T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

# YÜKSEK LİSANS TEZİ

# Ti6Al4V ALAŞIMININ FARKLI TALAŞLI İMALAT YÖNTEMLERİ ile İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

**Mustafa ERSOY**

**DANIŞMAN**
**Dr. Öğr. Üyesi Nuray BEKÖZ ÜLLEN**

**II. DANIŞMAN**
**Dr. Öğr. Üyesi Şakir ALTINSOY**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı**

**Haziran, 2022**

## TEZ KABUL VE ONAYI

**Mustafa ERSOY** tarafından, **Dr. Öğr. Üyesi Nuray BEKÖZ ÜLLEN** danışmanlığında hazırlanan **"Ti6Al4V ALAŞIMININ FARKLI TALAŞLI İMALAT YÖNTEMLERİ ile İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ"** başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **03/06/2022** tarihinde yapılan sınav sonucunda **oy birliği** ile başarılı bulunarak **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Jürisi**

| | | İmza | Sonuç |
|---|---|---|---|
| **DANIŞMAN** | Dr. Öğr. Üyesi Nuray BEKÖZ ÜLLEN<br>İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa<br>Metalurji ve Malzeme Mühendisliği<br>Anabilim Dalı | | ☒ Kabul<br>☐ Ret |
| **ÜYE** | Prof. Dr. İlven MUTLU<br>İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa<br>Metalurji ve Malzeme Mühendisliği<br>Anabilim Dalı | | ☒ Kabul<br>☐ Ret |
| **ÜYE** | Dr. Öğr. Üyesi Diyadin CAN<br>İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi<br>Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı | | ☒ Kabul<br>☐ Ret |

# BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Mustafa ERSOY

(İmza)

# BÜTÇE DESTEKLERİ

**Ti6Al4V ALAŞIMININ FARKLI TALAŞLI İMALAT YÖNTEMLERİ ile İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: FYL-2021-35633

# TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı tezimi yöneten danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Nuray BEKÖZ ÜLLEN'e ve ikinci danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Şakir ALTINSOY'a ve bölümümüz öğretim elemanlarından Araş. Gör. Gizem KARABULUT'a en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Tez çalışmalarının yapılabilmesi için her türlü yardımı, desteği ve çalışma ortamını sağlayan Bor Kesici Takım ve Mak. San. Tic. Ltd. Şti. Müdürü Sayın Tarkan YAZICI'ya ve şirket çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Bugün aramızda olmayan ancak her daim varlığını hissettiğim sevgili anneme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Yardımlarını esirgemeyerek iyi ve kötü günde her zaman yanımda olan değerli arkadaşım Seda BAŞIBÜYÜK'e ve onun nezdinde tüm dostlarıma teşekkür ederim.

Haziran 2022 Mustafa ERSOY

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa No**

**TEZ KABUL VE ONAYI** ..... **ii**
**BEYAN** ..... **iii**
**BÜTÇE DESTEKLERİ** ..... **iv**
**TEŞEKKÜR** ..... **v**
**İÇİNDEKİLER** ..... **vi**
**ŞEKİL LİSTESİ** ..... **ix**
**TABLO LİSTESİ** ..... **xii**
**SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ** ..... **xiii**
**ÖZET** ..... **xiv**
**ABSTRACT** ..... **1**
**1. GİRİŞ** ..... **3**
**2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE** ..... **5**
2.1. TİTANYUM VE ALAŞIMLARI ..... 5
2.1.1. Saf Titanyum ..... 8
2.1.2. Alfa Alaşımları ..... 8
2.1.3. Beta Alaşımları ..... 9
2.1.4. Alfa-Beta Alaşımları ..... 9
2.2. Ti6Al4V ALAŞIMLARININ İŞLENEBİLİRLİĞİ ..... 10
2.2.1. Ti6Al4V Alaşımlarının İşlenebilirliğini Etkileyen Faktörler ..... 13
2.2.2. Talaş Oluşumu Mekaniği ..... 17
2.2.3. Takım Aşınması ..... 20
2.2.4. Yüzey Pürüzlülüğü ..... 26
2.2.5. Ti6Al4V İşlenmesinde Karşılaşılan Zorluklar ..... 29
2.2.6. Ti6Al4V Alaşımının Delinmesi ..... 32
2.2.7. Ti6Al4V Alaşımının Frezelenmesi ..... 34
2.2.8. Ti6Al4V Alaşımının Tornalanması ..... 35
2.3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI ..... 37
**3. YÖNTEM** ..... **47**

3.1. KULLANILAN İŞ PARÇASININ ÖZELLİKLERİ ..... 47
3.2. İŞ PARÇASININ İŞLENMESİNDE KULLANILAN KESİCİ UÇLAR ..... 48
3.3. İŞ PARÇASININ TALAŞLI İMALAT YÖNTEMLERİ İLE İŞLENMESİ ..... 50
3.3.1. İş Parçasının Delinmesi ..... 50
3.3.2. İş Parçasının Frezelenmesi ..... 52
3.3.3. İş Parçasının Tornalanması ..... 53
3.4. KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI ..... 56
3.4.1. Talaş Morfolojilerinin İncelenmesi ..... 56
3.4.2. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü ..... 56
3.4.3. SEM Analizleri ..... 57
3.4.4. Takım Ömrünün Belirlenmesi ..... 58
**4. BULGULAR ..... 59**
4.1. TALAŞ MORFOLOJİLERİ ..... 59
4.1.1. Delme İşlemi Sonucu Oluşan Talaşlar ..... 59
4.1.2. Frezeleme İşlemi Sonucu Oluşan Talaşlar ..... 61
4.1.3. Tornalama İşlemi Sonucu Oluşan Talaşlar ..... 62
4.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ..... 68
4.2.1. Delme İşlemi Sonrası Elde Edilen Yüzey Pürüzlülük Değerleri ..... 69
4.2.2. Frezeleme İşlemi Sonrası Elde Edilen Yüzey Pürüzlülük Değerleri ..... 70
4.2.3. Tornalama İşlemi Sonrası Elde Edilen Yüzey Pürüzlülük Değerleri ..... 72
4.3. SEM ANALİZLERİ ..... 80
4.3.1. Kesici Uçların SEM Görüntüleri ..... 80
4.3.2. İşlenen Yüzeylerin SEM Görüntüleri ..... 87
4.4. TAKIM ÖMRÜ ..... 92
**5. TARTIŞMA ..... 97**
5.1. TALAŞ MORFOLOJİLERİ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ..... 97
5.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ..... 100
5.3. KESİCİ UÇ AŞINMA SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ..... 102
5.4. İŞLENEN YÜZEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ..... 105
5.5. TAKIM ÖMRÜ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ..... 106
**6. SONUÇ VE ÖNERİLER ..... 108**
6.1. GENEL SONUÇLAR ..... 108
6.2. ÇALIŞMA KAPSAMINDA ÖNERİLER ..... 110
**KAYNAKLAR ..... 112**

**İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI ..... 120**
**ETİK KURUL İZİN YAZISI ..... 121**
**KURUM İZNİ YAZILARI ..... 122**
**ÖZGEÇMİŞ ..... 123**

# ŞEKİL LİSTESİ

**Sayfa No**

Şekil 2.1: Titanyumun SHP ile HMK kafes yapıları . ..... 6

Şekil 2.2: Titanyum alaşımlarının üç boyutlu sınıflandırılması . ..... 7

Şekil 2.3: Talaşlı imalat yöntemlerin kullanım oranları. ..... 10

Şekil 2.4: Titanyum alaşımlarından üretilen uçak parçalarının talaşlı imalatında kullanılan yöntemler, yöntemlerinin kullanımının oransal olarak karşılığı ..... 11

Şekil 2.5: İşlenebilirliği etkileyen faktörler. ..... 13

Şekil 2.6: Talaş kaldırma esnasında oluşan kesme bölgeleri..... 18

Şekil 2.7: Çeşitli talaş şekilleri. ..... 19

Şekil 2.8: Kesici takımdaki aşınmaların şematik olarak gösterilmesi ..... 21

Şekil 2.9: Titanyum alaşımlarının işlenmesinde görülen aşınma tipleri. ..... 25

Şekil 2.10: Yüzey pürüzlülüğünün teorik gösterimi ve yüzey pürüzlülüğü ölçümü ..... 26

Şekil 2.11. İşlenmiş bir yüzeyin yüzey karakteri..... 28

Şekil 2.12: Delik delme işlemi ..... 33

Şekil 2.13: Delme sonucu işlenen Ti6Al4V'den çıkarılan talaş yapıları. ..... 34

Şekil 2.14: Yüzey frezeleme işlemi..... 35

Şekil 2.15: Tornalama ile parça işleme ..... 36

Şekil 3.1: Çalışmada kullanılan kesici uçlar a) karbür matkap ucu, b)APXT-1003-PDR freze ucu, c) kaplamalı DNMG karbür tornalama ucu, d) kaplamasız CBN tornalama ucu. ..... 49

Şekil 3.2: Deneysel çalışmada kullanılan kontrollü dik işleme tezgahı. ..... 51

Şekil 3.3: Delme işleminden sonra iş parçasının görüntüsü ..... 52

Şekil 3.4: Deneysel çalışmada kullanılan frezeleme tezgahı. ..... 52

Şekil 3.5: Frezeleme işleminden sonra iş parçasının görüntüsü. ..... 53

Şekil 3.6: Deneysel çalışmada tornalama işlemleri için kullanılan CNC tezgahı. ..... 54

Şekil 3.7: CNC tornalama işleminden sonra iş parçasının görüntüsü. ..... 55

Şekil 3.8: Yüzey pürüzlülük ölçümü. ..... 57

Şekil 3.9: Çalışmada kullanılan SEM cihazı. ..... 58

Şekil 4.1: (a) Ø7,5 mm uç ile kuru ortamda, (b) Ø7,5 mm uç ile kesme sıvısıyla, (c) Ø8,4 mm uç ile kuru ortamda, (d) Ø8,4 mm uç ile kesme sıvısıyla delme sonrası talaş formları. ..... 60

Şekil 4.2: (a) 50 m/dak kesme hızında kuru ortamda, (b) 50 m/dak kesme hızında kesme sıvısı ile, (c) 100 m/dak kesme hızında kuru ortamda ve (d) 100 m/dak kesme hızında kesme sıvısı ile frezeleme sonrası talaş formları ..... 61

Şekil 4.3: (a) 30, (b) 40 ve (c) 50 m/dak kesme hızları ile DNMG kesici uç kullanılarak uygulanan tornalama sonrası talaş formları ..... 63

Şekil 4.4: (a) 0,15, (b) 0,25 ve (c) 0,35 mm/dev ilerleme hızları ile DNMG kesici uç kullanılarak tornalama işlemi sonrası talaş formları ..... 63

Şekil 4.5: (a) 0,2 (b) 0,4 ve (c) 0,6 mm kesme derinlikleri ile DNMG kesici uç kullanarak tornalama sonrası talaş formları ..... 64

Şekil 4.6: (a) 30, (b) 40 ve (c) 50 m/dak kesme hızları ile CBN kesici uç kullanılarak uygulanan tornalama işlemi sonrası talaş formları. ..... 66

Şekil 4.7: (a) 0,15 (b) 0,25 ve (c) 0,35 mm/dev ilerleme hızları ile CBN kesici uç kullanarak tornalama sonrası talaş formları ..... 66

Şekil 4.8: (a) 0,2 (b) 0,4 ve (c) 0,6 mm kesme derinlikleri ile CBN kesici uç kullanarak tornalama sonrası talaş formları ..... 67

Şekil 4.9: Ø7,5 ve Ø8,4 mm matkap ucu ile kuru ve sıvı ortamda işlenen parça sayısına göre Ra değişimleri ..... 69

Şekil 4.10: 50 ve 100 m/dak kesme hızı ile kuru ve sıvı ortamda freze ile işlenen parça sayısına göre ortalama yüzey pürüzlülüğü değişimleri ..... 71

Şekil 4.11: a) DNMG b) CBN ile tornalama işlemi yapılmış parçaların yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının ekran görüntüleri ..... 72

Şekil 4.12: DNMG kesici uç ile tornalanmış yüzeylerin Ra değerleri üzerine kesme hızı ve ilerleme hızının etkileri. ..... 76

Şekil 4.13: DNMG kesici uç ile tornalanmış yüzeylerin Ra değerleri üzerine kesme hızı ve kesme derinliğinin etkileri. ..... 76

Şekil 4.14: DNMG kesici uç ile tornalanmış yüzeylerin Ra değerleri üzerine ilerleme hızı ve kesme derinliğinin etkileri. ..... 77

Şekil 4.15: CBN kesici uç ile tornalanmış yüzeylerin Ra değerleri üzerine kesme hızı ve ilerleme hızının etkileri. ..... 77

Şekil 4.16: CBN kesici uç ile tornalanmış yüzeylerin Ra değerleri üzerine kesme hızı ve kesme derinliğinin etkileri. ..... 78

Şekil 4.17: CBN kesici uç ile tornalanmış yüzeylerin Ra değerleri üzerine ilerleme hızı ve kesme derinliğinin etkileri. ..... 78

Şekil 4.18: DNMG ve CBN ile tornalanmış yüzeylerin Ra değerlerine kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliğinin etkileri. ..... 79

Şekil 4.19: (a) Ø7,5 mm uç ile kuru delme, (b) Ø7,5 mm uç ile kesme sıvısıyla delme, (c) Ø8,4 mm uç ile kuru delme ve (d) Ø8,4 mm uç ile kesme sıvısıyla delme sonrası kesici uçların SEM görüntüleri. ..... 82

Şekil 4.20: (a) 50 m/dak kesme hızında kuru ortamda, (b) 50 m/dak kesme hızında kesme sıvısıyla, (c) 100 m/dak kesme hızında kuru ortamda ve (d) 100 m/dak kesme hızında kesme sıvısıyla frezeleme sonrası kesici uçların SEM görüntüleri. ..... 83

Şekil 4.21: 50 m/dak kesme hızında kuru ortamda yapılan frezeleme sonrası kesici uçta oluşan kırık bölgenin SEM görüntüsü. ..... 83

Şekil 4.22: (a) 30, (b) 40 ve (c) 50 m/dak kesme hızları ile DNMG kesici uç kullanılarak tornalama sonrası kesici uçların SEM görüntüleri. ..... 85

Şekil 4.23: (a) 30, (b) 40 ve (c) 50 m/dak kesme hızları ile CBN kesici uç kullanılarak tornalama sonrası kesici uçların SEM görüntüleri. ..... 86

Şekil 4.24: (a) Ø7,5 mm uç ile kuru delme, (b) Ø0,75 mm uç ile kesme sıvısıyla delme, (c) Ø8,4 mm uç ile kuru delme ve (d) Ø8,4 mm uç ile kesme sıvısıyla delme sonrası aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri. ..... 88

Şekil 4.25: (a) 50 m/dak kesme hızında kuru ortamda, (b) 50 m/dak kesme hızında kesme sıvısıyla, (c) 100 m/dak kesme hızında kuru ortamda ve (d) 100 m/dak kesme hızında kesme sıvısıyla frezeleme sonrası aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri. ..... 89

Şekil 4.26: (a) 30 , (b) 40 ve (c) 50 m/dak kesme hızları ile DNMG kesici uç kullanılarak tornalama sonrası aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri. ..... 91

Şekil 4.27: (a) 30, (b) 40 ve (c) 50 m/dak kesme hızları ile CBN kesici uç kullanılarak tornalama sonrası aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri. ..... 91

Şekil 4.28: Matkap çapına göre, kuru ve kesme sıvısı ortamlarında delme sonrası kesici uçların aşınma süreleri. ..... 94

Şekil 4.29: Kesme hızına göre, kuru ve kesme sıvısı ortamlarında frezeleme sonrası kesici uçların aşınma süreleri. ..... 94

Şekil 4.30: Kesme hızına göre, DNMG ve CBN kesici uçların tornalama sonrası aşınma süreleri. ..... 95

Şekil 5.1: Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen faktörler (Benardos ve Vosniakos, 2003) ..... 100

## TABLO LİSTESİ

**Sayfa No**

Tablo 2.1: Bazı metallerin fiziksel özelliklerinin kıyaslanması. ..... 5

Tablo 2.2: Titanyum alaşımlarının tipleri ..... 7

Tablo 2.3: Titanyum alaşımlarının özelliklerinin kesici takıma etkisi ..... 15

Tablo 2.4: Titanyum alaşımlarının işlenmesinde farklı özellikte takımların performansları ... 16

Tablo 3.1: Ti6Al4V titanyum alaşımının kimyasal bileşimi. ..... 47

Tablo 3.2: Ti6Al4V titanyum alaşımının mekanik özellikleri. ..... 47

Tablo 3.3: Delme işleminde kullanılan elmas karbür matkap ucunun özellikleri. ..... 48

Tablo 3.4: Frezeleme işleminde kullanılan APXT-1003-PDR freze ucunun özellikleri. ..... 49

Tablo 3.5: Tornalama işleminde kullanılan CBN ve DNMG kesici uçların özellikleri. ..... 49

Tablo 3.6: Agma VMC serisi, VMC-115 markalı dik işleme tezgahı özellikleri. ..... 51

Tablo 3.7: Deneysel çalışmada kullanılan delme parametreleri. ..... 51

Tablo 3.8: Deneysel çalışmada kullanılan frezeleme parametreleri. ..... 53

Tablo 3.9: Deneysel çalışmada kullanılan tornalama parametreleri. ..... 54

Tablo 3.10: Yüzey pürüzlülük ölçümünde kullanılan cihazın özellikleri. ..... 56

Tablo 4.1: Delme işlemi sonrası ortalama Ra değerleri ..... 69

Tablo 4.2: Frezeleme işlemi sonrası ortalama Ra değerleri ..... 70

Tablo 4.3: DNMG kesici uç ile tornalama işlemi sonrası ortalama Ra değerleri ..... 73

Tablo 4.4: CBN kesici uç ile tornalama işlemi sonrası ortalama Ra değerleri ..... 74

Tablo 4.5: Kesme parametreleri ve kesici uçlara göre ortalama Ra değerleri ve Ra değerlerindeki % değişim oranları ..... 75

Tablo 4.6: Delme işleminde kesici uçların aşınma süreleri. ..... 92

Tablo 4.7: Frezeleme işleminde kesici uçların aşınma süreleri. ..... 93

Tablo 4.8: Tornalama işleminde kesici uçların aşınma süreleri. ..... 93

# SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

| Simgeler | Açıklama |
|---|---|
| **α** | : Alfa |
| **β** | : Beta |
| **$K_c$** | : Spesifik Kesme Kuvveti |
| **$K_k$** | : Spesifik Özellikler Besleme Kuvveti |
| **Ra** | : Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü |
| **Ø** | : Çap |

| Kısaltmalar | Açıklama |
|---|---|
| **ASTM** | : Amerikan Test ve Malzeme Kurumu |
| **BUE** | : Talaş Yığıntısı |
| **CBN** | : Kübik Bor Nitrür |
| **HMK** | : Hacim Merkezli Kübik |
| **HPDC** | : Yüksek Basınçlı Yönlendirilmiş Soğutma Sıvısı |
| **HSS** | : Yüksek Hız Takım Çeliği |
| **FE** | : Sonlu Eleman |
| **ISO** | : Uluslararası Standartlar Teşkilatı |
| **SPH** | : Sıkı Paket Hegzagonal |
| **YMK** | : Yüzey Merkezli Kübik |
| **PVD** | : Fiziksel Buhar Biriktirme |

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

### Ti6Al4V ALAŞIMININ FARKLI TALAŞLI İMALAT YÖNTEMLERİ İLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

**Mustafa ERSOY**

**İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı**

**Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Nuray BEKÖZ ÜLLEN**
**II. Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Şakir ALTINSOY**

Titanyum ve alaşımları, yüksek korozyon ve ısı direnci, iyi tokluk ve mukavemet dayanımı, yüksek çalışma sıcaklığı ve düşük ağırlık oranı, uzun servis ömrü ve kompozit malzemelerle rekabet edebilir nitelikte olmasından dolayı havacılık, uzay, otomotiv, denizcilik, kimya-petrokimya ve biyomedikal gibi farklı endüstrilerde yüksek mühendislik alaşımları olarak kullanılmaktadırlar. Titanyum alaşımları içerisinde ise en yüksek kullanım oranı Ti6Al4V alaşımına aittir. Ti6Al4V alaşım ürünlerinin yüzey kalitesi ve ölçü hassasiyetinin iyi olmasının gerekliliği talaşlı imalat işlemlerini ön plana çıkartmaktadır. Talaşlı imalatın en önemli konularının başında işlenebilirlik gelmektedir. İyi işlenebilirlik, istenilen kalitede yüzey elde edebilmektir. Bunun için bir çok kesme parametresinin optimum şekilde düzenlenmesi gerekmektedir. Titanyum ve alaşımları, ısıl iletkenliklerinin düşük olması nedeniyle kesme bölgesinde oluşan yüksek ısı, kimyasal reaktifliklerinin yüksek olması nedeniyle talaşın takıma yapışma eğilimi, yüksek sıcaklılarda mukavemet özelliklerini koruması ve düşük elastisite modülleri nedeniyle plastik deformasyonun zorluğu, işlenebilirlikleri düşük olan

malzemelerdir. Bu nedenlerden dolayı titanyum alaşımların işlenmesinde üretim maliyetlerinin ve işleme zamanının azaltılması için kesici takım performansının ve yüzey kalitesinin iyileştirilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, Ti6Al4V alaşımının delme, freze ve torna ile işlenmesinde faklı kesici uçlar, kesme parametreleri ve soğutma ortamları kullanılarak, işlenebilirlik davranışları incelenmiştir. Delme işlemi üzerine yapılan incelemelerde Ø7,5 mm ve 8,4 mm matkap uçları çaplı kuru ve kesme sıvısı ortamlarında kullanılmıştır. Frezeleme işleminde, 50 ve 100 m/dak kesme hızlarında kuru ve kesme sıvısı ile soğutma ortamlarında işlem yapılmıştır. Tornalama işleminde DNMG ve CBN kesici uçlar ile farklı kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliğinde talaşlı işlem yapılmıştır. İşlenen parçalardan elde edilen talaşların morfolojileri, işlenen parçaların yüzey pürüzlülükleri ve kesici uçların aşınma analizleri yapılarak takım ömrü tespit edilmiştir. Delinebilirlik testlerinde, Ø7,5 mm çapında matkap ucu kullanımı ve kesme sıvısı ile delmede daha iyi yüzey kalitesi ve kesici takım ömrü elde edilmiştir. Artan matkap çapı ile her iki kesme ortamında da aşınma artmıştır. Tüm şartlarda oluşan aşınmaların matkabın kesici ağzının merkeze yakın olan bölgesinde yan yüzey aşınması şeklinde olduğu ancak kuru kesme şartlarında matkabın dış kısmına yakın bölgede kırılma ağzı şeklinde gerçekleşmiştir. Kesme sıvısı kullanımının talaş formu üzerine matkap çapından daha belirleyici etkisinin olduğu belirlenmiştir. Frezeleme testlerinde; kesme hızının artmasıyla, yüzey pürüzlülük değeri azalmış ve kesme ortamının kurudan sıvıya geçmesiyle yüzey özelliğinin iyileştiği tespit edilmiştir. Kesme sıvısı ile sürtünmeden kaynaklı olumsuz etkiler ortadan kaldırılmış ve artan kesme hızı ile kesici takım aşınması azalmıştır. Bu durumun kesici takım ömrü üzerine olumlu etkisi olduğu tespit edilmiştir. Frezelemede; talaş formu üzerine kesme hızının, kesme ortamından daha belirleyici etkisi olduğu belirlenmiştir. Tornalama testlerinde; kaplamalı ve kaplamasız kesici uçların her ikisinin kullanımında ilerleme hızının yüzey pürüzlülük değeri üzerine en etkili parametre olduğu tespit edilmiştir. Artan ilerleme hızı ile ortalama yüzey pürüzlülüğü artarken; artan kesme hızı ile azalmış; artan kesme derinliği ile fazla değişmemiştir. Kesme hızı arttıkça kesici uçlarda aşınma artmıştır. Kesici takımın kesme kenarı ve yan yüzeyinde sürtünme aşınması ile serbest yüzey aşınması oluşmuştur.

Haziran 2022 , 138. sayfa.

**Anahtar kelimeler:** Ti6Al4V, İşlenebilirlik, Talaş morfolojisi, Yüzey Pürüzlülüğü, Takım ömrü

# ABSTRACT

## M.Sc. THESIS

## INVESTIGATION OF MACHINABILITY OF Ti6Al4V ALLOY USING DIFFERENT MACHINING METHODS

**Mustafa ERSOY**

**İstanbul University-Cerrahpaşa**

**Institute of Graduate Studies**

**Department of Metallurgy and Materials Engineering**

**Programme of Metallurgy and Materials Engineering**

**Supervisor : Assist. Prof. Dr. Nuray BEKÖZ ÜLLEN**
**Co-Supervisor: Assist. Prof. Dr. Şakir ALTINSOY**

Titanium and titanium alloys have high corrosion, heat resistance, good toughness, strength, ability to work at high temperatures, low specific weight, long service life and can compete with composite materials. Thanks to these properties, they are used as high engineering alloys in different industries such as aerospace, automotive, marine, chemical/petrochemical, and biomedical. Among the titanium alloys, the highest usage rate belongs to the Ti6Al4V alloy. Considering the points where titanium alloys are used, the necessity of good surface quality and measurement accuracy of the products highlights the machining processes. Machinability is one of the most important issues in machining. Good workability is to obtain the desired quality surface. For this, many cutting parameters need to be optimally regulated. Titanium and its alloys have low machinability because high heat occurs in the cutting zone due to their low thermal conductivity, the chip has a tendency to adhesion to the tool due to its high chemical reactivity, plastic deformation becomes difficult due to the protection of their strength properties at high temperatures and low elasticity modules. For these reasons, it is necessary to

improve the cutting tool performance and surface quality in order to reduce the production costs and machining time in the machining of titanium alloys.

In this thesis, the machinability behavior of Ti6Al4V alloy was investigated by using different cutting inserts, cutting parameters, and cooling conditions in drilling, milling, and turning techniques. In the investigations on the drilling process, Ø7.5 mm and 8.4 mm diameter drill bits were used in dry and use of coolant conditions. In the milling, the cutting speeds of 50 and 100 m/min were processed in dry and use of coolant machining conditions. In the turning, machining was performed at different cutting speeds, feed rates, and cutting depths with DNMG and CBN cutting inserts. The tool life was determined by analyzing the morphology of the chips, the surface roughness of the machined parts, and the wear of the cutting inserts. As a result of the examinations made in the drilling process, better surface quality and tool life were obtained in the use of drill bits with a diameter of Ø7.5 mm and in drilling with cutting fluid. It was determined that increasing drill diameter increased wear in both cutting environments. In all conditions, wear occurred in the form of flank wear in the region of the cutting edge of the drill close to the center, but in the dry cutting conditions, in the region close to the outer part of the drill, it was in the form of a fracture edge. It has been determined that the use of coolant has a more decisive effect on the chip form than the drill diameter. In milling tests, as the cutting speed increased, the surface roughness value decreased and it was determined that the surface properties improved with the transition of the cutting medium from dry to liquid. The negative effects caused by friction were eliminated with the use of cutting fluid, and the wear of the cutting tool decreased with increasing cutting speed. It has been determined that this situation has a positive effect on the tool life. In the milling, it has been determined that the cutting speed has a more decisive effect on the chip form than the cutting environment. In the turning tests, it has been determined that the feed rate is the most effective parameter on the average surface roughness in the use of both coated and uncoated inserts. Average surface roughness values increased with increasing feed rate, decreased with increasing cutting speed, and did not show a significant change with increasing depth of cut. As the cutting speed increased, the wear on the inserts increased. Frictional and flank wear occurred on the cutting edge and side surface of the cutting tool.

June 2022, 138 pages.

**Keywords:** Ti6Al4V, Machinability, Chip morphology, Surface roughness, Tool life

# 1. GİRİŞ

Günümüzde, dayanıklı ve hafif mühendislik malzemelerinin kullanım alanı artmakta buna karşılık üretiminde iyileştirmeye dönük çalışmalar yapılmaktadır. Malzeme biliminde yaşanan gelişmeler ile malzemelerin daha iyi anlaşılması ve üretimleri kapsamında önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Talaşlı imalat, metal ürünlerinin üretiminde kullanılan önemli bir teknolojik gruptur. Talaşlı imalat proseslerin amacı, üstün yüzey kalitesine sahip ürünlerin istenilen zamanda, kalitede ve uygun maliyetle imalatını yapmaktır. Talaşlı işlemlerde yüzey kalitesinin arttırılması, işlem süresinin ve işlem maliyetlerinin azaltılmasını sağlayarak, metal kesme işlemlerinin üretim verimliliğini ve performansını geliştirmeyi amaçlamaktadır. Metal kesme teknolojileri; yüzey kalitesinin iyileştirilmesi, işlem süresinin ve işlem maliyetlerinin düşmesini sağlayarak, metal kesme işlemlerinin üretim performansını ve verimliliğini geliştirmeyi amaçlamaktadır (Chunxiang ve diğ., 2011; Ensarioğlu ve Çakır, 2005).

