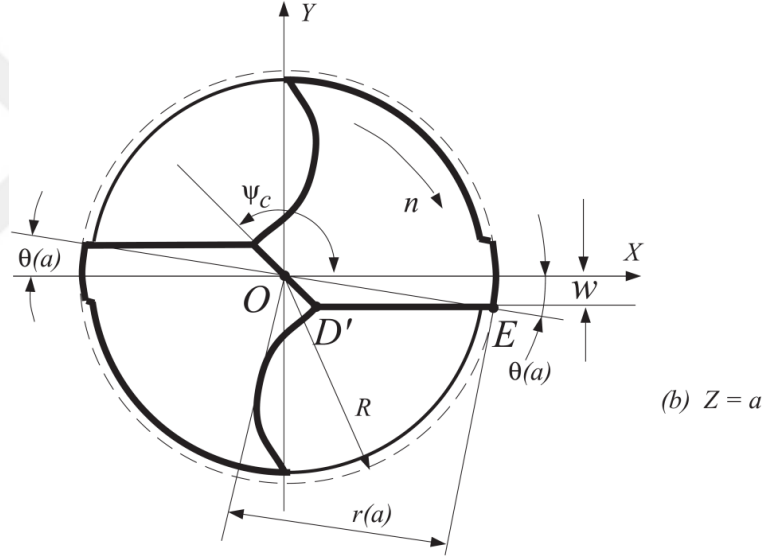
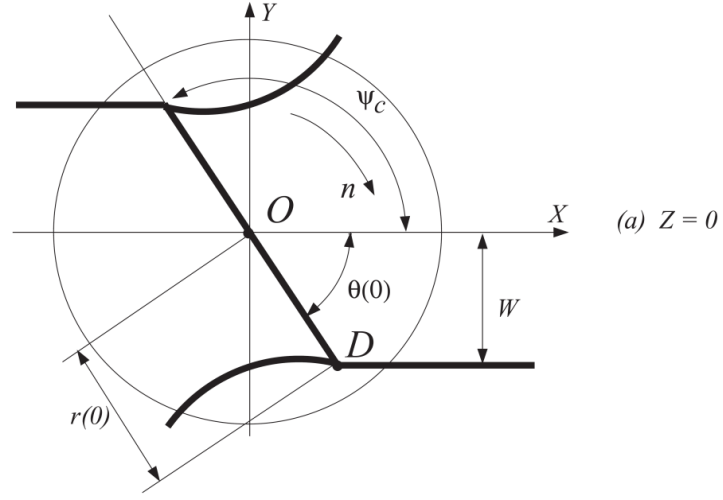


Şekil 3.6. Helisel matkabın mekanik modeli [1]

Takım oluğun alt kısmı yani kesme ağzıyla radyal kesme ağzının birleştiği nokta orijin noktasıdır. Radyal kesme ağzından kaynaklanan ofset w ile ve radyal kesme ağzı açısı ψ_c olarak ifade edilmiştir (Şekil 3.7). Delme merkeziyle kesme ağzının radyal kesme ağzıyla kesiştiği nokta arasındaki radyal mesafe [1,6];

$$r(0) = \frac{w}{\sin(\pi - \psi_c)} \quad (3.9)$$

koordinatları ise; $x(0) = r(0) \cos(\pi - \psi_c)$, $y(0) = w$, $z = 0$ şeklindedir.



Şekil 3.7. Helisel matkap ucunda oyuk kesme ağzı keşişim düzleminin üstten görünüşü [1]

Kesme ağzı ve helisel oyuk keşişmesi arasındaki kot farkı $z = a$ ve takım yarıçapı R ile ifade edilmiştir. Kesme ağzının en uzak noktasıyla delme merkezi arasındaki radyal mesafe [1,6];

$$r(a) = R, \quad (3.10)$$

koordinatları ise; $x(a) = R \cos \theta(a)$, $\theta(a) = \sin^{-1}(w/R)$, $y(a) = w$, $z = a$ şeklindedir [1,6].

Burada R delme yarıçapıdır. Tüm kesme ağzının tasarlanan uzunluğunun xy düzlemindeki kot farkı $z = a$ olur;

$$\overline{DE} = \overline{DE} \sin \kappa_t = b \sin \kappa_t \quad (3.11)$$

Burada $b = \overline{DE}$ iş parçasını kesen kesme ağzı uzunluğudur. Kesme ağzı boyunca helis açısı değişmesine rağmen takımın temsili helis açısı (β_0) silindirik bölgede ($r(a) = R$) oyuk için aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [1,6];

$$\tan \beta_0 = \frac{2\pi R}{L_p} \quad (3.12)$$

Burada L_p helisin sabit hatvesini ifade etmektedir.

Kesme ağzı üzerindeki $P(x,y,z)$ noktası Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Kesme ağzının xy düzlemine izdüşümünün kot farkı; $z \overline{DP} = z \tan \kappa_t$ 'dir. P noktasıyla delme eksenindeki radyal mesafe [1,6];

$$r(z) = \sqrt{y(0)^2 + [x(0) + \overline{DP}]^2} = \sqrt{w^2 + [w \cot(\pi - \psi_c) + z \tan \kappa_t]^2} \quad (3.13)$$

koordinatları ise, $x(z) = r(z) \cos(\theta(z))$, $y(z) = r(z) \sin(\theta(z))$ şeklindedir.

P noktasındaki bölgesel helis açısı;

$$\beta(z) = \frac{2\pi r(z)}{L_p}, \quad (3.14)$$

her kot için ayrı helis açısını ifade eder. Kesme hızı (V) radyus $r(z)$ ve xy düzlemindeki aşağıda ifade edilen bileşene diktir [1,6];

$$\begin{aligned} V_x(z) &= V \cdot \cos \theta(z) \\ V_y(z) &= V \sin \theta(z) \end{aligned} \quad (3.15)$$

Kesme hızının kesme ağzına izdüşümü [1,6];

$$V_t = V_y \sin \kappa_t = V \sin \theta(z) \sin \kappa_t \quad (3.16)$$

Eğim açısı (i) kesme hızı ve kesme kenarının normali arasındaki açı olarak aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [1,6];

$$\sin i = \frac{V_t}{V} = V \sin \theta(z) \sin \kappa_t \quad (3.17)$$

Kesmenin mekaniği kesme ağzına dik olan normal düzlem üzerinde tanımlanmıştır. Eğer kesme ağzının normali P noktasında olduğu düşünülürse, hızın bir bileşeni kesme ağzına dik olur $V_y(z) = V \cdot \cos \kappa_t$, diğer bileşeni V_y' ye paralel olur. İki hız bileşeni arasındaki açı [1,6];

$$\tan \gamma_d = \frac{V_y \cos \kappa_t}{V_x} = \tan \theta(z) \cos \kappa_t \quad (3.18)$$

Efektif talaş açısı (α_f) Armarego ve Brown tarafından kesme ağzı üzerindeki bir nokta, kesme hızı boyunca ve değişimin izdüşümü kullanılarak aşağıdaki gibi belirlenmiştir [1,20];

$$\tan \alpha_f = \frac{\tan \beta(z) \cos \theta(z)}{\sin \kappa_t - \tan \beta(z) \sin \theta(z) \cos \kappa_t} \quad (3.19)$$

Talaş açısı geometriden yararlanılarak bulunursa;

$$\alpha_n = \alpha_f - \gamma_d \quad (3.20)$$

Takım geometrisi karmaşık olmasına rağmen kesme ağzı boyunca oluşan kesme kuvvetlerinin tahmini için Eşitlik (3.18), Eşitlik (3.19) ve Eşitlik (3.20) kullanılabilir. Eğer kesme ağzının dz yüksekliğindeki ve Δb genişliğinde bir parçası alınırsa bu parçanın kaldırdığı talaş alanı [1,6];

$$dA(z) = \Delta b \cdot h \quad (3.21)$$

Burada h iki oyuktan biri tarafından tahliye edilen talaş kalınlığı ve talaş genişliği Δb ;

$$h = \frac{c}{2} \sin \kappa_t$$

$$\Delta b = \frac{dz}{\cos \kappa_t}$$
(3.22)

Talaş akışı ve radyal doğrultuya teğet kesme kuvveti (kesme hızına paralel);

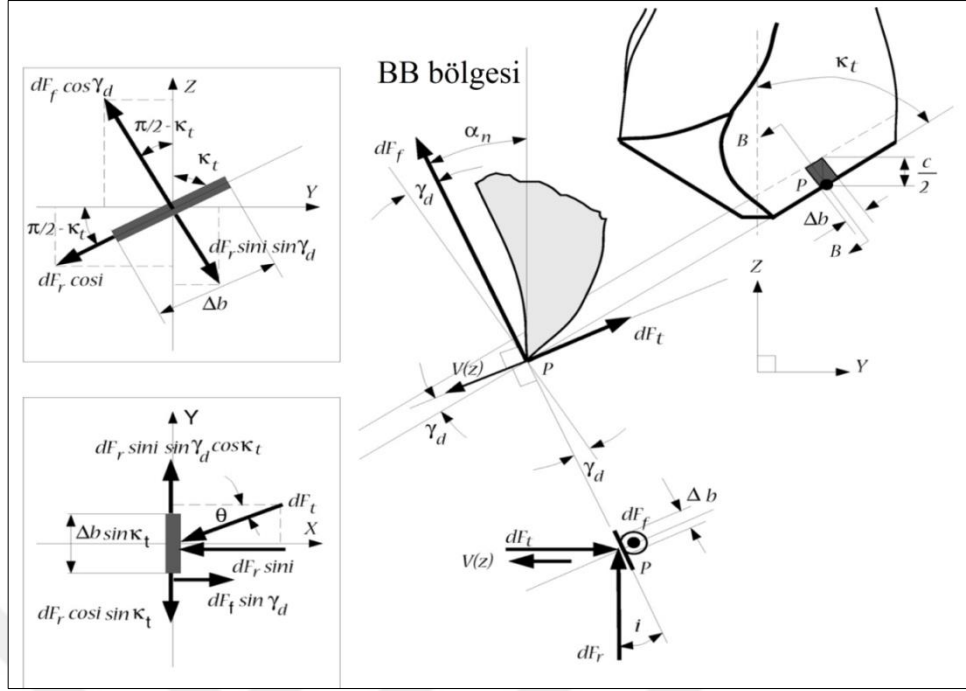
$$\left. \begin{aligned} dF_t(z) &= K_{tc}(z)dA + K_{te}\Delta b, \\ dF_f(z) &= K_{fc}(z)dA + K_{fe}\Delta b, \\ dF_r(z) &= K_{rc}(z)dA + K_{re}\Delta b, \end{aligned} \right\}$$
(3.23)

Burada her element için z kotundaki kesme katsayısı değişken helis, talaş ve eğim açısından dolayı farklıdır [1,6].

Kesme ağzı sabitleri K_{te} , K_{fe} ve K_{re} deneysel olarak değerlendirilmiştir. K_{tc} , K_{fc} ve K_{rc} ise teorik olarak hesaplanan kesme sabitleridir. K_{fc} eksenel kesme kuvvet sabiti, K_{rc} radyal kesme kuvvet sabiti, K_{tc} ise teğetsel kesme kuvvet sabitidir [1,6].

Kesme kuvvet elementlerinin bileşenleri (dF_t, dF_f, dF_r) x, y, z doğrultularında Şekil 3.8'de gösterilmiştir [1];

$$\left. \begin{aligned} dF_x(z) &= [dF_f \sin \gamma_d - dF_t \cos \theta - dF_r \sin i] \\ dF_y(z) &= [dF_f (\sin i \cdot \sin \gamma_d \cdot \cos \kappa_t) - dF_f \cos \gamma_d \cdot \cos \kappa_t - dF_t \sin \theta] \\ dF_z(z) &= [dF_f \cos \gamma_d \cdot \sin \kappa_t - dF_r (\cos i \cdot \cos \kappa_t + \sin i \cdot \sin \gamma_d \cdot \sin \kappa_t)] \end{aligned} \right\}$$
(3.24)



Şekil 3.8. Kesme kuvvet doğrultuları [1]

Delmedeki toplam kesme kuvveti ve tork tüm kesme ağızı elementlerinin toplanmasıyla bulunabilir. İki kesme ağzından kaynaklanan toplam kesme kuvveti ve tork aşağıda gösterilmiştir [1,6];

$$\begin{aligned} \text{KUVVET}_{ii} &= 2 \sum_{m=1}^M dF_z(z) \\ \text{TORK}_{ii} &= 2 \sum_{m=1}^M dF_t(z) \cdot r(z) \end{aligned} \quad (3.25)$$

Delmede kullanılan toplam kesme kuvveti kesme ağızı ve radyal kuvvetlerin toplanmasından elde edilir [1,3];

$$\text{KUVVET} = \text{KUVVET}_i + \text{KUVVET}_{ii} \quad (3.26)$$

Radyal kesme kuvvetinden kaynaklanan tork ihmal edilebilir [1].

3.8. Delik Delme Operasyonu Hakkında Literatür Çalışması

Delik delme operasyonu ile ilgili literatürde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Malzeme çeşitliliği, kesici takımların çeşitliliği bu çalışmaların güncel olarak devam etmesine sebep olmaktadır. Literatürde yer alan bazı çalışmalara aşağıda değinilmiştir.

Çakır ve arkadaşları AA7075 ve AA6013 malzemelerinin delik delme operasyonu için kesme parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. İki farklı takım ucu (HSS ve Karbür), dört farklı kesme hızı ve dört farklı ilerleme değeri kullanarak kesme kuvvetinin değişimini gözlemlemişlerdir. Deneyleri tam faktöriyel tertibinde uygulamışlar ve sonuçları varyans analizi ile yorumlamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre kesici takım ve kesme parametrelerinin delik delme performansına etkili olduğunu kaydetmişlerdir. İlerleme oranının kesme kuvvetlerini ve delme momentlerini açık bir şekilde artırdığını kaydetmişlerdir. Kesme hızının artışının HSS matkaplarda, karbür matkaplara oranla kuvvet ve momentlerde daha fazla artışa sebep olduğunu belirtmişlerdir. Aynı şartlarda AA7075 iş parçası malzemesinde oluşan kesme kuvvetleri AA6013'e göre daha yüksek çıktığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca kesme kuvvetlerine etki eden faktörlerle ilgili olarak, kesici takım kesme hızı ve ilerleme oranının kesme kuvvetleri üzerinde etkili olduğunu malzemenin etkili olmadığını belirtmişlerdir [2].

Bayraklılar yapmış olduğu çalışmada, üç farklı takım ucu (HSS-G, HSS-G TiN, HSS-G Co) için performans değerlendirmesi ortaya koymuştur. AA6082 malzemesini kullanarak yapmış olduğu deneylerde en iyi performansı HSS-G Co takım ucu ile elde ettiğini belirtmiştir. Ayrıca, kesme kuvvetlerinin artışının yüzey kalitesine doğru orantılı etkisi olduğunu gözlemlemiştir. HSS-G TiN ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının ise en kötü sonuçlar olduğunu kaydetmiştir. [6]

Meral ve arkadaşları AISI 1050 çeliğinin delinmesinde oluşan ilerleme kuvvetlerini ve yüzey pürüzlülüğünü regresyon analiziyle modellemişlerdir. Yapmış oldukları deneysel çalışmada, farklı çaplarda kaplamasız ve TiN kaplamalı yüksek hız çeliği kullanmışlardır. İlerleme oranlarını ve takımın kesme hızını değiştirerek elde ettikleri sonuçlara göre regresyon analiziyle bir model geliştirmişlerdir. Buna göre kaplamalı takımlarda elde ettikleri ilerleme kuvvetlerinin kaplamasız takımlara göre daha düşük çıktığını belirtmişlerdir. Ayrıca ilerleme hızının ve takım çapının artışının ilerleme kuvvetlerini daha da artırdığını belirtmişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü için ise, kaplamasız matkapların daha iyi sonuç verdiğini kaydetmişlerdir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünün ilerleme hızı ve takım çapı ile doğru orantılı olarak arttığını ve kesme kuvveti artışı ile ters orantılı bir şekilde azaldığını belirtmişlerdir [21].

Meral ve arkadaşları yapmış oldukları bir başka çalışmada ise delik delme işlemlerinde kaplamalı ve kaplamasız matkapların, kesme parametrelerine bağlı olarak performans analizlerini yapmış ve optimum işleme şartlarını araştırmışlardır. Deneyleeri Taguchi L9 ortogonal düzlemine göre yapmış ve deney sonuçlarının değerlendirilmesinde sinyal/gürültü (S/N) oranını kullanmışlardır [22].

Savaşkan ve arkadaşları, deney tasarımı tekniğini kullanarak matkap uçlarında performans optimizasyonu yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada ince sert seramik kaplı (TiAlN ve TiN) matkap uçları kullanmışlardır. Kaplama türü, kesme hızı ve ilerleme hızının etkilerini Taguchi Deney Tasarım tekniğini kullanarak incelemiştirler. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde ise varyans analizi ve sinyal/gürültü oranını kullanmışlardır. Optimum kesme kuvvetini elde ettikleri kesme parametrelerinin TiAlN kaplamalı matkap ucunda ve 25 m/dk kesme hızında ve 164 mm/dk ilerleme oranında olduğunu belirtmişlerdir [23].

Huang ve Lin , AA6061 malzemesinin delme parametrelerinin optimizasyonunu yapmak için Taguchi metodunu kullanmışlardır. TiN, TiAlN ve CrN kaplamalı matkap uçları kullanılmıştır. Çalışma sonucunda takım ömrü, yüzey kalitesi ve çapak oluşumu bakımından optimum sonuçları CrN kaplamalı matkap ucuyla 3000 dev/dak ve 0,1 mm/dev kesme hızında elde etmişlerdir [24].

4. ALÜMİNYUMUN GENEL ÖZELLİKLERİ

Alüminyum doğada bileşikler halinde bulunur. Yerkabuğundaki yaklaşık olarak %8 civarındaki içeriğiyle alüminyum, oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan üçüncü elementtir. Bu kadar çok bulunmasına rağmen varlığı 1808 yılında İngiliz Sir Humphry Davy tarafından tespit edilen bu metalin ticari anlamda üretim teknolojisi ancak 1886 yılında Paul Louis Toussaint Héroult (Fransa) ve Charles Martin Hall(ABD) birbirlerinden habersiz şekilde ayrı ayrı çalışarak geliştirilmiştir. Hall-Héroult yöntemi olarak halen kullanılan bu üretim teknolojisi alüminyum oksidi ergimiş kriyolit içinde çözündürüp üzerinden güçlü bir elektrik akımı geçirilerek alüminyumun elektrolitin altında sıvı halde elde edilmesidir. 1888 yılında İsviçre ve ABD’de ilk alüminyum elektroliz haneleri kurulmuştur [25, 26].

4.1. Alüminyumun Diğer Metallere Göre Avantajları

Alüminyumun diğer metallere göre birçok avantajı vardır. Bunlar [25, 26];

1. Hafiflik
2. Alaşımlarında yüksek mukavemet
3. Tekrar kullanılabilirlik
4. Yüksek korozyon direnci
5. Plastik şekil verme kabiliyeti
6. Dövülebilirlik
7. İşlenebilirlik
8. Yüksek ısı ve elektriksel iletkenlik
9. Işık ve ısı yansıtıcılığı

Demirden üç kat daha hafif olan alüminyum alaşımlandırılmak suretiyle demire yakın mukavemette bir malzemeye dönüşebilmektedir. Alüminyum normal atmosfer koşullarında oksijen ile reaksiyona girerek kendi yüzeyinde doğal bir koruyucu film tabakası oluşturur. Bu alümina tabakası alüminyumu korozyondan korur. Diğer

metallere göre neredeyse %100 geri dönüşümlü olan alüminyumun geleceğin metali olmasını sağlayacak en önemli ana unsurlardan birisi de ekolojik özelliğidir [25, 26].

4.2. Alüminyum'un Kullanım Alanları

Kullanım alanına göre özelliklerinden kaynaklanan bazı avantajları ve yeni alanların getirdiği bazı alanlarda artan oranda çeliğe ikame olanakları nedeniyle, sanayiinin tüm alanlarında alüminyum tüketimi diğer metallere göre daha fazla artmaktadır. Teknolojinin gelişme paralelinde alüminyum kendisine yeni kullanım alanları bulmakta, üretim metotları, ürün tasarımı ve kalite kontrol için Ar-Ge çalışmalarına ağırlık verilerek devam edilmektedir [26, 27].