Titanyum ve alaşımları, yüksek dayanım/ağırlık oranı, yüksek çalışma sıcaklığı, mükemmel korozyon direnci, yüksek mukavemet ve kırılma direnci, iyi kaynak edilebilirlik, biyouyumluluk özelliklerini bir arada bulundururlar. Bu özellikleri sayesinde titanyum ve alaşımları; havacılık ve uzay endüstrisi başta olmak üzere, kimya, biyomedikal, denizcilik, otomotiv, petrokimya, gıda ve spor endüstrisinde, tıpta, denizcilikte ve yiyecek endüstrisinde sıklıkla tercih edilirler (Katta ve Chaitanya, 2017, Wong ve diğ., 2008). Kullanım alanları göz önüne alındığında; yüzey kalitesinin yüksek olması ve karmaşık şekilli olması gibi zorunluluklar vardır. Bu durumda üretim hattı içerisinde talaşlı imalatı zorunlu hale getirmektedir. Ancak, titanyum alaşımlarının düşük termal iletkenliğe, yüksek kimyasal reaktiviteye, düşük elastiklik modüle ve yüksek mukavemete sahip olması kesici takım ve iş parçası arasında yüksek sıcaklıkların oluşmasını sağlar. Özelikle düşük ısıl iletkenliği, talaşlı imalat sırasında kesme bölgesinde yüksek ısı oluşturur ve kesici takımın ömrünün hızla azalmasına neden olmaktadır. Yüksek mukavemet özelliğinden dolayı plastik deformasyonu talaş oluşumu engelleyecek şekilde zorlaşır ve talaşlar kesici uca yapışır. Ti alaşımları yüksek sıcaklıklarda kesici takım ile kimyasal tepkimeye girerek kısmen de olsa kesici ucun sıcaklığını artırarak, aşınmayı hızlandırır. Tüm bunlar işlenen parçanın yüzey kalitesini olumsuz yönde etkileyerek işlenebilirliği düşürür (Arrazola ve diğ., 2009).

Titanyum ve alaşımları; saf titanyum, alfa titanyum alaşımları, alfa-beta titanyum alaşımları ve beta titanyum alaşımları olarak sınıflandırılmaktadırlar. Titanyum üretiminin yaklaşık %30'unu

alaşımsız grup, yaklaşık %45'ini Ti6Al4V ve geri kalan yaklaşık %25'ini ise diğer alaşım grupları oluşturmaktadır. Titanyum alaşımları içerisinde en yaygın olarak kullanılan alfa-beta alaşımı olan Ti6Al4V'dir. Havacılık, uzay ve medikal endüstrilerinde %80, global üretimde ise %50'den fazla kullanım potansiyeline sahiptir (Amin ve diğ., 2007; Shokrani ve diğ., 2016). Bu oranda kullanım nedenleri; mükemmel kimyasal ve mekanik özelliklere sahip olması, ısıl işlem ve kaynak edilebilirlik özeliklerinin iyi olmasıdır. Günümüz teknolojisinde titanyumun işlenmesinde birçok talaşlı işleme tekniği kullanılmaktadır. Ancak yukarıda da bahsedildiği gibi, titanyum alaşımları sahip olduğu birçok özellikleri nedeniyle, işlenmesi oldukça zor malzemeler grubundadır. Kullanım alanının bu derece geniş ve işlenen yüzey kalitesinin oldukça önemli olduğu Ti alaşımlarının işlenebilirliğinde yaşana problemler, gerek akademik alanda gerekse endüstriyel alanda araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Talaşlı imalat, kesici takım ve iş parçasının nispi hareketleri ile iş parçasının belirli bir kısmında, gerilim oluşturarak gerçekleştirilir (Hasak, 2018; Şahin, 2001; Şahin, 2003). Kesici takımın daha uzun ömürlü olabilmesi, iş parçasının da istenilen kalitede üretilerek hammadde israfının önlenebilmesi için, kesme performansı ve şartlarını iyi belirlemek gerekir. Bunu gerçekleştirebilmek için, kesici takımın kullanım ömrüne etki eden faktörler ve iş parçasının yüzey kalitesinin belirlenmesinde etkili olan etkenler belirlenmelidir. Bu faktörler; kesici takımın özellikleri, kesme parametreleri, soğutma ortamı ve iş parçası ve kesici takım rijitliği gibi parametrelerdir (Hasak, 2018; Tekaslan ve diğ., 2016). Bu faktörlerin iyileştirilmesi ile Ti alaşımlarının işlenmesinde; parça yüzey kalitesinin ve kesici takımların performansının arttırılması, üretim maliyetlerinin ve zamanının azaltılması sağlanacaktır.

Genel olarak Ti ve alaşımları mühendislik malzemeleri içerisinde gittikçe artan kullanım alanlarına sahip olmakla birlikte, üretim ve şekillendirilmesi de ön plana çıkmaktadır. İşlenmesinde yaşanan yüzey bütünlüğü ve kesici takım aşınması gibi problemler, bu alanda çalışmayı zorunlu kılmıştır. Bu çalışmada, Ti6Al4V alaşımının delinmesinde, frezelenmesinde ve tornalanmasında, farklı kesici uçlar, kesme parametreleri ve soğutma ortamları kullanılarak, kesici uçların aşınma mekanizması, işlenen parçaların yüzey pürüzlülükleri ve işlem sonucu çıkan talaşların morfolojileri, konuyla ilgili literatür ışığı altında detaylı bir şekilde incelenmiştir.

# 2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

## 2.1. TİTANYUM VE ALAŞIMLARI

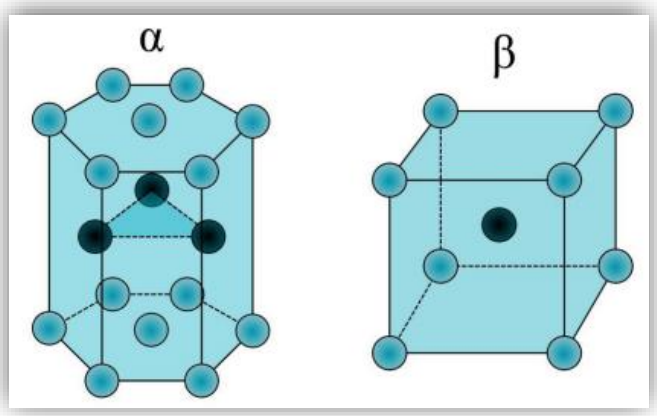
Titanyum ve alaşımları yüksek mukavemet ve kırılma dayanımı, uzun yorulma ömrü, düşük yoğunluk, mükemmel korozyon direnci, bileşiminde zararlı maddeler içermemesi ve yüksek sıcaklık dayanımı nedenleri cazip yapısal ve fonksiyonel bir mühendislik malzemesidir. Yerkabuğunda en çok karşılaşılan elementlerden dördüncüsü olmasına rağmen, yüksek ergime noktası ve aşırı kimyasal reaktiflik özelliğine bağlı olarak, üretim maliyeti oldukça yüksektir (Hourmand ve diğ., 2021; Habrat ve diğ., 2019). Titanyum ve alaşımları sahip olduğu üstün özellikleri nedeniyle modern endüstriyel alanlar için tercih edilen bir malzemedir. Günümüzde, Ti ve alaşımları başta uzay ve havacılık sanayi olmak üzere çeşitli hafif yapılarda, kimya, medikal, denizcilik, petrol endüstrisi, spor aletleri, nükleer güç santrallerinde ve taşımacılık sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Niknam ve diğ., 2014). Alüminyum gibi hafif ve Fe-C alaşımları gibi dayanıklı olması ile biyomalzeme alanında oldukça geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Titanyum ile bazı metallerin fiziksel özelliklerinin karşılaştırılması Tablo 2.1'de verilmiştir.

**Tablo 2.1:** Bazı metallerin fiziksel özelliklerinin kıyaslanması (Veiga ve diğ., 2012).

| Özellikler | Ti | Al | Fe | Ni |
|---|---|---|---|---|
| Yoğunluk (g/cm$^3$) | 4,5 | 2,7 | 7,9 | 8,9 |
| Erime Noktası (˚C) | 1670 | 660 | 1538 | 1455 |
| Termal İletkenlik (W/mK) | 15-22 | 221-247 | 68-80 | 72-92 |
| Elastik Modül (GPa) | 115 | 72 | 215 | 200 |
| Oksijen ile Reaktiflik | Çok Yüksek | Yüksek | Düşük | Düşük |
| Korozyon Direnci | Çok Yüksek | Yüksek | Düşük | Orta |
| Malzeme Fiyatı | Çok Yüksek | Orta | Düşük | Yüksek |

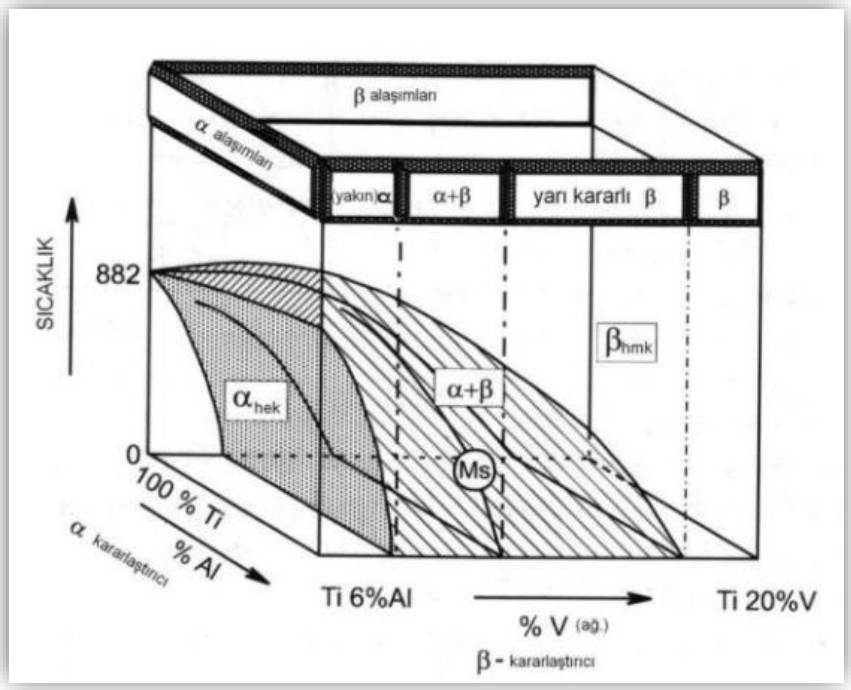
Titanyum, alfa (α) ve beta (β) olmak üzere iki tür kristal yapıya sahiptir. Titanyum alaşımları dört grup altında sınıflandırılır: yüksek saflıkta titanyum (Ti >%99), alfa alaşımları (%90-95 Ti), alfa-beta alaşımları (%80-90 Ti) ve beta alaşımları (Ti >%80) şeklindedir. 882 ˚C'nin

altındaki sıcaklıklarda, titanyum sıkı paket hegzagonal (SPH) fazlı kristal yapısında bulunur fakat sıcaklık 882 ˚C'nin üzerine çıkarılmasıyla, α fazı allotropik bir dönüşüme uğrayarak hacim merkezli kübik (HMK) β fazına geçer. Bu faz, titanyumun (1668 ˚C) erime noktasına kadar stabil kalır; bununla birlikte, belirli elementlerin eklenmesi dönüşüm sıcaklığını değiştirebilir. Plastik deformasyona yatkınlık SPH kristal yapıda ez az seviyede iken yüzey merkezli kübik (YMK) kristal yapısında en fazladır. Titanyum ve alaşımlarında SPH kristal yapısındaki α titanyum fazı, HMK kristal yapıdaki β titanyum fazındaki malzemelere göre plastik deformasyona daha az yatkındır. Titanyumun sahip olduğu kristal kafes yapısı ile deformasyon ve difüzyon miktarları da değişmektedir. SPH kafes yapısındaki titanyumun mekanik özellikleri anizotropiktir (Leyens and Peter, 2006; Lütjering ve Williams, 2007). Titanyumun SPH (α fazı) ile HMK (β fazı) olan iki farklı kafes yapısı Şekil 2.1'de verilmiştir.




**Şekil 2.1:** Titanyumun SHP ile HMK kafes yapıları (Akdaş, 2006).

Alüminyum (Al), Galyum (Ga), Oksijen (O), Azot (N) ve Karbon (C) eklenmesi dönüşüm sıcaklığını yükseltir. Bu elementler α fazını stabilize eder ve kararlaştırıcı olarak bilinirler. Vanadyum (V), Molibden (Mo), Niyobyum (Nb), Demir (Fe), Krom (Cr), Nikel (Ni), Manganez (Mn) ve Kobalt (Co) gibi elementler dönüşüm hızını azaltır (Akdaş, 2006, Niknam ve diğ., 2014, Özyürek ve diğ., 2011). Şekil 2.2'de Al ve V elementleri ile alaşım oluşturan üç boyutlu titanyumum faz diyagramı verilmiştir. Ti alaşımları oda sıcaklığındaki mikroyapılarına bağlı olarak α, β, α+β, α'ya yakın veya β yarı kararlı şeklinde sınıflandırılmaktadır (Lütjering ve Williams, 2007; Motyka ve diğ., 2012; Yalçın, 2007). Alfa alaşımları yapılarında yalnızca alfa fazı, beta alaşımları yapılarında yalnızca beta fazı bulunmaktadır. Alfa+beta alaşımları ise oda sıcaklığında her iki fazı da bünyesinde bulundurmaktadır. Eğer alaşım yapısında alfa fazı fazlaysa "yaklaşık alfa", beta fazı fazlaysa "yaklaşık beta" alaşımları denilmektedir. Tablo 2.2'de alaşım elementi tipine ve içeriğine göre Ti alaşımlarının sınıflandırılması verilmiştir.




**Şekil 2.2:** Titanyum alaşımlarının üç boyutlu sınıflandırılması (Leyens ve Peters, 2006).

**Tablo 2.2:** Titanyum alaşımlarının tipleri (Yıldız, 2010).

| Alaşım Grubu | Alaşım Tipi |
|---|---|
| α Alaşımları | Ticari Saf – ASTM derecesi 1, 2, 3 ve 4<br>Ti/Pd Alaşımları – ASTM derecesi 7 ve 11<br>Ti2.5Cu – IMI 230 |
| Yaklaşık α Alaşımları | Ti8Al1Mo1V<br>Ti6Al5Zr0.5Mo0.2Si – IMI 685<br>Ti6Al2Sn4Zr2Mo0.08Si<br>Ti5.5Al3.5Sn3Zr1Nb0.3Mo0.3Si – IMI 829<br>Ti5.8Al4Sn3.5Zr0.7Nb0.5Mo0.3Si –IMI 834<br>Ti6Al3Sn4Zr0.5Mo0.5Si – Ti 1100 |
| α + β Alaşımları | Ti6Al4V<br>Ti4Al4Mo2Sn0.5Si<br>Ti4Al4Mo4Sn0.5Si – IMI 551<br>Ti6Al6V2Sn<br>Ti6Al2Sn4Zr6Mo |
| Yarı Kararlı β Alaşımları | Ti3Al8V6Cr4Zr4Mo Beta C<br>Ti15Mo3Nb3Al0.2Si<br>Ti15V3Cr3Sn3Al |

### 2.1.1. Saf Titanyum

% 98,5 - 99,5 oranında titanyum içeren ticari saflıktaki titanyum, yerkabuğunda rutil ($TiO_2$) veya ilmenit ($FeTiO_3$) şeklinde bulunur. Oksijene karşı aşırı ilgisi dolayısıyla, titanyumu saflaştırma ve kullanılmaya hazır duruma getirme maliyeti oldukça yüksektir. Ticari saflıktaki titanyumun şekillendirilebilme yeteneği yüksektir, kolayca kaynak yapılabilir ve mükemmel korozyon direncine sahiptir. Genellikle, yüksek dayanım gerektirmeyen fakat korozyon direncinin önemli olduğu uygulamalarda tercih edilirler. Saf titanyumun korozyon direncinin alaşımlı titanyumlara göre yüksek olmasına karşın mukavemetleri daha düşüktür. Genelde soğuk çalışma koşullarında tercih edilmektedir. Saf titanyum, kullanıcılarına göre değer seviyesi fazla olan bir malzeme olarak görülmemektedir. Tercih edilmesindeki en önemli neden ise düşük miktarlarda alaşım elementlerinin ilavesiyle yeni özellikleri kazanmasıdır. (Sert, 2017; Ensarioğlu ve Çakır, 2005).Ticari saflıktaki titanyumların en yüksek kullanım alanı ise korozyon direncine sahip borular, tanklar ve kimyasal proses endüstrisi ekipmanlarıdır (Pramanik ve Littlefair 2015; Ezugwu, 2005; Campbell, 2006).

### 2.1.2. Alfa Alaşımları

Alfa (α) alaşımları, yüksek oranda α fazı ve bazen de tamamen α fazı içerir. Bu alaşımlar, 300 °C'ye kadar çekme mukavemetlerini korur ve ayrıca yüksek sıcaklıklarda olağanüstü sürünme stabilitesi sergiler. Isıl işlem uygulaması mikroyapısal özelliklerinde değişim yapmaz. Çok düşük miktarda arayer atomu içeren α alaşımları, sünekliğini ve tokluğunu çok düşük sıcaklıklarda dahi sürdürmektedir. Bu alaşımlar 300 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çekme mukavemetlerini kaybettiklerinden, en çok kriyojenik uygulamalar veya korozyona karşı büyük direncin gerektiği yerlerde kullanılırlar. Ti5-2,5(Ti5Al2,5Sn) en çok kullanılan α alaşımıdır. Yüksek sıcaklık veya sürünme dayanımı gerektiren uygulamalarda daha çok kullanılırlar (Sert, 2017; Leyens ve Peters, 2006; Lütjering ve Williams, 2007).

α'ya yakın alaşımlar, α titanyum alaşımlarına az miktarda β kararlaştırıcı elementlerin ilavesi ile oluşurlar. %1–2 oranında β kararlaştırıcısı ekleyerek titanyum alaşımlarının işlenebilirliği ve mukavemetini arttırmak mümkündür. α'ya yakın alaşımlar yüksek oranda α dengelidir ve az miktarlarda β dengeleyici elementler içerir. Bu alaşımlar, az miktarlarda β fazı içeren mikroyapıları ile tanımlanır. α fazı alaşımlarına yüksek benzerliklerinden dolayı, 400 ile 520 °C arasındaki yüksek sıcaklıklarda kullanılabilirler. Bu nedenle, yakın alfa (α) titanyum alaşımları, havacılık sektöründe jet motorları gibi yüksek sıcaklıklara maruz kaldığı yerlerde çok sıkı kullanılmaktadır (Niknam ve diğ., 2014; Matthew, 2001; Pramanik, 2014).

### 2.1.3. Beta Alaşımları

Beta alaşımları yüksek oranda HMK yapıda beta fazı içermektedir. Beta fazı içeriğinin artması ile ısıl işlem ile özelliklerinin iyileştirilmesi mümkündür. Ayrıca süneklilikteki artış ile alfa alaşımlarına göre şekillendirilmeleri daha kolay olur. Beta alaşımları β dengeleyicilerle desteklendiğinden soğuma hızının artması ile tamamı β fazından oluşan dengesiz bir faz meydana getirirler. Beta matrisi içinde, α fazının çökelmesi ile sertleştirilebilirler. Katı eriyik sertleştirilmesi ile dayanım gerçekleştirilir. Genel olarak, kırılma toklukları ve korozyon direnci yüksek ve çok iyi kaynak edilebilirler özelliktedirler. Sürünme değerlerinin düşük olmasından dolayı, uygulama alanları 370 °C işlem sıcaklığı ile sınırlıdır (Ezugwu ve diğ., 2005; Campbell, 2006). β alaşımları yüksek dayanım gerektiren uçak parçaları, yaylar ve boru ürünlerinde kullanılmaktadır (Boyer ve Briggs, 2005; Niknam ve diğ., 2014).

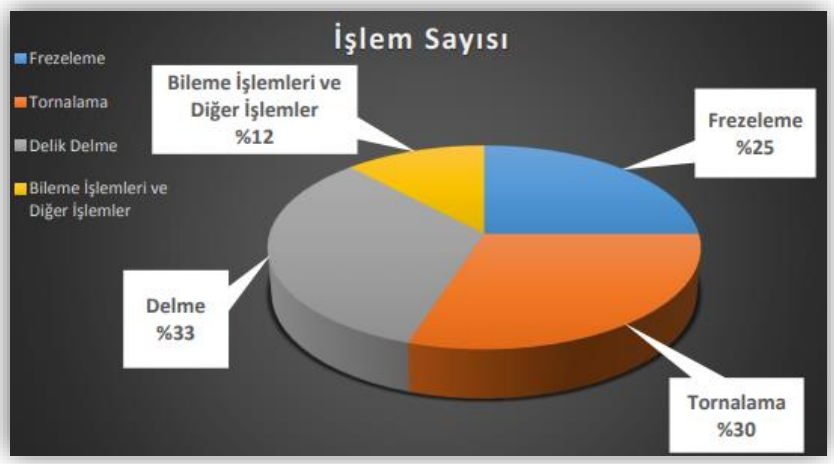
### 2.1.4. Alfa-Beta Alaşımları

Bu alaşım grubu, bir veya daha fazla α fazını kararlaştırıcı, α fazı içinde çözünebilen elementler vasıtasıyla bir veya daha fazla β fazını kararlaştırıcı elementleri bünyesinde bulundurur. α+β faz elementlerin uygun bir şekilde bir araya gelmesiyle oda sıcaklığında α+β fazlarının bir arada olduğu yapı elde oluşmaktadır. Ticari uygulamalarda en çok kullanılan α+β titanyum alaşımları; Ti6Al4V, Ti6Al6V2Sn ve Ti6Al2Sn4Zr6Mo'dir. Bu alaşımlar ısıl işlem sonrası yüksek dayanım değerlerine ulaşırlar. Özellikle 350 - 400 °C arasındaki çalışma sıcaklıklarda yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır (Livingston, 2011; Lütjering ve Williams, 2007). Bunlar arasında Ti6Al4V alaşım grubu üstün özelliklerinden dolayı titanyum üretiminin yarısından fazlasının oluşturmaktadır. Alüminyum kararlaştırıcısı alfa fazını oluşturarak dayanımı arttırırken, Vanadyum kararlaştırıcısı beta fazını oluşturarak çözelti sertleştirmesine neden olarak ısıl işlem yapılabilir özelliğini arttırmaktadır. Kaynak edilebilirlik özelliği ve şekillendirme kabiliyetleri diğer alaşım grupları ile kıyaslandığında daha iyidir. Ti6Al4V alaşımı özellikle havacılık ve uzay sanayinde %60 gibi yüksek bir oranda kullanıma sahiptir. Son yıllarda medikal sektöründe de kullanım oranı hızla artmıştır. Oldukça yüksek mukavemete sahip Ti6Al6V2Sn alaşımı ve yüksek mukavemet ve tokluğa sahip Ti6Al2Sn4Zr6Mo alaşım grubu, 400 °C'ye kadar olan işlem sıcaklıklarında kullanılmaktadır (Sert, 2017; Ezugwu ve diğ., 2003; Campbell, 2006).

## 2.2. Ti6Al4V ALAŞIMLARININ İŞLENEBİLİRLİĞİ

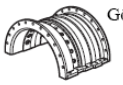
İşlenebilirlik, parça yüzeyinden talaş kaldırma esnasında oluşan kayıplarının az veya çok olmasıyla ifade edilebilir. İşlenen malzemenin kimyasal bileşimi, mikroyapısı ve mekanik özellikleri işlenebilirliği önemli oranda belirleyen etkenlerdir (Çelik ve Kılıçkap, 2018). Şekil 2.2'de talaşlı işleme yöntemlerinin kullanım oranlarına bakıldığında; delme, tornalama ve frezeleme işlemlerinin oldukça büyük oranlarda kullanıldığı görülmektedir. İşlenebilirliğin belirlenmesinde kullanılan ana unsurları aşağıdaki şekilde ele alabiliriz (Katta ve Chaitanya, 2017; Sert 2017; Pramanik 2015; Niknam ve diğ. 2014; Arrazola ve diğ., 2009; Eser, 2006).

- Takım aşınması ve takım ömrü: En fazla değerlendirilen işlenebilirlik kriteridir. Aşınan takım, işlenen parçanın yüzey kalitesini, işleme zamanının ve maliyeti doğrudan etkileyen önemli bir unsurdur. Doğru takımın seçilmesi, talaşlı imalat açısından birçok sorunu ortadan kaldırırdır.
- Talaş Formu: Talaşların şekli, boyutu ve oranı işlenebilirlik özelliğini belirleyen bir unsurdur. Belli koşullarda kesme parametrelerinin veya kesici uç formunun değiştirilmesi ile talaş oluşumu değiştirilebilir.
- Yüzey Kalitesi: İşlenen parçanın yüzey kalitesi genellikle yüzey pürüzlülük değerinin ölçülmesi ile değerlendirilir. Bu değer azaldıkça yüzey kalitesi iyileşir.
- Kesme kuvveti veya kesme gücü: Kesme gücünün mevcut koşullarda azaltılması işlenebilirliğin iyileştirilmesidir. Yüksek kesme kuvveti, ölçü keskinliğini azaltarak takım aşınma hızını arttırarak takım ömrünü azaltır. Kesme kuvveti doğru kesme parametrelerinin seçimi ile azaltılabilir.




**Şekil 2.3:** Talaşlı imalat yöntemlerin kullanım oranları (Eser, 2016).

Ti6A14V alaşımı geniş uygulama alanına sahip yüksek mukavemet, mükemmel korozyon direnci ve iyi yorulma dayanımı gösteren mühendislik alaşımıdır. Ti6Al4V alaşımı uzay, havacılık, nükleer enerji üretim tesisleri, otomotiv, gıda işleme makineleri, spor malzemeleri, biyomedikal ürün ve implant imalatı gibi çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır. Bu alaşımın havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılmasının nedeni, jet motorları gibi ısıya, korozyona ve yorulmaya dayalı zorlu çalışma koşullarında kullanılmasını uygun kılan üstün özellikleridir. Yüksek sıcaklıklarda çalışabilen jet motorları daha verimli çalışır ve yakıt tüketimi azalır. Kullanım alanları göz önüne alındığında; Ti6A14V alaşımından üretilen parçalar oldukça iyi yüzey hassasiyeti boyut kalitesi gerektiren uygularda kullanılmaktadır. Talaşlı imalat yöntemleri; ölçümsel doğruluk ve yüzey bütünlüğü açısından parçaya son şeklinin verilme konusunda ön sıradadır. Şekil 2.4'te titanyum alaşımlarından üretilen uçak parçalarının talaşlı imalat yöntemlerini oran olarak vermektedir (Jaffery ve Mativenga, 2019; Özyürek ve Tekeli, 2011; Sert, 2017; Çelik ve Kılıçkap, 2018). Bu tez çalışmasında da ele alınan ve geleneksel olarak ifade edilen tornalama, frezeleme ve delik delme operasyonlarının oldukça yoğun oranlarda kullanılmaktadır.

| Uçak Parçası | Tornalama | Frezeleme | | Delik Delme | Diğer |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Değişebilen | Yekpare | Yekpare | |
|  Disk | %75 | | | %5 | %20 |
|  Kanatçıklı disk | %30 | %20 | %45 | %5 | |
|  Kompresör gövdesi | %20 | %40 | %20 | %20 | |
|  Gövde | %60 | %20 | %10 | %10 | |
|  Türbin kanadı | | %60 | %20 | %20 | |
|  Yüksek basınç kanadı | | %10 | %50 | | %40 |
|  Valfler | %10 | %10 | %40 | | %40 |
|  Motor sabitleme aparatı | | %70 | %20 | %10 | |

**Şekil 2.4:** Titanyum alaşımlarından üretilen uçak parçalarının talaşlı imalatında kullanılan yöntemler, yöntemlerinin kullanımının oransal olarak karşılığı (Sert, 2017).

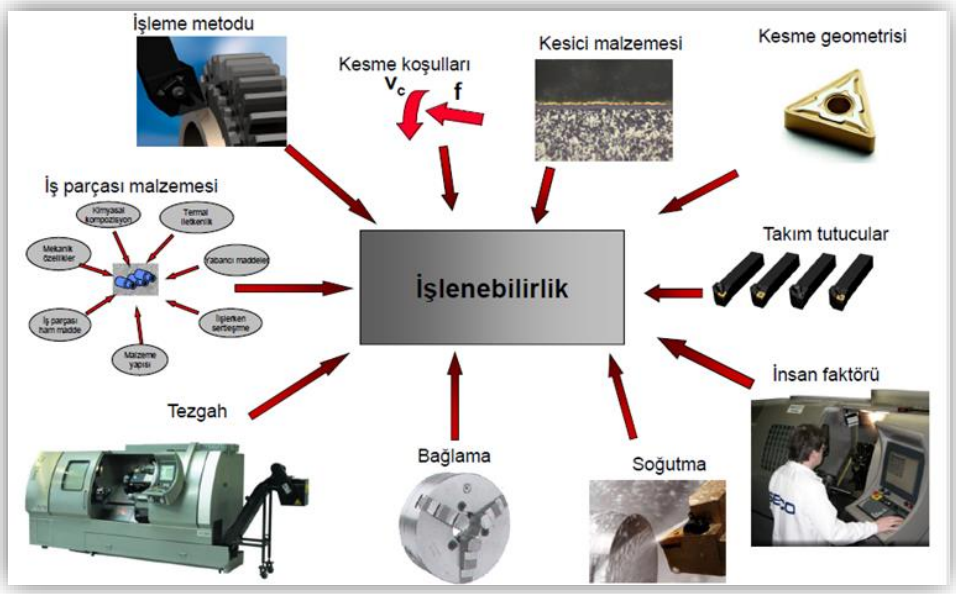
Büyük oranda talaşlı imalat yöntemleri ile üretimi gerçekleştirilen Ti6Al4V alaşımı işlenebilirliği zor olan malzemelerdendir. Titanyum alaşımlarının işlenmesinde karşılaşılan problemler üzerine ve işlenebilirliğinin iyileştirmek için, titanyumun alaşımlarının 1950'lerin başından itibaren kullanılması süreciyle akademik ve endüstriyel araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Talaşlı imalat ile üretiminde karşılaşılan zorlukların nedenleri aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Çiftçi ve Gökçe, 2019; Motorcu, 2009; Motorcu, 2010; Krishnaraj ve diğ., 2014; Taylan ve Oral, 2018; Nahbani, 2001).