Demir-Çelik, bakır ve pirinç malzemelere göre üç kez daha hafif olmasına rağmen amaca hizmet edecek düzeyde yüksek dayanıma sahip olması, alüminyumun ulaştırma sektöründe kullanım miktarını hızla yükseltmektedir. Avrupa'da tüketilen alüminyumun yaklaşık üçte biri ulaşım sektörü tarafından kullanılmaktadır. Otomobillerde, uçaklarda, tren ulaşım sisteminde yük taşıma ve yolcu kompartımanlarının yapımında, gemi sanayiinde gittikçe artan oranlarda alüminyum kullanılmaktadır [26, 27].

Alüminyum son derece iletken bir metaldir. Alüminyum, yeraltı kablolarında, elektrik borularında ve motor bobin sarımında da yaygın şekilde kullanılmaktadır. Şaseler, yongalar, transistör soğutucuları, veri kayıt diskleri ve cihaz kasaları alüminyumun elektronikteki ana kullanım alanlarıdır [26].

Dünyada kullanılan metal kutuların % 80'i alüminyumdur. Bunun nedenleri hafif, açılması kolay, darbeye dayanıklı, sağlam, geri kazanılabilir oluşu ve çabuk soğutma özellikleridir [26].

Hafifliği, yüksek korozyon direnci, uzun ömürlülüğü, düşük bakım maliyetleri, geri kazanma imkanı ve metalin çok yönlülüğü ve sonsuz değişik şekilde profil elde edebilme olanağı nedenleri ile binaların çatı ve cephe kaplamalarında, kapı ve pencerelerinde, merdivenlerde, çatı ve inşaat iskelelerinde, sera yapımında da yoğun şekilde kullanılan alüminyum, sağlamlığı yanında eloksal kaplama sayesinde

dekoratif görünümü sayesinde inşaat sektörüne de birçok seçenekler sunmaktadır [26].

Alüminyum savunma sanayii açısından da önemi ve kullanım alanları hızla artmaktadır. Çeşitli roket ve füze sistemlerinde alüminyum alaşımları değişik miktarlarda kullanılmaktadır. Roket ya da füzenin türlerine göre (topçu roketleri, havadan-havaya, havadan-karaya, yerden havaya, anti-tank vb.) ve alt komple/parçalarına göre (harp başlığı, motor, gövde) alüminyum ve ürünleri tercih edilebilmektedir [26].

4.3. Alüminyum Alaşımları

Alüminyumun kullanım amacına göre istenilen dayanım değerlerini elde etmek, çeşitli elementlerle alaşımlandırarak mümkündür. Tablo 4.1’de alüminyum alaşımlarının hangi elementlerle sağlandığı gösterilmiştir [25].

Tablo 4.1. Alüminyum alaşımlarının alaşım elementlerine göre sınıflandırılması [25]

Seri	İçerik
1XXX	%99 ve üzeri Al
2XXX	Cu
3XXX	Mn
4XXX	Si
5XXX	Mg
6XXX	Mg ve Si
7XXX	Zn
8XXX	Diğer elementler
9XXX	Kullanılmayan dizin

5. ULTRASONİK TİTREŞİM HAKKINDA GENEL BİLGİLER

5.1. Ultrasonik Sesler Hakkında Genel Bilgiler

Ultrasonik sesler insan kulağının duyabileceği frekansın üzerindeki ses dalgalarıdır. İnsan için duyulabilen ses, 20 Hz ile 20000 Hz aralığındadır. Ses, titreşim hareketinden meydana gelen mekanik bir dalgadır ve Tablo 5.1’de seslerin frekanslarına göre sınıflandırılması gösterilmiştir [28].

Tablo 5.1. Seslerin frekanslarına göre sınıflandırılması [28]

Ses türü	Frekans Aralığı
İnfrases	< 20 Hz
Duyulabilir ses	20 Hz - 20000 Hz
Ultrases	20000 Hz - 1 GHz
Hiperses	> 1 GHz

Ultrasonik ses üretiminde bir teli, bir zarı titreştirmek gibi işitilebilir ses üretim yöntemlerine benzer bir çok mekanik yöntem olmasına rağmen ultrases üretiminde piezoelektrik olaylardan yararlanılır. Ultrases ilk olarak 1880 yılında Piere ve Jacques Curies kardeşlerce, piezoelektrik (basınç elektriklenmesi) özelliği olan kristaller yardımı ile üretilmiştir. Ultrases üretiminde kuartz, lityum sülfat, kadmium sülfat, çinko oksit, tourmaline, baryum, titanat, kurşun titanat gibi piezoelektrik özelliğine sahip kristaller kullanılmaktadır. Piezoelektrik olay basitçe, üzerine mekanik bir basınç uygulanan bazı kristal ve seramik malzemelerde bir elektriksel gerilimin oluşması anlamına gelir. Piezoelektrik özellikte bir kristal malzeme, disk veya prizma şeklinde kesilip, yüzeyleri ince iletken bir metal (altın, gümüş, alüminyum) ile kaplanır. Kristalin alt ve üst yüzeylerine mekaniksel basınç uygulanırsa, bu yüzeylerde kutuplanmalar, tersi bir uygulama sonucunda ise devamlı değişen voltajın frekansına bağlı seri bir şekilde uzama ve kısalmalar elde edilir. Bu mekaniksel uzayıp kısalmalar (titreşimler) da bize ultrases’i verir. Piezoelektrik olay çift yönlüdür. Ters piezoelektrik olayla ultrases elde edilir, sistem verici olarak

kullanılır. Normal piezoelektrik olayla ultrases algılanır, sistem alıcı olarak kullanır [28,29].

5.2. Ultrasonik İşleme

Ultrasonik işleme (USM, Ultrasonic Machining) genel olarak yüksek frekans ve düşük genliklerde oluşturulan ultrasonik ses dalgalarının bir dönüştürücü (transducer) aracılığı ile mekanik harekete dönüştürülerek, doğrudan takıma ya da iş parçasının uygulandığı hibrit bir talaşlı imalat yöntemidir. [30, 31, 32, 33, 34].

Hibrit üretim yöntemleri ve teknolojileri en az iki farklı enerji kaynağının işlenecek parça için uygulanması olarak tanımlanabilir. Ultrasonik destekli delme de, konvansiyonel matkabın oluşturduğu kesme hareketi ultrasonik salınımlara maruz kalır. Ultrasonik destekli delme ile ultrasonik işleme farklı yöntemlerden oluşur ve bu farkı ifade etmek gerekir. ultrasonik işleme de ana enerji kaynağı ultrasonik destekli delmenin aksine ultrasonik salınımlardır [32, 33].

Ultrasonik işleme, günümüzde genellikle geleneksel yöntemlerle işlenmeleri çok güç olan, çok sert ve kırılğan malzemelerin (örneğin; cam, yahut elmas, seramik, karbid v.s.) işlenmesinde yaygın olarak uygulanmaktadır. Ultrasonik titreşimlerin sert ve kırılğan malzemelere uygulanması, işlenen malzemenin titreşim takımı ve zımpara tozlarıyla (pasta halinde, veya su yahut yağda çamurlaştırılmış halde) temasa geldiğinde hızla aşınması özelliğine dayanmaktadır. Takım, tercihen önemli bir aşınmaya neden olmayacak şekilde yüzeyine zımpara tozu yedirilmiş plastik metalden yapılır. Bu durumda, zımpara malzemesi kesme işlemini yaparken takım sadece kılavuzluk yapar. Uygun şekilde teması sağlamak için sadece titreşim ünitesinin iş parçası üzerinde hafifçe basmasına gerek vardır, iş parçası üzerindeki daha fazla basınç titreşimi söndürür ve kesme hızını düşürür [32, 33, 34, 35].

5.3. Ultrasonik Destekli Delme

Ultrasonik destekli delme konvansiyonel yöntem ile ultrasonik salınımların beraber uygulandığı bir hibrit prostestir. Titreşim kesici takımı burarak Kumabe (1979)) veya aksenal (Devine (1985), Neugebauer & Stoll (2004)) olarak uygulanır [31].

Ultrasonik işleme gevrek malzemelere uygulanabilirken ultrasonik destekli delme hem gevrek hem sünek malzemelere uygulanabilmektedir [15, 16, 33]. Delme prosesinde titreşimden en yüksek seviyede faydalanabilmek için titreşim sisteminin oluşabilecek rezonanslara karşı ayarlı olması gerekmektedir. Sistemin rezonans frekansları proses parametrelerine ve farklı kesme şartlarına göre farklılık gösterilebilir. Rezonansı oluşması sistemin doğrusal olmayan etkiler altında satürasyona uğramasına sebep olacak ve bu durum sistemin verimliliğini ortadan kaldıracaktır [31].

5.3.1. Ultrasonik titreşimli delme hakkında literatür çalışması

Çeşitli araştırmacılar ultrasonik destekli delmenin kesme kuvvetleri, çapak oluşumu, takım aşınması, gürültü azaltımı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.

Chang and Bone, AA1100-0 malzemesinin ultrasonik destekli delinmesinde çapak boyutunun düşebileceğini göstermişlerdir [16].

Chang ve Bone yaptıkları bir başka çalışmada, AA6061-T6 malzemesinin ultrasonik titreşimli delinmesinde oluşan çapak boyu için analitik bir model geliştirmişler ve geliştirdikleri modelin deneysel sonuçlardan \pm %10 saptığını ortaya koymuşlardır [17].

Lopez de Lacalle ve arkadaşları, Ti6Al4V ultrasonik destekli delinmesinde titanyum alaşımının konvansiyonel işleme göre talaş oluşumunda bir farklılık olmadığını ancak kesme kuvvetlerinde ortalama %20'lik bir düşüş olduğunu gözlemlemişlerdir. Yüksek genliğin kesme kuvvetlerini düşürmesi beklenirken, lineer bir düşüş gözlemleyememişlerdir. Ayrıca ultrasonik titreşimin genlik yükseldikçe takım sıcaklığını artırdığını kaydetmişlerdir [36].

Neugebauer and Stoll, alüminyum alaşımlarının ultrasonik destekli delinmesinde oluşan kesme kuvveti ve momentlerinin %30-50'ye kadar düşebildiğini ve bu düşen kuvvetlerin takımın kesici kenarlarının ömrünü konvansiyonel yöntemle göre 20 kat daha arttığını belirtmişlerdir [32].

Azarhoushang ve Akbari, inkonel alaşımlarının ultrasonik destekli delinmesinde, ortalama yzey pürüzlülüğü ve silindiriklik değerlerinin çok daha iyi olduğunu ve delik kalitesinde %60 a varan bir artış gözlemlenmişlerdir [33].

Zhang ve arkadaşları, elyaf iğerikli kompozit malzemelerin titreşimli delinmesinde kesme kuvvetlerinin en aza indirgenemediği en uygun titreşim koşullarının var olduğunu ortaya koymuşlardır [37].

Onikura ve arkadaşları, piezoaktüatör kullanarak oluşturdukları 40 kHz'lik titreşimi matkap miline uygulayarak, talaş ve talaş yzeyi (rake face) arasındaki sürtünmenin azaldığını, bu sayede talaşların daha ince oluştuğunu ve bununda kesme kuvvetlerini azalttığını gözlemlenmişlerdiler [38, 39].

Simon Chang, AA6061-T6 alaşımlarının ultrasonik titreşimli delinmesinde, sabit genlikte ve farklı frekans aralıklarında yaptığı çalışmasında apak boyutlarını ve kesme kuvvetlerinin değişimini gözlemlenmiştir. Kesme kuvveti ve apak boyutu için matematiksel bir model geliştirmiş ve bu modeli yaptığı deneylerle ortalama %13 hata payı ile doğrulamıştır. Ultrasonik titreşimin, doğru seçilmiş parametreler altında uygulandığında kesme kuvvetini ve apak boyutu azaltabileceğini belirtmiştir. Kötü seçilmiş parametrelerin ise kesme kuvvetini ve yzey pürüzlülüğünü artırabileceğini yaptığı deneylerle göstermiştir. Ayrıca aynı anda iki ultrasonik titreşim uygulamasının kesme kuvvetlerini oldukça önemli ölçüde azaltabileceğini gözlemlenmiştir [40].

Takeyama ve Kato, ortalama kesme kuvvetlerinin ultrasonik titreşimli delinme sayesinde büyük ölçüde düşebileceğini ve oluşan talaşların daha ince olduğunu ve delinen delikten kolayca ayrılabilmediğini belirtmişlerdir. Ayrıca, giriş anında ve çıkış anında oluşan apak boyutlarının düşen kesme kuvvetleri sayesinde büyük ölçüde küçüldüğünü söylemişlerdir. [41].

Babitsky ve arkadaşları, ultrasonik titreşimlerin tornalama yönteminde kullanılmasının yzey kalitesini önemli ölçüde artırdığını ve ortalama kesme kuvvetlerinin azaldığını göstermişlerdir [42, 43].

Makhdum ve arkadaşları, karbon fiber takviyeli plastik malzemelerin delinmesinde ultrasonik titreşimli delmenin kesme kuvvetleri, takım aşınması, talaş oluşumu, yüzey kalitesi ve sıcaklık üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçların konvansiyonel yöntemle kıyasladıklarında ise delik kalitesinde önemli ölçüde artış olduğunu belirtmişlerdir [44].



6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yapılan deneylerde ısıl işlem görmüş alüminyum 6061-T1 ve 6061-T6 alaşımları kullanılmıştır. AA6061-T6 hazır olarak temin edilmiştir. Bu malzemeye T1 ısıl işlemi uygulanmıştır. T1 ısıl işlemi 540 derece fırında 6 saat bekletilerek yapılmıştır. Malzemelerin Brinell sertlik değerleri sırasıyla 111 HB ve 45 HB olarak ölçülmüştür. Malzemeler 30 mm çapında çubuk şeklinde temin edilmiş ve şerit testere makinesi ile 10 mm kesilerek deney numuneleri elde edilmiştir. AA6061-T6 ve AA6061-T1 malzemelerinin kimyasal bileşimi, fiziksel özellikleri ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 6.1, Tablo 6.2 ve Tablo 6.3’de verilmiştir. Deney numunelerinin kesilmesi sırasında çekilen bir fotoğraf ve elde edilen numunelerinin genel görünümü sırasıyla Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de gösterilmiştir.

Tablo 6.1. AA6061 kimyasal bileşimi [25]

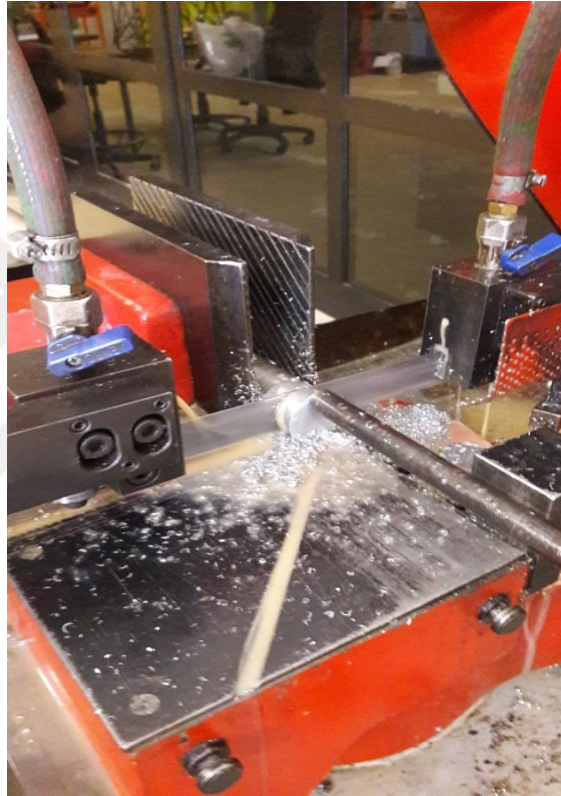
Element	Kimyasal Bileşim Aralığı
Magnezyum (Mg)	0,8 – 1,2
Silisyum (Si)	0,4 – 0,8
Demir (Fe)	< 0,7
Bakır (Cu)	0,15 – 0,40
Çinko (Zn)	< 0,25
Titanyum (Ti)	< 0,15
Mangan (Mn)	< 0,15
Krom (Cr)	0,04 - 0,35
Diğer	0,05
Alüminyum (Al)	Kalan

Tablo 6.2. AA6061-T6 ve AA6061-T1 fiziksel özellikleri [25]

Fiziksel Özellik	6061-T1	6061-T6
Yoğunluk (g/cm)	2,7	2,7
Elektriksel Direnç (Ω .m)	$0,0365 \cdot 10^{-6}$	$0,04 \cdot 10^{-6}$
Isıl Genleşme (1/K)	$23,6 \cdot 10^{-6}$	$23,6 \cdot 10^{-6}$
Isıl İletkenlik (W/m.K)	180	167
Erime Noktası ($^{\circ}$ C)	580	580

Tablo 6.3. AA6061-T6 ve AA6061-T1 mekanik özellikleri [25]

Mekanik Özellik	6061-T1	6061-T6
Çekme Dayanımı (Mpa)	125	310
Akma Dayanımı (Mpa)	55	275
Kayma Dayanımı (Mpa)	85	205
Elastisite Modülü (Gpa)	69	69
Brinell Sertliği (HB)	30	95
Uzama (%)	25	12



Şekil 6.1. Deney numunelerinin kesilmesi işlemi



Şekil 6.2. Deney numulereinin genel görünümü

6.1. DeneY Ekipmanlarının Tanıtımı

Hazırlanan numuneler TOSS TU5032B matkap tezgahında delinmiştir. Deneylerde kullanılan matkap tezgahının teknik özellikleri Tablo 6.4’te verilmiştir.

Tablo 6.4. Matkap tezgahının teknik özellikleri [45]

Teknik Özellik	Değer
Maksimum Delme Kapasitesi	32 mm
Maksimum Kılavuz Kapasitesi	M22
Maksimum İş Mili Tabla Arası Mesafe	1195 mm
İş Mili Sütun Arası Mesafe	320 mm
Tabla Ölçüsü	500x420 mm
Tabla Dönüş Açısı	45°
İş Mili Koniği	MK 4
İş Mili Stroku	160 mm
İş Mili Devir Kademeleri	12 adet
İş Mili Devri	125 - 3010 dev/dak
Motor Gücü	1,5 Kw
Tezgah Boyutları	835x500x1960 mm
Tezgah Ağırlığı	55 Kg

Deneylerde HSS-G kaplamasız ve HSS-G TiN kaplamalı olmak üzere iki tür kesici takım kullanılmıştır (Şekil 6.3). Delik delme operasyonu bölümünde ifade edildiği üzere ulaşımı kolay ve verimliliği yüksek olan HSS (High Speed Steel, Yüksek Hız Takım Çeliği) matkap uçları tercih edilmiştir. Deneylerde kullanılan kesici takımların bazı teknik özellikleri Tablo 6.5’te verilmiştir.

Tablo 6.5. Deneylerde kullanılan kesici takımların özellikleri [46]

Özellik	HSS-G	HSS-G TiN
Oyma Ucu	DIN 1412 C çapraz bileme uçu	DIN 1412 C çapraz bileme uçu
Oyma Açısı	118°	118°
Heliks Açısı	20 – 30 °	20 – 30 °
Kesme Yönü	Sağ (Saat yönü)	Sağ (Saat yönü)
Tolerans	H8	H8
Yüzey Tesviyesi	Parlak Taşlanmış	TiN kaplama



Şekil 6.3. Deneylerde kullanılan matkap uçları

Delme işlemi sırasında oluşan aksel kuvvetler matkap tablasına bağlanan dört bileşenli Kistler 9272 marka piezoelektrik delme dinamometresi (Şekil 6.4) ve Kistler 5070 A amplifikatör (Şekil 6.5) yardımıyla ölçülmüştür. Piezoelektrik dinamometreden veri aktarımı RS-232 ara yüzü ve Dynoware–Kistler bilgisayar yazılımı ile sağlanmaktadır. Veri aktarımı analog sinyallerin dijital sinyallere dönüştürülmesi mantığına dayanmaktadır [12].



Şekil 6.4. Kistler 9272 piezoelektrik dinamometre [47]



Şekil 6.5. Kistler 5070 A amplifikatör [47]

Deneilerde kullanılan ultrasonik titreşim platformu 5 bileşenden oluşmaktadır (Şekil 6.6).

- 1) Güç Amplifikatörü (Power Amplifier)
- 2) Piezoelektrik Dönüştürücü + Titreşim platformu (Vibrating Platform including the transducer)
- 3) Yük Koruması (Protective Load)
- 4) Fonksiyon Jeneratörü (Function Generator)
- 5) Osiloskop (Oscilloscope)

Ultrasonik titreşimin elde edilmesi için günümüzde temel olarak kullanılan iki tane temel dönüştürücü tasarım yöntemi vardır. Bunlar manyetostriktif ve piezoelektrik dönüştürücülerdir. Piezoelektrik dönüştürücüler malzemenin piezoelektrik özelliğini kullanarak jeneratörden gelen elektrik enerjisi ultrasonik titreşimler şeklinde mekanik enerjiye dönüştürür. Manyetostriktif dönüştürücüler malzemenin manyetostriktif özelliğini kullanarak manyetik alandan oluşan enerjiyi mekanik enerjiye dönüştürür [48, 49].

Deneilerin uygulandığı ultrasonik titreşim platformunun çalışma prensibi piezoelektrik olaylara dayanmaktadır. Fonksiyon jeneratörünün oluşturduğu farklı elektrik sinyalleri güç amplifikatöründe yüksek frekanslara ulaştırılarak ultrasonik platformda bulunan piezoelektrik dönüştürücüye gelir ve burada ultrasonik titreşimler şeklinde mekanik bir enerjiye dönüştürülür. Platforma bağlı olan iş

parçası tutucu kısım bu esnada eksenel ve radyal olarak titreşmeye başlar ve delme için istenilen düşük genlikli ve yüksek frekanslı titreşim elde edilir. Platformun rezonansa girmesi gibi durumlarda mekanik enerjiye dönüştürülemeyen fazla elektrik sinyalleri yük koruması sayesinde elektrik enerjisine dönüştürülür ve sistemin sağlıklı bir şekilde çalışmasının sürekliliği sağlanmış olur.



Şekil 6.6. Ultrasonik titreşim ekipmanlarının genel görünümü

Ultrasonik titreşim uygulanan delme deneylerinde oluşturulan titreşimin frekansı AA Tech Ads-1022B (Şekil 6.7) marka dijital osiloskop ile ölçülmüştür. Titreşim genliğini ölçmek için ise SKF Microlog Vibrometer (Şekil 6.8) kullanılmıştır.



Şekil 6.7. ADS-1022B Dijital Osiloskop



Şekil 6.8. SKF Microlog Vibrometer [50]

Delinen deney numunelerinin yüzey pürüzlülükleri uygun ölçüm şartlarında her delik için üç noktadan ölçülerek ve ortalama değer alınarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümler Mitutoyo 178-954-4A marka yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.9).



Şekil 6.9. Mitutoyo 178-954-4A yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

6.2. Deneylerin Yapılması

Deneyler konvansiyonel yöntemle göre delme ve ultrasonik titreşimli delme olmak üzere iki aşama da gerçekleştirilmiştir. Delme dinamometresi uygun bağlantı elemanlarıyla tezgahın tablasına bağlanmıştır (Şekil 6.10). Delme dinamometresinin üzerine uygun şekilde tasarlanan ultrasonik titreşim platformu delme dinamometresinin üzerine uygun bağlantı elemanları ile bağlanmıştır (Şekil 6.11). 30

mm çapında ve 10 mm kalınlığında elde edilen numuneler platform üzerine uygun bağlantı elemanlarıyla bağlanmıştır. Tasarlanan deney düzeneğinin genel görünümü şekil 6.12’de deney düzeneğinin şematik gösterimi ise şekil 6.13’de gösterilmiştir. Deneylerde kesme sıvısı kullanılmamıştır.



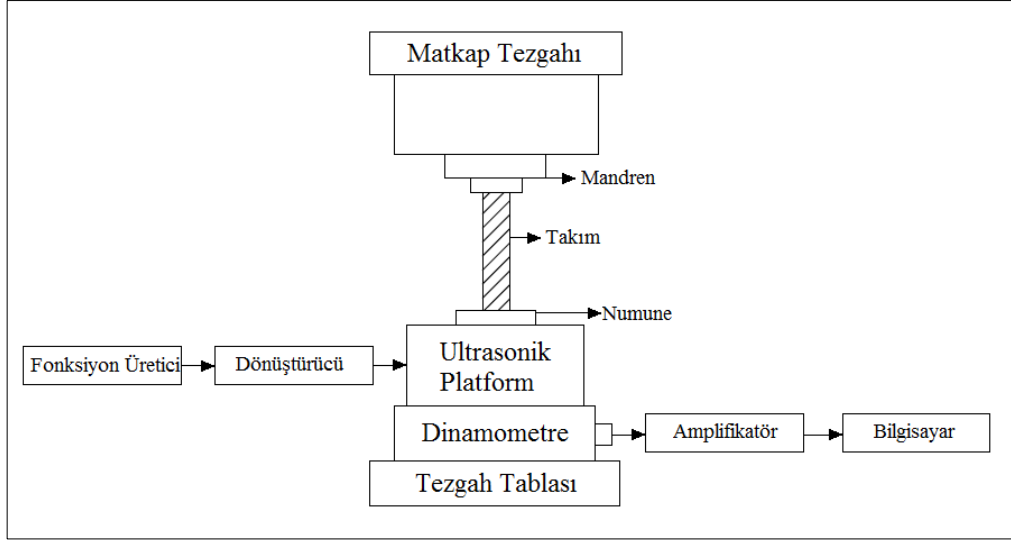
şekil 6.10. Delme dinamometresinin matkap tablasına bağlanması



Şekil 6.11. Ultrasonik titreşim platformunun delme dinamometresinin üzerine bağlanması



Şekil 6.12. Deney ekipmanlarının genel görünümü

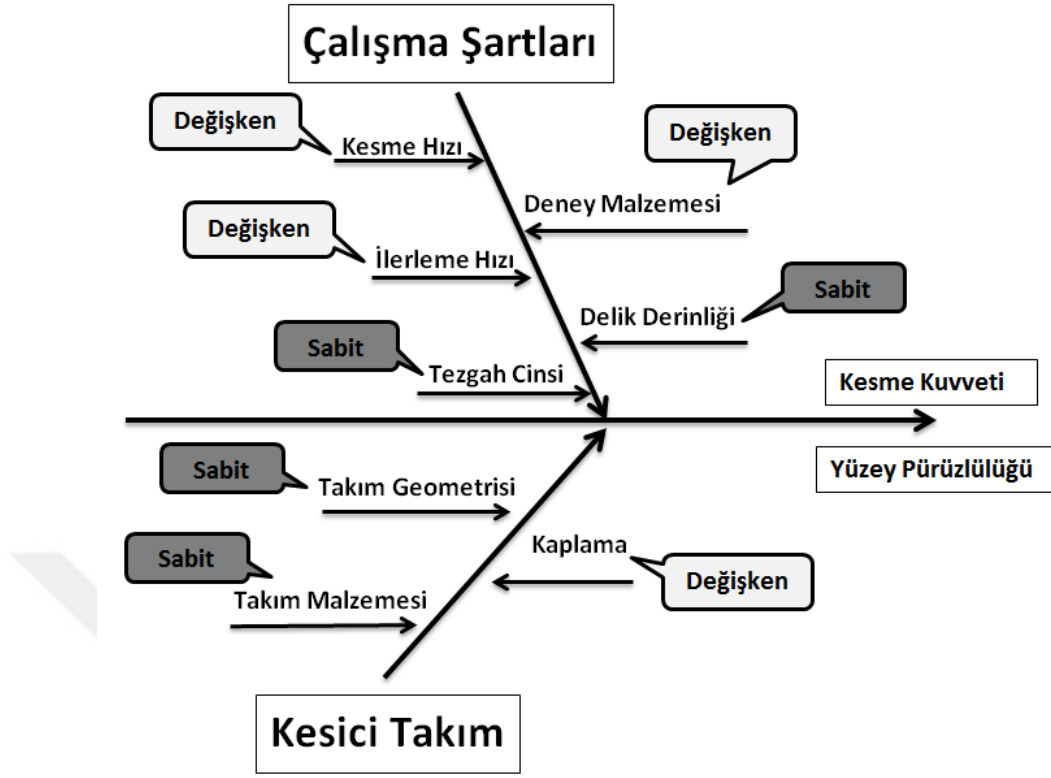


Şekil 6.13. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

Deneyleerin gerçekleştirildiği her iki aşama için de iki farklı malzeme ve iki farklı takım türü kullanılmıştır. Deneyleerin birinci aşaması olan konvansiyonel delme için 3 farklı kesme hızı ve 3 farklı ilerleme hızı tercih edilmiştir. Birinci aşama için oluşturulan kesme parametreleri Tablo 6.6’da verilmiştir. Konvansiyonel delme için oluşturulan sebep sonuç diyagramı ise Şekil 6.14’de gösterilmiştir.

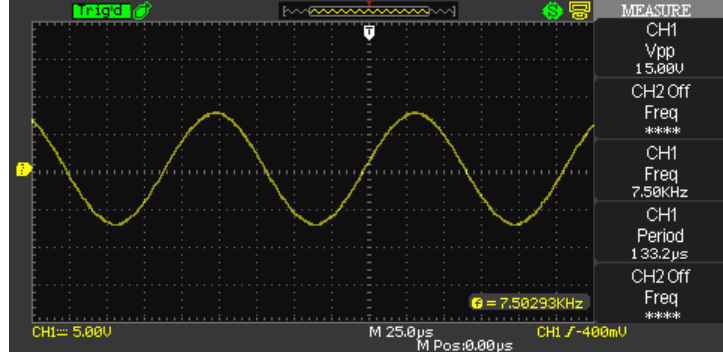
Tablo 6.6. Konvansiyonel delme için kesme parametreleri

Malzeme	AA6061-T6	AA6061-T1	
Kesici Takım	HSS-G	HSS-G TiN	
İlerleme Oranı (mm/dev)	0,1	0,2	0,3
Dönme Hızı (dev/dak)	535	1070	1520

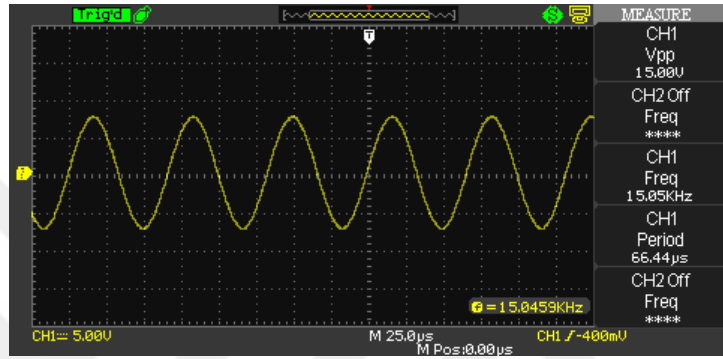


Şekil 6.14. Konvansiyonel delme için sebep sonuç diyagramı

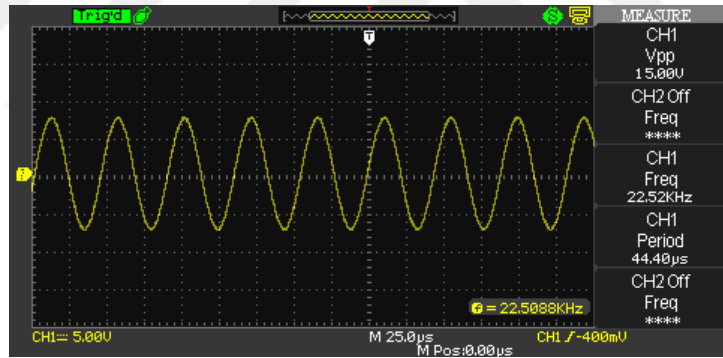
Deneilerin ikinci aşaması olan ultrasonik titreşimli delme için ise sabit ilerleme hızında 3 farklı dönme hızı uygulanmıştır. Delme için oluşturulan titreşim dalgaları ise 3 farklı titreşim frekansında ve sabit genlikte (3 μm) uygulanmıştır (Şekil 6.15). İkinci aşama için oluşturulan kesme parametreleri Tablo 6.7’de verilmiştir. Ultrasonik titreşimli delme için oluşturulan sebep sonuç diyagramı Şekil 6.16’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

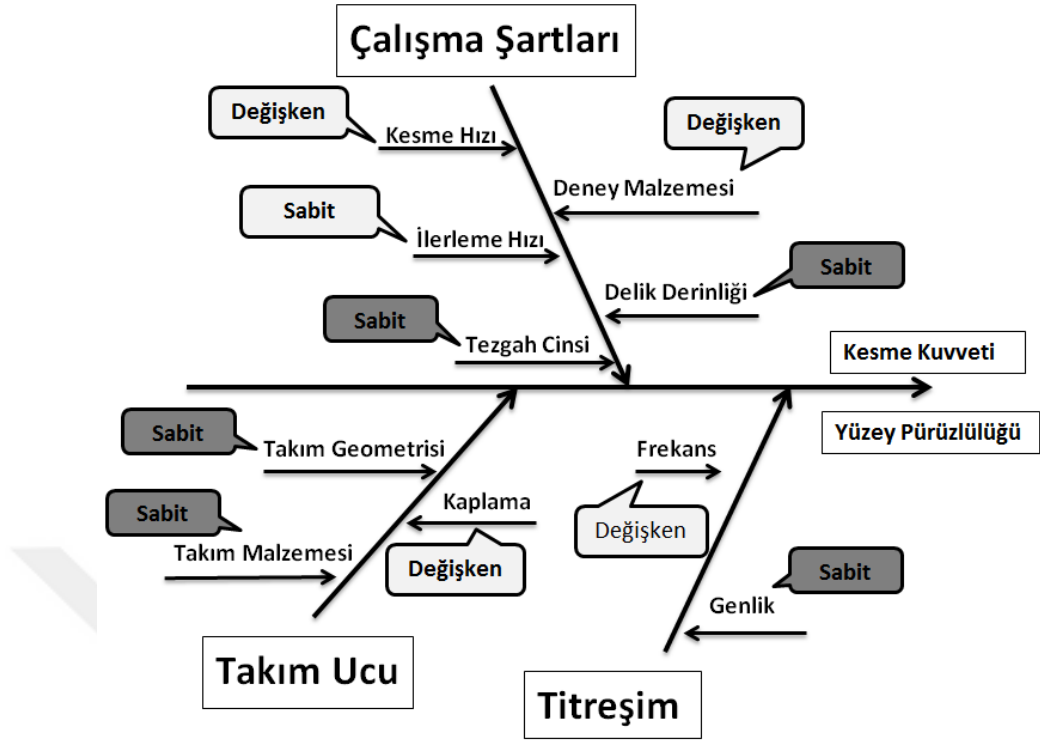


(c)

Şekil 6.15. Sabit genlikli titreşim dalgaları (a) 7,5 KHz (b) 15 KHz (c) 22,5 KHz

Tablo 6.7. Ultrasonik titreşimli delme için kesme parametreleri

Malzeme	AA6061-T6	AA6061-T1		
Kesici Takım	HSS-G	HSS-G TiN		
Dönme Hızı (dev/dak)	535	1070	1520	
Frekans (KHz)	0	7,5	15	22,5
Genlik (µm)	0	3		



Şekil 6.16. Ultrasonik titreşimli delme için sebep sonuç diyagramı

Toplamda 72 farklı deney gerçekleştirilmiştir.

6.3. Deney Sonuçları

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerleri Ek-A'da verilmiştir. Delinen deney numunelerine ait bir görüntü Şekil 6.17'de gösterilmiştir.



Şekil 6.17. Delinen deney numunelerine ait bir fotoğraf

6.4. Deneý Sonuçlarının Deęerlendirilmesi

Deneý sonuçlarının deęerlendirilmesinde tam faktöriyel deneý tasarımı yöntemi kullanılmıřtır. Deneý tasarımı Minitab 17 isimli paket programı aracılıęı ile yapılmıřtır. Konvansiyonel yönteme göre yapılan deneýler için kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri Tablo 6.8’de gösterilmiřtir. Ultrasonik titreřimli delme yöntemine göre yapılan deneýlerde kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri ise Tablo 6.9’da gösterilmiřtir. AA6061-T6 ve AA6061-T1 için de aynı kontrol faktörleri ve seviyeleri kullanılmıřtır.

Tablo 6.8. Konvansiyonel delme için oluşturulan kontrol faktörleri ve seviyeleri

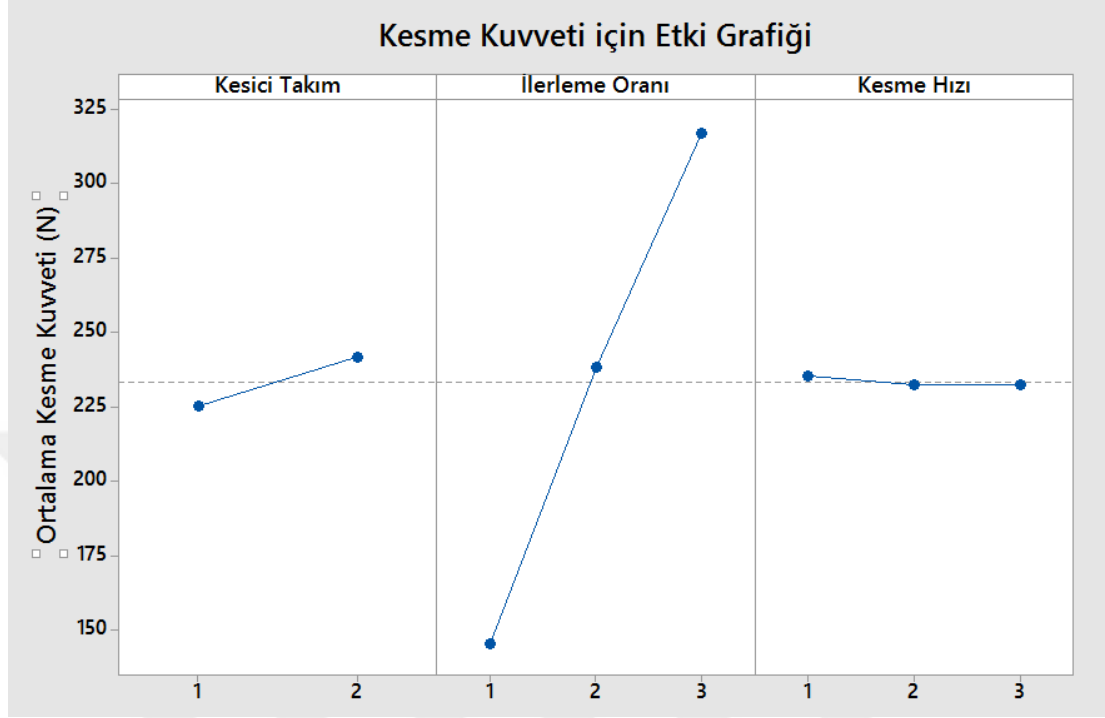
FAKTÖRLER	1. SEVİYE	2. SEVİYE	3. SEVİYE
1) KESİCİ TAKIM	HSS-G	HSS-G TiN	-
2) İLERLEME HIZI (mm/dev)	0,1	0,2	0,3
3) KESME HIZI (dev/dk)	535	1070	1520

Tablo 6.9. Ultrasonik titreşimli delme için oluşturulan kontrol faktörleri ve seviyeleri

FAKTÖRLER	1. SEVİYE	2. SEVİYE	3. SEVİYE	4. SEVİYE
1) KESİCİ TAKIM	HSS-G	HSS-G TiN	-	-
2) KESME HIZI (dev/dk)	535	1070	1520	-
3) FREKANS (KHz)	0	7,5	15	22,5

Deneý sonuçlarında elde edilen kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüęü deęerleri ayrı ayrı deęerlendirilmiřtir. Ayrıca tam faktöriyel yönteme göre yapılan deneý tasarımında elde edilen sonuçlar %95 güven aralıęında varyans analizi (ANOVA) ile deęerlendirilmiřtir.