- Titanyum alaşımları zayıf termal iletkenlikleri nedeniyle kesme işleminde ortaya çıkan ısıyı hızlı şekilde dağıtamamaktadır. Isının büyük bir çoğunluğu kesme yüzeyinde ve kenarında hapsolmaktadır. Kesici takımda oluşan yoğun çalışma sıcaklığından dolayı, kesici uç ve titanyum alaşımı arasında kimyasal bir reaktivite meydana gelmektedir.
- İşlenen titanyum alaşımı ve talaş arsında oluşan birincil kayma bölgesinde heterojen deformasyon gelişimi sergilemesi işlemeyi zorlaştırır.
- Kesici takım ve talaş arsında oluşan ikincil kayma bölgesinde, titanyum alaşımının kesici uç ile yüksek kimyasal reaksiyon eğiliminde olması, takım aşınmasına neden olur.
- Titanyum alaşımlarının işlenmesinde, plastik deformasyon sırasında kararsızlık sergilemesi düşük kesme hızlarında dahi tırtıklı olarak bilinen talaş oluşur. Bu durum kesme kuvvetlerinde dalgalanmalara neden olur ve yüzey kalitesini düşürür.
- Titanyum alaşımlarının düşük elastisite modülüne sahip olması ve orta sıcaklıklarda ani olarak artış gösteren düşük elastiklik modülü, işleme esnasında eğilmeye neden olur. Özellikle, ince et kalınlığı olan malzemeleri ve bitirme yüzeyini işlerken sorun yaşanmaktadır.

Bu alaşımın işlenmesi sırasında ortaya çıkan bu tür sorunlar üretim maliyetlerini arttırmaktadır. Ayrıca bu sorunlar ürün kalitesini ve verimliliğini de düşürmektedir. Bu çerçevede talaşlı imalat sürecini optimize etmeye yönelik çalışmalar giderek önem kazanmaktadır (Soren ve diğ., 2019; Ezugwu, 2005; Jaffery ve Mativenga, 2009; Lazoglu ve diğ., 2014; López ve diğ., 2011; Sun ve diğ., 2009; Ribeiro ve diğ., 2003; Kadirgama ve diğ., 2008).

### 2.2.1. Ti6Al4V Alaşımlarının İşlenebilirliğini Etkileyen Faktörler

Talaşlı imalatta işlenebilirlik tek bir faktörle açıklanmayıp, birçok parametrenin etkisi altında kalan oldukça karmaşık bir kavramdır. İşlenebilirliğin değerlendirmek için işleme koşullarının en uygun duruma getirilmesi öncelikle temel malzeme özellikleri ve bu özelliklerin işlenebilirliği hangi derecede etkilediğinin dikkate alınması gerekir. Genel olarak işlenebilirliğin değerlendirmesi; kesme kuvveti ve gücünün ölçümü, takımın kullanım ömrünün belirlenmesi, talaş oluşum mekanizmasının anlaşılması, kesici takım sıcaklığı ve yüzey pürüzlülüğü gibi çeşitli ölçümler ile yapılmaktadır. Bunu yanı sıra; iş parçasının kimyasal, mekanik, fiziksel özellikleri ve mikroyapısı gibi parametrelerde etkilidir (Hasak, 2018; Davim, 2010). Şekil 2.5'te işlenebilirliği etkileyen faktörler şematik olarak verilmiştir.




**Şekil 2.5:** İşlenebilirliği etkileyen faktörler.

Bu bölümde, Ti6Al4V işlenebilirliği üzerinde etkili olan ana değişkenler olarak; kesme parametreleri olan kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliğinin yanı sıra kesici takım ve kesme ortamı şartları konuları ele alınacaktır.

#### *2.2.1.1. Kesme Hızı*

Titanyumun işlenebilirliğini zorlaştıran önemli nedenlerden biri olan ısıl eksenli aşınmalara sebep olan ısı iletiminin düşük olmasından kaynaklı bölgesel sıcaklık yoğunlaşmasıdır. Bu durumu etkileyen en önemli kesme parametresi kesme hızıdır. Kesme hızı; işleme süresini, talaş oranını yüzey kalitesini, kesici uçta oluşacak aşınma oranın ve tezgâhta meydana gelen titreşimleri, dolayısıyla işleme maliyetini büyük oranda etkiler. Titanyum alaşımlarının işlenmesinde uygulamalarda; çeliğin işlenmesinde kullanılan kesme hızı değerlerin %10-35'i

kullanılır. İşleme esnasında büyük oranda talaş oluşumuna neden olan bu durum zaten oldukça yüksek hammadde maliyetine sahip olan titanyum alaşımının işleme maliyetinin artmasına neden olur. Yüksek hız ile işleme ile bu durum telefi edilebilir ancak kesme hızının artması ile sıcaklık artacak ve testere dişli talaş oluşması sonucu kesici takım aşınması hızlanacaktır. Takım aşınması işlenen parçanın yüzey kalitesinin çabuk bozulmasına, yüzeysel sertlik artışına ve mikroyapısal değişikliklere neden olur. Genellikle, titanyum alaşımlarının işlenmesinde en yüksek kesme hızı 90-100 m/dak aralığındadır (Pramanik ve Littlefair, 2007; Ensarioğlu ve Çakır, 2005).

#### *2.2.1.2. İlerleme Hızı*

İlerleme hızı; iş parçasının özellikleri, işleme tezgâhı, kesici takımın geometrisi ve diğer kesme parametrelerinden etkilenir. Yüzey bütünlüğünü, kesme gücünü ve çıkan talaş oranı üzerinde belirleyici rol oynar. Genelde talaşlı üretim şartlarında; ilerlemenin belirleyici etkeni işlenen yüzey kalitesidir. İlerlemenin kesici takım aşınması üzerine etkisinin yoğun olmasının nedenleri aşağıdaki gibidir (Hasak, 2018; Davim, 2008; Ensarioğlu ve Çakır, 2005):

- Isıl iletkenliğin düşük olması sonucu gerçekleşen bölgesel ısınma, ilerleme hızını artması ile kesici takım ve talaş yüzeyinde aşınmaya neden olur.
- Kesici takım ve talaş yüzeyi arasındaki kesme bölgesinin dar bir alanda olması, ilerleme hızında en küçük artıştan bile etkilenmesine neden olmaktadır.

#### *2.2.1.3. Kesme Derinliği*

Kesme derinliği; iş parçasının işleme süresini, yüzey kalitesini, kesici takım aşınmasını, kesme kuvvetlerini ve talaş debisini etkileyerek işlenebilirliği etkilemektedir. Uygun olmayan kesme derinliğinin seçilmemesi yüzey kalitesinde bozulmalara sebep olur. Kesme derinliği az seçilirse, işlem süresi çok uzar ve maliyeti arttırır. Belirlenenden daha fazla seçilirse kesici ucun kırılmasına neden olur (Şahin, 2003; Eser, 2020). Titanyumun alaşımlarının işlenmesinde, kesme hızından sonra en etkili parametrenin kesme derinliği olduğunu belirten birçok çalışma bulunmaktadır. Isıl iletimi düşük olan titanyum alaşımlarının işlenmesinde artan kesme derinliği ile sürtünme kaynaklı ısı artışı olacağından, bölgesel sıcaklık daha da artacak ve takım aşınması hızlanacaktır (Davim, 2008; Ensarioğlu ve Çakır, 2005).

#### *2.2.1.4. Kesici Takım*

Talaş oluşumu için, kesme kuvveti ve kesici takım ile iş parçası arasında izafi hareket gereklidir. Kuvvet etkisi ve hareketten kaynaklı oluşan sürtünme, ısı artışının ve aşınma mekanizmasının ana nedenidir. Talaş kaldırma sırasında kesici uçta meydana gelen aşınma, talaşlı imalat performansını belirleyen en önemli faktörlerden birisidir. Kesici takımın kullanım ömrü

sınırlıdır. Takım aşınması, kesme işlemini belirleyen kesme hızı, ilerleme oranı ve talaş derinliğinden belirli oranlarda etkilenir, tüm bu kesme parametrelerinin optimizasyonu takım ömrünün iyileştirilmesi için şarttır. Plastik deformasyonun düşürülmesi; kesme ve ilerleme hızı, talaş derinliğinin azaltılması ile mümkündür (Šalak, 2005; Davim, 2008; Ensarioğlu ve Çakır, 2005; Signal, 2013). Doğru kesici takımların kullanımı ve kalitesinin iyileştirilmesi takımın kullanım ömrüne olumlu etki etmektedir. Takım ömrünün artması enerji tasarrufunu ve istenilen kalitede parçalar üretmeyi destekler.

Genelde titanyum alaşımları çalışma sıcaklığı 500 °C'nin üstüne çıkıldığında, kesici takım malzemeleri ile kimyasal olarak reaksiyona girerek, talaşların kesici uca yapışmasına ve oldukça ciddi aşınmalara neden olur (Niknam ve diğ., 2014; Akyol, 2007). Titanyumun alaşımlarının karakteristik özelliklerine bağlı olarak, talaşlı imalat ile işlenmesi sırasında kesici takımın maruz olumsuz kaldığı etkiler Tablo 2.3'de verilmiştir.

**Tablo 2.3:** Titanyum alaşımlarının özelliklerinin kesici takıma etkisi (Akyol, 2007).

| Malzeme Karakteristikleri | Kesici Takıma Etkisi |
|---|---|
| Mukavemetin yüksek sıcaklıklarda korunması | Yüksek kuvvet ve ısıların oluşması |
| Dar talaş/takım temas alanı | Kesme kuvvetinin ve ısının yoğunlaşması |
| Isıl iletkenliğin düşüklüğü | Isının sıkışıp yükselmesi |
| Periyodik talaş oluşumu ve düşük elastisiteden kaynaklanan değişken kuvvetler | Vibrasyon ve tırlama |
| Kimyasal reaktifliğin yüksek olması | Özellikle krater aşınması olmak üzere kimyasal tabanlı aşınmalar |

Tüm bu olumsuz etkiler göz önüne alındığında, oluşan ve uzaklaştırılması mümkün olmayan yüksek ısıya direnç göstermesi açısından titanyum alaşımının işlenmesinde kullanılan kesici takımlarda bulunması gereken özellikler: yüksek aşınma direnci, kimyasal kararlılık, iyi kızıl

sertlik, yüksek tokluk, yüksek ısıl iletkenlik ve yüksek kesici uç keskinliğidir (Ensarioğlu ve Çakır, 2005; Niknam 2014). Titanyum alaşımlarının talaşlı imalat ile işlenmesinde kesici takım ucunun özelliklerinin performansı Tablo 2.4'te verilmektedir.

**Tablo 2.4:** Titanyum alaşımlarının işlenmesinde farklı özellikte takımların performansları (Nabhani, 2001; Ahkubo ve diğ., 2000)**.**

| **Takım Çeşidi** | **Performansı** |
|---|---|
| Seramik Takımlar | Isıl iletkenliklerinin düşük olması nedeniyle malzemeden ısı uzaklaşamaz bu nedenle ısı kesici takımdan da uzaklaşamaz ve ısı nedeniyle meydana gelen aşınma mekanizmaları yüksek oranda etkilidir. Titanyum ve alaşımları işlenirken, seramik takımların krater ve serbest yüzey aşınması sebebiyle gerçekleşebilecek kırılmanın, oluşan yüksek gerilmelerin ve değişken yük değerlerinin "tokluk" gerektirmesi seramik kesici takımların en önemli eksikliğindendir. Titanyumla reaksiyona girme eğilimleri oldukça fazla olması nedenleriyle tavsiye edilmezler. |
| Hız Çeliği Takımlar | Talaşlı imalat sırasında meydana gelen yüksek ısı ve gerilmeler nedeniyle, kısa sürede plastik deformasyon meydana gelmekte ve daha sonra kırılma gerçekleşmektedir. Kesme işleminin aralıklı yapılması gerekmektedir. Bu işlem dışında titanyumun işlenmesinde önerilmezler. |
| Kaplamalı Karbür Takımlar | Titanyumun işlenmesi esnasında kaplama kısa sürede hasara uğramaktadır. Bu nedenle tavsiye edilmezler. |
| Kaplamasız Karbür Takımlar | Kaplamalı karbür takımlara göre daha iyi işlenebilirlik gösterirler. Bunun nedeni ise kaplamalı takımların, takım ana malzemesinin de kaplama ile birlikte hasar görmesidir. Özellikle K sınıfı olarak geçen tungsten karbür takımlar (WC), tokluk özelliği kazandırmak amacıyla %6 Co eklenmesi ile, genel amaçlarla titanyumun talaşlı imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. Sementit karbür takımlar ise, iyi işlenebilirlik sağlamazlar. |
| PCD ve CBN Takımlar | Bu kesici takımlar, aşınmaya karşı çok iyi dayanım sergilemektedirler. Ancak maliyetlerinin yüksek olması kullanımlarını kısıtlamaktadır. Hassas işlemlerde yüksek yüzey kalitesi ve uç değişim sıklığının azaltılarak ilgili olan kalite tutarlılığı aranıyorsa bu takımların tercih edilmesi gereklidir. |

#### *2.2.1.5. Kesme Sıvısı*

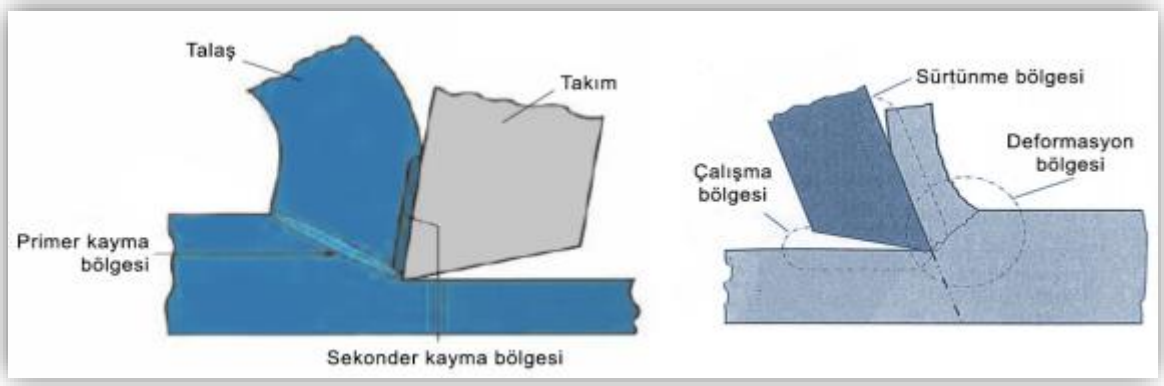
Talaşlı imalat yöntemleri arasında yaygın olarak kullanılan; matkapla delik delme, tornalama, frezeleme, testere ile kesme ve taşlama gibi işlemlerde kullanılan kesici uç, kesilen malzeme yüzeyi ve çıkan talaş arası oldukça yüksek oranlarda ısı oluşur. Açığa çıkan ısının zararlı etkisini azaltıp kesici takımın aşırı ısınmasından kaynaklı aşınmayı önleyerek kullanım ömrünü arttırmak ve üretim maliyetlerini düşürmek için kesme sıvısı kullanılmaktadır. Takım ve işlenen malzeme arasına talaş yapışmasını engellemek ve işlenen parçayı ve kesici ucu korozyona karşı korumak ve talaşların kolay uzaklaştırılması sağlamakta en temel kullanım nedenlerindendir. Sonuç olarak; sıcaklıktan kaynaklı şekil değişimleri azalmış, daha düşük kesme gücü kullanılarak daha düzgün yüzey kalitesi elde etmeye katkı sağlar (Šalak,ve diğ. 2005; Aktaş, 2021).

Titanyum alaşımlarının işlenmesinde yaşanan en önemli sorun kesme esnasında oluşan yüksek sıcaklık ve bu yüksek ısının sebep olduğu yapışmadan kaynaklı aşınmadır. Bu durumu bertaraf etmek işlemede ısı etkisini azaltmak için kesme sıvısı kullanmak gerekmektedir. Kesme hızı düşük olduğunda talaşlı işlemede kullanılan bor yağı tercih edilirken, yüksek kesme hızlarında klor içerikli kesme sıvılarının kullanılır. Kesme sıvıları yüksek oranda viskoziteye sahip olmalarından dolayı yağlayıcı özellikte gösterirler. Yüksek basınçla takım ve talaş temas yüzeyine nüfuz etmeleri sayesinde sürtünme etkisini azaltarak, sürtünme katsayısı ve sıcaklığı düşürür, kesici takım sertliğini korunur, yapışma durumu azalır. Düşük kesme hızlarında kullanılan sıvı azot soğuk kesme işlemlerinde tercih edilmektedir (Ensarioğlu ve Çakır, 2005; Taylan ve Oral 2018).

### 2.2.2. Talaş Oluşumu Mekaniği

Talaş kaldırma işlemleri başlıca üç grupta incelenebilir. Birincisi doğrusal kesme, ikincisi dönel kesme işlemleri ile talaş kaldırmadır. Üçüncüsü ise bileşik veya helisel kesmedir. Matkapla delme işlemi yapılırken matkap hem dönel hem de doğrusal hareket yaparak kesme yapar. Bu hareket küçük adımlı helis şeklinde oluşur. Kesme işleminde, kesici takım iş parçasına temas ettiğinde talaş iş parçası üzerinde bölgesel bir kesme oluşmaya başlar. Kesme düzleminin hemen üzerinde plastik deformasyona uğramış ve yüksek gerilme kazanmış talaş iş parçasından ayrılırken kesici takımın ön yüzeyine sürtünerek yukarıya doğru hareketlenir. Bu esnada aynı anda kesme düzleminin ön tarafında plastik basma, plastik basmanın da önünde elastik basma meydana gelir. Plastik basma, sıcaklığı yükselmiş olan metalde yoğun dislokasyon artışı ve dolayısıyla deformasyon sertleşmesi meydana getirir. Deformasyon sertleşmesi maksimum

düzeye ulaştığında malzeme geri dönüşüm yapamaz ve kesilir. Kesme işlemi sürekli değildir, talaş ince tabakalı bir yapı şeklinde görülür. Kesici takım ucunda meydana gelen kesme işlemi üç bölgede incelenebilir. 1. bölge deformasyon bölgesi, 2. bölge sürtünme bölgesi ve 3. bölge çalışma bölgesidir. Şekil 2.6'da şematik olarak talaş kaldırma sırasında oluşan kesme bölgeleri görülmektedir (Vipidas ve Mathew 2021; Šalak ve diğ., 2005; Sun ve diğ., 2009; Hasak, 2018).




**Şekil 2.6:** Talaş kaldırma esnasında oluşan kesme bölgeleri (Hasak, 2018).

Şekilden de görüldüğü gibi talaşlı imalat işlemi esnasında birinci deformasyon bölgesinden ayrılan talaş, kesici takım-talaş yüzeyinden geçerek kesme bölgesinden atılır. Talaşın bu bölgeden geçerken kesici takımla etkileşimi ve davranışı talaşlı imalat performansını önemli ölçüde etkiler. Çoğu analizlerde bu bölgede kesici takım ve talaş arasında klasik sürtünme olduğu kabul edilmiştir. Fakat bu yaklaşımın genellikle uygun olmadığı görülmüştür. Kesici takım, talaş ve ani durdurma ile elde edilen numuneler üzerinde yapılan metalürjik incelemelerde, bu bölgede çoğunlukla klasik sürtünmenin olmadığı ve yapışma olduğu sonucuna varılmıştır. Bu bölgede yüksek basınç ve sıcaklıktan dolayı iki yüzey birleşerek metalin kayma hareketini durdurur. Fakat takım-talaş arasındaki hareket devam ettiğinden dolayı ara yüzeyde akma bölgesi oluşur. Hareketin şekli çoğunlukla kesilen iş parçası malzemesinin özelliğine ve kesme parametrelerine bağlıdır. Bu bölge "akma bölgesi" veya "ikinci deformasyon bölgesi" olarak adlandırılır (Sun ve diğ., 2009; Šalak ve diğ., 2005; Hasak, 2008; SenthilKumar ve diğ. 2013).

Kesici takımın iş parçası üzerinden talaş kaldırması için gerekli olan üç şart şu şekilde özetlenebilir: Kesici olarak kullanılan bir takımın iş parçasından daha sert ve aşınmaya karşı daha dirençli olması gerekir. Kesici takımın, iş parçasına dalmasını kolaylaştırmak için belirli bir geometriye sahip olmalıdır. İş parçası malzemesinin direncini yeterli kuvvetle yenmesi için iş parçası ve takım arasında bir kesme hızı ve ilerleme hareketi olması gerekmektedir. (Šalak

ve diğ., 2005; Hasak, 2018). Talaş oluşumu testlerinde, operasyon sırasında talaşın oluşma kolaylığı, takıma, iş parçasına ve operatöre zarar vermeden, kırılması dikkate alınır. Talaş morfolojisi yoluyla malzeme davranışı hakkında bilgi almak mümkündür. Kolay talaş oluşumu, mesela daha düşük kesme kuvveti veya daha az takım aşınması verileriyle desteklenmedikçe tam belirleyici olmaz (Sun ve Dargusch 2009; Erdi, 2012; Hasak, 2018). Çeşitli şekillerde talaş formları Şekil 2.7.'de gösterilmiştir.




**Şekil 2.7:** Çeşitli talaş şekilleri (Erdi, 2012).

Şerit, karışık ve sarmal talaşlar kabul edilmez, helisel, uzun tüp, kısa virgül ve uzun virgül talaşlar kabul edilir, ufalanmış ve spiral talaşlar iyi talaş olarak sınıflandırılmaktadır. Talaşın kesintisiz ve sürekli çıkması, kesici takım açılarının iyi olduğunu ve bilemenin iyi yapıldığını gösterir. Çıkan talaşların bir yandan ideal sayılan kesintisiz talaş olması istenirken, diğer yandan, bu talaşların tezgâha ve operatöre zarar vermemesi ve depolama/taşıma kolaylığı sağlaması istenir (Gavas ve diğ., 2013). Aynı zamanda kesme bölgesinden uzaklaşan talaşın kontrolü ve işlem sırasında oluşan ısının büyük bir bölümünün bu talaşlarda ortamdan uzaklaştırılması zorunluluğudur (Çakır, 2006). Durum böyle olunca kesintisiz talaşların belli bir boyda kopması arzu edilir. Bunu sağlamak için de talaş kırıcılar kullanılır. Talaş kırıcılar bazen direkt olarak kesici takımın yüzeyinde oluşturulur, bazen de kesici takım üzerine

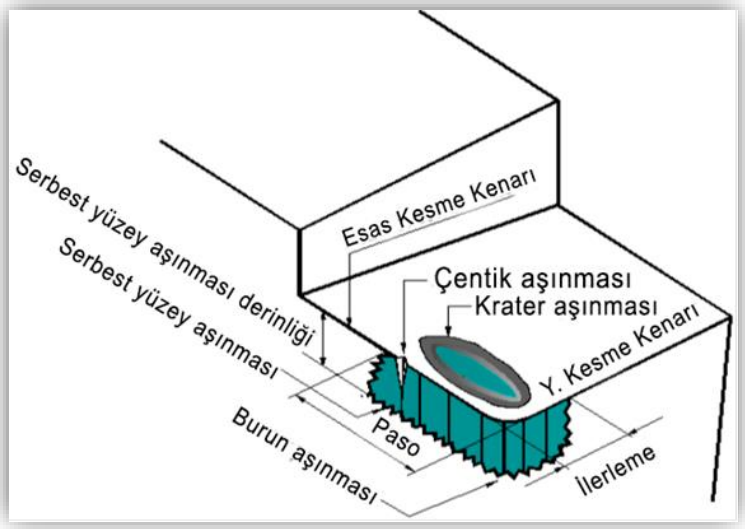
mekanik olarak bağlanan ilave parçalar yapılır. İşleme anında kesme bölgesinde ve yakınlarında oluşan plastik deformasyonlardan dolayı malzemenin sıcaklığı artarken, mekanik özelliklerine bağlı olarak malzemede deformasyon sertleşmesi meydana gelir ve malzemenin normal sertliği artar. Oluşan talaş tipleri kullanılan farklı kesme hızı, kesme derinliği, ilerleme derinliği, takım geometrisi ve malzeme cinsi talaş kaldırma parametrelerine bağlı olarak değişir. Elde edilen talaş tiplerini inceleyerek kesme şartları ve yüzey kalitesi hakkında bilgi almak mümkündür (Šalak ve diğ., 2005; Özçatalbaş, 2003; Hasak, 2018).

### 2.2.3. Takım Aşınması

Sanayide tam otomatikleşmenin önemli bir konuma gelmesiyle birlikte kesme işlemi esnasında takım durumunu incelemek amacıyla bu konu üzerine araştırmacılar birçok çalışma yapmışlardır. Talaş oluşumu esnasında hem takım ile talaş hem de takımla işlenen yüzey arasında oluşan sürtünmeler, ısınmanın gerçekleşmesine ve takım aşınmasına neden olmaktadır. Gerçekleşen bu iki olay, talaş kaldırma için çok önemli olan takım ömrünü belirler. Takım ömrü, esasen olarak aşınmaya bağlı olması nedeniyle, aşınmayı etkileyen parametreler takım ömrünü de etkilemektedir. Öncelikle iş parçası ve kesici takımın malzeme ve mekanik özellikleri ile beraber kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği ve kesme sıcaklığı gibi etkenler takımların aşınma miktarlarını belirleyen parametrelerdir. Bu parametrelerden en önemlisi de kesme hızıdır. Takım ömrü ise hem takım aşınmasını hem de işleme maliyetini belirleyen bir etmendir. Kesici takımda kırılma gerçekleşmeden değiştirilmesi aşınmanın incelenmesi açısından son derece önemlidir. Çünkü kesici takımda kırılma gerçekleşmesi hem çalışılan tezgaha hem de iş parçasına ekonomik açıdan büyük zararlara neden olmaktadır (Chowdhury, ve diğ., 2021; Özçatalbaş, 2002; Hasak, 2018; Şahin, 2003).

Kesici takım ile iş parçası sürtünme sonucu yüzeylerinde gerçekleşen malzeme kaybı takım aşınması olarak tanımlanmaktadır. Malzemelerdeki aşınma miktarı ise malzemenin cinsine, sürtünme gerçekleşen yüzeylerin biçime, servis şartlarına (sürtünme, çevre koşulları, kimyasallar) bağlıdır. Aşınma, büyük ekonomik kayıplara neden olduğu için bu konuda araştırmalar oldukça yoğunlaşmıştır. Ancak aşınmayı tamamıyla önlemek imkansızdır. Takımlarda gerçekleşen erken aşınma, üretimin akışını ve kalitesini olumsuz etkileyen önemli bir parametredir. Aşınma miktarını etkileyen parametrelerin seçiminde yapılacak bir yanlış tercih, takım aşınmasının hızlanmasına ve böylece aşınma miktarı arttıkça iş parçasının yüzey kalitesi de bozulacaktır. Buna ek olarak, kesici takımlarda meydana gelen aşınma arttıkça işleme maliyeti de artmaktadır. Üretimin daha etkili sonuçlar vermesi için kalite, verim ve

ekonomi kriterleri bir arada ele almak gerekmektedir. Takım aşınması işlemi esnasında mekanik veya kimyasal etmenlerden dolayı kesme kenarından parçacıkların kopmasıyla oluşan bir olaydır. Kesici takımda yan yüzey aşınması, krater aşınması, burun yarıçap aşınması ve çentik aşınması gibi aşınma türleri gerçekleşebilmektedir (Hasak, 2018; İnce, 2015; Sözen, 2016; Šalak ve diğ., 2005, Kam ve Şeremet, 2021). Şekil 2.8.'de çeşitli takım aşınmaları şematik olarak gösterilmiştir.