6.4.1. AA6061-T6'nın konvansiyonel yöntemle göre delinmesinde kesme kuvveti analizleri



Şekil 6.18. AA6061-T6'nın konvansiyonel yöntemle göre delinmesinde kesme kuvveti etki grafiği

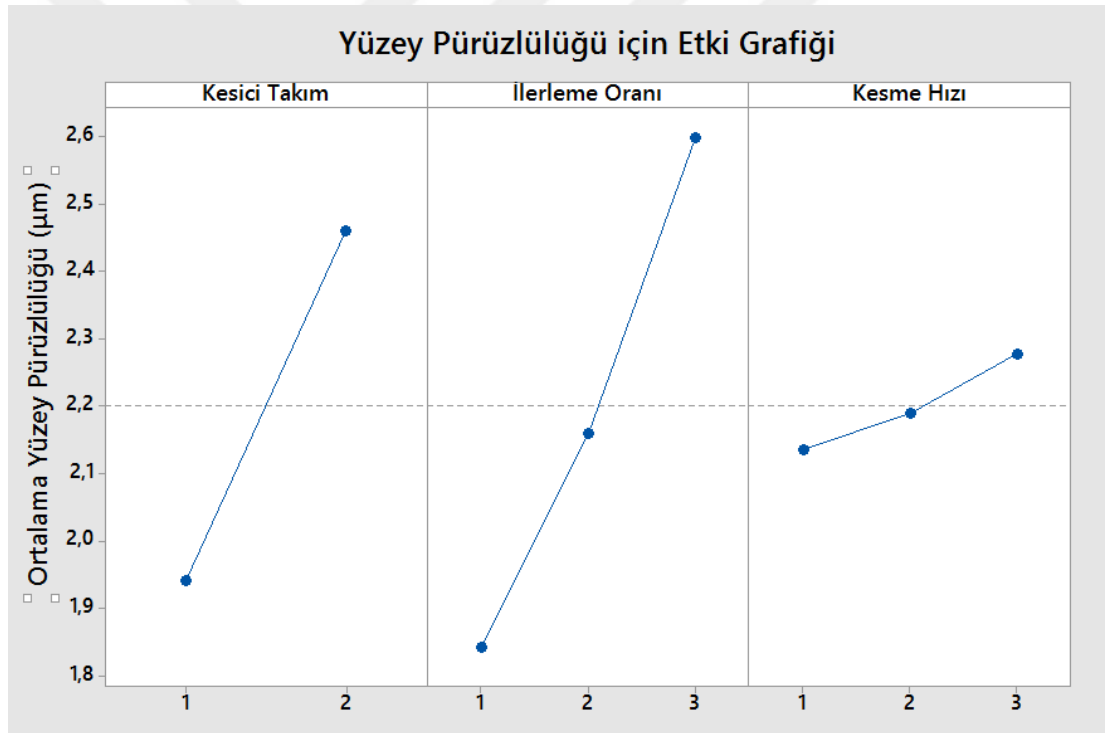
Şekil 6.18'de AA6061-T6'nın konvansiyonel yöntemle göre delinmesinde kesme kuvveti için etki grafikleri görülmektedir. Buna göre; kesme kuvvetinin değişmesine sebep olan en büyük etkinin ilerleme oranı olduğu görülmektedir. Kesici takımın ise ikinci derece de etkili olduğu söylenebilir. Kesme hızının kesme kuvvetine gözle görülür bir etkisinin olmadığı açıkça görülmektedir.

Tablo 6.10'da AA6061-T6'nın konvansiyonel yöntemle göre delinmesinde kesme kuvvetlerinin varyans analizi gösterilmiştir. Buna göre kesici takımın ve ilerleme oranının kesme kuvvetinin değişmesinde anlamlı birer değişken olduğu, ancak kesme hızının anlamlı bir değişken olmadığı görülmektedir.

Tablo 6.10. AA6061-T6'nın konvansiyonel yöntemle göre delinmesinde kesme kuvvetlerinin varyans analizi

Varyasyon Kaynağı	SD	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Oranı	P Değeri
Model	5	89654	17930,8	404,2	0
Doğrusal	5	89654	17930,8	404,2	0
Kesici Takım	1	1184,2	1184,2	26,7	0
İlerleme Oranı	2	88437	44218,7	996,79	0
Kesme Hızı	2	32,4	16,2	0,37	0,701
Hata	12	532,3	44,4		
Toplam	17	90186			

6.4.2. AA6061-T6'nın konvansiyonel yöntemle göre delinmesinde yüzey pürüzlülüğü analizleri



Şekil 6.19. AA6061-T6'nın konvansiyonel yöntemle göre delinmesinde yüzey pürüzlülüğü etki grafiği

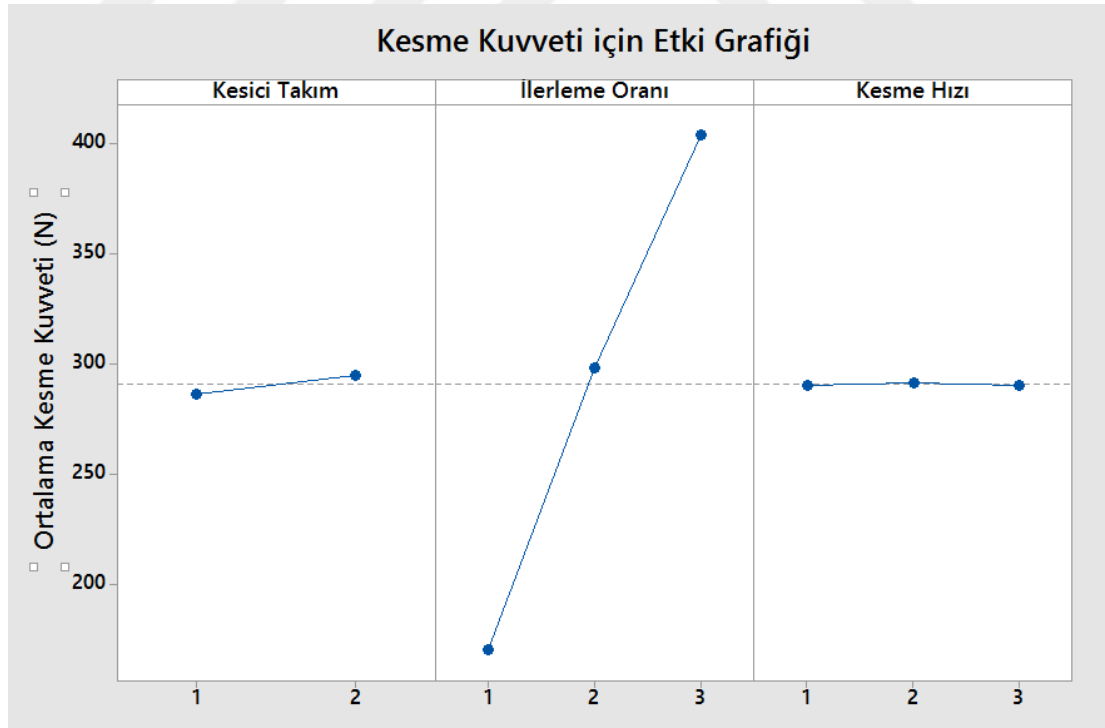
Şekil 6.19'da AA6061-T6'nın konvansiyonel yöntemle göre delinmesinde yüzey pürüzlülüğü için etki grafikleri görülmektedir. Buna göre her üç faktöründe yüzey pürüzlülüğü değerine etki ettiği ancak en büyük etkinin ilerleme oranında olduğu görülmektedir.

Tablo 6.11’de AA6061-T6’nın konvansiyonel yönteme göre delinmesinde yüzey przllg değerlerinin varyans analizi verilmiştir. Buna göre kesici takımın ve ilerleme oranının yüzey przllgnn değişmesinde anlamlı birer değişken olduğu ancak kesme hızının anlamlı bir değişken olmadığı görülmektedir.

Tablo 6.11. AA6061-T6’nın konvansiyonel yönteme göre delinmesinde yüzey przllg değerlerinin varyans analizi

Varyasyon Kaynağı	SD	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Oranı	P Değeri
Model	5	2,9977	0,59954	34,23	0
Doğrusal	5	2,9977	0,59954	34,23	0
Kesici Takım	1	1,2116	1,21161	69,17	0
İlerleme Oranı	2	1,7249	0,86244	49,24	0
Kesme Hızı	2	0,0612	0,03061	1,75	0,216
Hata	12	0,2102	0,01752		
Toplam	17	3,2079			

6.4.3. AA6061-T1’in konvansiyonel yönteme göre delinmesinde kesme kuvveti analizleri



şekil 6.20. AA6061-T1’in konvansiyonel yönteme göre delinmesinde kesme kuvveti etki grafiği

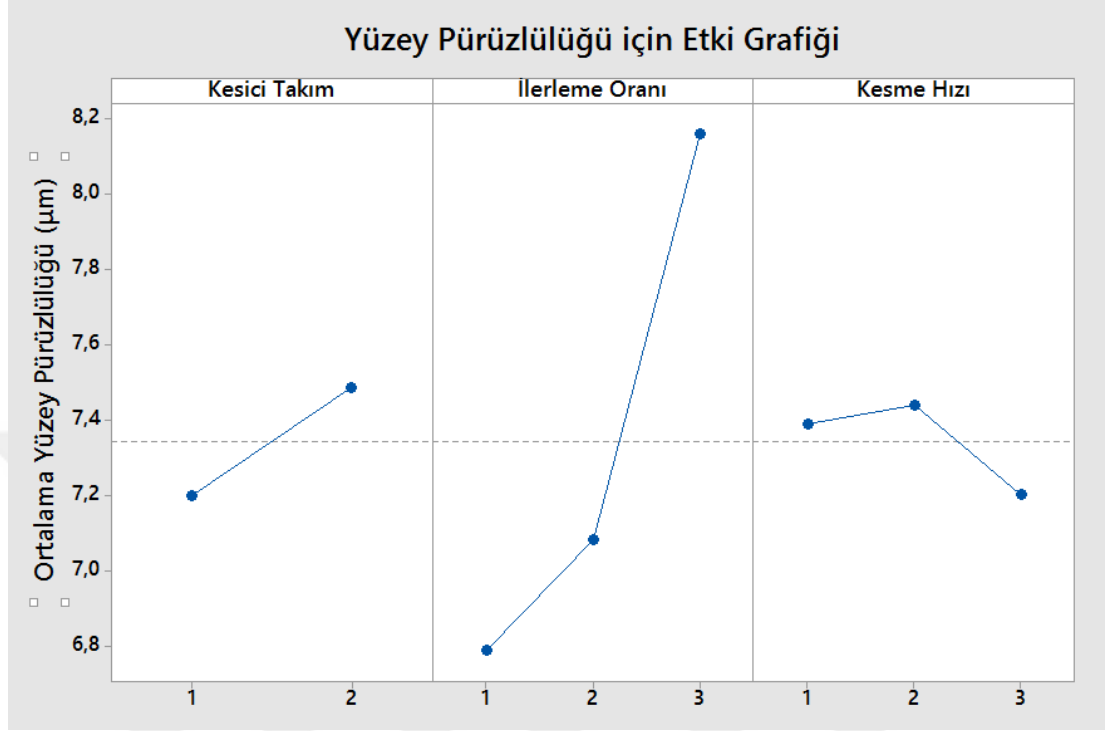
Şekil 6.20’de AA6061-T1’in konvansiyonel yönteme göre delinmesinde kesme kuvveti için etki grafikleri görülmektedir. Buna göre; kesme kuvvetini değiştiren en büyük değişkenin ilerleme oranı olduğu görülmektedir. Kesici takımın çok az da olsa bir etkisinin olduğu söylenebilir. Kesme hızının ise kesme kuvvetleri üzerinde bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

Tablo 6.12’de AA6061-T1’in konvansiyonel yönteme göre delinmesinde kesme kuvvetlerinin varyans analizi gösterilmiştir. Buna göre kesici takımın ve ilerleme oranının kesme kuvvetinin değişmesinde etkili olduğu ancak kesme hızının anlamlı bir değişken olmadığı görülmektedir.

Tablo 6.12. AA6061-T1’in konvansiyonel yönteme göre delinmesinde kesme kuvvetlerinin varyans analizi

Varyasyon Kaynağı	SD	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Oranı	P Değeri
Model	5	164408	32881,5	446,02	0
Doğrusal	5	164408	32881,5	446,02	0
Kesici Takım	1	347	346,7	4,7	0,050
İlerleme Oranı	2	164058	82029,1	1112,68	0
Kesme Hızı	2	3	1,4	0,02	0,981
Hata	12	885	73,7		
Toplam	17	165292			

6.4.4. A6061-T1'in konvansiyonel yöntemle göre delinmesinde yüzey pürüzlülüğü analizleri



Şekil 6.21. AA6061-T1'in konvansiyonel yöntemle göre delinmesinde yüzey pürüzlülüğü etki grafiği

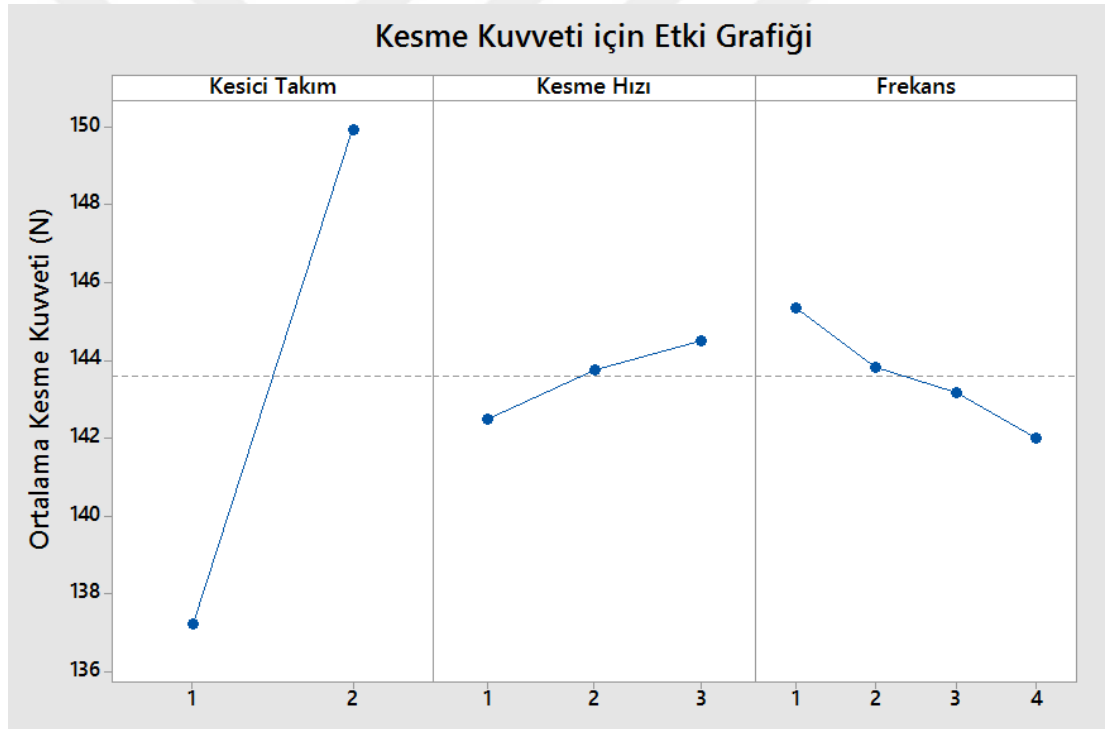
Şekil 6.21'de AA6061-T1'in konvansiyonel yöntemle göre delinmesinde yüzey pürüzlülüğü için etki grafikleri görülmektedir. Buna göre; kesme kuvvetinin değişmesine sebep olan en büyük etkinin ilerleme oranı olduğu görülmektedir. Kesici takımın yüzey pürüzlülüğünün değişmesine ikinci dereceden etkili olduğu söylenebilir. Kesme hızının ise kararsız bir halde olduğu görülmektedir.

Tablo 6.13'de AA6061-T1'in konvansiyonel yöntemle göre delinmesinde yüzey pürüzlülüğünü değerlerinin varyans analizi gösterilmiştir. Buna göre ilerleme oranının yüzey pürüzlülüğünün değişmesinde anlamlı bir değişken olduğu ancak diğer iki değişkenin anlamlı birer değişken olmadığı görülmektedir.

Tablo 6.13. AA6061-T1'in konvansiyonel yöntemle göre delinmesinde yüzey pürüzlülüğü değerlerinin varyans analizi

Varyasyon Kaynağı	SD	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Oranı	P Değeri
Model	5	6,7855	1,3571	7,13	0,003
Doğrusal	5	6,7855	1,3571	7,13	0,003
Kesici Takım	1	0,3727	0,37267	1,96	0,187
İlerleme Oranı	2	6,228	3,11401	16,35	0
Kesme Hızı	2	0,1848	0,09241	0,49	0,627
Hata	12	2,2849	0,19041		
Toplam	17	9,0704			

6.4.5. AA6061-T6'nın ultrasonik titreşimli delinmesinde kesme kuvveti analizleri



Şekil 6.22. AA6061-T6'nın ultrasonik titreşimli delinmesinde kesme kuvveti etki grafiği

Şekil 6.22'de AA6061-T6'nın ultrasonik titreşimli delinmesinde kesme kuvveti için etki grafikleri görülmektedir. Buna göre; her üç faktöründe kesme kuvvetini değiştirdiği ve en büyük etkinin kesici takım da olduğu görülmektedir.

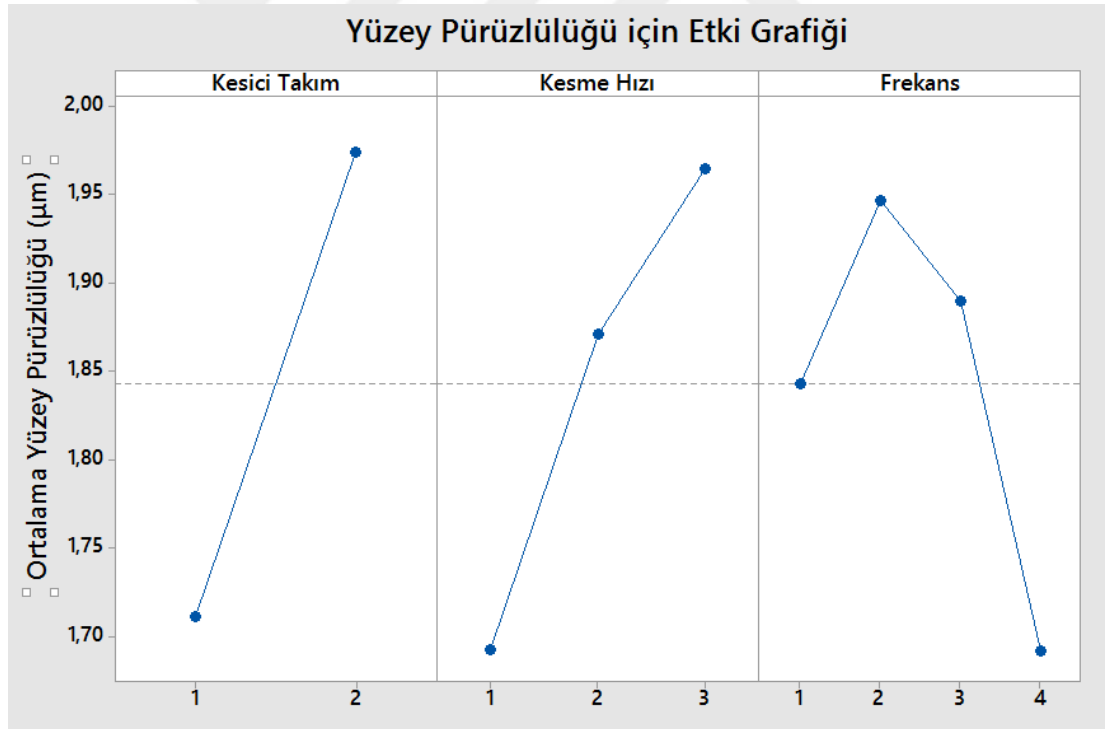
Tablo 6.14'de AA6061-T6'nın ultrasonik titreşimli delinmesinde kesme kuvvetlerinin varyans analizi gösterilmiştir. Buna göre kesici takımın anlamlı bir

değişken olduğu ancak kesme hızı ve frekans değişkenlerinin anlamlı birer değişken olmadığı görülmektedir.