**Şekil 2.8:** Kesici takımdaki aşınmaların şematik olarak gösterilmesi (Şeremet ve Kam, 2019).

İş parçasıyla kesici takım arasındaki etkileşimden dolayı temas yüzeyindeki takım malzemesinin hacim kaybı olarak tanımlanır ve çoğunlukla takım-talaş ara yüzünde oluşan nispi kayma hızı, gerilmeler ve meydana gelen sıcaklıklarla belirlenir. Talaşlı imalat işlemlerinde kullanılan kesici takımların aşınması, talaşlı imalat işleminin verimliliğini, üretilen iş parçasının boyutlarını ve yüzey kalitesini doğrudan etkiler. Kesici takımda aşınma arttıkça, kesme kuvvetleri, kesme bölgesinde sıcaklık, titreşim ve ses artar. Artan kesme kuvvetleri sonucu daha fazla enerji gereksinimine ihtiyaç duyulur. Aynı zamanda, artan kesme kuvvetleri iş parçası ve kesici üzerinde daha fazla gerilme oluşturur. Aşınmış kesici takımda, kesici takımın kesici ucunda keskin bir kenardan farklı olarak sürtünen bir bölge olacağı için bu bölgenin iş parçası ile sürtünmesi sonucu da daha fazla ısı enerjisi açığa çıkarak, kesme bölgesinde kesici takım ve iş parçasının sıcaklığı artar. Artan sıcaklıkla, kesici takımın aşınma direnci ve dayanımı azalır. Artan sıcaklıkla aynı zamanda, iş parçası boyutlarında sapma olur ve istenilen ölçü toleranslarının dışına çıkılarak hatalı parçalar üretilebilir. Yüksek sıcaklık sonucu iş parçasının yüzeyinde ve yüzey altında istenilmeyen metalürjik dönüşümler oluşabilir. Bu dönüşümler iş parçası yüzeyinde çekme tipinde kalıcı gerilmelere neden olarak iş parçalarının yorulma dayanımını azaltabilir. İmalat sırasında verimi etkileyen en önemli

parametre olan takım aşınması ne kadar azalırsa üretim verimi o kadar artacaktır. Bu nedenle aşınmayı minimuma indirecek kesme şartlarını oluşturmak önemlidir. Ayrıca işleme sırasında aşınmış takımı da tespit etmek bir o kadar önemlidir. Kesici kenar üzerine etkiyen çeşitli yük faktörleri sebebiyle temel aşınma mekanizmaları talaş kaldırma işlemine dolayısıyla kesici takımın aşınmasına sebep olur. Aşınmış takımla işlemeye devam etmek hem verimi düşürecek hem de harcanan gücü artıracaktır. Dolayısı ile işleme maliyeti de artacaktır, bu nedenle aşınmayı azaltacak işleme şartlarını oluşturmak ve aşınma mekanizmalarını iyi bilmek gerekmektedir. Aşağıda aşınma mekanizmaları özetlenmiştir (Çakır, 2006; Ertunç ve Sevim, 2011; Hasak, 2018; Küçükköse, 2017) :

- Abraziv aşınma: En fazla görünen ve genellikle iş parçası malzemesinde bulunan sert parçacıkların neden olduğu taşlama işlemine benzer bir durumdur. İşleme esnasında sert taneciklerin, yumuşak malzemenin yüzeyinden parçacıklar koparması şeklinde görülür. Genellikle kopan parçacıklar takım-iş parçası ara yüzeyinden uzaklaşır ve yapışma olmaz. Bu nedenle yüzeyde malzeme kaybının fazla olduğu bir aşınma tipidir. Kesici kenarın abrasiv aşınmaya karşı direnç kabiliyeti, önemli ölçüde sertliğine bağlıdır. Abraziv aşınma takım talaş yüzeyinde ise krater oluşmasına sebep olur (Ertunç ve Sevim, 2011; Çakır, 2006; Hasak, 2018; Şahin, 2003).
- Difüzyon aşınması: Kesme işlemi sırasında daha çok kimyasal yükten etkilenen ve bir metal yüzeyden diğerine atom transferi ile meydana gelen bir aşınma tipidir. Yüzeyleri birbirine temas eden iki metal malzemenin birbirine yapışmasıyla başlayan ve yeniden ayrılması sırasında zayıf olan malzemenin ana parçadan kopmasıyla oluşan ve daha çok sıcaklığa bağlı oluşan bir aşınmadır. Talaş kaldırma işleminde kesici takım malzemesi ve iş parçası arasında oluşan yüksek sıcaklıklardan dolayı atomlar kesici takım malzemesinden iş parçası malzemesine hareket ettiğinde ortaya çıkar (Çakır, 2006; Hasak, 2018; Şahin, 2003; Şeremet ve Kam, 2019).
- Oksidasyon aşınması: Yaygın olmayan bir aşınma tipidir. Ancak kesme bölgesinde yüksek sıcaklık, çevresel faktörler ve soğutma sıvısı gibi dış faktörler birçok metal için oksidasyon demektir. Yüksek kesme sıcaklıklarında hava bulunması sonucunda yüzeylerde oksit tabakasının oluşmasıyla sonuçlanan bir aşınma tipidir. Oksitler birbirlerine göre farklılık gösterirler ve bazı oksit tabakaları çıkan talaş ile yüzeyden uzaklaştırılabilir. Bu durum bazı takım malzemeleri için kesici takımın aşınmasına sebep olmaktadır. Talaş kaldırma işlemi sonrasında temas yüzeylerinin yakınında

oluşan renklenmeler kesici takımın oksidasyona uğradığını gösterir (Küçükköse, 2017; Çakır, 2006; Hasak, 2018; Şahin, 2003).

- Yorulma aşınması: Termo-mekanik bir kombinasyonun sonucu oluşan bir aşınma türüdür. Sıcaklıktaki dalgalanmalar ve takıma etkiyen kesme kuvvetlerinin sıfır ile maksimum değerler arasında değişmesi, kesici kenarın çatlamasına ve kırılmasına yol açar. Aralıklı kesme işlemi sonucu telaş ile temasta olan kesici kenarında sürekli ısınma ve soğuma sonucu şok etkisi oluşur. Kesme kuvvetlerinin kesici kenarın mukavemetinden çok daha büyük olduğu durumlarda mekanik yorulma görülmektedir. Sert ve dayanıklı iş parçası malzemelerinin çok yüksek ilerleme hızlarında işlendiği veya takım malzemesinin yeterince sert olmadığı durumlarda söz konusudur. Bu gibi durumlarda plastik deformasyon oluşur (Ertunç ve Sevim 2011; Çakır, 2006; Hasak, 2018; Şahin, 2001).
- Adheziv aşınma: Takımın talaş yüzeyindeki düşük ilerleme hızına bağlı sıcaklıklardan dolayı meydana gelen bir aşınma tipidir. Alüminyum, çelik ve dökme demir gibi kısa ve uzun talaş veren malzemelerde görülür. Bu aşınma mekanizması genellikle kesici kenarı ile talaş arasında yığma kenar oluşumuna neden olur. Yüzeyleri birbirine temas eden iki metal malzemenin birbirine yapışmasıyla başlayan ve yeniden ayrılma sırasında zayıf olan malzemenin ana parçadan kopmasıyla oluşan bir aşınmadır. Takım aşınma mekanizmalarının sebep olduğu farklı tipte aşınmalar söz konusudur. İşlenebilirliğin tanımlanabilmesi için bunların belirlenmesi gerekmektedir. Genel olarak karşılaşılan aşınma tipleri aşağıda kısaca verilmiştir (Çakır, 2006; Şahin, 2001).
- Serbest yüzey aşınması: Kesici takımın kesme kenarı ve yan yüzeyinde sürtünme aşınması sonucu ile oluşan en yaygın aşınma tiplerinden biridir. Bu aşınma kesme kenarlarının abrazyonu ile meydana gelir. Genellikle üniform genişlikte ve kenara yakın bölgede oluşur. Serbest yüzey aşınması ortadan kaldırılamaz fakat azaltılabilir. Aşınma miktarı arttıkça kesme kuvvetleri artar ve buna bağlı olarak kesme bölgesindeki ısı artar ve yüzey kalitesi azalır. Yan kenar aşınması, takımın yan kenar yüzeyinin temas alanı ve yeni işlenmiş is parçası yüzeyi arasındaki sürtünmeden dolayı oluşur. Aşınma bölgesinin alanı, aşınma miktarının bir ölçümü olarak alınır ve optik mikroskop ile belirlenir (Özçatalbaş, 2002; Çakır, 2006; Hasak, 2018; Şahin, 2003).
- Krater aşınması: Takım ile talaş iş parçası arasında, talaş yüzeyinin en sıcak kısmında oluşan difüzyon sonucunda veya küçük talaş parçacıklarının, takım yüzeyine yapışmaları ve daha sonra koparak kesici takım malzemesi üzerinde girintiler

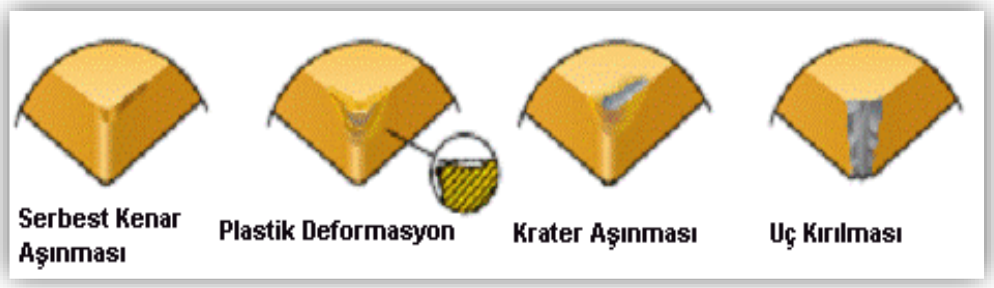
oluşturması sonucu ortaya çıkar. Aşırı miktarda gerçekleşen krater aşınması kesici kenar geometrisinin değişmesine, ucun zayıflamasına, talaş şeklinin bozulmasına, mukavemetin azalmasına ve kesme kuvvet yönlerinin farklılaşmasına yol açar (Çakır, 2006; Hasak, 2018; Şahin, 2003).

- Plastik deformasyon: Yüksek sıcaklık ve basıncın etkisi sonucunda kesici kenar üzerinde oluşur. Sert malzemeyi işleme, yüksek kesme ve ilerleme hızı, yüksek sıcak ve basınç meydana getirir. Plastik deformasyon aşınması daha yüksek sıcaklıkların oluşmasına, geometri deformasyonuna ve talaş akışının değişmesine sebep olur. Çelikler, süper alasımlar ve işlenebilirliği düşük diğer malzemeler islendiği zaman, takım, basma gerilimi altında plastik deformasyona maruz kalır veya kırılabilir. Takım ucundaki deformasyon, takım kuvvetini ve bölgesel sıcaklığı arttırır. Kesici uçtaki deformasyonu kontrol eden diğer önemli faktör ise, is parçası malzemesinin sertliğidir. Takım ucunda oluşan deformasyon, kesme hızı ve ilerlemeyle kontrol altında tutulabilir (Küçükköse, 2017; Şahin, 2001).
- Çentik oluşumu: Tipik bir adezyon aşınmasıdır. Malzeme ile kesici kenarın ayrıldığı noktada çentik meydana gelir. Bu aşınma ince işlemlerde yüzey kalitesini düşürür ve kesici kenarı zayıflatır. Zayıf kesici takım geometrisi veya köşe kısmında oluşan yapışmalar ve kırılgan kesici takım kullanılması bu tip aşınmanın oluşmasına sebep olmaktadır. Çentik aşınması, kimyasal reaksiyonla ve is parçası ile takım arasında fiziksel temas alanının dışında, yani talaş derinliğinin bitimine yakın yerde oluşur. Çentik aşınması, hem talaş hem de yan kenar yüzeyini aynı zamanda etkiler ve bazen şiddetli aşınmaya neden olur (Sahin, 2001).
- Isıl çatlaklar: Genellikle ısı değişimi sebebiyle yorulma aşınması olarak ortaya çıkar. Bu tip aşınma kesici takım kenarına dik olarak oluşur ve bunun sonucunda takım kırılır veya kesici kenar bozulmaya uğrar. Isıl veya termal çatlaklar aşınması frezeleme işleminde daha çok görülür. Talaş kalınlıklarındaki değişim sıcaklığın artmasına etki eden bir faktördür (Hasak, 2018; Şahin, 2003).
- Mekanik yorulma çatlakları: Kesme kuvvetlerinde oluşan ani değişimler neticesinde meydana gelir. Mekanik yüklerdeki sürekli değişim çatlağa sebep olur. Kesme işleminin başlangıcında ve kesme kuvvetinin değeri ve yönündeki değişimler kesici ucun dayanımından ve tokluğundan fazla olduğu durumlarda gerçekleşir. Bir takım malzemesinde temel gereksinimlerden biri de sert olmasıdır. Fakat takım malzemelerinde yüksek sertlik, çoğu takım malzemelerini gevrek yapar ve

kullanıldığında kırılmaya maruz kalır. Takımdaki kırılmalar; dikkatsiz çalışma, kötü ayarlama ve dengesiz bağlamadan da kaynaklanabilir (Akyol, 2007; Şahin, 2001).

- Kesici kenardan parçacık kopması (dökülme): Aşınma sonucu kesici kenarın çok kırılması ile ortaya çıkar. Takımı etkileyen mekanik gerilmeler aşırı olduğunda ve kesici uç aşırı sıcaklık değişimine uğradığında bir yorulma meydana gelir ve takım malzemesi takım yüzeyinden kopar (Çakır, 2006; Hasak, 2018; Şahin, 2003).
- Kesici kenarın kırılması: Kesici kenarın kullanılmaz bir duruma gelmesine sebep olan aşınma tipidir. En tehlikeli tür olarak bilinir. Kenarın zayıflaması, geometrinin değişimi, sıcaklık ve kuvvet artışları bu aşınmayı gerçekleştiren faktörlerdir. Yüksek kesme hızlarında kesici takım kenarında farklı gerilmeler oluşur ve ucun dayanma sınırını geçmesine ve sonuç olarak kesici ucun kırılmasına neden olmaktadır (Hasak, 2018; Şahin, 2003).
- Yığma kenar: Sıcaklık ve kesme hızına bağlı olarak kesici takım yüzeyine kaynak olan malzemeden dolayı ortaya çıkar ve kesici takım yüzeyinden parçacık kopmasına sebep olur. Düşük sıcaklıklar ve yüksek basınçlar iş parçası malzemesinin kesici takım yüzeyine kaynak olmasına neden olur. Sıcaklık ve kesme hızları kontrol edilerek bu aşınmanın kolaylıkla önüne geçilebilir (Çakır, 2006; Hasak, 2018; Şahin, 2003).

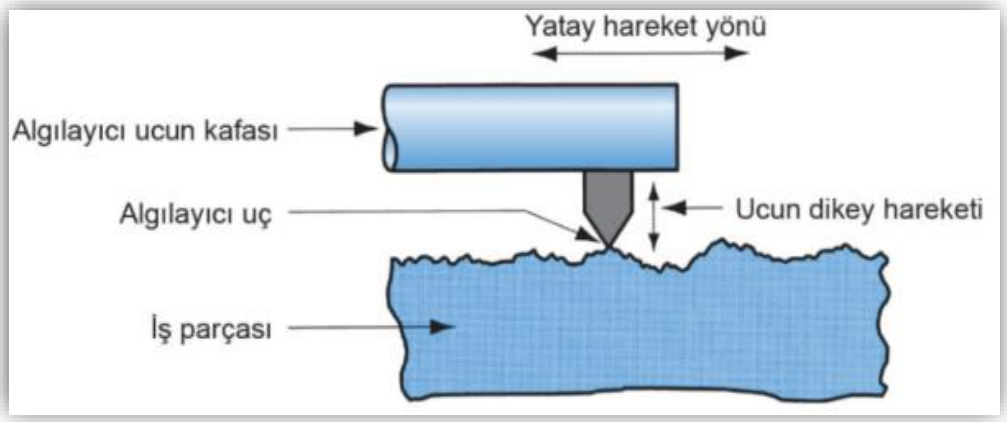
Titanyum alaşımlarının işlenmesinde Şekil 2.9.'da şematik olarak belirtilen aşınma tipleri gözlenmektedir. Kesici takımın serbest yüzeyinin işlenen parçanın yüzeyine sürtünmesi ile "serbest yüzey aşınması" oluşur. Kesici takım ile malzeme arasındaki sürtünme ısısından kaynaklı, birincil kesme bölgesi içinde dar bir alanda gerilme sonucu "plastik deformasyon" meydana gelir. Kimyasal reaktifliğin yüksek olasından kaynaklı gerilme altında titanyumun kesici takıma yapışması ve oradan kopması sonucu "krater aşınması" oluşur. Bu aşınmada difüzyon aşınmasının da etkisi vardır. Serbest yüzey ve krater aşınması sonucu, özellikle kırılma tokluğu düşük olan takımlarda "kırılma" görülmektedir (Akyol, 2007; Kaplan ve diğ, 2018; Özyürek ve Tekeli, 2011; Bruschi ve diğ. 2016)




**Şekil 2.9:** Titanyum alaşımlarının işlenmesinde görülen aşınma tipleri (Akyol, 2007).

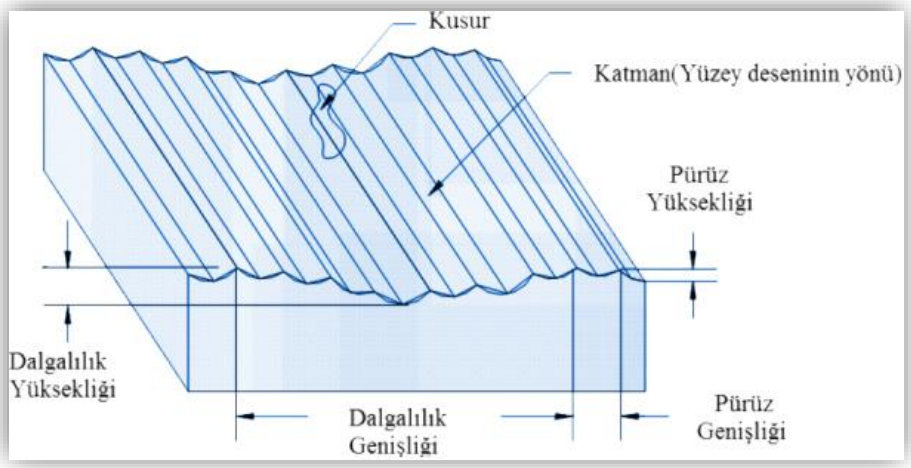
### 2.2.4. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey kalitesi birçok parametreyi kapsayan bir terimdir. Bu parametreler içerisinde en önemli olan yüzey pürüzlülüğünü de etkileyen, yüzeye uygulanan nihai bitirme talaş kaldırma işlemidir. Üretimi tamamlanmış iş parçası üzerinde boyut, geometri ve yüzey kalitesi açısından bazı hatalar meydana gelebilir. Bu hatalar "tolerans" olarak adlandırılmaktadır ve parçanın kullanım noktasına göre belirli değer aralıklarında bu toleranslara izin verilebilmektedir. Tolerans değeri ne kadar küçük olursa o kadar kaliteli bir yüzey elde edilmektedir. Parçanın kullanım alanına göre, ekonomik durumda dikkate alınarak iş parçasının uygun yüzey kalitesinde işlenmesi gereklidir. Geleneksel talaşlı imalat yöntemleri ile işlenen yüzeylerde yüzey pürüzlülüğüne etki eden malzemenin cinsi, kesici takımın cinsi, kesme hızı ve ilerleme miktarı, paso derinliği, devir sayısı, sıcaklık ve soğutma sıvısı gibi bir çok parametre vardır. Genellikle malzemenin işlenmesi sırasında kullanılan her bir parametrenin yüzeyin hassasiyetini etkilediği söylenebilir. Malzemenin işleme prosesinden önce gördüğü herhangi bir ısıl işlemle mikroyapısında gerçekleşen bir değişim yüzey kalitesini doğrudan etkilemektedir. Talaşlı işlem esnasında iş parçası malzemesinin yüzeyinde istenmeyen çizgiler oluşmaktadır. İşleme yöntemi, kesici takım cinsi, iş parçası malzemesi, kesme şartları, fiziksel, kimyasal ve ısıl faktörler ile kesen ve kesilen arasındaki mekanik hareket sonucu olarak, nominal yüzey çizgisinin üstünde veya altında düzensiz sapmalar meydana getiren bu duruma yüzey pürüzlülüğü denir. İşlenebilirlik testleri için ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerinin hesaplanması gereklidir. Şekil 2.10.'da yüzey pürüzlülüğü teorik gösterimi ve yüzey pürüzlülüğü ölçümü gösterilmiştir (Tekaslan ve diğ., 2016; Šalak ve diğ., 2005; Hasak, 2018; Şeremet ve Kam, 2019).




**Şekil 2.10:** Yüzey pürüzlülüğünün teorik gösterimi ve yüzey pürüzlülüğü ölçümü (Şeremet ve Kam, 2019)

Yüzey pürüzlülüğü; sadece sürtünme, aşınma, yorulma ve yağlama gibi tribolojik olarak değil aynı zamanda sızdırmazlık, elektrik ve ısı iletimi gibi farklı durumlarda da dikkate alınmasının gerekli olduğu bir kalite kriteridir. Birbiriyle çalışan makine parçaları ne kadar pürüzsüz yüzeye sahip olursa, o kadar rahat ve verimli olarak çalışır. Pürüzsüz yüzeye sahip parçalar sürtünmeden dolayı meydana gelen aşınma daha az olmaktadır. Bu sayede makine parçalarının daha uzun ömürlü olması sağlanmaktadır. Bazı makine parçalarında her ne kadar yüzey pürüzlülüğü dikkate alınmasa da işleme sonucunda bütün yüzeylerin pürüzsüz olması beklenmektedir. Tamamen pürüzsüz yüzey elde etmek mümkün değildir. Ancak pürüzlülük değeri tolerans değerleri içinde tutmak çok önemlidir. İşleme parametrelerinden en çok etkilenen yüzey pürüzlülüğüdür. Tornalama işlemi sırasında yüzey kalitelerini etkileyen en önemli parametre ise ilerleme hızıdır. Genellikle düşük ilerleme hızları daha iyi yüzey kalitesi vermektedir. Bu nedenle malzeme, kesici takım ve kesme parametreleri ile ilgili bilgi sahibi olunmalı, uyumluluk dengesi iyi kurulmalıdır. Genel olarak, iyi bir yüzey kalitesi elde etmek için ideal kesme şartlarının oluşturulması ile talaş kaldırma işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bir yüzey yapısının kontrolünde yorulma ömrü, yataklık etme özelliği ve aşınma önemli faktörlerdir. İşlenen yüzeylerde oluşan dalgalar ve pürüzlülük olmak üzere iki tip yüzey sapması meydana gelir. Dalgalanmalar yüzeyin geometrik şeklini karakterize ederken, pürüzlülük yüzey kalitesini tayin eder. Yüzey pürüzlülüğü standartlara göre yüzeye dik olan bir kesitte, belirli bir numune uzunluğu boyunca, belirli bir referans profiline ve profil ortalama çizgisine göre tayin edilir. Referans profil olarak genellikle geometrik profil alınır. Profil ortalama çizgisinin yeri, bu çizginin üstünde ve altında kalan alanların toplamı birbirine eşit olacak şekilde belirlenir. Düz bir yüzey denildiğinde dalgasız, pürüzsüz denildiğinde dalgalı, fakat gözle bakıldığında veya tırnakla kontrol edildiğinde, pürüzlülükleri fark edilemeyen yüzeyler anlatılmak istenir. Doğrultu, yüzey pürüzlerinin referans alınan bir alın yüzeyine göre durumunu belirler (Davim, 2010; Šalak ve diğ., 2005; Hasak, 2018; Şeremet ve Kam, 2019). Şekil 2.11.'de işlenmiş bir parçanın yüzeyine ait yüzey karakteri şematik olarak verilmiştir.




**Şekil 2.11.** İşlenmiş bir yüzeyin yüzey karakteri (İnce, 2015).

Yüzey pürüzlülüğüne etki eden birçok faktör vardır. Bunlardan bazıları şunlardır (Davim, 2010; İnce, 2015; Çakır, 2006; Özçatalbaş, 2002):

- Kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliğinin etkisi
- Takım tezgâhlarının yeterli rijitlikte olmaması,
- Tezgâhın çalışma sırasında kesme kuvvetleri sonucu oluşan titreşim,
- Takım ve talaş geometrisi,
- İşlenen malzemenin kayma mukavemeti ve sertleşebilirliği,
- Kesici uç ve malzeme arasındaki sürtünme değeri,
- İşlenen malzemenin sünek veya gevrek yapıda olması
- Talaş akış durumu,
- İşlenen malzemede bağlamadan dolayı oluşan deformasyon,
- İlerleme hızındaki düzensizlikler,
- İşlenen malzemenin yapısal veya yüzeysel problemleri,
- Tezgâhın kinematik mekanizması,
- Yataklama dolayı meydana gelen tezgâh hataları,
- Takım ucu ve takım tutucunun rijit olmaması
- Kesicinin tasarımı, geometrisi ve kesme kapasitesi,
- Takım konumlama ve bağlama hataları,
- Takım aşınmasından kaynaklanan hatalar,
- Çevrenin etkisi ile oluşan hatalar olarak sayılabilir.

### 2.2.5. Ti6Al4V İşlenmesinde Karşılaşılan Zorluklar

Titanyum ve alaşımlarının yaygın kullanım alanına rağmen, talaşlı imalat ile üretilmelerinde birçok problemle karşılaşılmaktadır. Bu sorunlar; yüksek kesme sıcaklığı, kısa takım ömrü, düşük talaş kaldırma oranları, yüksek kesme kuvveti ve düşük yüzey kalitesi olarak ortaya çıkmaktadır. Titanyum alaşımlarının işlenmesinde harcanan kesme kuvvetleri, çeliklerinin işlenmesindeki harcanan kesme kuvvetlerinden daha yüksek bir değere sahiptir. Benzer sertlik değerlerinde olmasına rağmen, titanyum alaşımları sahip olduğu metalurjik özelliklerden dolayı talaşlı işlemede problem yaratmaktadır. Doğru işleme parametrelerinin seçilmesi, uygun kesici takım kullanımı ve kesme şartlarının optimizasyonu ile bu alaşımların işlenebilirliğinde iyileştirmeler yapılabilmektedir. Bugüne kadar titanyum ve alaşımlarının işlenebilirliği üzerine birçok araştırma yapılmasına rağmen mevcut sorunlar düzeltilememiştir (Groover, 2010; Jahedi ve diğ., 2009; Pervaiz ve diğ., 2014). Bu durumda bu konuyla ilgili çalışmaların devamlılığını gerektirmektedir. En zor işlenen titanyum alaşımı beta alaşım grubudur. Alfa-beta alaşım grubundan olan Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde karşılaşılan zorluklar aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir.

Düşük ısı iletimi: Ti6Al4V alaşımının sahip olduğu düşük ısıl iletkenlik kesme bölgesinde oluşan ısının bölgesel olarak kesme kenarında yoğunlaşmasına neden olur. Kesme bölgesindeki sıcaklık, kesme kuvvetlerini, takım ömrünü, takım aşınma oranını ve iş parçasının yüzey bütünlüğünü doğrudan etkileyen kritik bir parametredir. Kesme bölgesindeki plastik deformasyon, talaş-takım yüzeyi arasındaki sürtünme ve takım-iş parçası arasındaki sürtünme işleme aşamasında ısı üretiminin ana kaynaklarıdır. Trent ve Wright (2000), yapılan işin %99'unun kesici takım ve iş parçası yüzeyinde yüksek sıcaklığa neden olan ısıya dönüştüğünü ortaya koymuştur. Takım yüzeyindeki sıcaklık, kesme hızı ve işleme süresinin değişmesiyle değişir. Daha uzun süre ve daha yüksek kesme hızı, kesme bölgesinde daha yüksek kesme sıcaklığına neden olur. Titanyumun yüksek kesme sıcaklığı, yüksek ısı kapasitesi ve düşük termal iletkenliği kombinasyonu, kesme işlemi sırasında zayıf ısı dağılımına neden olur. Düşük ısı iletkenliği ısının kesme kenarında birikmesine ve kesme kenarında yüksek ısıl gerilimlerin oluşmasına yol açar. Titanyum alaşımlarının yüksek termal gerilmeleri ve kimyasal kombinasyonu ilişkisi kesici takımın difüzyon ve adhesiv aşınma mekanizmaları yoluyla aşınmasını kolaylaştırır. Ti6Al4V'nin işlenmesi sırasında oluşan ısının yaklaşık %80'inin iş parçasının düşük ısıl iletkenliği nedeniyle kesici takıma aktarıldığı ve talaş kaldırma işleminin kesme bölgesinden ısıyı uzaklaştıramadığı bildirilmiştir (Lindvall ve diğ., 2021; Ensarioğlu ve Çakır, 2005; Pervaiz ve diğ., 2014).

Yüksek sıcaklarda sertlik ve hızlı şekil değiştirme sertleştirme: Titanyum alaşımları, yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet sergiler. Kesme işlemi sırasında kesme sıcaklığının artmasına rağmen, bu alaşımlar mukavemetlerini koruyarak kesici takım malzemesinin hızla bozulmasına ve takım ömrünün kısalmasına neden olur. Ayrıca işleme sırasında aşırı aşınma sonucu sertleştirme davranışı gösterirler. Yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemetleri nedeniyle yüksek kesme derinliği ile çalışmak mümkün değildir. Titanyum alaşımların olağanüstü sıcaklık sertliği nedeniyle yüksek kesme kuvvetleri ve ısı oluşur. Bu ısı sonucu oluşan sıvanma (BUE- built up edge) kesici takımın önünde yüksek bir kayma açısı oluşturur (Lindvall ve diğ, 2021; Pervaiz ve diğ., 2014).

Parçalı Talaş Oluşumu: Talaş oluşum mekanizmasını kolaylaştırmak için yeterli plastik deformasyon gereklidir. Titanyum alaşımları, yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruyarak işleme aşamasındaki oluşacak olan plastik deformasyonu zorlaştırır. Özel malzemelerin işlenmesinde seçilen kesme hızları işleme sırasında oluşan talaşın sürekli, süreksiz veya dilimli olacağı hakkında bilgi verir. Tüm geleneksel malzemeler için kesme hızı arttıkça talaş morfolojisi, sürekliden süreksize değişir. Titanyum alaşımları için tüm kesme hızlarında dilimli (parçalı) talaşların oluştuğu daha önce bildirilmiştir. Parçalı talaş oluşumunda, malzeme takımın önünde plastik deformasyona uğrar. Kesme işleminde belirli bir gerilim seviyesine ulaşıldığında oluşan talaş bandında kırılma meydana gelir. Bu talaş oluşumu, işleme aşamasında değişken kuvvetler üretir. Literatürde (Rhim ve Oh, 2006; Sette ve diğ., 2010) kesme kuvvetlerindeki değişimler tırtıklı talaş oluşumu ve düşük elastikiyet modülü nedeniyle oluşmakta ve bunun da kesici takımda aşırı titreşime neden olduğu bildirmişlerdir. Titanyum alaşımların sertliği ve bu sertlik sonucunda oluşan sıcaklık takım üzerinde toplanarak titanyum alaşımlarının kesici uç üzerinde sıvanmasına sebep olmaktadır. Kesici takımın önünde oluşan bu yığıntı malzeme kütlesinin eksikliği nedeniyle yüksek bir kayma açısı ve birim başına yüksek taşıma yüklerin oluşmasına sebep olmaktadır. Oluşan taşıma kuvveti ile talaşın oluşturduğu sürtünme kuvvetlerinin birleşmesi sonucu takım üzerinde lokalize bir bölgede ısının çok hızlı artmasına ve kesme kenarına çok yakın bir bölgede krater aşınmasına sebep olarak takımın çok hızlı bir şekilde körlenmesine neden olmaktadır (Jahedi ve diğ., 2009; Pervaiz ve diğ., 2014).

Kendinden kaynaklı titreşim: Titreşim, titanyum alaşımların işlenmesinde başka bir sorundur (Sette ve diğ., 2010). Talaşlı imalat işlemi sırasında üretilen kesme kuvveti, takım tezgâhı yapısında elastik gerilmeye neden olabilir. Bu gerilme nedeniyle kesici takım ve iş parçası

arasındaki geçiş sürekli olarak değişir. Kesici takım geçişlerinin üst üste gelmesi nedeniyle titreşim oluşur. Kötü yüzey kalitesi, aşırı gürültü, aşırı takım aşınması, düşük üretim hızı, takım tezgâhı kırılması, hurda artışı, enerji artışı ve yüksek maliyet, titreşimin getirdiği diğer bazı dezavantajlardır (Quintana ve Ciurana, 2011; Pervaiz ve diğ., 2014). Titanyum alaşımları, iyi elastik özellikler sağlayan yüksek akma noktasına ancak düşük elastisiteye sahiptir. Davim (2010), yaptığı çalışmada işleme aşamasında kesme takımının titanyumun yüksek esnekliği nedeniyle bir yay gibi geri sıçradığı bildirmektedir. Bu geri tepme eylemi, işleme sırasında çatırtıyı kolaylaştıran yan yüzdeki boşluk açısını azaltır. Dilimli talaşların oluşumu nedeniyle üretilen kuvvetin döngüsel doğası, aşırı titreşimin bir başka nedenidir. Daha yüksek çatırtı, yanak aşınmasını, titreşimi ve kesme sıcaklığını artırır (Huang ve diğ., 2013; Pervaiz ve diğ., 2014; Tanga ve diğ., 2009).

Kesme ara yüzündeki yüksek gerilmeler: Titanyum alaşımlarının işlenmesi sırasında kesici takım kenarına çok yakın ve bölgesel olarak dar bir alanda ısıdan etkilenen alan oluşur. Takım ve malzeme arasındaki daha az temas alanı, kesme kenarının yakınında yüksek derecede mekanik gerilmelere neden olur. Lindvall ve diğ. (2021), yaptığı çalışmada farklı kesici takım malzemelerini kullanarak Ti6Al4V işlenebilirliği üzerinde kesme kuvvetleri ve ısı dağılımını incelemiştir. Isı üretiminin %80'inin kesici takıma iletilerek, çeliğin işlenmesinde oluşan gerilmeden çok daha yüksek gerilme seviyelerine neden olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, Ti6Al4V'nin işlenmesindeki temas alanının, çeliklerin işlenmesinde gözlemlenen alandan 2-3,5 kat daha küçük olduğuna ve takım-talaş ara yüzeyinde yüksek gerilimler sonucu küçük talaşlar oluştuğunu bildirmişlerdir. Dilimli talaşların oluşumu, kesme kenarında titreşimli yük oluşturur. Bu alaşımların yüksek sıcaklıktaki yüksek sıcaklık sertliği, takım ucunda yüksek kesme kuvvetlerinin ve yüksek gerilmelerin oluşmasının bir başka nedenidir. Ayrıca kesici takım uç açısı, talaş ve boşluk açıları gibi kesici takımın geometrisi, kesme kuvvetlerinin ve kesme kenarında gerilmelerin oluşumunda önemli bir rol oynar. Bunun temel nedeni, takım geometrisinin takım-talaş temas alanını ve ortaya çıkan gerilmeleri etkilemesidir (Muthukrishnan ve Davim, 2011; Ensarioğlu ve Çakır, 2005; Pervaiz ve diğ., 2014).

Kesici uç: Çeliklerin elastik modülü titanyuma göre daha yüksektir ve bunun neticesinde çeliklerin esnekliği titanyuma göre daha yüksek olmaktadır. Titanyum işlenmesinde daha güçlü kesici uçlara ve daha mukavemetli takımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Kesme işleminde takım üzerine uygulanan basınç sebebiyle, tolerans problemleri, tırlama ve kesici takımda sürtünme

gibi problemler çok fazla görülmektedir. Bunun dolayı, düzgün şekilli ve keskin takımların kullanılması rijitlik açısından çok önemlidir (Jahedi ve diğ., 2009; Pervaiz ve diğ., 2014).

Yüksek Kimyasal Reaktivite: Titanyum alaşımları çok yüksek kimyasal reaktiviteye sahiptir (Canter, 2009). Genel olarak kesici takım malzemelerinin çoğu, yüksek çalışma sıcaklıklarında titanyum alaşımları ile kimyasal tepkime gösterir. Titanyum alaşımlarının yüksek kimyasal reaktivitesi nedeniyle talaşlar, takım ucunda ve kesici kenarda kaynak yapma eğilimi gösterir. Bu durum; krater aşınmasına, yüksek kenar yığmasına, takım körelmesine ve kenar ufalanmasına neden olur. Kesme hızındaki artış, kesme ara yüzeyinde sıcaklığının artmasıyla sonuçlandığından, titanyum alaşımlarını daha yüksek hızlarda işlemek son derece zordur (Nabhani, 2001). Kesici takım malzemeleri alanındaki son gelişmelerle birlikte, paslanmaz çelik, sertleştirilmiş çelikler ve takım çelikleri gibi kesilmesi zor birçok malzeme yüksek kesme hızlarında işlenmesi mümkün olmuştur. Bu gelişmiş kesici takım malzemeleri, titanyum alaşımların yüksek kimyasal reaktivitesinden hala zarar görmektedir ve daha yüksek kesme hızlarında iyi performans göstermemektedir. Titanyum alaşımlarının talaşlı imalatında kesme sıvılarının seçimi dikkat gerektirmektedir. Titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri için yapılan son çalışmalarda, soğutulması için kullanılan sıvıdaki klor iyonlarının belirli koşullar altında, gerinim-korozyon çatlaklarına sebep olduğu görülmüştür. Bundan dolayı, kesme sıvısındaki klor içeriği son derece önemlidir ve kontrol edilmelidir (Groover, 2010; Jahedi ve diğ., 2009; Pervaiz ve diğ., 2014).

### 2.2.6. Ti6Al4V Alaşımının Delinmesi

Delik delme işlemi yaygın olarak kullanılan talaşlı imalat işlerinin başında gelir. Matkap tezgâhının dışında freze ve torna tezgâhlarında da delik delme işlemi yapılsa da oluşan çapakların kırılıp atılması farklılıklar oluşturur. Deliğin uzunluğu, deliğin çıkış noktası (ucu açık veya kapalı), kesme parametreleri, talaş sıcaklığı gibi faktörler yüzey kalitesine ve ölçüm doğruluğa etki ettiğinden delinebilirlik açısından önemlidir (Wong ve diğ., 2008). Matkap uçları ölçülerine, şekillerine, malzemesine, kanal sayısına ve sap şekillerine göre çeşitlilik göstermektedir. Çoğu zaman açılan delikler; cıvata, vida, perçin gibi bağlantı elemanlarıyla montaj yapmak için kullanılırlar. Delik delme prosesi, geleneksel talaşlı imalat işlemleri olan tornalama, frezeleme işlemleri arasında yaklaşık %33 gibi bir paya sahiptir. Otomotiv, havacılık ve uzay sanayiinde bu oranın yaklaşık %60'a kadar yükselmektedir. Otomotiv sanayinde maliyeti en yüksek olan işlemlerden biride delme işlemidir. Tüm bu spesifik

nedenlerden dolayı delinebilirlik üzerine inceleme ve araştırmalar devam etmektedir (Yiğit, 2020).

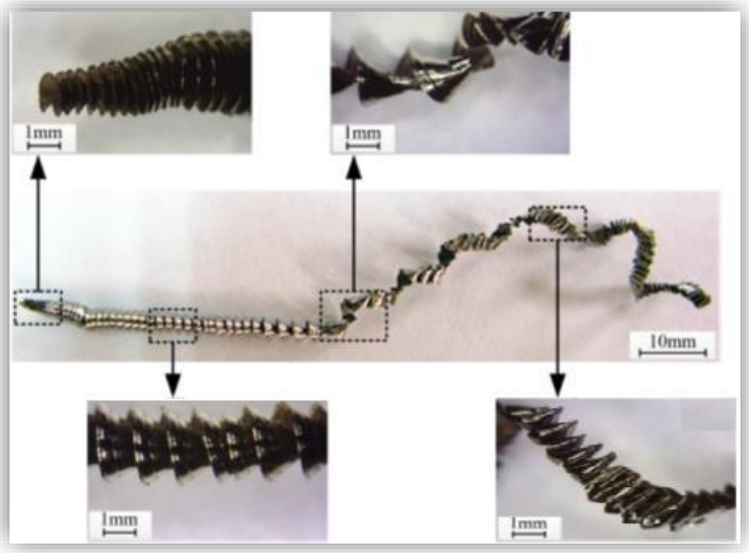
Ti6Al4V alaşımları üstün özelliklinden ve yüksek sıcaklıklarda kararlı yapısından dolayı havacılık uzay ve savunma sanayi gibi hassas alanlarda, medikal sektöründe birçok üründe tercih edilen malzemelerdendir. Bu alaşımların kullanılabilmeleri genellikle talaşlı imalat yöntemleri ile şekillendirilmeleri gerekmektedir. Örneğin; bir uçağın gövdesindeki ve kanadındaki perçinlerin, silindir kapakları ve motor bloklarındaki cıvataların ve daha birçok parçasında çok sayıda delik vardır. Deliklerdeki ölçü hassasiyeti kullanım alanı gereği çok önemlidir. Ancak titanyum alaşımlarının düşük termal iletkenliğinden kaynaklı kesici takım ve iş parçası ara yüzeyinde yüksek oranlarda sıcaklık oluşumu işlenebilirliği olumsuz yönde etkiler. Yüksek mukavemete sahip olması da delik delmede yüksek kesme kuvvetlerine sebep olmaktadır. Titanyum alaşımlarının delinmesi ile elde edilen delikler; delik yüzey kalitesi, silindiriklik, delik çapı, yüzey pürüzlülüğü ve çıkan çapaklar açısından değerlendirilir (Li, 2007; Wong ve diğ., 2008; Cantero ve diğ., 2005; Yiğit, 2020). Şekil 2.12'de Ti6Al4V alaşımının talaşlı imalat ile delik delme işlemi gösterilmiştir.



**Şekil 2.12:** Delik delme işlemi (https://www.yenasoft.com/urunlerimiz/esprit/freze/, Erişim Tarihi: 10 Mayıs 2022).

Titanyum alaşımları delme işlemlerinde hem giriş hem de temel sorun olarak karşılaşılan çıkış yüzeylerinde çapak oluşturur. Yüksek sıcaklık, aşınmış takım yüzeyi ve artan titreşimlerin sonucu malzemede mikroyapı çatlakları ve yüksek plastik deformasyonlar başlar ve talaşın düzensiz olarak oluşmasına neden olur. Şekil 2.13'te bu durumu gösteren talaş morfolojileri görülmektedir. Ayrıca bu olumsuzluklar, işlenen yüzeyin kalitesinin kötü olmasına ve delik çıkışında çapak oluşumuna neden olmaktadır. Titanyum alaşımlarının delinmesinde çıkan talaşlar, malzemenin oldukça maliyetli olmasından dolayı büyük sorun oluşturmaktadır. Bu malzemeleri havacılık, uzay, savunma sanayi ve biyomedikal sektörü gibi alanlarda kullanıldığı

göz önüne alındığında bu durum daha da önem kazanmaktadır. Yapılan çalışmalarda havacılık sektöründe bazı parçaların maliyetinin %30'unu çıkan talaşlar belirmektedir (Wong, 2008; Yiğit, 2020; Zareena ve diğ, 2001).




**Şekil 2.13:** Delme sonucu işlenen Ti6Al4V'den çıkarılan talaş yapıları (Zhu ve diğ., 2017).

Titanyum alaşımının kaplamalı ve kaplamasız takımlarla işlenmesi, farklı kesme parametreleri, kullanılan soğutucu ortam gibi faktörler çıkan talaşların morfolojisini etkilemektedir. Özellikle titanyum alaşımının kaplamasız kesici uçla delinmesinde oluşan çapak uzun ve düzensiz morfoloji sergilerken, kaplamalı kesici uçla delinmesinde boyut olarak daha küçük ve düzenli morfolojiye sahip çapak oluşumu söz konusudur. Ti6Al4V alaşımının delinebilirlik performansı üzerine kesici takımın, kesme parametrelerinin, soğutma ortamının etkisini inceleyen birçok bilimsel çalışma bulunmaktadır (Li ve diğ., 2007; Wong, 2008; Çelik ve Kılıçkap, 2018; Li ve Shih, 2007; Sharif ve Rahim, 2007; Çakır, 2006; Darsin ve diğ., 2017). Ancak yine de; Ti6Al4V alaşımının delinmesinde hassas üretim ihtiyacı sonucu doğan yüksek doğruluk için ovallik ve dairesellik gibi geometrik faktörlerin incelenmesi gerekmektedir.

### 2.2.7. Ti6Al4V Alaşımının Frezelenmesi

Frezeleme; çok uçlu dönen bir takımın kendi ekseni etrafında dönme hareketine karşılık doğrusal hareket eden iş parçasının ilerlemesi ile talaş kaldırma işlemidir. Bugünün tezgâhlarında yapılan frezeleme işleminde takım her yönde iş parçasına doğru hareket edebilmektedir. Talaş kaldırma sırasında kesici takım ucu ve iş parçası arasında kesme hareketi, sürtünme hareketi, ilerleme ve yardımcı hareketler oluşur. Bu yöntem ile düz ve eğrisel yüzeyler, helisel ve T kanallar, hareket milleri, dişli çarklar gibi oldukça karmaşık parçalar

üretilebilir (Norberto ve diğ., 2011; Shokrani, 2016; Krishnaraj ve diğ., 2017). Şekil 2.14'te yüzey freze işlemine ait bir fotoğraf gösterilmiştir.



**Şekil 2.14:** Yüzey frezeleme işlemi (https://metaldunyasi.com.tr/tr/guncel/120/aluminyum-islemede-iyilestirmeler.html, Erişim Tarihi: 10 Mayıs 2022).

Titanyum ve alaşımlarının son şeklinin verilmesinde kullanılan talaşlı imalat yöntemlerinden olan frezeleme işlemi birden fazla kesici uçla gerçekleştirilebilir. İşlem itibariyle delme prosesine göre açık ortamda kesme yapıldığından; kesici takıma gelen kesme kuvveti ve takım aşınması daha azdır. Ancak titanyum alaşımlarının yüksek mekanik özellikler içermesi, ani olan titreşim ve darbelerde kesici ucun kırılmasına sebep olur. Bu yüzden sert kesici karbür takımlarla işlenmesi önerilmez (Amin ve diğ., 2007; Sette ve diğ., 2010). Titanyum alaşımlarının freze ile işlenmesinde kesme hızı dikkate alınarak devir sayısı belirlenir. Kesme hızının seçimi uygun kesme parametrelerinin seçilmesinde önemli bir etkendir. Çok düşük seçilen kesme hızlarında parçayı işlemek, kesici takım ucunda talaş sıvanması ve yapışması meydana getirebilir. Bu durum kesici uç geometrisini değiştirerek bütünlüğünü bozar. Çok yüksek seçilen kesme hızlarında parçayı işlemek, kesici takımın çok hızlı aşınmasına sebep olarak sürekli uç değişimi gerektirebilir. Bu durum çok yüksek maliyet artışına sebep olur. Tüm bu sebeplerden dolayı titanyum alaşımlarının işlenmesinde; uygun kesme hızı seçimi ile kesici takım ömrü, talaş miktarı ve yüzey kalitesi belirlenebilir. Titanyum alaşımlarının işlenmesinde, ilerleme oranı ve kesme derinliği göz önüne alındığında, en derin talaş ve en hızlı ilerleme ölçütü alınır. Bunun temel sebebi, kesici ucun kullanım ömrünü kesme hızından daha az derecede etkilemeleridir (Safari ve diğ., 2010; Huang ve diğ., 2013; Tanga ve diğ., 2009).

### 2.2.8. Ti6Al4V Alaşımının Tornalanması

Tornalama işlemi, genellikle torna tezgâhında dairesel kesitli parçalarda istenilen ölçü ve profili elde etmek için doğrusal hareket eden kesici takım kendi ekseni etrafında dönen iş parçası

üzerinden talaş kaldırma işlemidir. Torna tezgâhlarında, alın, konik, silindirik, pah, havşa, profil tornalama, kanal açma, kırma, kesme, vida çekme, tırtıl çekme, delik delme ve genişletme gibi çok değişik işlemler yapılmaktadır. Tüm bu işlemler ile iş parçaları istenilen ölçü, şekil ve yüzey kalitesine getirilir (Taylan ve Oral, 2018; Gavas, 2013). Şekil 2.16'da tornalama işlemine ait bir fotoğraf gösterilmiştir.



**Şekil 2.15:** Tornalama ile parça işleme (https://www.kovokon.cz/en/services/cnc-turning/, Erişim Tarihi: 10 Mayıs 2022).

Prensip olarak titanyum alaşımlarının torna ile şekillendirilmesi, delme ve frezeleme işlemlerine benzerdir. Torna ile işleme prosesinde de yüksek çalışma sıcaklığı ile yüksek kesme kuvvetleri oluşmaktadır. Bu nedenle kesici takımda hızlı aşınma meydana gelmektedir. Titanyum alaşımlarının tornalanmasında kesici ucun ve uca uygun parametrelerinin seçimi işlenebilirliği büyük oranda belirler. Kullanılacak kesici takımlar; yüksek mukavemet ve iyi tokluk, yüksek aşınma dayanımı, yüksek sıcaklıklarda kimyasal kararlılık ve yüksek sıcaklık sertliği özelliklerine sahip olmalıdır. Ti6Al4V alaşımının işlenebilirliği üzerine kesici takım aşınmasının ön planda tutulduğu birçok bilimsel çalışma vardır (Venugopal ve diğ., 2007; Sharif ve Rahim, 2007; Zhu, 2017, Vipindas ve Mathew, 2021; Hourmand ve diğ., 2021; Uzun ve diğ., 2017; Çiftçi ve Gökçe, 2019). Ancak Ti6Al4V alaşımının çok üstün özelliklere sahip olmasına rağmen zor işlenen malzeme grubunda yer alması, bu kapsamda çalışmaların hala devam etmesine sebep olmuştur. Bu çalışmalar sonucunda genel olarak elde edilen sonuçlara göre; kaplamasız karbür takım uçları kaplamalı olanlara göre daha iyi sonuç vermektedir. Bunu ana nedeni; kaplamalı karbürlerde takım ana malzemesinin kaplama ile birlikte kopması ve ucu hızla aşındırmasıdır. Bu nedenle, ticari olarak üretilen WC-Co karbür takımlar, titanyum alaşımlarının işlenmesinde iyi performanslar gösteren kesici takımlardır (Motorcu, 2009). Ancak son yıllarda geliştirilen yüzey kaplamaları ile uç aşınması azaltılmış ve bu sorun minimize edilmiştir (Sandvik, 2020).

## 2.3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Ti6Al4V alaşımı işlenebilirliği zor malzemeler grubunda yer almaktadır ve imalat sürecindeki zorluklar nedeniyle titanyum alaşımlarının kullanım maliyetleri de artmaktadır. Zor işlenebilirlik takımın hızlı aşınmasına ve işlenen yüzey kalitesinin kötü olmasına neden olmaktadır. Bunların üstesinden gelebilmek için bu konunun detaylı olarak ele alınması gerekmektedir. Literatürde Ti6Al4V alaşımları ile ilgili yapılan işlenebilirlik çalışmalarına bakıldığında, genellikle tek bir talaşlı üretim tekniği ile kaplamalı ve kaplamasız takımlarla, farklı ilerleme ve kesme hızlarında, takım aşınması, takım ömrü, kesme kuvvetleri ve yüzey kalitesi gibi parametrelerin incelendiği görülmektedir. Bu çalışmalar konunun bilimsel ve endüstriyel anlamda önemini anlamak açısından aşağıda özetlenmiştir.

Krishnaraj ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V alaşımının yüksek hızlı parmak freze ile işlenmesini araştırmışlardır. Kesici uç olarak karbür esaslı 12A01R020A16ED10 parmak freze uçlarını kuru kesme ortamında kullanmışlardır. Kesme parametreleri olarak; 120, 150 ve 180 m/dak kesme hızları; 0,05, 0,075 ve 0,1 mm/dev ilerleme hızları ve 0, 5, 0, 75 ve 1 mm kesme derinlikleri belirlemişlerdir. Kesme parametrelerinin; kesme kuvveti, kesici uç sıcaklığı ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre; kesme hızına kıyasla kesme derinliği ve ilerleme hızının kesme kuvvetleri üzerinde daha yüksek etkiye sahip olduğu, kesme hızının ise sıcaklık ve takım aşınması üzerinde daha fazla etkisinin olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünün kesme hızının artmasıyla azaldığını, fakat ilerleme hızının değişmesiyle fazla etkilenmediğini belirtmişlerdir. Titanyum alaşımının düşük ısıl iletkenliği nedeniyle, kaba işleme sırasında kesici takım üzerinde daha fazla ısı konsantrasyonu oluşturduğunu ve kesici takımın sıcaklığını artırarak iş parçasının yüzey bütünlüğünü etkileyerek takım aşınmasına neden olduğunu da rapor etmişlerdir.

Sharif ve Rahim (2007) çalışmalarında, Ti6Al4V'un delme işlemini kaplamasız WC-Co ve PVD kaplamalı TiAlN karbür matkaplar ile yapmışlardır. Kesme parametreleri olarak; 25, 35, 45 ve 55 m/dak kesme hızları ve 0,06 mm/dev ilerleme hızı kullanmışlardır. Delme işlemlerini 19,4 l/dak'lık bir akış hızında ve %6'lık suda çözünür soğutma sıvısı kullanılarak yapılmışlardır. Kesme hızının; takım ömrü ve yüzey kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. En yüksek takım ömrünü, 25 m/dak kesme hızında TiAlN kaplamalı matkaplarla elde etmişlerdir. Test edilen tüm kesme hızlarında, TiAlN kaplamalı ucun takım ömrü ve işlediği parçanın yüzey kalitesinin; kaplamasız uçtan daha iyi performans gösterdiğini rapor etmişlerdir.

Uzun ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V alaşımının delinebilirliğini 140° uç açısına sahip 6,8 mm çapında TiN ve TiAlN kaplamalı iki ağızlı helisel karbür matkap uçlar ile incelemişlerdir. Delme işlemi; kesme sıvısı kullanarak 38, 41,8 ve 45,6 m/dak kesme hızları ve 0,1 mm/dev ilerleme hızı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İşleme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve takım aşınması üzerindeki etkilerini incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; en düşük ilerleme kuvveti 38 m/dak kesme hızında tespit edilmiştir. En yüksek ilerleme kuvveti ise en yüksek takım aşınmasının olduğu 41,8 m/dak kesme hızında görülmüştür. Kesme hızı ve kesme uzunluğu değiştikçe kesme kuvvetlerinin ve delik kalitesinin de değiştiğini ve bu değişimin takım aşınmasından kaynaklandığını rapor etmişlerdir.

Yang ve diğ. (2010) yaptıkları çalışmada, α+β türünden olan TC11 titanyum alaşımının işlenebilirliğini farklı kesme hızları ve soğutma ortamlarında frezeleme yaparak incelemişlerdir. 376,8 m/dak, 471 m/dak ve 565,2 m/dak kesme hızları; kuru, emülsiyon sıvısı ve yağ buharı olmak üzere üç farklı soğutma ortamı seçmişlerdir. İşlemleri kaplamasız semente karbür freze ucu ile yapmışlardır. Artık gerilmeleri, yüzey pürüzlülüğünü ve işlenen yüzeyin mikroyapısını incelemişledir. Tüm kesme koşulları altında yüzey artık gerilmelerinin basma gerilmesi şeklinde olduğunu belirlemişlerdir. Kesme hızının artmasıyla basma gerilmesindeki artışının azaldığını, yüzey pürüzlülüğünde az da olsa bir artışın olduğunu ve emülsiyon sıvısı kullanılarak en düşük basınç gerilmesinin oluştuğunu tespit etmişlerdir. Yüzey tabakasının mikro yapısının belirgin bir değişim göstermediğini, tüm kesme koşullarında faz geçişi ve istenmeyen tane deformasyonu oluştuğunu rapor etmişlerdir. Bunun nedenini ise, yüksek hızlı kesme koşullarında talaş şeklinin bölgesel talaştan birim talaşa değişmesi ve talaş ile talaş yüzeyi arasındaki sürtünmenin kesme kuvvetinin ve kesme ısısının ana kaynağı olmaması ile açıklamışlardır. Kesme ısısının büyük bir kısmının talaşlar tarafından uzaklaşması, iş parçasına ve kesici takıma iletilen ısının azalması, kesme kuvvetinin ve kesme ısısının işlenmiş yüzey üzerindeki etkisi büyük ölçüde azalmasına neden olduğundan mikroyapının değişmediğini de ifade etmişledir.

Arrazola ve diğ. (2009) yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V ve β yakın alaşımı olarak bilinen Ti555.3 alaşımlarının işlenebilirliği incelemişlerdir. Kesme kuvvetleri, talaş geometrisi ve takım aşınma mekanizmaları değerlendirilmiştir. İşleme öncesi Ti6Al4V alaşımına su verme ve tavlama işlemi ve Ti555.3 alaşımına ise solüsyona alma ve yaşlandırılma ısıl işlemleri uygulamışlardır. Deneylerde; ilerleme hızı ve 2 mm kesme derinliği sabit tutulmuşlar ve kaplamasız semente karbür (CNMG 120408-23) kesici uç kullanmışlardır. Ti555.3 alaşımı için;

40, 50 ve 60 m/dak kesme hızları, Ti6Al4V alaşımı için ise 40, 50, 60, 70, 80 ve 90 m/dak kesme hızları kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre; Ti6Al4V'nin işlenebilirlik oranının Ti555.3'ten daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. İki alaşımın maksimum kesme hızı karşılaştırıldığında, Ti6Al4V'nin işlenebilirlik oranı Ti555.3'dan yaklaşık %56 daha yüksektir. İşlenebilirlik oranı ile iş malzemesinin mekanik özellikleri (sertlik ve sıcak çekme mukavemeti), kimyasal bileşimi (Mo eşdeğer değeri) ve ayrıca talaş morfolojisi, spesifik kesme kuvveti (Kc), spesifik özellikler besleme kuvveti (Kk) arasında yakın bir ilişki olduğunu rapor etmişlerdir. İncelenen tüm kesme hızı koşullarında Ti555.3 alaşımında Ti6Al4V'ye göre daha yüksek Kk ve Kc değerleri gözlemlemişlerdir. Kesme hızının artmasıyla kesici uçların aşındığını, takım talaş yüzeyi üzerindeki mekanik ve termal yüklerdeki dalgalanmaların artmasıyla difüzyon aşınması oluştuğunu belirtmişlerdir. Difüzyon aşınması ve karbonun varlığı sonucu, her iki Ti alaşımında da talaş yüzeylerinde Ti ve TiC'den oluşan yapışmış bir malzeme tabakası oluştuğunu ifade etmişlerdir.