Tablo 6.14. AA6061-T6'nın ultrasonik titreşimli delinmesinde kesme kuvvetlerinin varyans analizi

Varyasyon Kaynağı	SD	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Oranı	P Değeri
Model	6	1013,8	168,972	5,79	0,002
Doğrusal	6	1013,8	168,972	5,79	0,002
Kesici Takım	1	962,67	962,667	32,99	0
Kesme Hızı	2	16,33	8,167	0,28	0,759
Frekans	3	34,83	11,611	0,4	0,756
Hata	17	496	29,176		
Toplam	23	1509,8			

6.4.6. 6061-T6'nın ultrasonik titreşimli delinmesinde yüzey pürüzlülüğü analizleri



Şekil 6.23. AA6061-T6'nın ultrasonik titreşimli delinmesinde yüzey pürüzlülüğü etki grafiği

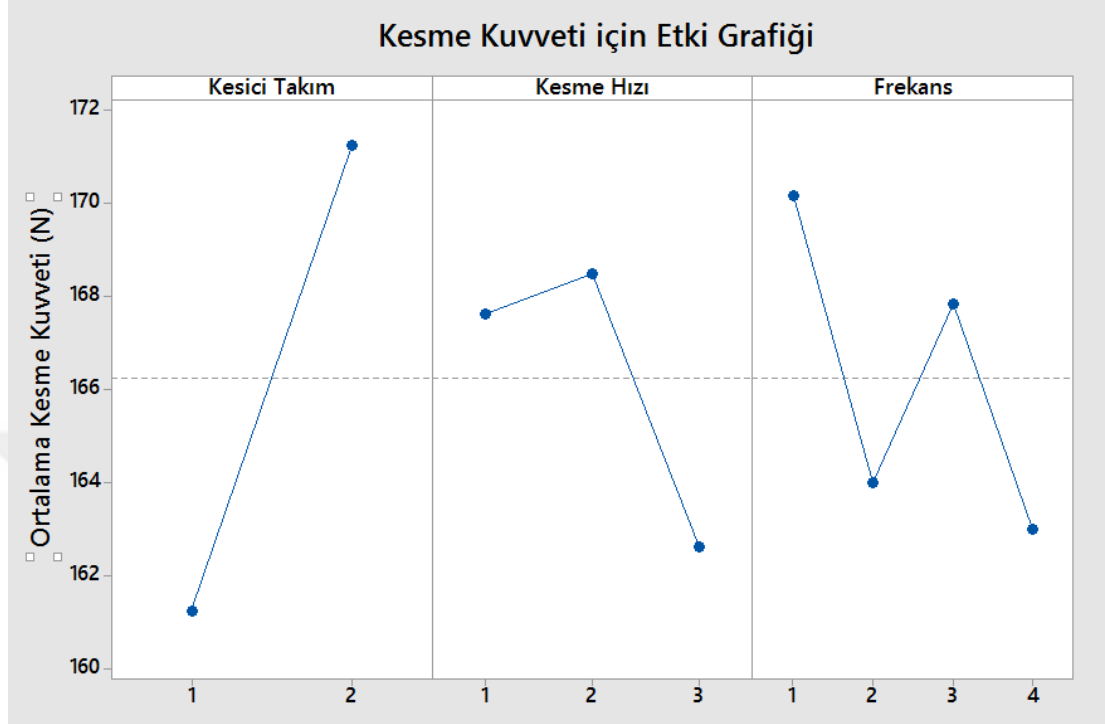
Şekil 6.23'te AA6061-T6'nın ultrasonik titreşimli delinmesinde yüzey pürüzlülüğü için etki grafikleri görülmektedir. Buna göre; yüzey pürüzlülüğü değerlerinin değişmesinde her üç faktöründe etkili olduğu söylenebilir.

Tablo 6.15'de AA6061-T6'nın ultrasonik titreşimli delinmesinde kesme kuvvetlerinin varyans analizi gösterilmiştir. Buna göre kesici takımın anlamlı bir değişken olduğu ancak kesme hızı ve frekans değişkenlerinin anlamlı birer değişken olmadığı görülmektedir.

Tablo 6.15. AA6061-T6'nın ultrasonik titreşimli delinmesinde yüzey pürüzlülüğü değerlerinin varyans analizi

Varyasyon Kaynağı	SD	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Oranı	P Değeri
Model	6	0,9352	0,15587	2,95	0,037
Doğrusal	6	0,9352	0,15587	2,95	0,037
Kesici Takım	1	0,4134	0,41344	7,82	0,012
Kesme Hızı	2	0,3067	0,15333	2,9	0,082
Frekans	3	0,2151	0,07172	1,36	0,289
Hata	17	0,8983	0,05284		
Toplam	23	1,8335			

6.4.7. AA6061-T1'in ultrasonik titreşimli delinmesinde kesme kuvveti analizleri



Şekil 6.24. AA6061-T1'in ultrasonik titreşimli delinmesinde kesme kuvveti etki grafiği

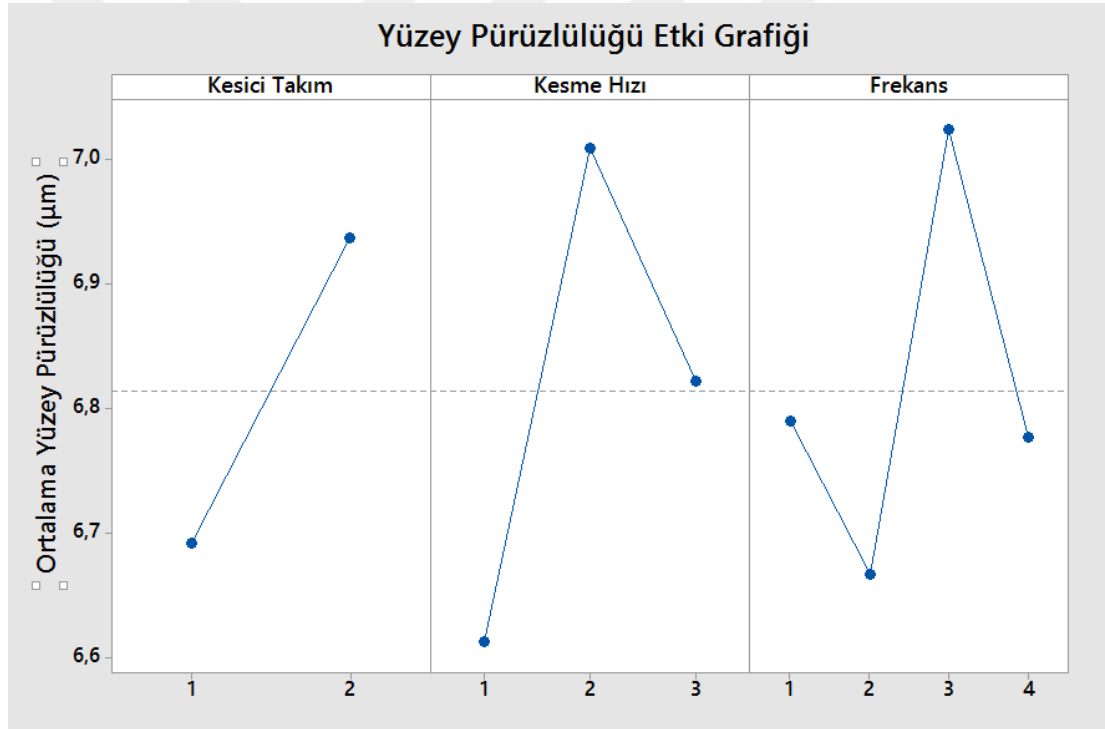
Şekil 6.24'te AA6061-T1'in ultrasonik titreşimli delinmesinde kesme kuvveti için etki grafikleri görülmektedir. Buna göre; her üç değişkenin de kesme kuvvetini değiştirdiği ancak kesme hızı ve frekans faktörlerinin kararsız bir değişim oluşturduğu söylenebilir.

Tablo 6.16'da AA6061-T1'in delinmesinde kesme kuvvetlerinin varyans analizi gösterilmiştir. Buna göre kesici takımın anlamlı bir değişken olduğu ancak kesme hızı ve frekans değişkenlerinin anlamlı birer değişken olmadığı görülmektedir.

Tablo 6.16. AA6061-T1'in ultrasonik titreşimli delinmesinde kesme kuvvetlerinin varyans analizi

Varyasyon Kaynağı	SD	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Oranı	P Değeri
Model	6	961,6	160,26	5,04	0,004
Doğrusal	6	961,6	160,26	5,04	0,004
Kesici Takım	1	600	600	18,86	0
Kesme Hızı	2	160,7	80,37	2,53	0,11
Frekans	3	200,8	66,94	2,1	0,138
Hata	17	540,9	31,82		
Toplam	23	1502,5			

6.4.8. AA6061-T1'in ultrasonik titreşimli delinmesinde yüzey pürüzlülüğü analizleri



Şekil 6.25. AA6061-T1'in ultrasonik titreşimli delinmesinde yüzey pürüzlülüğü etki grafiği

Şekil 6.25'te AA6061-T1'in ultrasonik titreşimli delinmesinde kesme kuvveti için etki grafikleri görülmektedir. Buna göre; her üç değişkenin de kesme kuvvetini değiştirdiği ancak kesme hızı ve frekans faktörlerinin kararsız bir değişime sebep olduğu söylenebilir.

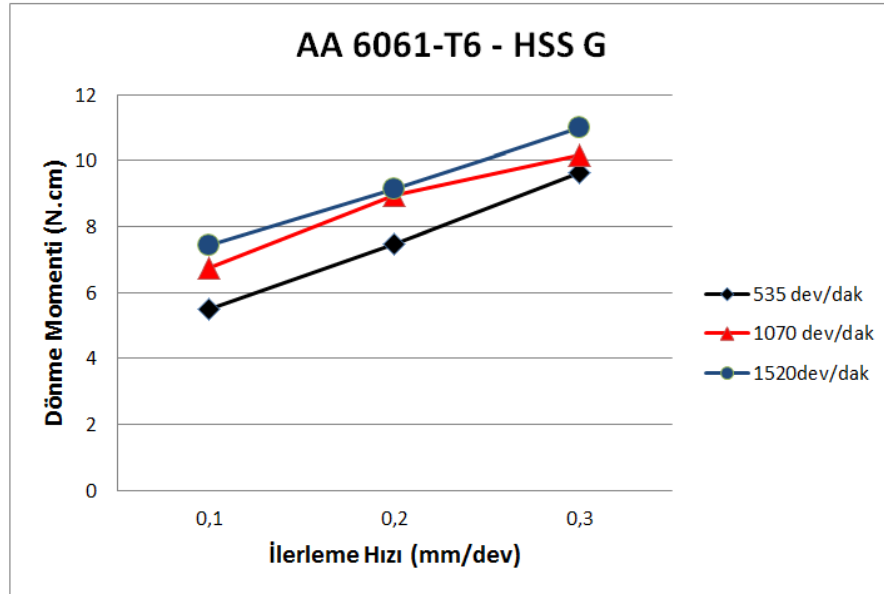
Tablo 6.17’de AA6061-T1’in ultrasonik titreşimli delinmesinde yüzey pürüzlülüğü değerlerinin varyans analizi gösterilmiştir. Buna göre kesici takım ve kesme hızının anlamlı birer değişken olduğu ancak frekansın anlamlı bir değişken olmadığı görülmektedir.

Tablo 6.17. AA6061-T1'in ultrasonik titreşimli delinmesinde yüzey pürüzlülüğü değerlerinin varyans analizi

Varyasyon Kaynağı	SD	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F Oranı	P Değeri
Model	6	1,3938	0,2323	4,3	0,008
Doğrusal	6	1,3938	0,2323	4,3	0,008
Kesici Takım	1	0,3601	0,36015	6,66	0,019
Kesme Hızı	2	0,6287	0,31433	5,81	0,012
Frekans	3	0,405	0,13499	2,5	0,095
Hata	17	0,9194	0,05408		
Toplam	23	2,3132			

6.4.9. AA6061-T6’nın HSS-G kesici takım ile delinmesinde elde edilen delme momentleri

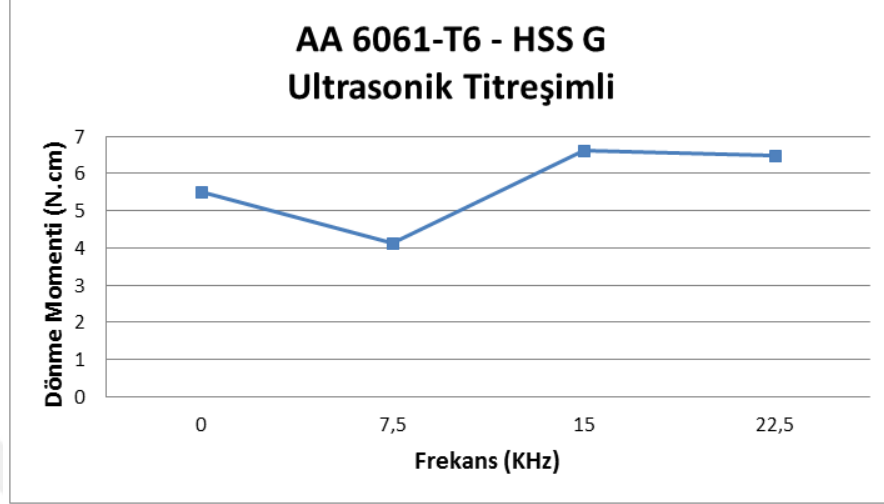
Bu bölümde ultrasonik titreşimin delme momentlerine olan etkilerine değinilmiştir.



Şekil 6.26. AA6061-T6’nın HSS-G kesici takım ile konvansiyonel yöntemle delinmesinde elde edilen delme momentleri grafikleri

AA6061-T6 malzemesinin HSS-G kesici takım ile konvansiyonel yöntemle delinmesinde elde edilen delme momentleri grafikleri Şekil 6.26’da gösterilmiştir.

Buna göre ilerleme oranının artması delme momentlerini artırmaktadır. Ayrıca dönme hızının da delme momentlerinin artmasına az da olsa sebep olduğu söylenebilir.



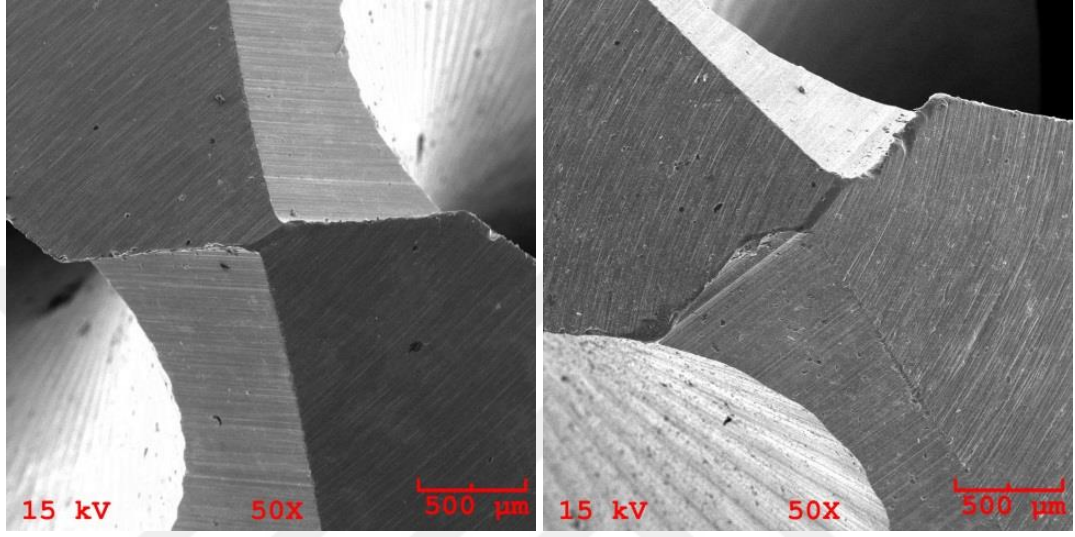
Şekil 6.27. AA6061-T6 malzemesinin HSS-G kesici takım ile ultrasonik titreşimli delinmesin de elde edilen delme momenti grafiği

AA6061-T6 malzemesinin HSS-G kesici takım ile ultrasonik titreşimli delinmesin de elde edilen delme momenti grafiği Şekil 6.27’de verilmiştir. Bu grafik 0,1 mm/dev ve 535 dev/dak kesme şartlarında elde edilmiştir. Buna göre farklı titreşim frekanslarının delme momentini hem azaltabileceği hem de artırabileceği söylenebilir.

6.4.10. Takım aşınmalarının değerlendirilmesi

Takım aşınması talaşlı imalat teknolojilerinde ve delme operasyonunda kaçınılmaz bir durumdur. Kesici takımlarda sürekli bir doğal aşınma olur. Bu bölümde AA6061-T6 alaşımının HSS-G ve HSS-G TiN ile delinmesinde meydana gelen takım aşınmalarına ultrasonik titreşimin etkileri değerlendirilmiştir. Takım aşınmalarını gözlemleyebilmek için tasarlanan deneyler sabit ilerleme oranında (0,1 mm/dev), sabit kesme hızında (1520 dev/dk), ultrasonik titreşimli delme için ise sabit frekansta (22,5 kHz) ve sabit genlikte (3 µm) yapılmıştır. Konvansiyonel delme için ve ultrasonik titreşimli delme için deneyler aynı takımla 5’er defa tekrarlanmıştır.

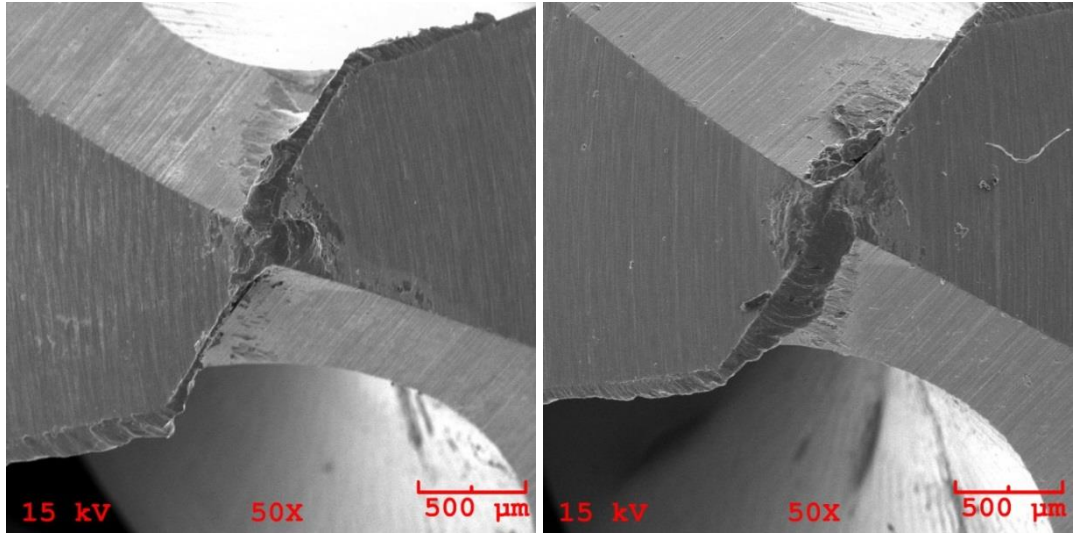
Takım aşınmaları SEM ile görüntülenmiş ve analizler bu görüntüler üzerinden karşılaştırmalı olarak yapılmıştır. Aşınmayı daha iyi gözlemleyebilmek için takımların kullanılmadan önceki görüntüleri önceden görüntülenmiş (Şekil 6.28) ve konvansiyonel yöntem için ve ultrasonik titreşimli delme için oluşan takım aşınmaları ayrı ayrı değerlendirilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 6.28. Kesici takımların kullanılmadan önceki SEM görüntüleri (a) HSS-G (b) HSS-G TiN

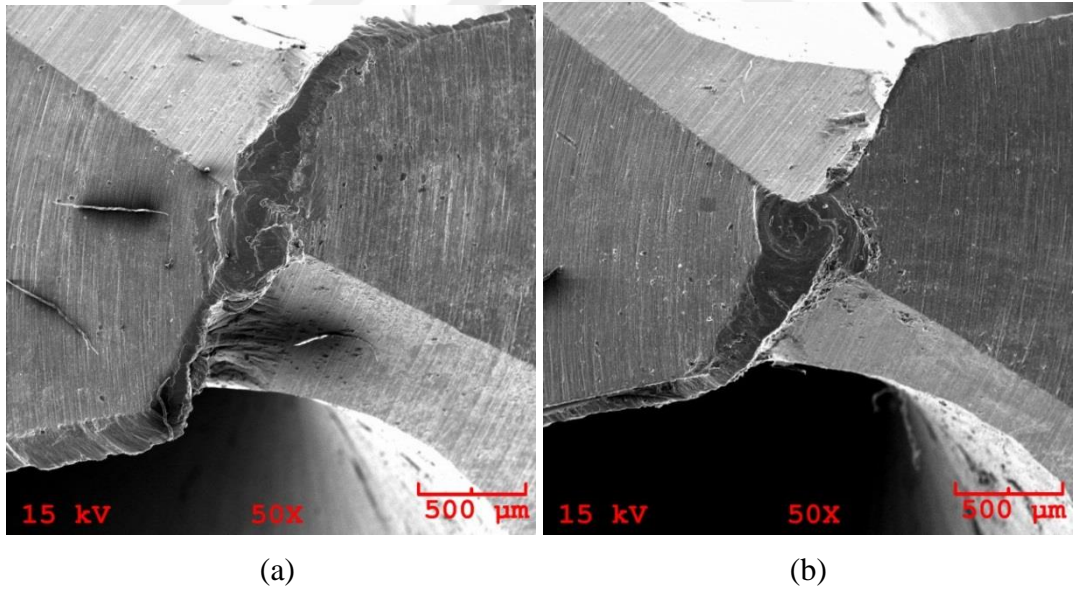


(a)

(b)

Şekil 6.29. HSS-G için SEM görüntüleri (a) konvansiyonel delme (b) ultrasonik titreşimli delme

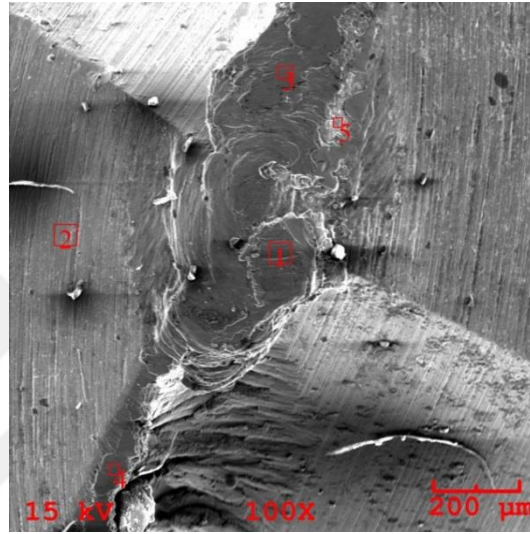
Şekil 6.29 (a)'da HSS-G için konvansiyonel delmede elde edilmiş SEM görüntüleri gösterilmiştir. Bu görüntü Şekil 6.28 (a) ile kıyaslandığında takım ucunda adhesif aşınmalar olduğu görülmektedir. Bu tip aşınmalar BUE (built-up edge, ağız birikimi oluşumu) oluşumu olarak adlandırılır. Genellikle yumuşak malzemelerin işlenmesi sırasında görülür. BUE oluşumu; işlenen malzemenin kesme kenarlarına çok güçlü yapışmasında, bunların birikmesi ve çıkıntı oluşturmasıyla meydana gelir [51]. Şekil 6.29 (b)'de ise HSS-G için ultrasonik titreşimli delmede elde edilmiş SEM görüntüsü verilmiştir. Aynı şekilde adhesif aşınmanın takım ucunda meydana geldiği görülmektedir. Her iki yöntemle elde edilen aşınmaları kıyaslamak gerekirse, takım uçlarında BUE oluşumunun farklı noktalarda doğru yoğunlaştığı görülmektedir. Konvansiyonel delmede BUE oluşumu kesme kenarlarına doğru yoğunlaştığı görülürken, ultrasonik titreşimli delmede takım ucunda yoğunlaştığı görülmektedir. Ultrasonik titreşimin HSS-G için BUE oluşumu azalttığı düşünülmektedir.



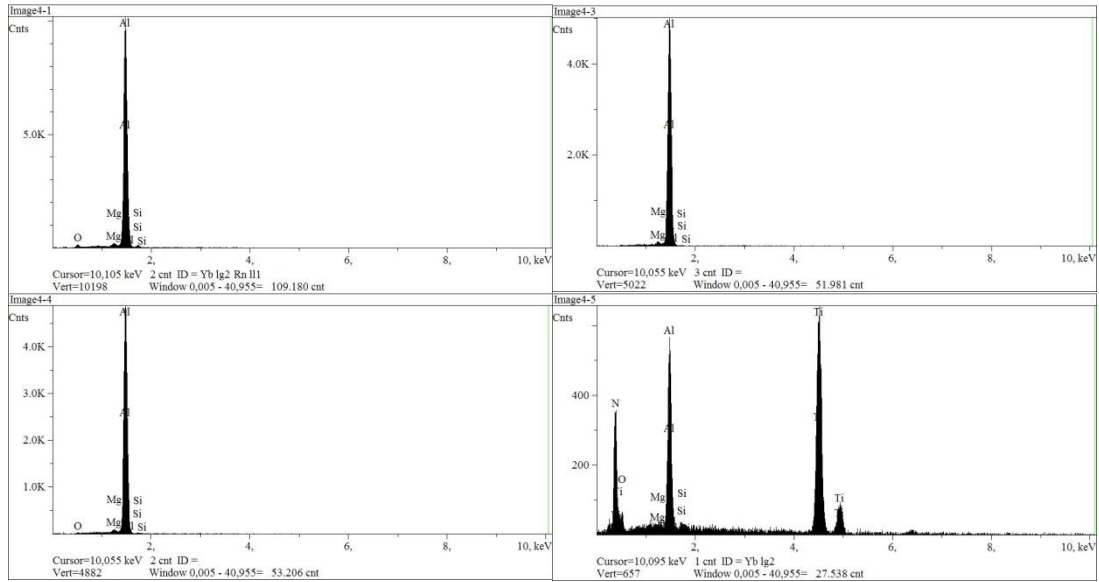
Şekil 6.30. HSS-G TiN için SEM görüntüleri (a) konvansiyonel delme (b) ultrasonik titreşimli delme

Şekil 6.30 (a)'da HSS-G TiN için konvansiyonel delmede elde edilmiş SEM görüntüleri gösterilmiştir. Bu görüntü Şekil 6.28 (b) ile kıyaslandığında takım ucunda HSS-G'de olduğu gibi adhesif aşınmalar olduğu görülmektedir. Şekil 6.30 (b)'de ise HSS-G TiN için ultrasonik titreşimli delmede elde edilmiş SEM görüntüsü verilmiştir. Aynı şekilde takım ucunda BUE oluşumu görülmektedir. Ultrasonik

titreşimli delme ile elde edilen görüntü, konvansiyonel delme için elde edilen görüntü ile kıyaslandığında BUE oluşumunda açık bir şekilde azalma görülmektedir. Özellikle kesme kenarlarına doğru BUE oluşumunun oldukça azaldığı söylenebilir. İş parçasında meydana gelen yüksek frekanslı titreşimin, kesme açısını değiştirdiği ve iş parçası malzemesinin delme sırasında kesici takıma yapışmasını engellediği düşünülmektedir. Bu sonuç ultrasonik titreşimli delme de elde edilen kesme kuvvetlerinin ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin daha iyi olduğunu açıklamaktadır.



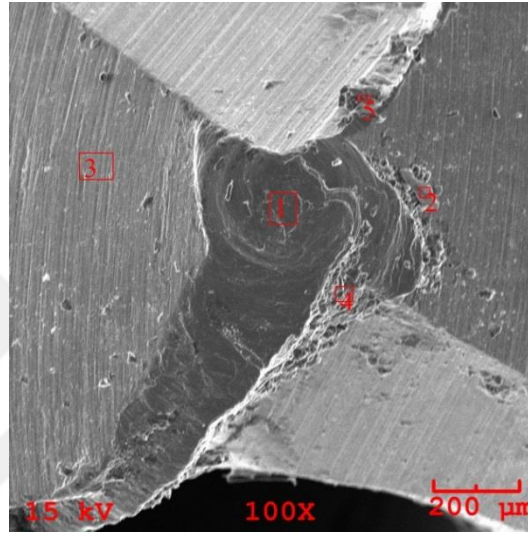
(a)



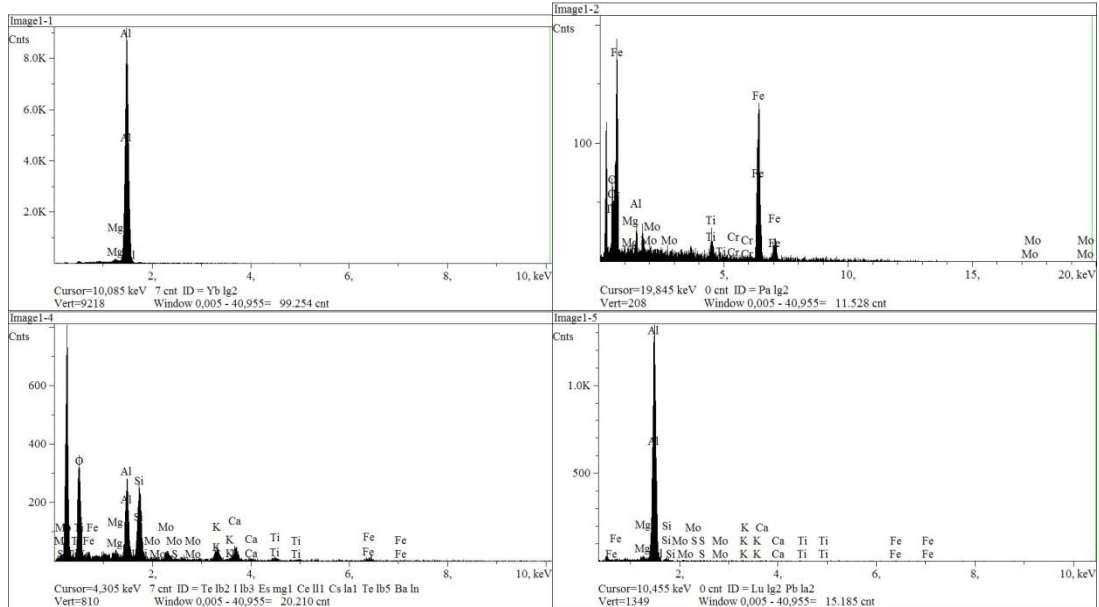
(b)

Şekil 6.31. (a) HSS-G TiN için konvansiyonel delmede takım ucunda oluşan adhesif aşınma (b) adhesif aşınmada SEM ile görüntülenen malzeme içerikleri

Şekil 6.31'de HSS-G TiN kesici takımında konvansiyonel delme sırasında oluşan adhesif aşınma mekanizması gösterilmiştir. Takıma yapışan malzeme içerikleri SEM analizi ile farklı bölgelerden kesitler olarak belirlenmiştir. Buna göre 1,3,4 ve 5 numaralı bölgelerde Al, Si, Mg saptanmıştır. İş parçası malzemesinin takıma yapıştığı açıkça görülmektedir. 3 ve 5 numaralı bölgelerde ise kesici takımın kaplandığı Ti ve N elementlerine rastlanmıştır. Ayrıca 1, 4 ve 5 numaralı bölgelerde az da olsa oksitlenme oluştuğu düşünülmektedir.



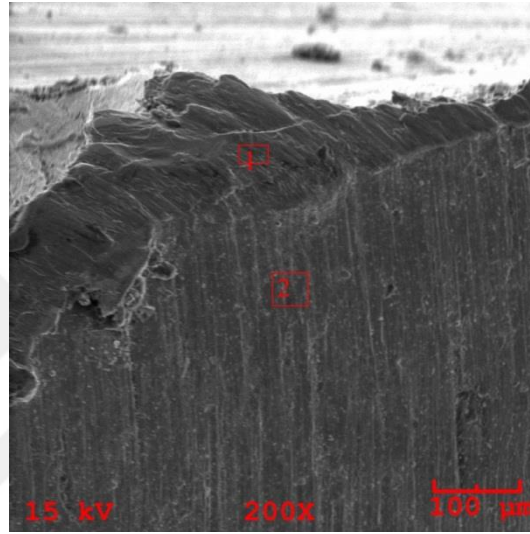
(a)



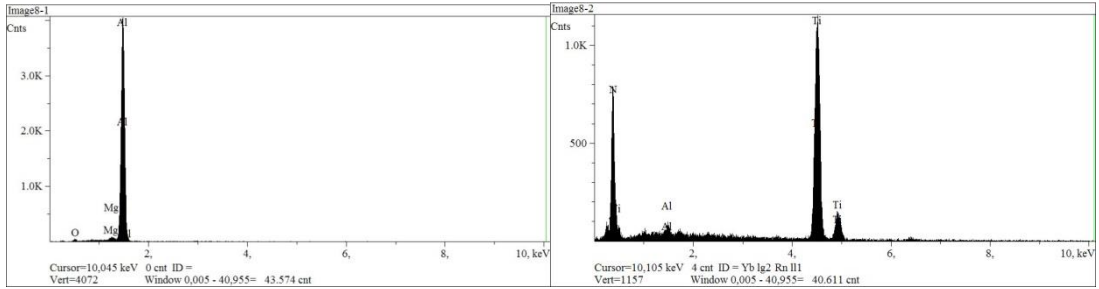
(b)

Şekil 6.32. (a) HSS-G TiN için ultrasonik titreşimli delmede takım ucunda oluşan adhesif aşınma (b) adhesif aşınmada SEM ile görüntülenen malzeme içerikleri

Şekil 6.32’de HSS-G TiN kesici takımında ultrasonik titreşimli delme sırasında oluşan adhesif aşınma mekanizması gösterilmiştir. Takıma yapışan malzeme içerikleri SEM analizi ile farklı bölgelerden kesitler olarak belirlenmiştir. Buna göre 1,2,4 ve 5 numaralı bölgelerde Al saptanmıştır. İş parçası malzemesinin takıma yapıştığı görülmektedir. 2 numaralı bölgede kesici takımın üretildiği demir (Fe) bulunmaktadır. TiN kaplamasının abrasif aşınma yoluyla kazındığı ve bu sebeple Fe’nin ortaya çıktığı düşünülmektedir.



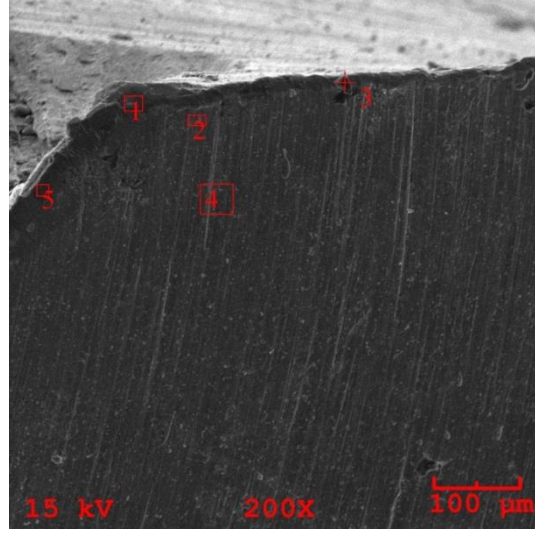
(a)



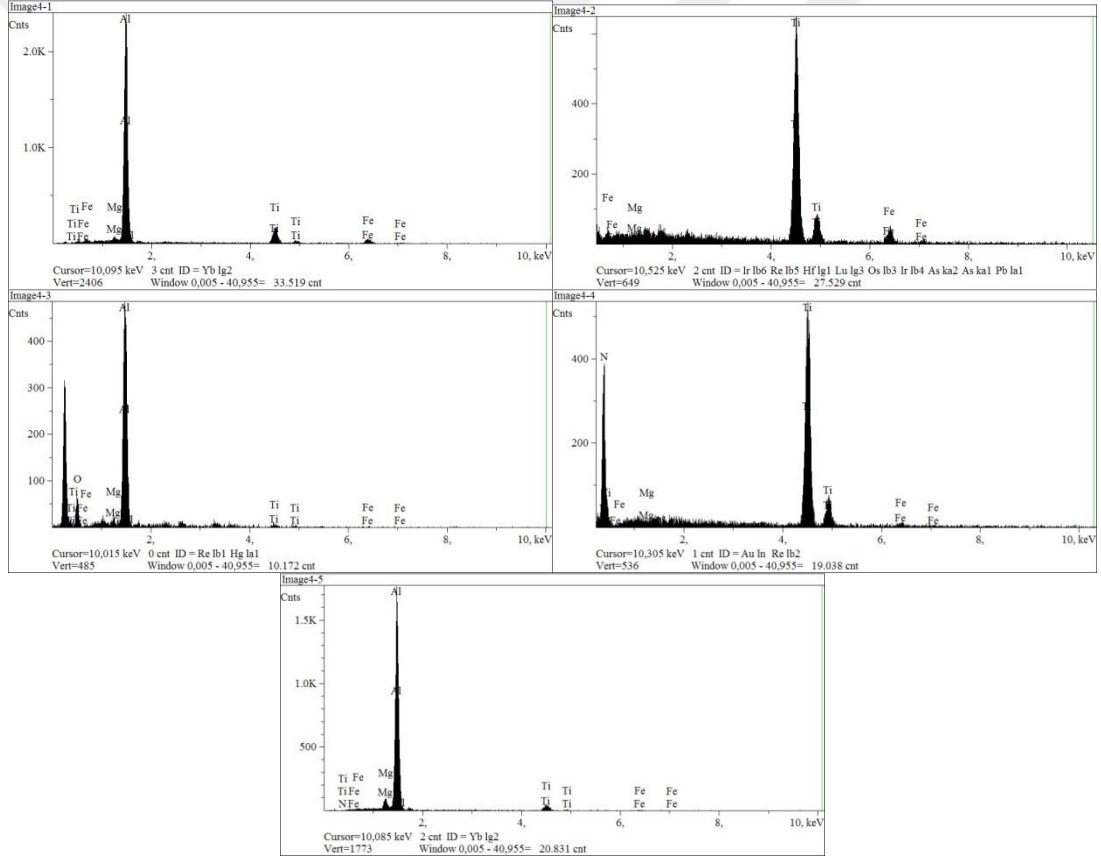
(b)

Şekil 6.33. (a) HSS-G TiN için konvansiyonel delmede birinci kesme kenarında oluşan adhesif aşınma (b) adhesif aşınmada SEM ile görüntülenen malzeme içerikleri

Şekil 6.33’te HSS-G TiN’in birinci kesme kenarında konvansiyonel delmede oluşan adhesif aşınma görülmektedir. 1 numaralı bölge de iş parçası malzemesinin takıma yapıştığı görülmektedir. 2 numaralı bölgede ise kaplama malzemesi olan titanyum ve azot bulunmuştur. Bu bölgede herhangi bir aşınma tipine rastlanmamıştır.



(a)

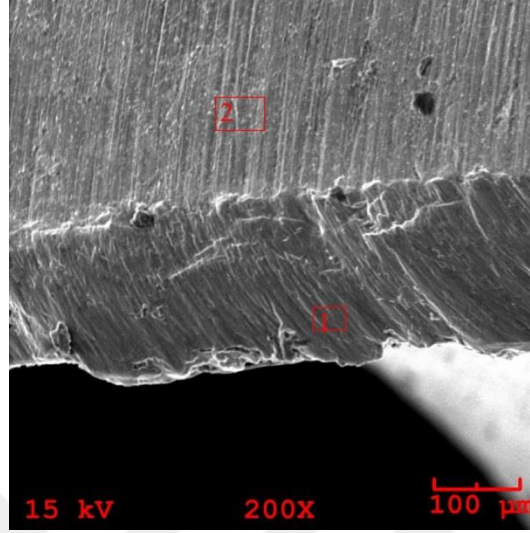


(b)

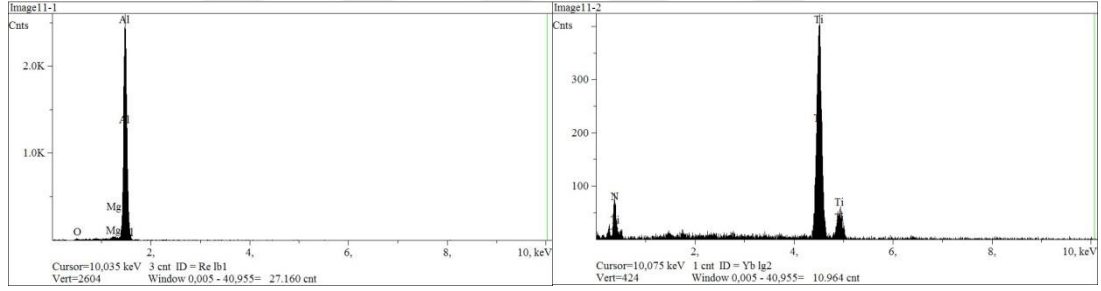
Şekil 6.34. (a) HSS-G TiN için ultrasonik titreşimli delmede birinci kesme kenarında oluşan adhesif aşınma (b) adhesif aşınmada SEM ile görüntülenen malzeme içerikleri

Şekil 6.34'te HSS-G TiN'in birinci kesme kenarında ultrasonik titreşimli delmede oluşan adhesif aşınma görülmektedir. Şekil 6.33 ile karşılaştırıldığında takıma yapışan iş parçası malzemesinin boyutsal olarak daha az olduğu görülmektedir. 1,3

ve 5 numaralı bölgelerde yapışan malzemenin yine iş parçası malzemesi (Al) olduğu görülmektedir. Ayrıca 1,2 ve 4 numaralı bölgelerde az da olsa demire rastlanmıştır. Bu bölgelerde abrasif aşınmanın olduğu düşünülmektedir.