Venugopal ve diğ. (2007) yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V alaşımının tornalanmasında soğutucu sıvının etkilerini araştırmışlardır. Deneyler; kuru, sıvı (çözünür yağ) ve kriyojenik soğutma ortamlarında kaplanmamış mikrokristalin karbür uçlarla gerçekleştirmişlerdir. Kesme parametreleri olarak; 70, 85 ve 100 m/dak kesme hızları, 0,2 mm/dev ilerleme hızı ve 2 mm kesme derinliği kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre; sıvı nitrojen jetleri ile kriyojenik soğutma ortamında, hem krater hem de yan yüzeylerde takım aşınmasını önemli derecede azaldığını belirtmişlerdir. Bu azalmayı kriyojenik soğutma altında işleme sıcaklığının kontrolü şekilde olmasıyla açıklamışlardır. Diğer soğutma ortamlarında oluşan krater aşınmasının ağırlıklı olarak yapışma-çözünme-difüzyon aşınması ile meydana geldiğini rapor etmişlerdir.

Çiftçi ve Gökçe (2019) yaptıkları çalışmada, karbür matkapla Ti6Al4V malzemenin delinmesi sonucunda kesici uçta gerçekleşen aşınmaları incelemişlerdir. Delme işlemlerinde; 20 m/dak kesme hızı, 0,01 mm/dev ilerleme hızı ve 5 mm çapına, 25 mm helisel kısımlarının uzunluğuna, 52 mm boyuna ve 140° uç açısına sahip helisel karbür matkap kullanmışlardır. Doğrudan dalma, 1 mm dalma ve 2 mm geri çıkma ve 1 mm dalma tam geri çıkma şeklinde üç farklı delme yöntemi kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre; en düşük matkap aşınmasının 1 mm dalma ve tam geri çıkma yönteminde elde edildiği rapor edilmiştir. Gerçekleşen aşınmaların; kesici ağzının merkeze yakın olan kısımlarında yan yüzey aşınması şeklinde ve ucun dış kısmına yakın olan bir alanda ağız kırılması şeklinde olduğunu belirtmişlerdir.

Pervaiz ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V alaşımının işlenebilirliğini araştırmışlardır. Kesme parametreleri olarak; 50, 120ve 150 m/dak kesme hızları, 0,1 ve 0,3 mm/dev ilerleme hızları ve 0,8 mm kesme derinliği kullanmışlardır. TiAlN kaplanmış karbür takımlar ile kuru kesme şartlarında işleme yapmışlardır. Kesme kuvvetlerini ve kızılötesi (IR) kamera ile ölçüm yapılarak kesme sıcaklıkları belirlemişlerdir. Johnson-Cook temel formülleri ve sürtünme modelleri kullanılarak sonlu eleman simülasyonları da yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre; kesme hızının artmasıyla sıcaklığın artarak kesici ucun aşınmasını hızlandırdığını; ilerleme hızının artmasıyla kesme kuvvetlerinin arttığını rapor etmişlerdir. Artan kesme hızı, kesme bölgesinde yüksek kesme sıcaklığı oluşturarak yığıntı talaş oluşumuna ve termal yumuşamaya neden olduğundan yüksek kesme hızlarında kesme kuvvetlerinin sabit veya azalma eğiliminde olduğunu ifade etmişlerdir.

Vipindas ve Mathew (2021) yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V alaşımının talaş morfolojisini analiz ederek mikro parmak frezeleme işleminin mekanizmasını araştırmışlardır. Mikro parmak frezeleme işleminde takımın ilerleme/diş ve kenar yarıçapının işleme mekanizması üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Kesme parametreleri olarak; 15,7 m/dak kesme hızı, 0,2, 0,4, 0,6, 1, 2, 3 ve 4 µm diş başına ilerleme ve 0,1 mm kesme derinliği kullanmışlardır. 1000 µm çaplı WC mikro parmak frezeleme ucu kullanarak kuru kesme şartlarında kesme yapmışlardır. Bu çalışmada, takım aşınmasının talaş morfolojisi üzerindeki etkisi ve işleme mekanizması ile ilişkisini araştırmışlardır. Düşük kesme hızlarında bile dilimli talaşların oluşumunu, Periyodik çatlak oluşumu ile birlikte çevresi ile ısı alış verişi yapmayan dar kesme bantlarının oluşumu ile açıklamışlardır. Kesme mekanizmasından sürünmeme mekanizmasına geçişin ince uzun şerit tipli talaşı tipine sebep olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca takım aşınmasının da mikro parmak frezelemenin işleme mekanizması üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu da tespit etmişlerdir.

Safari ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V titanyum alaşımı yüksek hızda parmak frezeleme ile işleyerek yüzey bütünlüğü ve takım aşınmasını araştırmışlardır. Kesme parametreleri olarak; 100, 200 ve 300 m/dak kesme hızları, 0,03 ve 0,06 mm/diş başına ilerleme ve 5 mm kesme derinliği ve kesici uç olarak; kuru kesme şartlarında TiAlN+TiN kaplanmış Nano Turbo karbür takım kullanmışlardır. İşlenen yüzeylerin pürüzlülüğü ve yüzey altı mikrosertlik ölçümlerini yapmışlardır. Yüksek hızda parmak frezeleme işlemi ile yüksek kaliteye sahip yüzeyler elde ettiklerini belirtmişlerdir. Kesme hızının 100' m/dak'dan 300 m/dak'ya çıkarılması ile yüzey pürüzlülüğünün %55 oranında düştüğünü; düşük kesme

hızlarında ilerleme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığını rapor etmişlerdir. Daha yüksek kesme hızı ve ilerleme hızı kullanıldığında işlenen yüzeyin mikrosertlik değerinin önemli derecede artarak plastik deformasyona neden olduğunu belirtmişlerdir.

Taylan ve Oral (2018) yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V alaşımının işlenmesi sırasında yüzey pürüzlülüğüne, yüksek basınçlı jet soğutmanın etkisini incelemişlerdir. Deneylerde yüksek basınçlı jet soğutma sistemi ile iki farklı soğutma su basıncı kullanmışlardır. Tornalama işlemlerinde; 80, 100 ve 120 m/dak kesme hızları, 0,2, 0,25 , 0,3 ve 0,4 mm/dev ilerleme hızları ve 2 mm kesme derinliği kullanmışlardır. TiAlN-TiN kaplı ISO Kodu CNMG120408 olan kesici uç ile işleme yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre; ilerlemenin artmasıyla yüzey pürüzlüğünün arttığını tespit etmişlerdir. Soğutma suyu basıncının yüzey pürüzlülüğü üzerine olumlu yönde etkisinin olmadığını ve basınç artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığını rapor etmişlerdir.

Muthukrishnan ve Davim (2011) yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V alaşımının işlenebilirliğini DNM6 120408 ve TTI 15 ($Al_2O_3$-TiC) içeren 0,30 µm tane boyutlu seramik kesici takımlar kullanarak incelemişlerdir. Tornalama işlemini kuru ve kesme sıvısı kullanarak yapmışlardır. Deneylerde kesme parametreleri olarak; 45, 90 ve 135 m/dak kesme hızları ve 0,10, 0,20 ve 0,32 mm/dev ilerleme hızları, 0,5 ve 0,75 mm kesme derinlikleri kullanmışlardır. Çalışmada kullanılan kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kesme sıvısının yüzey pürüzlülüğü üzerinde olumlu etkiye sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Takım ömrünün kesme sıvısı ile yaklaşık olarak %30 arttığını tespit etmişlerdir. Takım aşınmasında difüzyon aşınma türünün daha etkili olduğunu, kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin azaldığını ve ilerleme arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin arttığını rapor etmişlerdir.

Li ve diğ. (2007) yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V alaşımının farklı matkap uçları kullanarak işlenebilirliği incelemişlerdir. Delme işleminde; 4 mm çapında M2 HSS twist, WC-Co Kennametal KWCD00344 ve WC-Co spiral Kennametal K285A01563 olmak üzere üç farklı matkap ucu kullanmışlardır. Çalışmada takım malzemesi, takım geometrisi ve delme parametrelerinin matkap aşınması, eksenel itme kuvveti, tork, enerji ve çapak oluşumu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. En yüksek talaş kaldırma oranını WC-Co spiral matkap uç ile elde etmişlerdir. 156 $mm^3$/sn talaş kaldırma oranı, 91 m/dak kesme hızı, 0,102 mm/dev ilerleme hızı ile WC-Co spiral uçlu matkap kullanılarak en iyi matkap ömrü ve yüzey kalitesi sonuçlarını elde ettiklerini rapor etmişlerdir. Spiral uçlu matkap tasarımının diğer uçlara göre,

itme kuvveti, tork, enerji ve çapak boyutu üzerinde olumlu etkilere sahip olduğunu belirtmişlerdir. WC-Co spiral uçlu matkap kullanılarak en kısa talaş uzunluğunun elde edildiğini belirtmişlerdir.

Rao ve diğ. (2011) Ti6Al4V alaşımının işlenebilirliğini soğutucu sıvı kullanarak, kaplamasız karbür uç ile frezeleme yaparak yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve takım performansı ile değerlendirmişlerdir. Kesme hızının artması ile kesme enerjisinde ve buna bağlı olarak kesme kuvvetinde kayda değer değişimler olmadığını belirtmişlerdir. İlerleme oranının artması ile kalıntı gerilme değerlerinde artış gerçekleşirken kesme hızının değişimi ile belirgin değişiklik olmadığını ifade etmişlerdir. İlerleme ile artışı işlenen parça ile takım arasındaki basınç artışı ile açıklamışlardır.

Ramesh ve diğ. (2008) Ti6Al4V alaşımlarının kuru kesme ortamında tornalanmasında kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği gibi kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü ve kesme kuvvetleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Artan kesme hızı ile yüzey pürüzlülüğünün azaldığını ancak takım aşınmanın arttığını; artan ilerleme hızı ile her iki değerinde arttığını rapor etmişlerdir.

Andriya ve diğ. (2012) yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V alaşımını TiAlN kaplı kesici takımlar kullanarak torna ile işlemiş ve farklı kesme hızları, ilerleme ve kesme derinliklerinin yüzey kalitesi ve kesme kuvvetleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Artan ilerleme ve kesme derinliği ile kesme kuvvet ve yüzey pürüzlülük değerlerinin artış gösterdiğini rapor etmişlerdir.

Kıvak ve Şeker (2015) yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V alaşımının delinmesinde kaplamalı ve kaplamasız matkap uçlarını kuru ve kesme sıvısı olan ortamlarda kullanmışlardır. Kesme kuvvetleri üzerine kesme parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. Kesme kuvvetlerinin değişimi üzerinde ilerleme hızının kesme hızından daha etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Kaplanmış uç kullanımında kesme işleminde yaklaşık %14 azalma olduğunu belirtmişlerdir.

Wong ve diğ. (2008) çalışmalarında, Ti6Al4V alaşımının delinebilirliği üzerine kesici uç özelliklerinin ve kesme şartlarının etkisini takım aşınması ile analiz etmişlerdir. Çalışmada kullanılan tüm kesme hızlarında doğrudan delme tekniğine göre gagalamalı delme yönteminin daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Artan kesme hızı ile takım aşınmasının azaldığı, artan kesme zamanı ile kesici uçta yan yüzey aşınmalarının giderek attığını tespit etmişlerdir. Bu aşınmalarında malzemede gerilim artışı yaratacağını belirtmişlerdir.

Cantero ve diğ. (2005) Ti6Al4V alaşımının delme işleminde delik kalitesi ve ölçüsel tamlığını üzerine delme süresinin etkisini kesici takım aşınmasını ele alarak incelemişlerdir. Kuru kesme şartlarında yapılan işlemlerde, artan kesme süresi ile yüzey kalitesinin bozulduğu ve talaş kalınlığının arttığını bu durumunda takım aşınmasını hızlandırdığını rapor etmişlerdir.

Feldshtein (2011) çalışmasında, Ti6Al4V alaşımının delme işleminde talaş oluşum mekanizmasını kaplamalı ve kaplamasız kesici takımlar kullanarak incelemişlerdir. Azalan ilerle oranı ve kesme hızı ile talaş uzunluğunun arttığını, ilerleme ve kesme hızının artması ile talaş uzunluğunun azaldığını, ilerleme oranının artması ve kesme hızının azalması ile talaş uzunluğunun ortalamanın altında oluğunu tespit etmişlerdir. Kaplamalı kesici uçlarda oluşan talaş boyunun, kaplamasız kesici uçlarla işleme sonrası çıkan talaşlara göre daha kısa boyutlu olduğunu belirtmişlerdir.

Wang ve Liu (2014) yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V alaşımının freze ile işlenmesinde değişen kesme parametrelerinin takım aşınma mekanizması ve keme kesme kuvvetleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Frezelemede, kübik bor nitrür (CBN) kesici uç ve yüksek basınçlı kesme sıvısı kullanmışlardır. Artan kesme hızının kesici ucun kullanım ömrünü uzattığını, meydana gelen aşınmanın ise talaşların işlenen yüzeye yapışma eğilimden kaynaklandığını belirtmişlerdir. İlerleme oranının azalması ile kesme işlem süresinin artığını ancak kesici takı aşınmasının azaldığını tespit etmişlerdir.

Thepsonthi ve Özel (2012) yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V alaşımının frezeleme işleminde kaplamasız tungsten karbür ve CBN kaplamalı tungsten karbür kullanarak kesme parametrelerinin takım aşınması, yüzey kalitesi ve talaş morfolojisi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Kesme kuvvetlerinin, kaplamalı takımlarda daha yüksek değerlere çıkmasına rağmen kesme sıcaklığının daha düşük seviyelerde kaldığını ve bunun da takım aşınmasını azalttığını belirtmişlerdir. Çalışma sıcaklığı ve kesici uçta oluşan aşınmanın kesme hızının artmasıyla arttığını, yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve talaş oluşumunu etkileyen en fazla etkileyen parametrenin ilerleme oranı olduğunu ifade etmişlerdir.

Gupta ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V alaşımının işlenebilirlik özelliğini kuru, $LN_2$ ve $CO_2$ ortamlarında tornalama yaparak incelemişlerdir. Kesme parametreleri olarak; 50, 75 ve 100 m/dak kesme hızları, 0,1, 0,15 ve 0,2 mm/dev ilerleme hızları ve 0,35 l/dak kriyojenik soğutucu akış hızı, kesici takım olarak; TiC-Al2O3-TiN kaplamalı karbür uç kullanmışlardır. En düşük kesme kuvvetini $LN_2$ soğutucu ortamda elde etmişlerdir. Ayrıca ilerleme hızının

kesme kuvvetleri üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Kesme hızının artmasıyla sıcaklığın arttığı ve en düşük sıcaklığın $CO_2$ soğutma ortamında elde etiklerini rapor etmişlerdir. Kesme sıcaklığı ölçümlerinde FE modellemesi ile deneysel sonuçlar arasındaki sapmaların kuru, $LN_2$ ve $CO_2$ soğutma ortamlarında sırasıyla; ortalama %5,54, %5,18 ve %8,42 olduğunu göstermişlerdir. Öte yandan, kuru, $LN_2$ ve $CO_2$ soğutma ortamlarında FE modellemesi ve kesme kuvvetleri sonuçları arasındaki sapma değerleri sırasıyla; %3,74, %3,358 ve %3,03 olduğunu tespit etmişlerdir.

Zhang ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V alaşımının iki aşamalı frezeleme (kaba ve ardından ince) işleme yöntemlerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada farklı işleme parametrelerinin; kesme kuvvetine, işleme yüzeyinin artık gerilimine ve mikroyapısı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. İşlemede, kuru kesme koşulları altında XOMX090308TR-M08,MP2500 tipi Ti(C,N)-Al2O3 kaplamalı ultra ince karbür kesici uçlar kullanmışlardır. Kaba frezeleme işlemende; 80, 120, 160, 200, 240, 280 ve 320 m/dak kesme hızları, 0,03, 0,05 ve 0,07 mm/dev ilerleme hızları ve 0,5, 1, 1,5 ve 2 mm radyal kesme derinlikleri kullanmışlardır. İnce frezeleme işlemende; 280 m/dak kesme hızı, 0.05 mm/dev ilerleme hızı ve 0,2 mm radyal kesme derinliği kullanmışlardır. Her iki işlemede de eksenel kesme derinliğini 1 mm olarak uygulamışlardır. Elde edilen deneysel sonuçlarına göre, mekanik ve termal deformasyonların birleşik etkileri nedeniyle, düşük kaba işleme kesme hızında yüksek kaba işleme kesme hızına göre kesme kuvvetinin ve artık basma gerilmesinin daha büyük olduğunu belirtmişlerdir. İki aşamalı işleme sürecinde, kaba işleme kesme hızının artmasıyla ilk olarak ince işleme yüzeyinde β fazının arttığını ve daha sonra azaldığını rapor etmişlerdir. Kaba işlemede kullanılan yüksek kesme hızlarında, işleme sertleştirme etkisi nedeniyle yüzeyinin mikroyapısının olumsuz olarak etkilendiğini belirtmişlerdir. İnce işlemenin kesme kuvveti, kaba işlemenin etkisi altında açıkça etkilendiğini açıklamışlardır. Kaba işlemedeki kesme hızının ince işlemedeki kesme kuvveti üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek kesme hızlarında, kesme kuvvetinin genelde azalan bir eğilim gösterdiğini ifade etmişleridir.

Chowdhury ve diğ. (2021) yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V alaşımının kaba tornalanması sırasında AlTiN ve CrN PVD kaplamaların talaş yığıntısı (BUE) oluşumu üzerindeki etkisini incelemişlerdir. AlTiN ve CrN kaplamalı Kennametal CNMG432 Grade K 313 ve kaplamasız Sandvik Coromant SPGN120308 sinterlenmiş karbür kesici uçları soğutuculu kesme şartlarında kullanmışlardır. Kesme parametreleri olarak; 45 m/dak kesme hızı, 0,15 mm/dev ilerleme hızı

ve 2 mm kesme derinliği belirlemişlerdir. Kaplamaların tribolojik performansını değerlendirmek için çip morfolojisini, performansını belirlemek için mikromekanik özeliklerini analiz etmişlerdir. En düşük takım aşınması ve talaş yığıntı oranını CrN kaplamalı uçlarda elde etmişlerdir. Yüksek kenar aşınması ve talaş yığıntısının artan kesme hızı ile artığını; düşük kesme hızları, takım-talaşı ara yüzünde oluşan şiddetli yapışkan etkileşimin kesici kenarda yoğun BUE oluşumuna yol açtığını açıklamışlardır.

Lindvall ve diğ. (2021) yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde yüksek hızlı finiş tornalama kullanarak kesme parametrelerinin takım aşınması üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Aşınma mekanizmasını analiz etmek için SEM, (S)TEM, XEDS ve SAED'nin gelişmiş mikroskop yöntemlerini kullanmışlardır. Kesme parametreleri olarak; 150, 200 ve 250 m/dak kesme hızları, 0,1 mm/dev ilerleme hızı ve 0,3 mm kesme derinliği kullanmışlardır. Kesme hızlarında makul bir takım ömrü sağlamak için 90 bar basınçta %8 yağ-su emülsiyonu ile HPDC (High-Pressure Directed Coolant) kullanmışlardır. Ek bir takım performans testi için, 150 m/dak kesme hızı ve10 bar kesme sıvısı basıncı HPDC sistemi ile kullanılmıştır. Sonuçlara göre; yan aşınmanın yüzey pürüzlülüğü üzerinde olumsuz bir etkisinin olduğunu, ancak elde edilen yüzey pürüzlülük değerlerinin kabul edilebilir olduklarını belirtmişleridir. İş parçası ve takım malzemesi arasındaki etkileşim kobalt-karbon difüzyonunun oluşumuna sebep olduğunu, kobalt difüzyon ile kısmı WC partiküllerinin çözünmesi kraterin ortasındaki tane bağını azalttığını ve böylece adhezif aşınmalara sebep olduğunu rapor etmişlerdir. Kesme bölgesinde karbonun yayılması sonucu tungsten tabakasının oluştuğunu ve karbon ve titanyum etkileşimi neticesinde kesme bölgesinde β-Ti, TiC, ve TiCo2 oluştuğunu da ifade etmişleridir.

Kaplan ve diğ. (2018) yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V alaşımını tornalama işlemi ile işleyerek, kesici uç aşınmasını incelemişlerdir. Deneylerde, farklı bağlayıcı içeriği ve tane boyutuna sahip karbür tabanlı CNMG120408-SM üç uç kullanmışlardır. Çalışmada işleme parametreleri olarak; %9 su-yağ emülsiyonu, 50, 70 ve 115 m/dak kesme hızları, 0,2 mm/dev ilerleme hızı ve 2 mm kesme derinliği kullanmışlardır. Takım aşınma miktarını SEM yoluyla incelemişlerdir. Artan bağlayıcı içeriğiyle aşınma miktarının arttığını ve takım ömrünün azaldığını rapor etmişlerdir. Yığıntı talaş mikro yapısının bağlayıcı içeriğine bağlı olduğunu ve daha düşük miktarda bağlayıcının olması koyu renkli BUE'nin artmasına neden olduğunu belirtmişlerdir. Kesici uç aşınmasının kimyasal ve yapışkan aşınma mekanizmalarının bir kombinasyonundan oluştuğunu belirtmişlerdir. WC tane büyüklüğünün orta derecede kesme hızlarında önemli bir parametre olduğunu rapor etmişlerdir.

Rahman Rashid ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V titanyum alaşımını 150 m/dak kesme hızında, kaplamasız karbür kesici takımlarla işleyerek oluşan takım aşınmalarını incelemişlerdir. Çalışma kuru işleme koşulları altında CNMX1204A2-SM H13A kaplamasız tungsten karbür uçlar kullanılarak yapılmıştır. Tornalama deneylerinde, 150 m/dak kesme hızı, 0,214 mm/dev ilerleme hızı, 1 mm kesme derinliği kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre aşınmaların; yapışma, aşınma ve difüzyon olmak üzere üç mekanizmadan meydana geldiğini belirtmişlerdir. Difüzyon arayüzü, kesme işleminin başlangıcında titanyumun yapışması ile oluştuğunu, kesici kenarın yakınında kararlı bir difüzyon arayüzü sonrası kararsız bir difüzyon tabakasının oluştuğunu rapor etmişlerdir. Aşınma bölgelerinde TiC ve WC katmanlarının difüzyon ve artan sıcaklık neticesinde oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Rotella ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada, Ti6Al4V titanyum alaşımının işlenebilirlik kabiliyetinin farklı işleme ortamlarında incelemişlerdir. Ortogonal tornalama işlemini kuru, MQL (Minimal Quality Lubrication) ve kriyojenik soğutma koşulları altında kaplanmış takımlar kullanarak yapmışlardır. Yapılan çalışmada soğutma koşullarının yüzey bütünlüğü ve ürün performansı üzerindeki etkisini, yüzey pürüzlülüğü, mikroyapı, sertlik, tane inceliği ve işlenmiş ürünün faz dönüşümü dâhil metalürjik koşullar açısından incelemişlerdir. Tornalama sırasında, 70, 110 ve 150 m/dak kesme hızları, 0,05 ve 0,1 mm/dev ilerleme hızları ve 2 mm kesme derinliği ve TiAlN kaplamalı Kennametal KCU10 kesici uçlar kullanmışlardır. MQL testlerinde, 60 ml/saatlik akış hızı ve 4 bar basınçla kesme bölgesine harici bir nozul yoluyla bitkisel yağ emülsiyonu uygulamışlardır. Kriyojenik testlerde ise; kesme bölgesine $LN_2$ soğutucu 2 mm nozul ve 12 bar basınçla uygulanıp −185 °C'lik bir yüzey sıcaklığı elde etmişlerdir. En iyi yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertlik değerlerini kesme hızının artmasıyla kriyojenik ortamda tespit etmişlerdir. Kriyojenik soğutucu ortamda, kesme hızının artmasıyla en yüksek yüzey sertliği ve en küçük tane boyutunun olduğunu ve yüzey sertliğinin numune merkezine doğru azaldığını rapor etmişlerdir.

# 3. YÖNTEM

Tez kapsamında kullanılan ticari ismi Ti6Al4V olan titanyum alaşımı Tuzla'da bulunan Varzene Metal San. ve Tic. A.Ş. firmasından tedarik edilmiştir. Parçaların talaşlı imalatı İkitelli Organize Sanayi Sitesinde bulunan Bor Kesici Takım ve Makine San. Tic. Ltd. Şti.'de gerçekleştirilmiştir. Gerek parçaların temini gerekse parçalar üzerinde yapılan tüm işlemlerin sanayide bulunan ve aktif olarak çalışan firmalarda gerçekleştirilmesi bakımından; Ti6Al4V alaşımını işleyen firmalar için çalışmanın sonuçlarının doğruluğu ve kabul edilbilirliği yüksektir. Bu tez çalışmasında, Ti6Al4V alaşımının delinmesinde, frezelenmesinde ve tornalanmasında, farklı kesici uçlar, kesme parametreleri ve soğutma ortamları kullanılarak, kesici uçların aşınma mekanizması, işlenen parçaların yüzey pürüzlülükleri, işlenen yüzey morfolojileri ve işlem sonucu çıkan talaşların morfolojileri, konuyla ilgili literatür ışığı altında detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada kullanılan malzemenin özellikleri, iş parçasına uygulana tüm talaşlı işlemler, test yöntemleri ve detayları bu bölümde belirli bir sırayla aşağıda ele alınmıştır.

## 3.1. KULLANILAN İŞ PARÇASININ ÖZELLİKLERİ

Bu çalışmada, Varzene Metal San. ve Tic. A.Ş.'den tedarik edilen 30 mm çapında ASTM standart numarası B348 olan Ti6Al4V alaşımı çubuklar kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan Ti6Al4V titanyum alaşımının firma tarafından verilen kalite belgesinde kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 3.1 ve 3.2'de verişmiştir. Ayrıca malzemeye ultrasonik iç çatlak testi ve yüzey çatlak testi uygulandığı rapor edilmiştir.

**Tablo 3.1:** Ti6Al4V titanyum alaşımının kimyasal bileşimi.

| Element | Al, % | V, % | Fe,% | C, % | N, % | H, % | O, % | Ti, % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ti6Al4V | 6,09 | 3,91 | 0,13 | 0,02 | 0,01 | 0,001 | 0,09 | Kalan |

**Tablo 3.2:** Ti6Al4V titanyum alaşımının mekanik özellikleri.

| Mekanik Özellik | Çekme Dayanımı, MPa | Akma Dayanımı, MPa | Sertlik, HV | Uzama, % |
|---|---|---|---|---|
| Ti6Al4V | 992 | 935 | 310 | 21 |

## 3.2. İŞ PARÇASININ İŞLENMESİNDE KULLANILAN KESİCİ UÇLAR

Talaşlı imalat, metal ürünlerinin üretiminde kullanılan önemli bir teknolojik üretim aşamasıdır. Talaşlı imalat işlemlerinde delik delme, tornalama ve frezeleme geleneksel yöntemler olup çok yoğun olarak talaşlı imalat sektöründe kullanılmaktadır. Tüm geleneksel talaş kaldırma yöntemlerinin uygulanabildiği Ti6Al4V alaşımını bu malzemeler, kendilerine has bazı özellikleri nedeniyle, işlenmesi zor malzemeler grubuna girmektedir. Bu çalışmada kesme şartlarının iyileştirilmesi ve takım maliyetinin azaltılması için talaşlı işlemlerinde farklı kesici takımlar kullanılarak işleme yapılmıştır. Delme işleminde iki farklı uç çapına sahip elmas karbür matkap ucu, frezeleme işleminde APXT serisi APXT-1003-PDR freze ucu ve ortogonal yüzey tornalama işleminde ise polikristalli $B_3N$ (kübik boron nitrit) esaslı PCBN Secomax 0° talaş açısına ve 5° boşluk açısına sahip kaplamasız ve CVD kaplamalı kesici uçları kullanılmıştır. Talaşlı işlemlerim tümünde; seri üretim şartlarında Bor Kesici Takım ve Makine San. Tic. Ltd. Şti. tarafından öngörülen kesici uçlar kullanılmıştır.

Delme, frezeleme ve tornalama işlemlerinde kullanılan kesici uçların özellikleri sırasıyla; Tablo 3.3, Tablo 3.4 ve Tablo 3.6'da verilmiştir. Delme işleminde kullanılan elmas karbür matkap ucun, frezelemede kullanılan PVD yöntemi ile TiCN kaplı APXT-1003-PDR freze ucunun ve tornalama işleminde kullanılan kaplamalı DNMG 150608-MK5 ve kaplamasız CBN200 kesici uçların fotoğrafları sırasıyla; Şekil 3.1 (a), (b), (c) ve (d) verilmiştir.