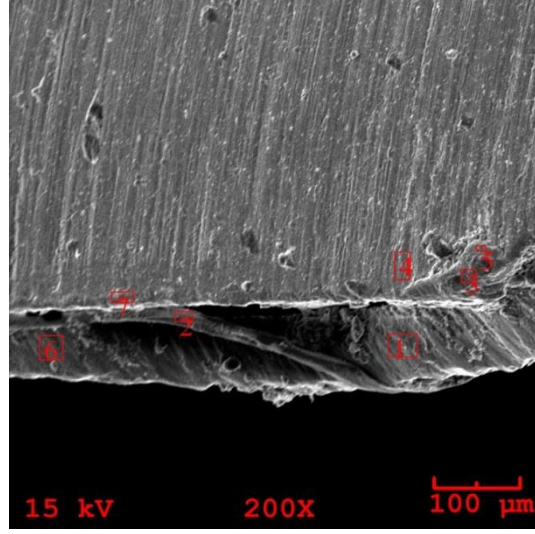
(a)



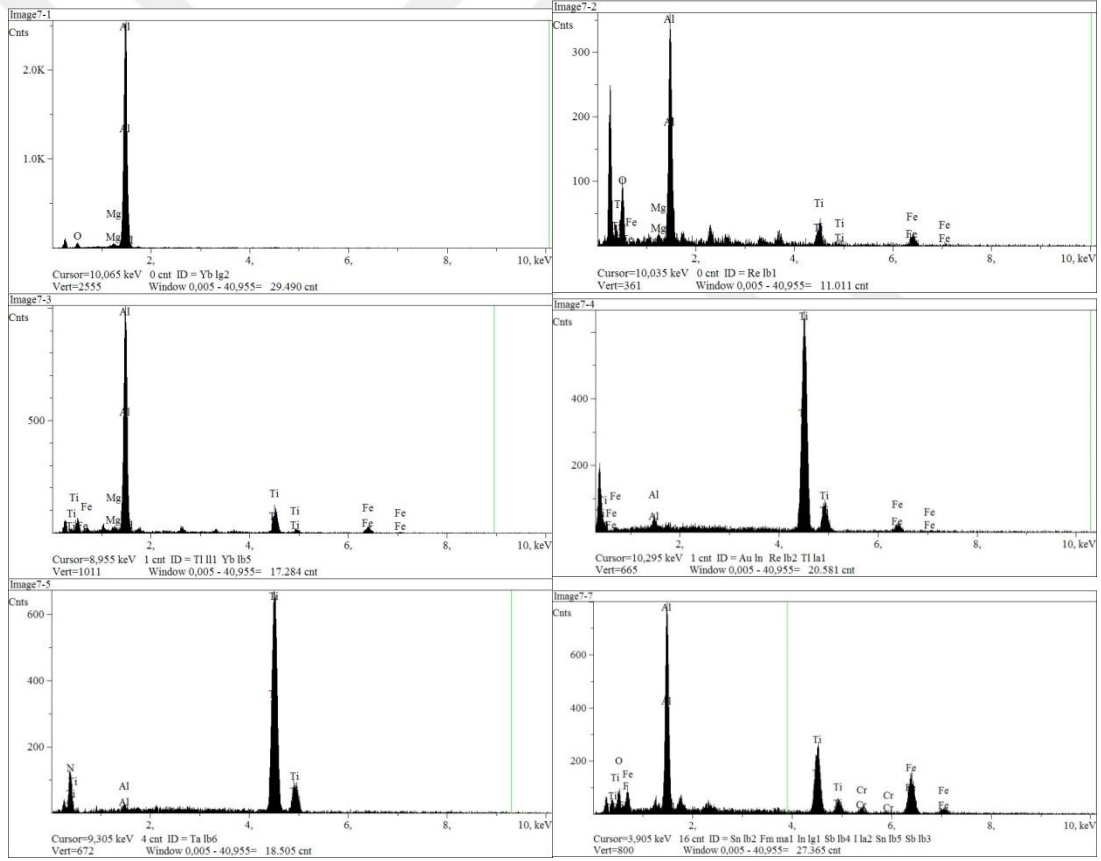
(b)

Şekil 6.35. (a) HSS-G TiN için konvansiyonel delmede ikinci kesme kenarında oluşan adhesif aşınma (b) adhesif aşınmada SEM ile görüntülenen malzeme içerikleri

Şekil 6.35'te, HSS-G TiN'in ikinci kesme kenarında konvansiyonel delmede oluşan adhesif aşınma görülmektedir. 1 numaralı bölge de iş parçası malzemesinin takıma yapıştığı görülmektedir. 2 numaralı bölgede ise kaplama malzemesi olan titanyum ve azot bulunmuştur. Bu bölgede herhangi bir aşınma tipine rastlanmamıştır.



(a)



(b)











Şekil 6.36. (a) HSS-G TiN için ultrasonik titreşimli delmede ikinci kesme kenarında oluşan adhesif aşınma (b) adhesif aşınmada SEM ile görüntülenen malzeme içerikleri

Şekil 6.36'da HSS-G TiN'in ikinci kesme kenarında ultrasonik titreşimli delmede oluşan adhesif aşınma görülmektedir. Şekil 6.35 ile karşılaştırıldığında takıma yapışan iş parçası malzemesinin boyutsal olarak daha az olduğu görülmektedir. Tüm

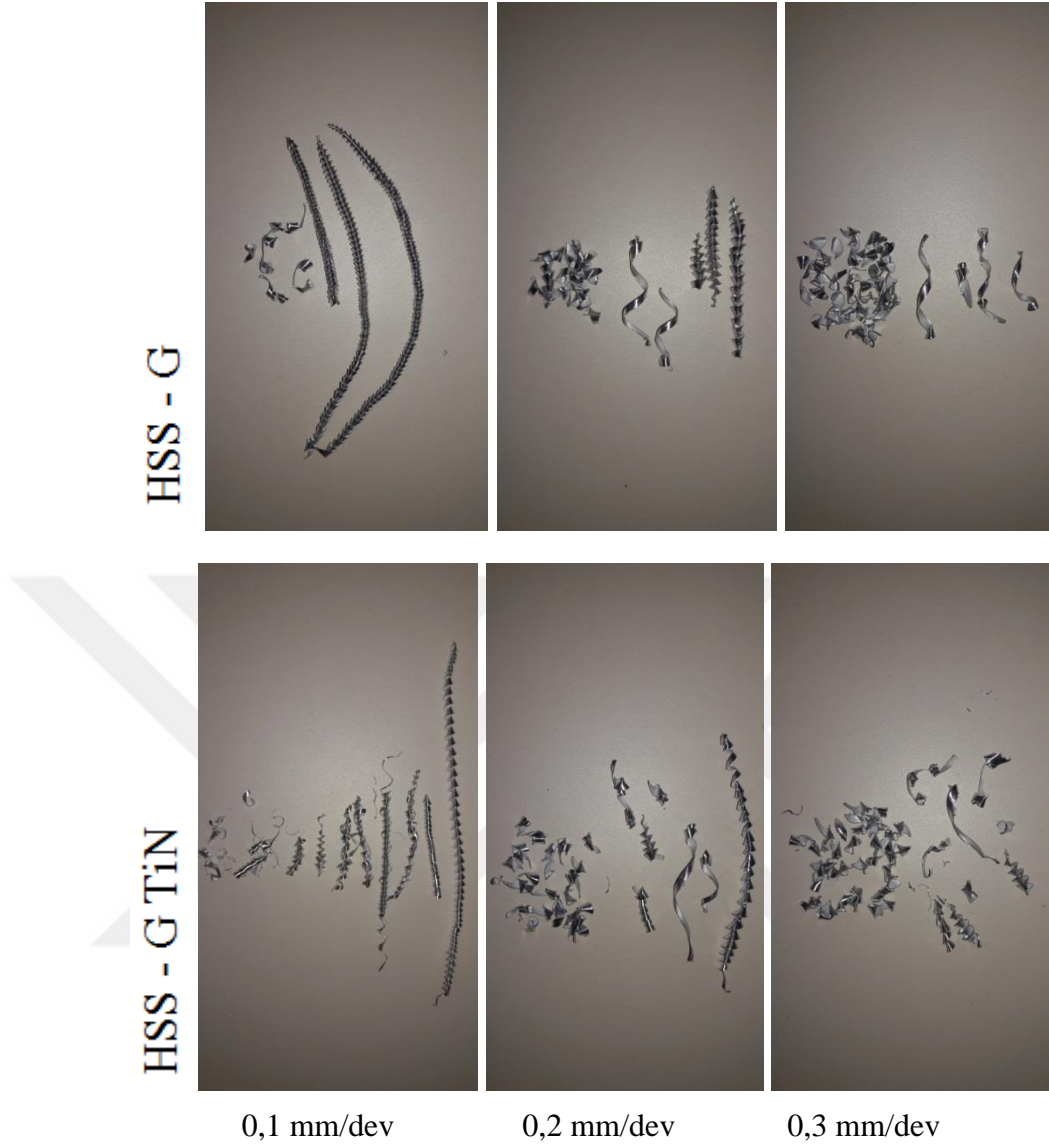
bölgelerde takıma yapışan malzemenin yine iş parçası malzemesi (Al) olduğu görülmektedir. Ayrıca 2,3,6 ve 7 numaralı bölgelerde az da olsa demire rastlanmıştır. Bu bölgelerde abrasif aşınmanın olduğu düşünülmektedir.

6.4.11. Delme sırasında oluşan talaş yapılarının değerlendirilmesi

Delme operasyonlarında oluşan talaş yapıları delinen numunenin yüzey kalitesi ve kesme kuvvetleri hakkında fikir sahibi olmamıza yardımcı olmaktadır. Şekil 6.37’de bir delme operasyonunda oluşabilecek talaş yapıları gösterilmiştir.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
									
Şerit talaş	Karışık talaş	Sarmal talaş	Helisel talaş	Uzun borumsuz talaş	Kısa borumsuz talaş	Spiral borumsuz talaş	Spiral talaş	Uzun virgül talaş	Kısa virgül talaş
			iyi						
			Kabul edilir						
İstenilmeyen									

Şekil 6.37. Talaş şekillerinin sınıflandırılması [6]



Şekil 6.38. AA6061-T6'nın 535 dev/dak dönme hızında konvansiyonel yöntemle delinmesinde oluşan talaş yapıları

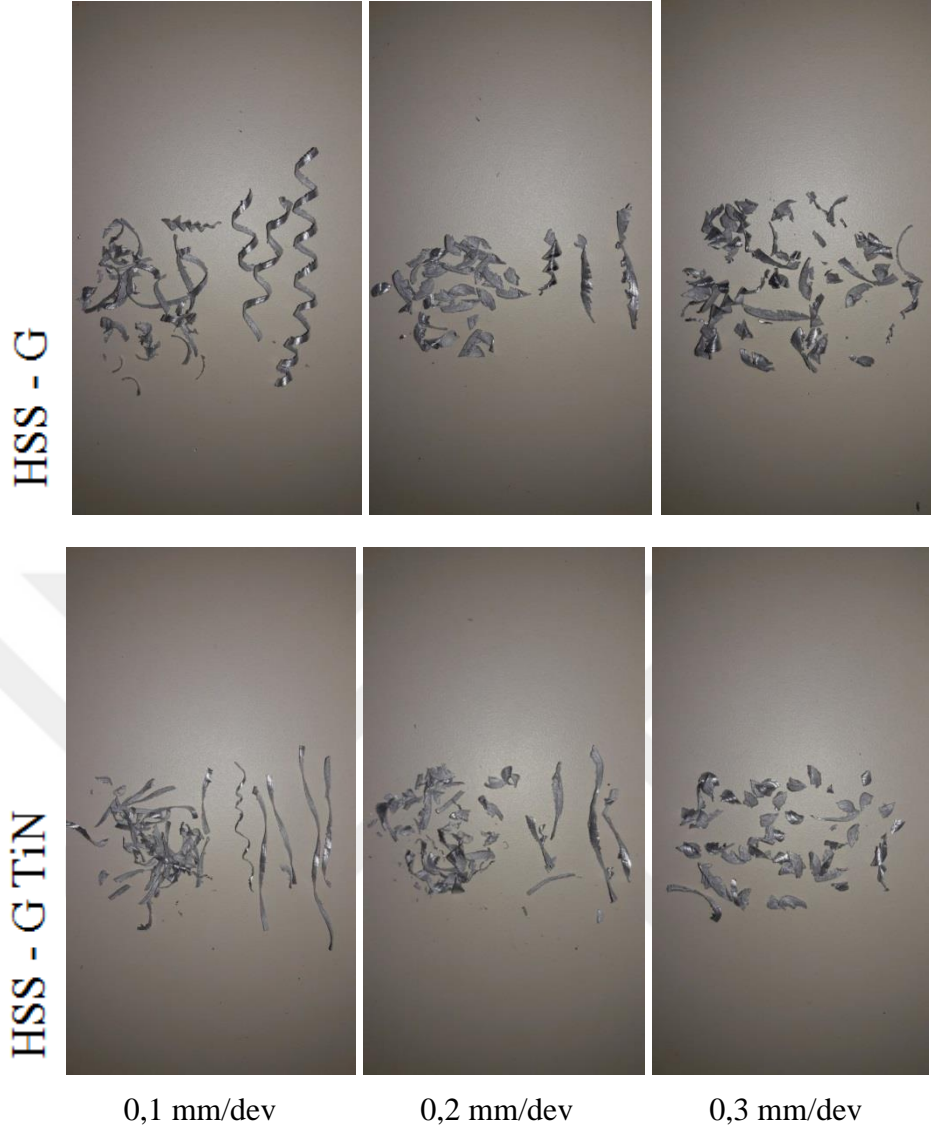
Şekil 6.38'de AA6061-T6'nın sabit dönme hızında (535 dev/dk) ve farklı ilerleme oranlarında, iki farklı kesici takımla konvansiyonel delinmesiyle elde edilen talaş yapıları gösterilmektedir. İlerleme oranını artması oluşan talaş yapılarını da değiştirdiği açıkça görülmektedir. 0,1 mm/dev ilerleme oranında elde edilen talaş yapıları helisel talaştır (Şekil 6.37). 0,2 mm/dev ve 0,3 mm/dev ilerleme oranlarında ise sarmal talaş gibi istenmeyen talaş yapıları elde edilmiştir. Bu durum en iyi ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin ve en düşük kesme kuvveti değerlerinin 0,1 mm/dev ilerleme oranında elde edildiğini doğrulamaktadır. HSS-G ile HSS-G TiN kesici takımlarının kullanımında elde edilen talaşlar karşılaştırıldığında, HSS-G TiN ile delinmede elde edilen talaş yapılarında karışık talaş ve sarmal talaş gibi istenmeyen

talaş yapılarının HSS-G'ye göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum ise HSS-G ile yapılan deneylerde elde edilen kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin HSS-G TiN'e göre daha düşük olduğunu açıklamaktadır.



Şekil 6.39. HSS-G TiN matkap ucu ile konvansiyonel delme sırasında oluşan talaş sarılması

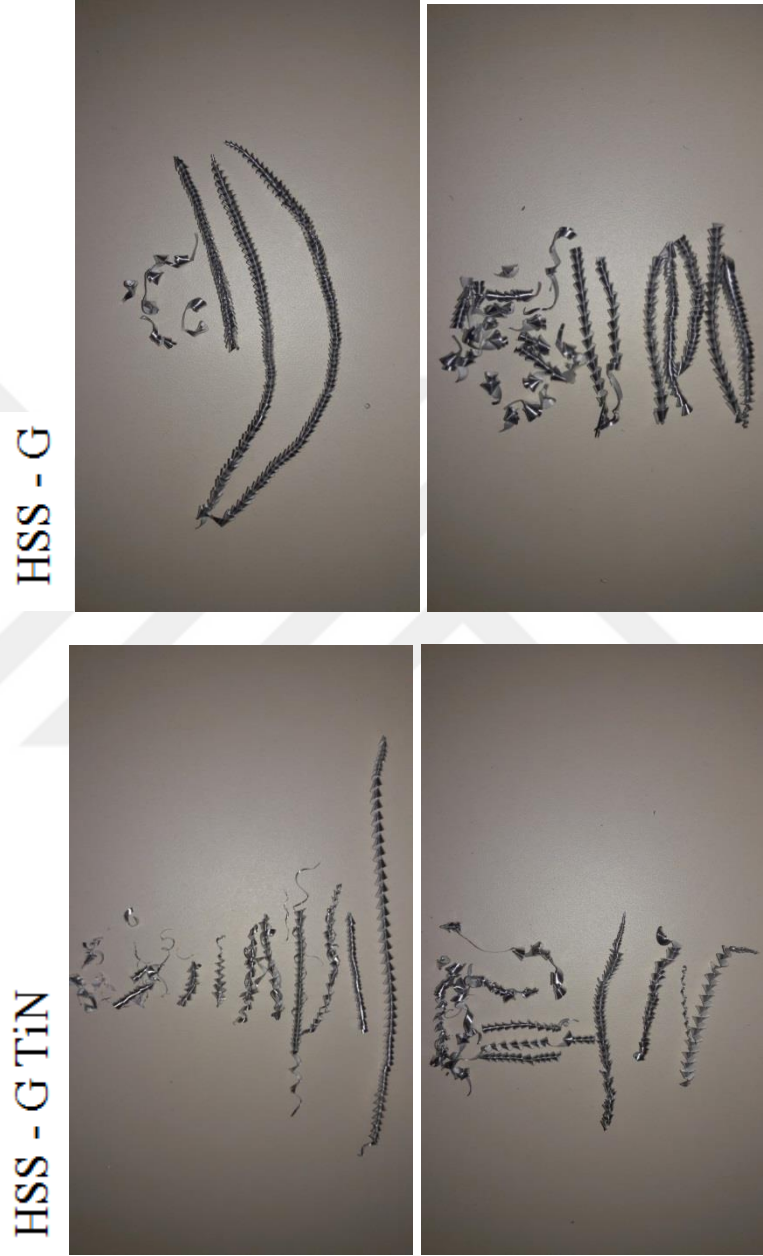
AA6061-T6'nın HSS-G TiN ile delinmesi sırasında talaş sarılması meydana gelmiştir (Şekil 6.39). Bu talaş sarılması matkabın kesmesini zorlaştırırken, delik iç yüzeyleriyle olan temas yüzey alanını arttırdığından, sürtünme kuvvetlerinin ve yüzey sıcaklığının arttığı düşünülmektedir. Yüksek sıcaklık ayrıca talaşların matkap ucuna yapışmasına sebep olacak ve bunun sonucunda yüksek kesme kuvvetleri ve düşük yüzey kalitesi oluşacaktır.



Şekil 6.40. AA6061-T1'in 535 dev/dak dönme hızında konvansiyonel yönteme göre delinmesinde oluşan talaş yapıları

Şekil 6.40'ta AA6061-T1'in sabit dönme hızında (535 dev/dk) ve farklı ilerleme oranlarında, iki farklı kesici takım ile konvansiyonel delinmesiyle elde edilen talaş yapıları gösterilmektedir. İlerleme oranını artması oluşan talaş yapılarını da değiştirdiği açıkça görülmektedir. Her iki kesici takım için ve her üç ilerleme oranı içinde oluşan talaş yapılarının karışık, sarmal ve şerit talaş olmak üzere istenilmeyen talaş yapıları olduğu söylenebilir. AA6061-T1'in AA6061-T6'ya göre daha yumuşak olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Delme sırasında kaldırılan talaşın artan sıcaklıkla beraber deliğin iç yüzey alanına sıvanarak oluştuğu düşünülmektedir. Bu durumun deliğin yüzey kalitesini yüksek derecede bozduğu ve kesme kuvvetlerinde artışa sebep olduğu düşünülmektedir. Elde edilen deney sonuçları da bu artışı

açıklamaktadır. HSS-G ve HSS-G TiN ile delinmede oluşan talaşlar kıyaslandığında ise, TiN kaplamalı takımında oluşan talaş yapılarının kaplamasız takıma göre çok daha kötü olduğu görülmektedir.



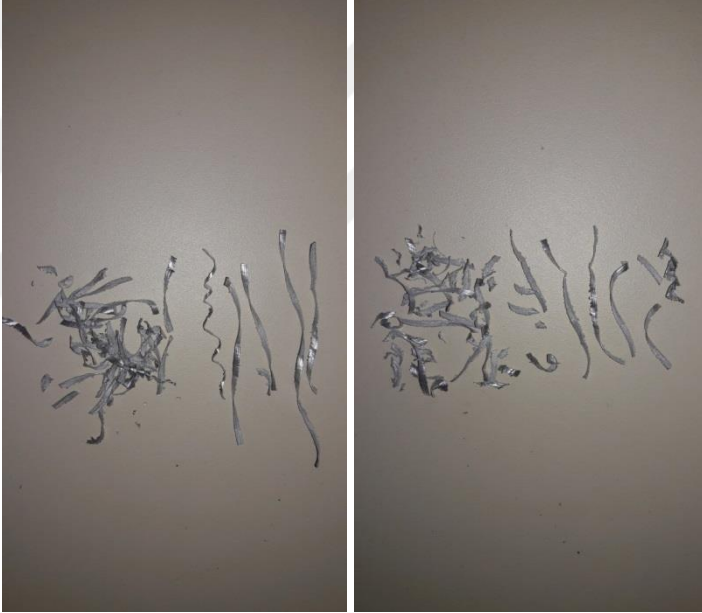
Konvansiyonel Delme Ultrasonik Titreşimli Delme

Şekil 6.41. AA6061-T6'nın 535 dev/dak dönme hızında ve 0,1 mm/dev ilerleme oranında delinmesiyle oluşan talaş yapıları

HSS - G



HSS - G TiN



Konvansiyonel Delme

Ultrasonik Titreşimli Delme

Şekil 6.42. AA6061-T1'in 535 dev/dak dönme hızında ve 0,1 mm/dev ilerleme oranında delinmesiyle oluşan talaş yapıları

Şekil 6.41 ve Şekil 6.42'de her iki malzeme içinde konvansiyonel yöntemle göre ve ultrasonik titreşimli delinmesinde elde edilen talaş yapıları gösterilmiştir. Her iki kesici takım için de ultrasonik titreşimli delme de talaş boyunun azaldığı görülmektedir. Titreşim uygulamasının, talaş kaldırılırken numuneden daha kolay ayrılmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Takım aşınmalarının değerlendirilmesinde ultrasonik titreşimli delmede BUE oluşumunun azaldığı bu

durumu kanıtlar niteliktedir. Buna bağlı olarak kesme kuvvetlerinde azalma ve yzey kalitesinde artış beklenmektedir. Deney sonuçları da buna paralel olarak elde edilmiş ve yzey kalitesinde artış ve kesme kuvvetlerinde dūřuř gözlemlenmiştir.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

AA6061 alaşımının konvansiyonel yönteme göre ve ultrasonik titreşimli delinmesinde farklı kesme parametrelerinin kesme kuvvetlerine takım aşınmasına ve yüzey kalitesine etkileri incelenmiştir.

1) AA6061-T1'in konvansiyonel yönteme göre delinmesinde elde edilen ortalama kesme kuvvetleri AA6061-T6'ya göre %25 daha yüksek çıkmıştır. Yüzey pürüzlülüğü değerlerinde ise yaklaşık %300 lük bir artış ortaya çıkmıştır. Bu artışların sebebinin T1 ısıl işlemlerinin T6 ısıl işlemi malzemeye göre plastik şekil değiştirme kabiliyetinin daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Delme sırasında, yumuşak malzemenin takımın yüzey alanına ve delik iç yüzeyine daha çok yapıştığı ve bununda sürtünme kuvvetini büyük ölçüde artırdığı düşünülmektedir. Sürtünme kuvvetinin artışı ise matkabın zorlanmasına sebep olmuş ve kesme kuvvetlerini artırmıştır.

2) AA6061-T6'in konvansiyonel yönteme göre delinmesinde, titanyum nitrid kaplamalı kesici takımda elde edilen kesme kuvvetleri, kaplamasız takıma göre %7 oranında daha yüksek çıkmıştır. Yüzey pürüzlülüğünde ise %26 oranında bir artış meydana gelmiştir. Titanyum nitrid kaplamalı kesici takımla delme sırasında meydana gelen talaş sarılmasının bu artışlara sebep olduğu düşünülmektedir. Talaş sarılması matkabın kesmesini zorlaştırırken, delik iç yüzeyleriyle olan temas yüzey alanını arttırdığından, sürtünme kuvvetlerinin ve yüzey sıcaklığının arttığı düşünülmektedir. Bu artışlar matkabın kesme kabiliyetini zorlaştırmış ve sonuç olarak daha pürüzlü delik yüzeyi ve daha yüksek kesme kuvvetleri ortaya çıkmıştır.

3) Her iki malzeme içinde ilerleme oranının artması kesme kuvvetlerini artırırken yüzey kalitesini de düşürmüştür.

4) Kesme kuvvetlerinin artması ile yüzey pürüzlülüğünün de arttığı gözlemlenmiştir.

5) AA6061-T6'nın ultrasonik titreşimli delinmesinde konvansiyonel yönteme göre kesme kuvvetlerinde yaklaşık %9'luk, yüzey pürüzlülüğünde ise yaklaşık %5'lik bir

düşüş gözlemlenmiştir. Bu düşüş oranları 22,5 KHz'lik ultrasonik titreşimin uygulandığı deneylerde elde edilmiştir. İş parçasında meydana gelen titreşimin kesme açısını değiştirdiği düşünülmektedir. Kesme açısının değişmesi ise talaş oluşumunu etkilemiş ve kesikli talaşların oluşmasına sebep olmuştur. Kaldırılan talaşın iş parçasından daha kolay ayrılması takım dış yüzeyi ile delik iç yüzeyi arasındaki sürtünme kuvvetini düşürmüş, bu da matkabin daha kolay hareket etmesini sağlamıştır. Ayrıca not edilmelidir ki, farklı frekanslarda titreşimsiz delmeye göre daha yüksek kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir.

6) AA6061-T1'in ultrasonik titreşimli delinmesinde elde edilen sonuçlar, konvansiyonel yöntemle karşılaştırıldığında , kesme kuvvetlerinde yaklaşık %4'lük bir düşüş gözlenirken, yüzey kalitesinde dikkate değer ölçüde bir iyileşme gözlemlenmemiştir. Aksine bazı titreşim frekanslarında yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlemlenmiştir.

7) AA6061-T1'e göre daha sert olan AA6061-T6'nın ultrasonik titreşimli delinmesinde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ultrasonik titreşimin özellikle yüzey kalitesinde, seçilen doğru kesme parametreleri ile iyi sonuçlar verebileceği düşünülmektedir.

8) AA6061-T6 malzemesinin HSS-G kesici takım ile ultrasonik titreşimli delinmesinde elde edilen delme momentleri incelendiğinde 7,5 KHz'lik titreşim frekansında konvansiyonel delmeye göre daha düşük moment değeri elde edildiği gözlenmiştir. Doğru seçilen titreşim parametrelerinin delme momentini düşürmesi beklenebilir.

9) AA6061-T6 malzemesinin HSS-G ve HSS-G TiN kesici takımları ile ultrasonik titreşimli delinmesinde, ultrasonik titreşimin BUE oluşumunu azaltabileceği kaydedilmiştir. Özellikle HSS-G TiN için BUE oluşumunun konvansiyonel delmeye göre çok daha az olduğu gözlemlenmiştir.

7.2. Öneriler

AA6061-T6 alaşımının kullanılacağı proseslerde yüksek yüzey kalitesi isteniyorsa HSS-G ve HSS-G TiN arasında seçim yapmak gerekirse HSS-G kesici takımı tercih edilmelidir. AA6061-T1 alaşımı için bu çalışmada ortaya koyulan kesme

parametreleri, yüksek yüzey kalitesi istenen çalışmalarda uygun olmadığı görülmüştür.

Alüminyumun delinmesinde HSS-G ve HSS-G TiN'e göre daha yumuşak kesici takımların kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenebilir.

Ultrasonik titreşimli delmenin kesme kuvvetleri ve özellikle yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri alüminyuma göre daha sert malzemeler tercih edilerek, titreşimin etkileri araştırılabilir.

Ultrasonik titreşimli delme de titreşim genliğinin etkilerini gözlemlemek için farklı genliklerde titreşim uygulanabilir. Aynı şekilde farklı frekans aralıkları da yapılacak olan çalışmalar için tercih edilebilir. Ultrasonik titreşim platformunun tasarlanması sırasında işlenecek malzeme kalınlığı önceden belirlenip platform buna göre tasarlanmalıdır.

Pürüzsüz sayılabilecek düzeyde yüzey kalitesi elde etmek için ultrasonik titreşimli delme sırasında soğutma sıvıları kullanılabilir.

Ultrasonik titreşimin kesici takıma uygulanmasının kesme kuvvetlerine ve yüzey kalitesine etkileri ayrı ayrı araştırılabilir. Ayrıca aynı anda hem kesici takım ve hem iş parçasına uygulanan titreşimin etkileri de deneysel olarak araştırmaya açık çalışma konuları olabilir.

Kompozit malzemelerin delinmesinde ultrasonik titreşimli delmenin etkileri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Altintas Y., *Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*, 2th ed., Cambridge, Boston, 2012.
- [2] Çakır A., Nalbant M., Duran A., Ulaş H.B, AA7075 Ve AA6013 Alüminyum malzemelere delik delme operasyonu sürecinde kesme parametrelerinin incelenmesi, 3. *Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, Ankara, 04-05 Ekim 2012.
- [3] Roukema J. C., *Mechanics and Dynamics of Drilling*, Doctor of Philosophy , The University of British Columbia, The Faculty of Graduate Studies, Vancouver, 2006.
- [4] El-Sonbaty I., Khashaba U. A. Machaly T., Factors affecting the machinability of GFR / epoxy composites, *Composite Structures*, 2004, **63**, 329-338.
- [5] Kurt M., Kaynak Y., Bakır B., Köklü U., Atakök G., Kutlu L., Al 2024-T4 alüminyumun elmas benzeri karbon (dlc) kaplanmış matkaplarla delinmesinde kesme parametrelerinin deneysel incelenmesi ve taguchi optimizasyonu, 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük 13-15 Mayıs 2009.
- [6] Bayraklılar M. S., HSS-G, HSS-G Co ve HSS-G TiN Matkapların AA6082-T6 alüminyum alaşımında talaşlı işleme performanslarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2014, 354568.
- [7] Zhu M. H. and Zhou Z. R., Fretting wear behaviour of ceramic coating prepared by micro-arc oxidation on Al-Si alloy, *Wear*, 2007, **263**, 472-480.
- [8] Yürekli Y., Frezeleme işleminde eş yönlü ve ters yönlü talaş kaldırmanın CVD/PVD kaplanmış sert metal uçların ömrüne etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2012, 322903.
- [9] Akkurt M., *Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1991.
- [10] Groover M. P., *Fundamentals of Modern Manufacturing*, 5th ed., Wiley, United States of America, 2012.
- [11] Liu C. S., Zhao B., Gao G. F., Zhang X. H., Study on Ultrasonic Vibration Drilling of Particulate Reinforced Aluminum Matrix Composites, *Key Engineering Materials*, 2005, **291-292**, 447-452.

- [12] Okutan E., Polimer kompozitlerin matkapla delinme karakteristiklerinin ve oluşan mekanizmalarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2009, 259418.
- [13] Merchant M. E, Mechanics of the metal cutting process. II: Plasticity conditions in orthogonal cutting, *Journal of Applied Physics*, 1945, **16**, 318-324.
- [14] Gavas M., Yaşar M., Aydın M., Altunpak Y., *Üretim Yöntemleri ve İmalat Teknolojileri*, 4. Baskı, Seçkin Yayınevi, İstanbul, 2015.
- [15] Chang S., Ultrasonic Assisted Drilling, Degree Master of Applied Science, McMaster University, School of Graduate Studies, Ontario, 2003.
- [16] Chang S. S. F., Bone G. M., Burr size reduction in drilling by ultrasonic assistance, *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 2005, **21**, 442-450.
- [17] Chang S. S. F., Bone G. M., Burr height model for vibration assisted drilling of aluminum 6061-T6, *Precision Engineering*, 2010, **34**, 369–375.
- [18] Armarego E. J. A., Pramanik D., Smith A. J. R., Whitfield R. C., Forces and power in drilling-computer aided predictions, *Journal of Engineering Production*, 1983, **6**, 149-174.
- [19] Galloway D. J., Some experiments on the influence of various factors on drill performance, *Transaction of the ASME*, 1957, **79**, 139.
- [20] Armarego E. J. A., Brown R. H., *The Machining of Metals*, 1st ed., Prentice, Hall, United States of America, 1969.
- [21] Meral G., Dilipak, H., Sarıkaya M., AISI 1050 Malzemenin Delinmesinde İlerleme Kuvvetleri ve Yüzey Pürüzlülüğünün Regresyon Analiziyle Modellenmesi, *Tübav Bilim Dergisi*, 2011, **4**(1), 31-41.
- [22] Meral G., Sarıkaya M., Dilipak, H., Delme işlemlerinde kesme parametrelerinin Taguchi yöntemiyle optimizasyonu, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2011, **27**(4), 332-338.
- [23] Savaşkan M., Taptık Y., Ürgen M., Deneysel tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında performans optimizasyonu, *İTÜ Dergisi*, 2004, **3**(6), 117-128.
- [24] Huang M. F., Lin T. R., Application of grey-taguchi method to optimise drilling aluminium alloy 6061 with multiple performance characteristics, *Materials Science & Technology*, 2004, **20**, 528-532.
- [25] Cayless R. B. C., Rooy E. L., *Metals handbook properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials*, 10th ed., ASM, Ohio, 1990.
- [26] http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi137/d137_1445.pdf (Ziyaret Tarihi: 3 Nisan 2016)

- [27] Yılmaz M., Çuhadaroğlu A.Ş., Alüminyum Sektöründe Yeni Kullanım Alanları, *2.Alüminyum Sempozyumu ve Sergisi*, Seydişehir, 22-24 Mayıs 2003.
- [28] <https://en.wikipedia.org/wiki/Ultrasound> (Ziyaret Tarihi: 21 Nisan 2016)
- [29] Kikuchi Y., *Ultrasonic Transducer Materials*, 1st ed., Springer, United States, 1971.
- [30] Grzesik W., *Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications*, 1st ed, Elsevier Science, United States, 2008.
- [31] Astashev V. K., Babitsky V. I., Khusnutdinova K., *Ultrasonic Processes and Machines: Dynamics, Control and Applications*, 1st ed, Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [32] Neugebauer R., Stoll A., Ultrasonic application in drilling, *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, **149**, 633–639.
- [33] Azarhoushang B., Akbari J., Ultrasonic-assisted drilling of Inconel 738-LC, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2007, **47**, 1027–1033.
- [34] Isobe H., Uehara Y., Hara K., Effect of Ultrasonic Vibration Drilling on Cutting Stress Distribution, *Key Engineering Materials*, 2012, **523-524**, 191-196.
- [35] Thoe T. B., Aspinwall D. K., Wise M. L. H., Review On Ultrasonic Machining, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 1998, **38**(4), 239–255.
- [36] Pujana J., Rivero A., Celaya A., Lo'pez deLacalle L.N., Analysis of ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* , 2009, **49**, 500-508.
- [37] Zhang L. B., Wang L. J., Liu X. Y., Zhao H. W., Wang X., Luo H. Y., Mechanical model for predicting thrust and torque in vibration drilling fibre-reinforced composite materials, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, **41**, 641–657.
- [38] Onikura H., Ohnishi O., Feng J. H., Kanda T., Morita T., Bopp U., Effects of ultrasonic vibration on machining accuracy in microdrilling, *International Journal of JSPE*, 1996, **30**, 210–216.
- [39] Onikura H., Ohnishi O., Drilling mechanisms in ultrasonic-vibration assisted micro drilling, *Journal of JSPE*, 1998, **64**, 1633–1637.
- [40] Chang S., Vibration Assisted Drilling Of Aluminum 6061-T6, Doctor of Philosophy, McMaster University, School of Graduate Studies, Ontario, 2010.

- [41] Takeyama H., Kato S., Burrless drilling by means of ultrasonic vibration, *Annals of CIRP*, 1991, **40**, 83–86.
- [42] Babitsky V.I., Kalashnikov A.N., Meadows A., Wijesundara A.A.H.P., Ultrasonically assisted turning of aviation materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, **132**, 157–167.
- [43] Babitsky V.I., Mitrofanov A.V., Silberschmidt V.V., Ultrasonically assisted turning of aviation materials: simulations and experimental study, *Journal of Ultrasonics*, 2004, **42**, 81-86.
- [44] Makhdum F., Phadnis V.A., Roy A., Silberschmidt V.V., Effect of ultrasonically-assisted drilling on carbon-fibre-reinforcedplastics, *Journal of Sound and Vibration*, 2014, **333**, 5939–5952.
- [45] <http://www.ekilavuz.com/kilavuz/5d96cbd58ebdd289/41/toss-united/tu5032b-matkap-tezgahi/matkap-tezgahlari> (Ziyaret Tarihi: 4 Mayıs 2016)
- [46] http://www.exact.info/katalog/Exact_Spiralbohrer.pdf (Ziyaret Tarihi: 4 Mayıs 2016)
- [47] <https://www.kistler.com/is/en/> (Ziyaret Tarihi: 4 Mayıs 2016)
- [48] Önel K., Dokumacı E., Eken C., Çubuklusu H.E., Aybarç U., Çe Ö.B., Kalender C., Kızılkaya M., Alüminyum Gaz Giderme İşleminde Ultrasonik Yöntemin Kullanımı, *Mühendis ve Makine*, 2015, **56**(667), 17-21.
- [49] <http://www.ctgclean.com/blog/technology-library/articles/magnetostrictive-versus-piezoelectric-transducers-for-power-ultrasonic-applications/> (Ziyaret Tarihi: 5 Mayıs 2016)
- [50] <http://www.skf.com/tr/index.html?switch=y> (Ziyaret Tarihi: 5 Mayıs 2016)
- [51] Özdemir U., Erten M., Talaşlı İmalat Sırasında Kesici Takımda Meydana Gelen Hasar Mekanizmaları ve Takım Hasarını Azaltma Yöntemleri, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 2003, **1**(1), 37-50.



EKLER

EK-A DENEY PLANI VE DENEY SONUÇLARI

DENEY NO	MAL ZEME	KESİCİ TAKIM	İLERLEME ORANII (mm/dev)	KESME HIZI (dev/dk)	FREKANS (KHz)	GENLİK (µm)	KESME KUVVETİ (N)	YÜZEY PÜRÜZLÜLÜ ĞÜ (Ra)
1	AA 6061-T6	HSS-G Ø8	0,1	535	0	0	137	1,48
2				1070	0	0	142	1,54
3				1520	0	0	145	1,76
4			0,2	535	0	0	227	1,80
5				1070	0	0	232	1,75
6				1520	0	0	221	1,90
7			0,3	535	0	0	315	2,40
8				1070	0	0	303	2,39
9				1520	0	0	306	2,45
10		HSS-G TiN Ø8	0,1	535	0	0	146	1,99
11				1070	0	0	150	2,19
12				1520	0	0	152	2,10
13			0,2	535	0	0	252	2,54
14				1070	0	0	251	2,56
15				1520	0	0	246	2,41
16			0,3	535	0	0	335	2,60
17				1070	0	0	316	2,71
18				1520	0	0	326	3,04
19		HSS-G Ø8	0,1	535	7,5	3	124	1,07
20					15	3	141	1,60
21					22,5	3	140	1,43
22				1070	7,5	3	135	2,10
23					15	3	141	1,83
24					22,5	3	133	1,70
25				1520	7,5	3	139	2,21
26					15	3	137	2,02
27					22,5	3	133	1,80
28		HSS-G TiN Ø8	0,1	535	7,5	3	155	2,13
29					15	3	147	2,00
30					22,5	3	150	1,84
31				1070	7,5	3	150	2,11
32					15	3	148	1,90
33					22,5	3	151	1,60
34				1520	7,5	3	160	2,06
35					15	3	145	1,99
36					22	3	145	1,78

37	AA 6061-T1	HSS-G Ø8	0,1	535	0	0	162	6,50	
38				1070	0	0	165	6,80	
39				1520	0	0	172	6,55	
40			0,2	535	0	0	298	6,90	
41				1070	0	0	292	7,26	
42				1520	0	0	292	7,15	
43			0,3	535	0	0	380	7,55	
44				1070	0	0	405	7,83	
45				1520	0	0	410	8,26	
46		HSS-G TiN Ø8	0,1	535	0	0	180	6,81	
47				1070	0	0	179	7,25	
48				1520	0	0	163	6,83	
49			0,2	535	0	0	309	7,97	
50				1070	0	0	300	6,69	
51				1520	0	0	297	6,53	
52			0,3	535	0	0	413	8,61	
53				1070	0	0	406	8,80	
54				1520	0	0	408	7,90	
55		HSS-G Ø8	0,1	535	7,5	3	160	6,41	
56					15	3	165	6,72	
57					22,5	3	156	6,15	
58				1070	7,5	3	155	6,48	
59					15	3	165	7,12	
60					22,5	3	162	6,95	
61			1520	7,5	3	150	6,41		
62				15	3	163	7,15		
63				22,5	3	160	7,06		
64			HSS-G TiN Ø8	0,1	535	7,5	3	173	6,63
65						15	3	175	7,18
66						22,5	3	170	6,5
67		1070			7,5	3	178	7,14	
68					15	3	179	7,35	
69	22,5				3	165	6,98		
70	1520	7,5		3	168	6,93			
71		15		3	160	6,62			
72		22,5		3	165	7,02			

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Yarar E.**, Karabay S., Ultrasonic Assisted Drilling of AA7075-T6, *2nd International Conference on Engineering and Natural Sciences*, Sarajevo, 24-28 Mayıs 2016.



ÖZGEÇMİŞ

1989 yılında Aksaray'da doğdu. İlköğretim ve lise öğrenimini Aksaray'da tamamladı. 2007 yılında girdiği İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 2012 yılında Makine Mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl Gaziantep Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde ÖYP kapsamında araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2014 yılında yine ÖYP kapsamında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne araştırma görevlisi olarak geçiş yaptı. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı. 2014 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde görev yapmaktadır.