**Tablo 3.3:** Delme işleminde kullanılan elmas karbür matkap ucunun özellikleri.

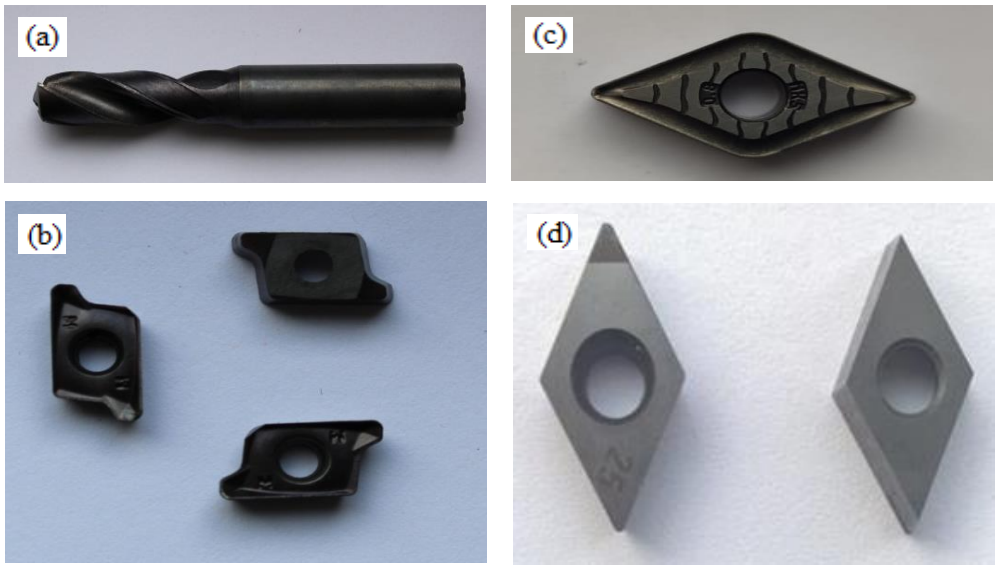
| Tanımı | Özellikleri | |
|---|---|---|
| Tip | Karbür Matkap | |
| Biçim | Elmas | |
| Boy | Standart Boy | |
| Ağız Sayısı | 2 | |
| Çap (mm) | 7,5 | 8,4 |
| Kesme Boyu (mm) | 69 | 75 |
| Tam Boy (mm) | 109 | 117 |

**Tablo 3.4:** Frezeleme işleminde kullanılan APXT-1003-PDR freze ucunun özellikleri.

| Tanımı | Özellikleri |
|---|---|
| Tip | APXT Serisi |
| Üretici Kodu | APXT-1003-PDR |
| Kalite | KLB 1255 |
| İç Daire (mm) | 3 |
| Kalınlık (mm) | 3,5 |
| Köşe Yarıçapı (mm) | 0,80 |
| En (mm) | 6,30 |
| Uzunluk (mm) | 11,30 |
| Biçim | Elmas |
| Kaplama | PVD ile TiCN |

**Tablo 3.5:** Tornalama işleminde kullanılan CBN ve DNMG kesici uçların özellikleri.

| Tanımı | Kesici Uç Özellikleri | |
|---|---|---|
| | **$B_3N$** | **DNMG** |
| Tip | CCGW | DNMG |
| Malzeme | CBN | Karbür |
| İç Daire (inç) | 1/4 | 1/2 |
| Kalınlık (inç) | 3/32 | 0.25 |
| Köşe Yarıçapı (inç) | 1/64 | 1/32 |
| Üretici Kodu | CBN200 | 150608-MK5 |
| Kaplama Türü | Kaplamasız | CVD |
| Kaplama | - | $TiCN+Al_2O_3+TiCN$ |
| Biçim | Elmas | Elmas |




**Şekil 3.1:** Çalışmada kullanılan kesici uçlar a) karbür matkap ucu, b)APXT-1003-PDR freze ucu, c) kaplamalı DNMG karbür tornalama ucu, d) kaplamasız CBN tornalama ucu.

## 3.3. İŞ PARÇASININ TALAŞLI İMALAT YÖNTEMLERİ İLE İŞLENMESİ

Talaşlı imalat sanayinde uygun kesme parametreleri ve kesme şartlarında çalışmak, kesici takımın kullanım ömrünü ve işleme tezgâhının kullanım süresini uzatır. Talaşlı imalat proseslerinin amacı, yüksek derecede üretim etkinliği ile bir ürünün istenilen zamanda, kalitede ve uygun maliyetle imalatını yapmaktır. Bu çalışmada Ti6Al4V titanyum alaşımının kesme şartlarının iyileştirmek için delme, frezeleme ve tornalama işlemleri farklı kesme hızı, ilerleme oranı, talaş derinliği ve soğutma ortamları kullanılarak yapılmıştır. Ti6Al4V alaşımının delinmesinde, frezelenmesinde ve tornalanmasında kullanılan tüm kesme parametreleri, işleme tezgâhının özellikleri, soğutucu ortamın detayları ve işlenen parçaların görselleri aşağıda belirli bir sırayla verilmektedir. Kullanılan kesme parametreleri, konuyla ilgili literatür taraması yapılarak ve Bor Kesici Takım ve Makine San. Tic. Ltd. Şti.'nin öngörüleri dikkate alınarak belirlenmiştir.

### 3.3.1. İş Parçasının Delinmesi

Ti6Al4V parçaların delik delme işlemi, AGMA VMC Serisi, VMC-115, X,Y ve Z eksenli, FANUC Serisi 18i-MB kontrolörlü 1-10,000 mm/dak kesme ilerlemesine sahip dik işleme tezgâhında yapılmıştır. Şekil 3.2'de solda tezgâhın fotoğrafı, sağda ise iş parçasının tezgâhta işleme görüntüsü verilmiştir. Tablo 3.6'da delme işlemi yapılan dik işleme tezgâhının özellikleri verilmiştir. Delme işleminde Ø7,5 mm ve Ø8,4 mm çapında iki farklı elmas karbür matkap ucu kullanılmıştır. Bu çalışmada, kesme hızı 50 m/dak, ilerlemesi hızı 0,08 mm/dev ve delme derinliği 20 mm kör delik olarak belirlenmiştir. Her bir delme işlemi, üç parçaya üçer delik olmak üzere toplam dokuz delik delinerek yapılmıştır. Delme işlemleri kuru ve kesme sıvısı kullanılarak yapılmıştır. Delme işlemlerinde kesme sıvısı olarak; %5 ESTRA 320 mikro emülsiyon metal işleme sıvısı ve %95 su karışımı kullanılmıştır. Ti6Al4V iş parçasına uygulanan delme işleminde kullanılan kesme parametreleri Tablo 3.7'de verilmiştir. Delik delme işleminden sonra iş parçasının fotoğrafı Şekil 3.3'te verilmiştir.



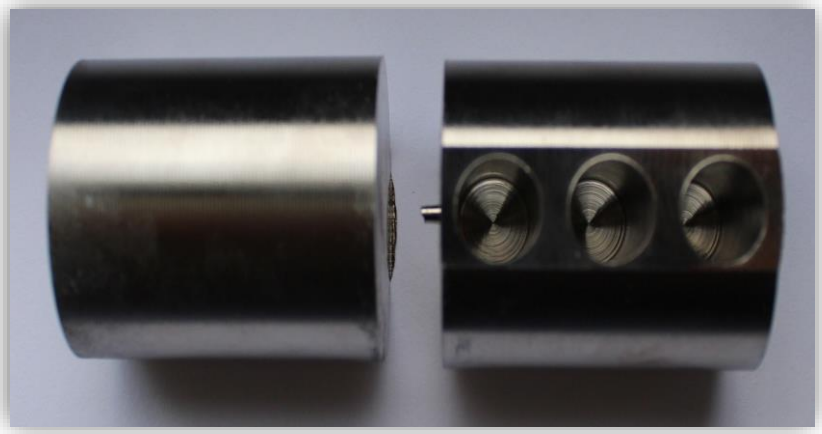
**Şekil 3.2:** Deneysel çalışmada kullanılan kontrollü dik işleme tezgahı.

**Tablo 3.6:** Agma VMC serisi, VMC-115 markalı dik işleme tezgahı özellikleri.

| Ayrıntılar | Özellik |
|---|---|
| Tabla Ölçüsü (mm) | 1200x580 |
| Maks. Tabla Yükü (kg) | 800 |
| X/Y/Z Eksen Hareketleri | 1100/550/580 |
| Fener Mili-Tabla Mesafesi (mm) | 150~750 |
| X/Y/Z Eksen Motor Gücü (kW) | 3/3/3 |
| Fener Mili Güç Aktarım Tipi | Direkt Tip |
| Fener Mili Motor Hızı (devir) | 8000/10000/12000 |

**Tablo 3.7:** Deneysel çalışmada kullanılan delme parametreleri.

| Matkap Çapı, mm | Delme Ortamı | Delme Derinliği, mm | Kesme Hızı, m/dak | İlerleme Hızı, mm/dev |
|---|---|---|---|---|
| 7,5 | Kuru<br>Sıvı | 20 | 50 | 0,08 |
| 8,5 | Kuru<br>Sıvı | 20 | 50 | 0,08 |



**Şekil 3.3:** Delme işleminden sonra iş parçasının görüntüsü

### 3.3.2. İş Parçasının Frezelenmesi

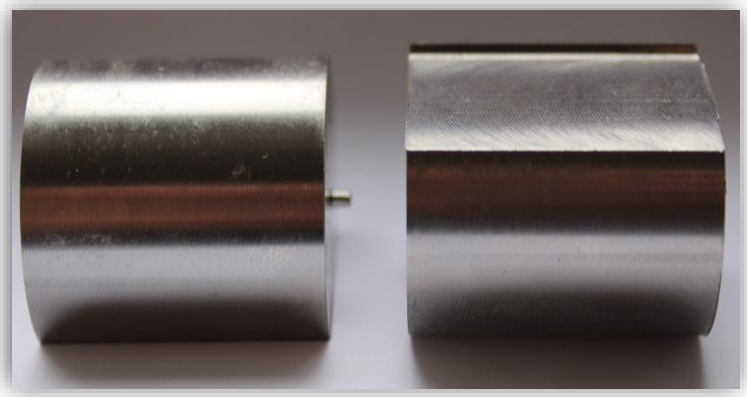
Ti6Al4V parçalarının frezeleme işlemi; Agma VMC Serisi, VMC-115, X, Y ve Z eksenli, Fanuc Serisi 18i-MB kontrolörlü 1-10,000 mm/dak kesme ilerlemesine sahip frezeleme tezgâhında yapılmıştır. Şekil 3.4'de sağda işleme tezgâhının fotoğrafı, solda ise iş parçasının tezgâhta işleme görüntüsü verilmiştir. Frezeleme işleminde APXT-1003-PDR freze ucu kullanılmıştır. Freze yönteminde yapılan işlenebilirlik incelemelerinde kesme hızları 50 ve 100 m/dak, ilerlemesi hızı 0,25 mm/dev ve kesme derinliği 0,4 mm olarak belirlenmiştir. Her bir frezeleme işlemi iki parçanın üç tarafı işlenerek gerçekleştirilmiştir. Frezeleme işlemleri kuru ve kesme sıvısı kullanılarak yapılmıştır. Frezeleme işlemlerinde soğutucu sıvı olarak (%5) ESTRA 320 mikro emülsiyon metal işleme sıvısı ve %95 su karışımı kullanılmıştır. Ti6Al4V iş parçalarına uygulanan frezeleme parametreleri Tablo 3.8'de verilmiştir. Frezeleme işleminden sonra iş parçasının fotoğrafı Şekil 3.5'de verilmiştir.




**Şekil 3.4:** Deneysel çalışmada kullanılan frezeleme tezgahı.

**Tablo 3.8:** Deneysel çalışmada kullanılan frezeleme parametreleri.

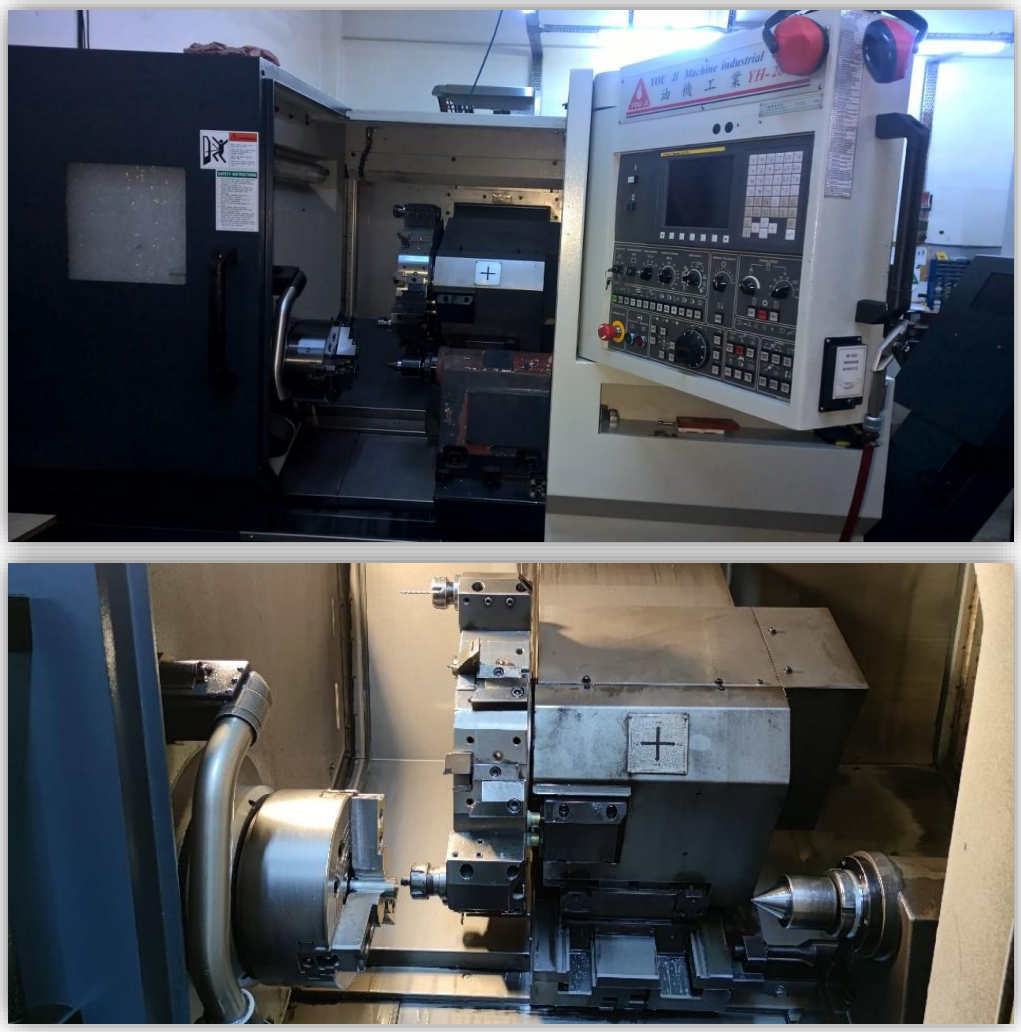
| Frezeleme Ortamı | Kesme Hızı (V), m/dak | İlerleme Hızı (f), mm/dev | Kesme Derinliği (a), mm |
|---|---|---|---|
| Kuru | 50 | 0,25 | 0,4 |
| Sıvı | | | |
| Kuru | 100 | | |
| Sıvı | | | |



**Şekil 3.5:** Frezeleme işleminden sonra iş parçasının görüntüsü.

### 3.3.3. İş Parçasının Tornalanması

Ti6Al4V parçalarının ortogonal yüzey tornalama işlemi YouJi Machine İndustrial Co. Ltd. tarafından üretilen, X ve Z eksenli, 550 mm işleme kursuna ve 3000 RPM devire sahip CNC tezgâhta yapılmıştır. Şekil 3.6'da üste işleme tezgâhının fotoğrafı altta ise iş parçasının tezgâhta işleme görüntüsü verilmiştir. Tüm işlemlerde kesme sıvısı olarak %5 ESTRA 320 mikro emülsiyon metal işleme sıvısı ve % 95 su karışımı kullanılmıştır. Ti6Al4V numuneler kaplamasız CBN200 ve TiCN+$Al_2O_3$+TiCN kaplamalı DNMG kesici uçlarla Tablo 3.9'da verilen kesme parametreleri ile işlenmiştir. Kesme hızları; 30, 40 ve 50 m/dak, kesme ilerlemeleri 0,15, 0,25 ve 0,35 mm/dev ve kesme derinlikleri 0,2, 0,4 ve 0,6 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 3.7'de CNC tornalama işlemi sonrası işlenen parçanın görüntüsü verilmiştir.



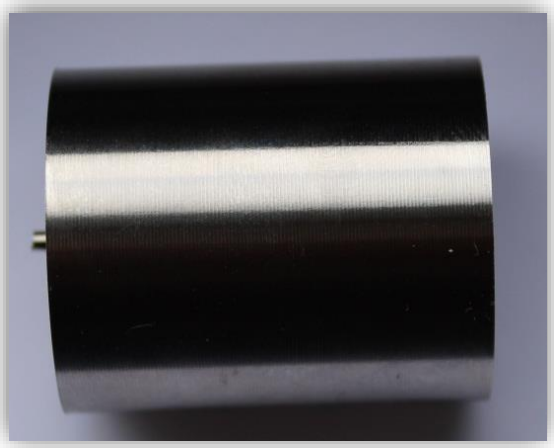
**Şekil 3.6:** Deneysel çalışmada tornalama işlemleri için kullanılan CNC tezgahı.

**Tablo 3.9:** Deneysel çalışmada kullanılan tornalama parametreleri.

| Deney No | Kesme Hızı (V), m/dak | İlerleme Hızı (f), mm/dev | Kesme Derinliği (a), mm |
|---|---|---|---|
| 1 | | 0,15 | |
| 2 | | 0,25 | 0,2 |
| 3 | | 0,35 | |
| 4 | | 0,15 | |
| 5 | 30 | 0,25 | 0,4 |
| 6 | | 0,35 | |
| 7 | | 0,15 | |
| 8 | | 0,25 | 0,6 |
| 9 | | 0,35 | |

**Tablo 3.9 (devam):** Deneysel çalışmada kullanılan tornalama parametreleri.

| Deney No | Kesme Hızı (V), m/dak | İlerleme Hızı (f), mm/dev | Kesme Derinliği (a), mm |
|---|---|---|---|
| 10 | | 0,15 | |
| 11 | | 0,25 | 0,2 |
| 12 | | 0,35 | |
| 13 | | 0,15 | |
| 14 | 40 | 0,25 | 0,4 |
| 15 | | 0,35 | |
| 16 | | 0,15 | |
| 17 | | 0,25 | 0,6 |
| 18 | | 0,35 | |
| 19 | | 0,15 | |
| 20 | | 0,25 | 0,2 |
| 21 | | 0,35 | |
| 22 | | 0,15 | |
| 23 | 50 | 0,25 | 0,4 |
| 24 | | 0,35 | |
| 25 | | 0,15 | |
| 26 | | 0,25 | 0,6 |
| 27 | | 0,35 | |



**Şekil 3.7:** CNC tornalama işleminden sonra iş parçasının görüntüsü.

## 3.4. KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI

Bu tez çalışmasında, Ti6Al4V alaşımının delinmesinde, frezelenmesinde ve tornalanmasında farklı kesici uçlar, kesme parametreleri ve soğutma ortamları kullanılarak işlenen parçaların işlenebilirlik testleri yapılmıştır. Bu amaçla talaş oluşum mekanizmaları, yüzey pürüzlülük ölçümleri ve kesici uçların aşınma mekanizmaları ve işlenen yüzey morfolojilerinin tespit edilmesinde kullanılan karakterizasyon çalışmalarının detayları aşağıda verilmektedir.

### 3.4.1. Talaş Morfolojilerinin İncelenmesi

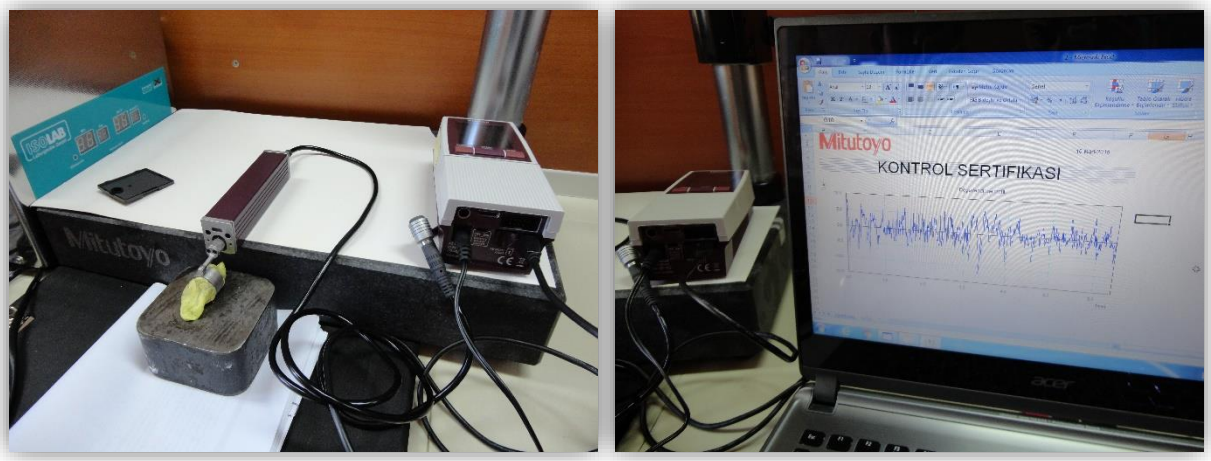
İşleme sonucu elde edilen talaş morfolojilerinin fotoğrafları Canon marka EOS 1300D model 18-55MM DC-III fotoğraf makinesi kullanılarak çekilmiştir. Talaş morfolojileri, delme işleminde matkap ucu çapı ve soğutma ortamına göre, frezeleme işleminde kesme hızına, soğutma ortamına ve uç tipine göre, tornalama işleminde ise ilerleme hızı, kesme hızı ve kesme derinliğine göre gruplandırılmıştır.

### 3.4.2. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

İşlenebilirliğin değerlendirilmesinde yüzey pürüzlülüğünün bilinmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada işlenmiş numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümleri, Mitutoyo marka Surftest SJ-210 model cihazda "Surface Roughnees Tester SJ-210/310/410" programı kullanılarak tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazına ait özellikler Tablo 3.10'da verilmiştir. Torna ile işlenmiş yüzeyler düz olmadığı için parçalar özel bir macunla ölçüm standına sabitlenerek yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Deliklerin yüzey pürüzlülük ölçümleri için özel bir aparat yardımıyla delik içlerine girilerek ölçüm alınmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri, delme işleminde matkap ucu çapı ve soğutma ortamına, frezeleme işleminde kesme hızına, soğutma ortamına ve uç tipine, tornalama işleminde ise ilerleme hızı, kesme hızı ve kesme derinliğine göre gruplandırılmıştır. Tüm ölçümler sonucunda bulunan yüzey pürüzlülük (Ra) değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak yüzey pürüzlülük değerleri hesaplanmıştır. Yüzey pürüzlülük cihazının (solda) ve ölçümü yapılan parçanın (sağda) fotoğrafı Şekil 3.8'de verilmiştir.

**Tablo 3.10:** Yüzey pürüzlülük ölçümünde kullanılan cihazın özellikleri.

| Özellik | Değer |
|---|---|
| Ölçme Hızı, mm/s | 0,25, 0,5, 0,75 |
| Ölçme Kuvveti, Mn | 0,75 |
| Uç Malzemesi | Elmas |
| Kesme Uzunluğu (λc), mm | 0,08, 0,25, 0,8, 2,5 |
| Değerlendirme Uzunluğu, mm | 0,3-16 aralığında |




**Şekil 3.8:** Yüzey pürüzlülük ölçümü.

### 3.4.3. SEM Analizleri

Talaşlı işleme sonrası kesici uçlarda meydana gelen aşınmalar ve işlenen parçaların yüzeylerinin karakterizasyonu, işlenebilirliği daha iyi yorumlamak açısından çok önemlidir. Kesici uçların aşınan yüzeylerinin ve işlem sonrası parça yüzeylerinin görüntü analizleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde bulunan JEOL™ JCM-6000 Benchtop model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. Şekil 3.9'da çalışmada kullanılan SEM cihazının fotoğrafı verilmiştir. Kesici uçların aşınan kısımlarını daha iyi görüntülemek için uçlar numune tutuculara dik bir konumda yerleştirilmiştir. İşlenen parçalardan alınan örnekler ve kesici uçlar çift taraflı karbon bant kullanılarak numune tutuculara sabitlenmiştir. SEM görüntüleri farklı büyütme oranları ile gerçekleştirilmiştir. SEM görüntüleri, delme işleminde matkap ucu çapı ve soğutma ortamına, frezeleme işleminde kesme hızına, soğutma ortamına ve uç tipine, tornalama işleminde ise farklı kesici uçlar, ilerleme hızı, kesme hızı ve kesme derinliğine göre ele alınarak değerlendirilmiştir. Böylece aşınma ve işlenmiş yüzey üzerine tüm parametrelerin, kesici uç türünün ve soğutucu ortamın etkisi daha iyi anlaşılmıştır.



**Şekil 3.9:** Çalışmada kullanılan SEM cihazı.

### 3.4.4. Takım Ömrünün Belirlenmesi

İşlenebilirliğin belirlenmesinde kullanılan en önemli kriterlerden birisi kesici takım ömrüdür. Kesici takımda oluşan aşınma, takım ömrünü tamamlayıncaya kadar devam etmektedir. Takım aşınmasına etki eden en belirgin faktörler, bu çalışmada da değişken olarak kullanılan kesme işlemini belirleyen kesme parametreleri, soğutma ortamı ve kesici ucun özellikleridir. Kesme işlemleri sırasında önemli olan takım ömrünün aşınma sebebiyle tamamlandığı zamanın belirlenmesidir. Kesici takımın kullanım ömrünü tamamlaması serbest ve yan yüzeylerde ki aşınmalar ve talaş ile plastik deformasyona bağlıdır. Genellikle takım ömrü kriterleri takım aşınmasına göre belirlenir, bunun için yüzey aşınması kullanılır. Bu çalışmada, takım ömrü belirlenirken aşınma kriteri olarak şunlar dikkate alınmıştır: kesici uçta oluşan ortalama serbest yüzey aşınması 200 μm'den fazla ise, kesici uçta herhangi bir kopma veya kırılma gerçekleşmişse takım ömrünü tamamlamıştır. Bu aşamalardan sonra kesme işlemine devam edilmemiş sonlandırılmıştır. Çalışmanın tamamında kullanılan takım ömürleri, delme işleminde matkap ucu çapı ve soğutma ortamına, frezeleme işleminde kesme hızına, soğutma ortamına ve uç tipine, tornalama işleminde ise değişen kesme hızı ve farklı kesici uç kriterlerinin etkileriyle belirlenmiştir.

# 4. BULGULAR

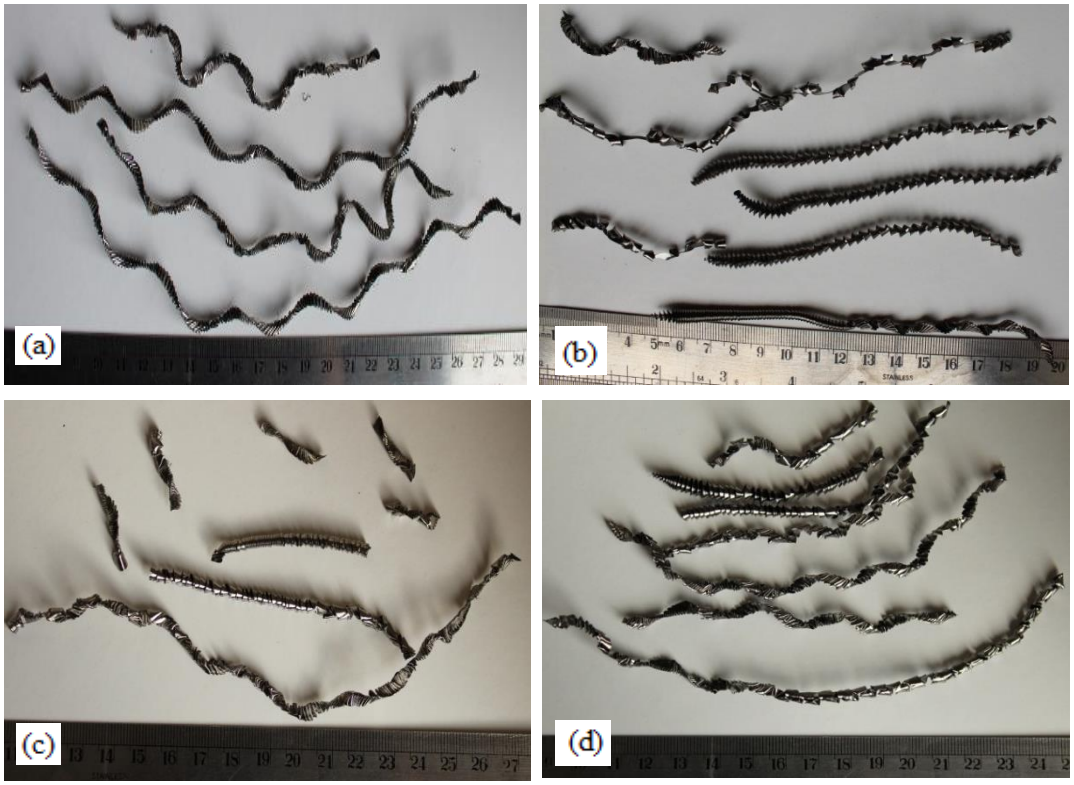
Ti6Al4V alaşımı parçaların delinmesinde, frezelenmesinde ve tornalanmasında, farklı kesici uçlar, kesme parametreleri ve soğutma ortamları kullanılarak; işlem sonucu çıkan talaşların morfolojileri, işlenen parçaların yüzey pürüzlülükleri, kesici uçların aşınma mekanizmaları ve işlenen yüzeylerin görüntülerinden elde edilen tüm sonuçlar belirli bir düzen dahilinde aşağıda verilmiştir.

## 4.1. TALAŞ MORFOLOJİLERİ

Talaşlı işleme sırasında oluşan kesme şartlarını ve olayları anlamak açısından, meydana gelen talaşların şekli ve rengi oldukça önemlidir. Talaşların boyutu ve yapısı talaşlı imalatta kullanılan kesici takımın ömrü, malzemenin yüzey kalitesini etkilemektedir (Sert, 2017). Bu yüzden oluşan talaşların morfolojilerini yorumlamak, takım aşınması ve işlenmiş yüzeyin kalitesi gibi işleme karakteristikleri hakkında bilgi vermek açısından önemlidir. Talaş formlarının kabul edilebilir sınırlar içinde olması ve boyutunun kısa oluşu, talaşın ortamdan uzaklaştırılması, tezgâhın güvenliği, işlenen yüzeyin kalitesinin biriken talaşlardan dolayı bozulmaması ve çalışanın güvenliği bakımından dikkate alınmalıdır (Hasak, 2018). Bu çalışmada, farklı talaşlı imalat prosesleri ile Ti6Al4V alaşımı parçalarının işlenmesi sonucu çok farklı formlarda talaş oluşumları gözlenmiştir. Tez çalışmasının bu bölümünde, farklı şartlar altında yapılan delme, frezeleme ve tornalama işlemleri sonrası talaş formları incelenmiştir.

### 4.1.1. Delme İşlemi Sonucu Oluşan Talaşlar

Şekil 4.1 (a) ve (b)'de sırasıyla kuru ve soğutma sıvısı kullanılarak Ø7,5 mm çapında elmas karbür matkap ucu ile elde edilen talaş formları; Şekil 4.1 (c) ve (d)'de sırasıyla kuru ve soğutma sıvısı kullanılarak Ø8,4 mm çapında elmas karbür matkap ucu ile elde edilen talaş formları verilmiştir. Görüntüsü alınan talaşların tamamı son parçanın delinme işleminden sonra elde edilmiştir. Tüm delme işlemleri; 50 m/dak kesme hızı, 0,08 mm/dev ilerlemesi hızı ve 20 mm kör delme derinliği ile yapılmıştır. Kullanılan soğutucu sıvı, %5 ESTRA 320 mikro emülsiyon metal işleme sıvısı ve %95 su karışımıdır.



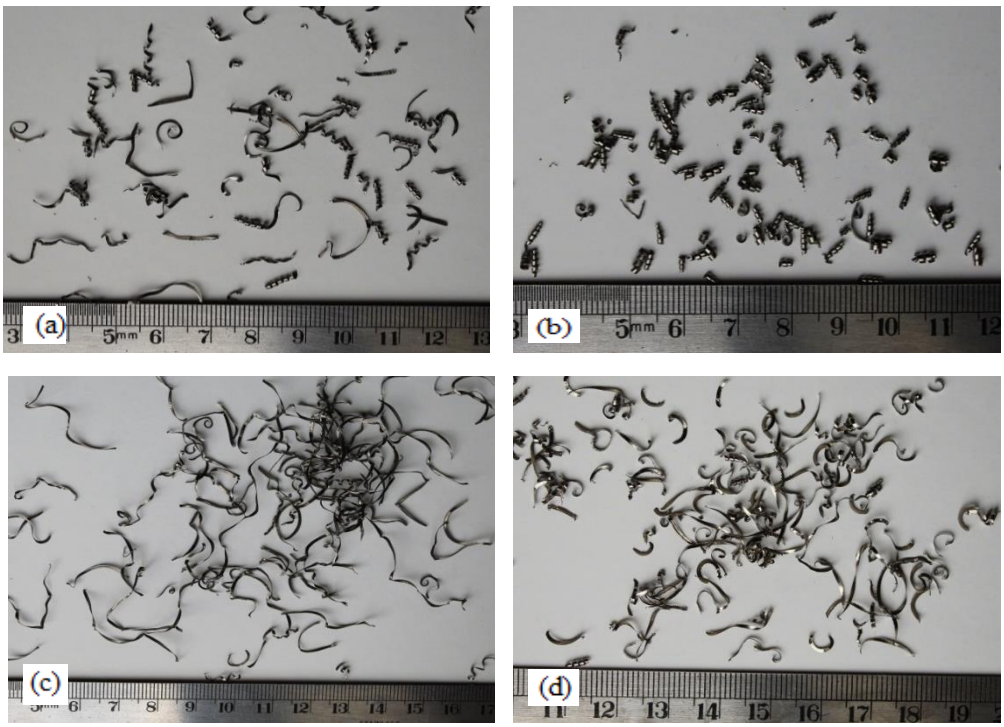

**Şekil 4.1:** (a) Ø7,5 mm uç ile kuru ortamda, (b) Ø7,5 mm uç ile kesme sıvısıyla, (c) Ø8,4 mm uç ile kuru ortamda, (d) Ø8,4 mm uç ile kesme sıvısıyla delme sonrası talaş formları.

Talaşlı işlemler sonrası ortaya çıkan talaş formlarını değerlendirmek için; literatürde genel talaş formlarının sınıflandırılmasında kullanılan genel terimlere göre değerlendirmelerimizi yaptık. (Akyol, 2007). Şekil 4.1'de Ø7,5 mm çapında elmas karbür matkap ucu ile elde edilen talaş formları incelendiğinde; (a) kuru işlemede istenmeyen talaş tipi olan burgu talaş oluşumu gözlemlenirken, (b) kesme sıvısı ile işlemede ise kabul edilebilir sınırın en altında olan helisel talaş oluşumu gözlemlenmiştir. Her iki koşulda da talaşlar uzun boyutlu ve düzenli şekilde kırılmıştır. Burgu talaş formu talaşlı işlemede, talaş boşaltma kanalında kolayca talaşın sıkışmasına sebep olacağından dolayı arzu edilmez (Yavuz ve diğ., 2017). Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde yaşanan en büyük sorunlardan biri kesici takım ile talaş arasında meydana gelen yüksek sıcaklık oluşumudur. Oluşan talaşın ilk kısmı ve son kısmı arasındaki yüksek sıcaklık farkından dolayı yaşanan ısıl genleşme ve büzülmeler burgu veya helisel olarak bilinen kıvrımlı talaş yapısının oluşmasına neden olmaktadır (An ve diğ., 2014). Şekil 4.1'de Ø8,4 mm çapında elmas karbür matkap ucu ile elde edilen talaş formları incelendiğinde, (c) kuru işlemede istenmeyen talaş tipi olan burgu talaş oluşumu düzensiz olarak farklı boyutlarda, (d) kesme sıvısı ile işlemede ise burgu ve helisel talaş formları bir arada, boyutları birbirinden farklı talaş oluşumları gözlenmiştir. Sonuç olarak, kesme sıvısı ile yapılan delme işlemlerinde, kabul

edilebilir sınırın en altında kalan helisel talaş oluşumu gözlenirken, kuru ortamda delmede istenmeyen ve işlem sırasında deliği tıkayarak talaş çıkışına sebep olan burgu talaş oluşumu gözlenmiştir. Ø8,4 mm çapında matkap ucuyla kuru işlemede ise boyutsal düzensizlik oldukça belirgindir. Şekil 4.1'de ki görüntülere talaş rengi açışından bakıldığında ise tüm şartlarda oluşan talaş renkleri birbirine benzerdir. Genel olarak; matkap çapının, kesme sıvısı kullanımı kadar talaş şekli üzerinde belirleyici olmadığı söylenebilir. Elde edilen burgulu ve helisel talaş formlarının takım aşınmasına hızlandırıcı etkisinin olduğu birçok çalışmada ifade edilmiştir (Strano vd., 2015; Ant, 2014; Yavuz, 2017).

### 4.1.2. Frezeleme İşlemi Sonucu Oluşan Talaşlar

Şekil 4.2 (a) ve (b)'de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 50 m/dak kesme hızıyla freze ile işleme sonrası elde edilen talaş formları, Şekil 4.2 (c) ve (d)'de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 100 m/dak kesme hızıyla freze ile işleme sonrası elde edilen talaş formları verilmiştir. Görüntüsü alınan talaşların tamamı son parçanın frezeleme işleminden sonra elde edilmiştir. Tüm frezeleme işlemlerinde, 0,25 mm/dev ilerlemesi hızı ve 0,4 mm kesme derinliği kullanılmıştır. Kullanılan kesme sıvısı, %5 ESTRA 320 mikro emülsiyon metal işleme sıvısı ve %95 su karışımıdır.



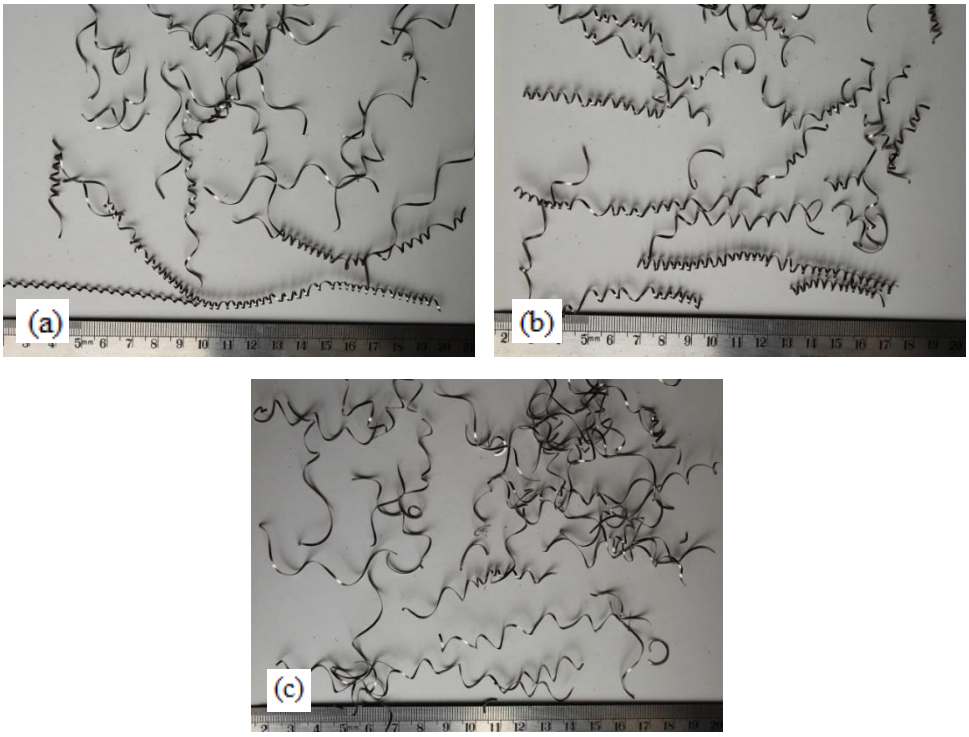

**Şekil 4.2:** (a) 50 m/dak kesme hızında kuru ortamda, (b) 50 m/dak kesme hızında kesme sıvısı ile, (c) 100 m/dak kesme hızında kuru ortamda ve (d) 100 m/dak kesme hızında kesme sıvısı ile frezeleme sonrası talaş formları

Şekil 4.2'de 50 m/dak kesme hızıyla freze ile işleme sonrası elde edilen talaş formları incelendiğinde (a) kuru işlemede kısa helisel, kısa boru ve kısa virgül şeklinde talaş oluşumları, (b)'de kesme sıvısı ile işlemede ise sadece kısa helisel talaş oluşumu gözlenmiştir. Kuru işlemede talaş kırılmaları düzgün olmasına rağmen düzensiz ve farklı formlarda talaşlar oluşmuştur. Kesme sıvısı ile işlemede daha stabil bir durum gözlenmiş ve tek tip talaş formu oluşmuştur. Şekil 4.2'de 100 m/dak kesme hızıyla freze ile işleme sonrası elde edilen talaş formları incelendiğinde (c) kuru işlemede karmaşık uzun spiral talaş oluşumu, (d)'de kesme sıvısı ile işlemede ise daha homojen ve kısa spiral talaş oluşumu gözlenmiştir. Her iki durumda da kabul edilebilir talaş formları oluşumu ve talaş kırılmaları düzgün bir şekilde gerçekleşmiştir. Şekil 4.2'de ki görüntülere talaş rengi açışından bakıldığında 50 m/dak kesme hızıyla frezelemede talaş rengi daha koyu, 100 m/dak kesme hızıyla frezelemeden elde edilen talaşlar daha açık renktedir. Genel olarak kesme hızının, kesme ortamından talaş formu üzerine daha belirleyici etkisinin olduğunu söyleyebiliriz.

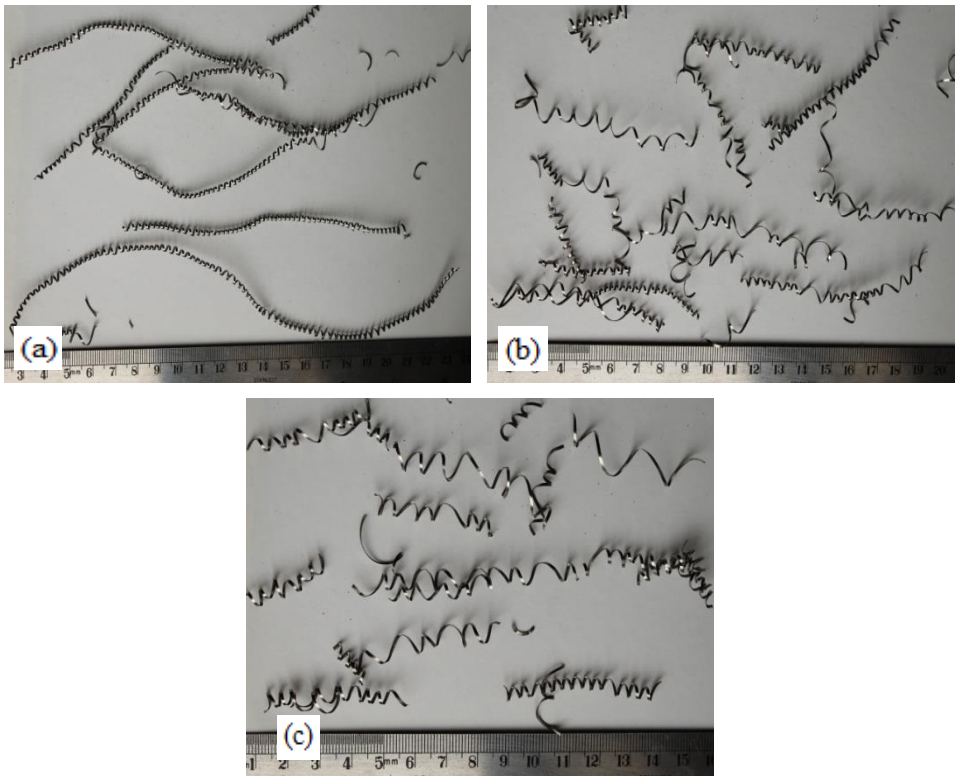
### 4.1.3. Tornalama İşlemi Sonucu Oluşan Talaşlar

Kesme hızı, ilerleme oranı ve kesme derinliğinin talaş formları üzerine etkisi oldukça önemli ölçüdedir. Bu parametrelerin talaş morfolojileri üzerine etkileri tüm değişkenlere göre ele alınmış ve karşılaştırmak açısından kendi aralarında kaplamalı ve kaplamasız kesici uçlara göre gruplandırılmıştır. Tüm işlemlerde kesme sıvısı olarak %5 ESTRA 320 mikro emülsiyon metal işleme sıvısı ve %95 su karışımı kullanılmıştır.

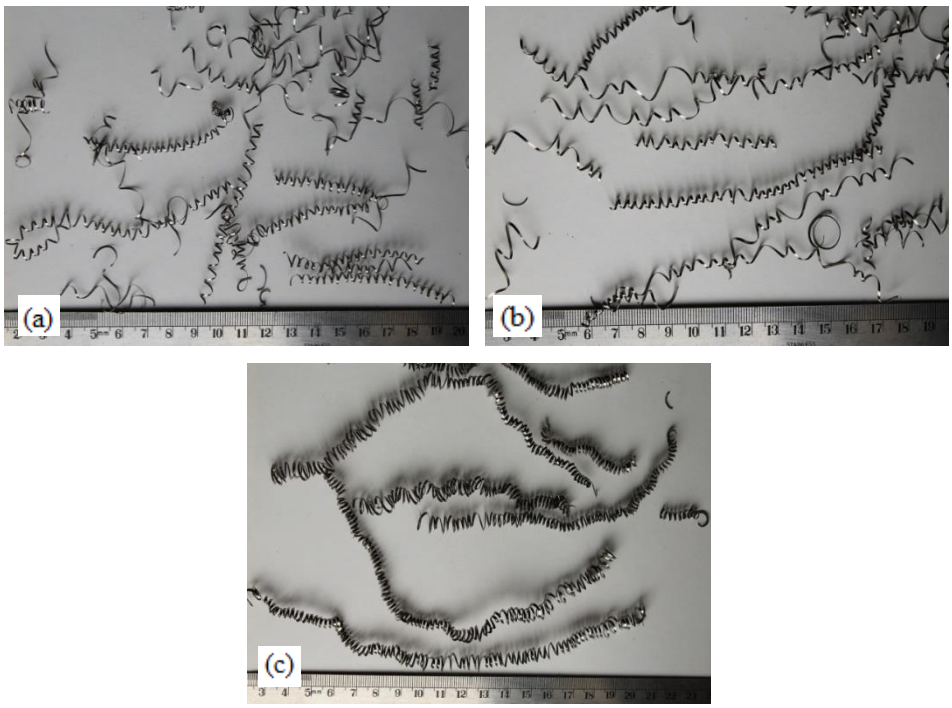
0,4 mm kesme derinliği ve 0,25 mm/dev ilerleme hızında, 30, 40 ve 50 m/dak kesme hızlarında kaplamalı DNMG kesici uç kullanarak tornalama sonrası elde edilen talaş formları sırasıyla, Şekil 4.3 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir. 40 m/dak kesme hızı ve 0,4 mm kesme derinliğinde; 0,15, 0,25 ve 0,35 mm/dev ilerleme hızlarında kaplamalı DNMG kesici uç kullanarak tornalama sonrası elde edilen talaş formları sırasıyla; Şekil 4.4 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir. 40 m/dak kesme hızı ve 0,25 mm/dev ilerleme hızında, 0,2, 0,4 ve 0,6 mm kesme derinliklerinde kaplamalı DNMG kesici uç kullanarak tornalama sonrası elde edilen talaş formları sırasıyla; Şekil 4.5 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir. Görüntüsü alınan talaşların tamamı son parçanın tornalama işleminden sonra elde edilmiştir.




**Şekil 4.3:** (a) 30, (b) 40 ve (c) 50 m/dak kesme hızları ile DNMG kesici uç kullanılarak uygulanan tornalama sonrası talaş formları




**Şekil 4.4:** (a) 0,15, (b) 0,25 ve (c) 0,35 mm/dev ilerleme hızları ile DNMG kesici uç kullanılarak tornalama işlemi sonrası talaş formları




**Şekil 4.5:** (a) 0,2 (b) 0,4 ve (c) 0,6 mm kesme derinlikleri ile DNMG kesici uç kullanarak tornalama sonrası talaş formları

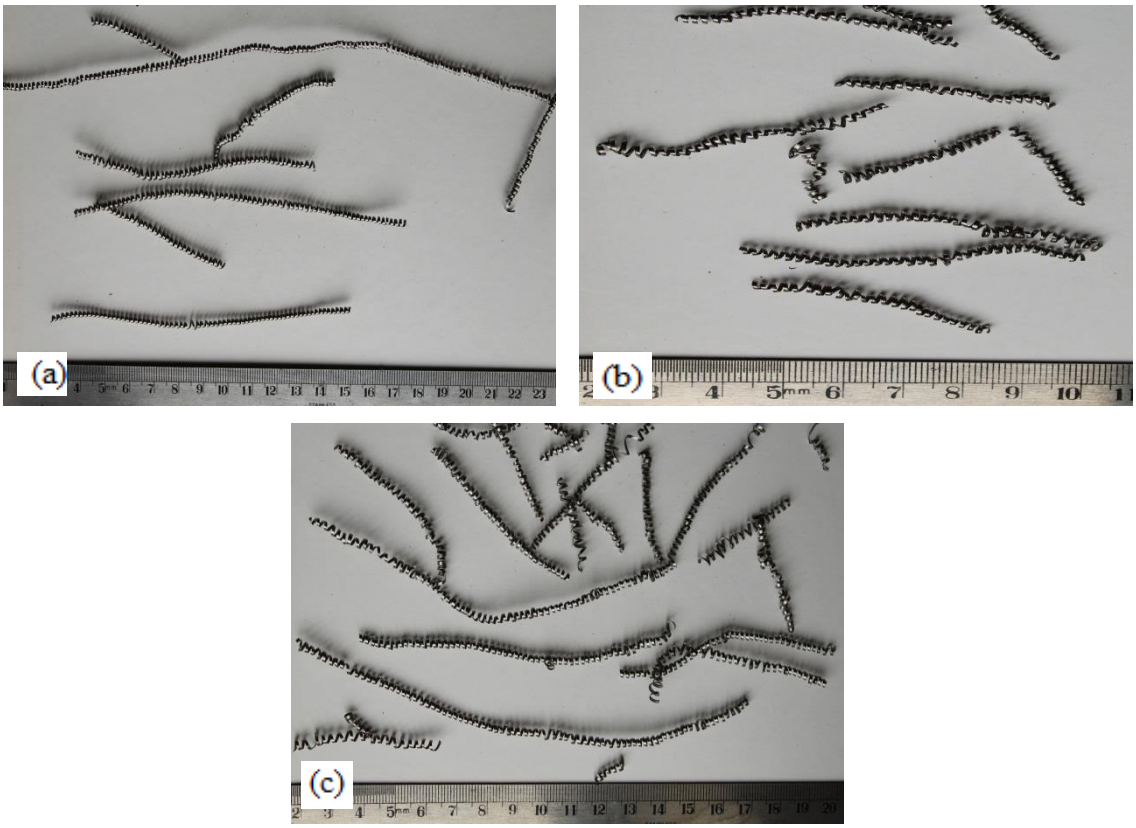
Şekil 4.3'te kaplamalı DNMG kesici uç ile elde edilen talaş formları incelendiğinde, 30 m/dak kesme hızında kısa burgu ve helisel talaş formları, 40 m/dak kesme hızında uzun burgu, helisel ve spiral şeklinde talaş formları ve 50 m/dak kesme hızında karışık boyutlu helisel talaş form oluşumları gözlenmiştir. Talaş boyutları açısından bakıldığında 30 m/dak kesme hızında 2-20 cm arasında değişen, 40 m/dak kesme hızında 5-10 cm arasında değişen ve 50 m/dak kesme hızında 2-10 cm arasında değişen uzunluklarda talaşlar elde edilmiştir. 30 m/dak ve 40 m/dak kesme hızlarında burgu talaş oluşumundan dolayı istenmeyen talaş formu gözlenirken, artan kesme hızı ile sadece helisel talaş formu gözlenmiş ve kabul edilebilir forma geçmiştir. 50 m/dak kesme hızında elde edilen talaşların boyut dağılımı daha homojendir. Talaş rengi açışından bakıldığında tüm parametrelerde benzer renk oluşumu göstermişlerdir. Genel olarak kaplamalı DNMG kesici uç ile tornalama işleminde kesme hızının artması ile talaş formunun iyileştiğini söyleyebiliriz.

Şekil 4.4'te kaplamalı DNMG kesici uç ile elde edilen talaş formları incelendiğinde 0,15 mm/dev ilerleme hızında uzun helisel talaş formları, 0,25 mm/dev ve 0,35 mm/dev ilerleme hızlarında kısa helisel ve uzun boru şeklinde talaş formları gözlenmiştir. Artan ilerleme hızı ile beraber talaş formları daha karmaşık şekilli hale gelmiştir. 0,15 mm/dev ilerleme hızında 2-22

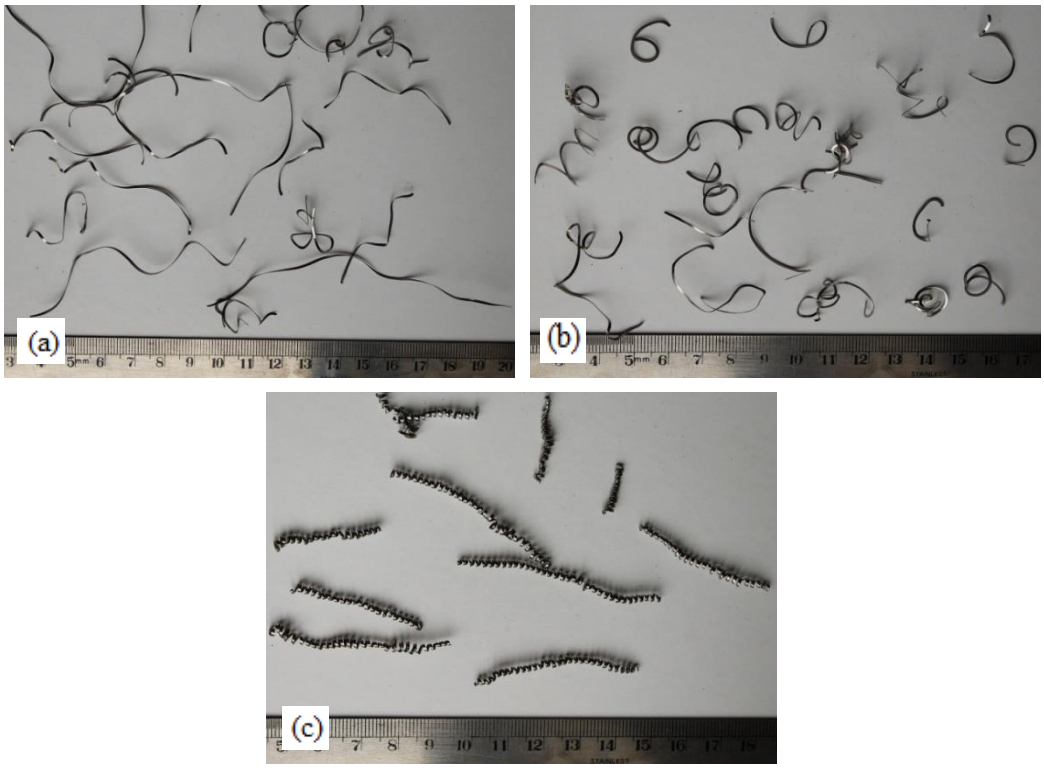
cm arasında değişen, 0,25 mm/dev ve 0,35 mm/dev ilerleme hızlarında 5-11 cm arasında değişen uzunluklarda talaşlar elde edilmiştir. Artan ilerleme hızı ile burgu talaş oluşumunun gözlenmesi ile beraber talaş boyu da oldukça kısalmıştır. Tüm ilerleme hızlarında kabul edilebilir formlarda talaş oluşumu gerçekleşmiştir ve talaş renkleri benzerdir. Genel olarak kaplamalı DNMG kesici uç ile tornalama işleminde ilerleme hızının artmasıyla talaş formu daha karmaşık ve talaş boyu daha kısa hale gelmiştir.

Şekil 4.5'de kaplamalı DNMG kesici uç ile elde edilen talaş formları incelendiğinde 0,2 mm ve 0,4 mm kesme derinliklerinde karışık boyutlu burgu ve helisel talaş formları, 0,6 mm kesme derinliklerinde oldukça uzun helisel talaş formları gözlemlenmiştir. Talaş boyutları açısından bakıldığında 0,2 mm ve 0,4 mm kesme derinliklerinde 2-12 cm arasında değişen, 0,6 mm kesme derinliğinde 8-25 cm arasında değişen uzunluklarda talaşlar elde edilmiştir. Artan kesme derinliği talaş formunu helisel ve daha uzun boyutlara sokmuştur. 0,2 mm ve 0,4 mm kesme derinliklerinde burgu talaş oluşumu istenmeyen talaş formu kapsamına girerken, 0,6 mm kesme derinliğinde oluşan helisel talaş formu kabul edilebilir kapsama girmektedir. Tüm kesme derinliklerinde talaş rengi benzerdir. Genel olarak kaplamalı DNMG kesici uç ile tornalama işleminde kesme derinliğinin 0,2'ten 0,4'e yükselmesi ile talaş form ve boyutu değişmemişken, 0,6 mm'ye çıkıldığında form değişmiş ve talaş boyu uzamıştır.

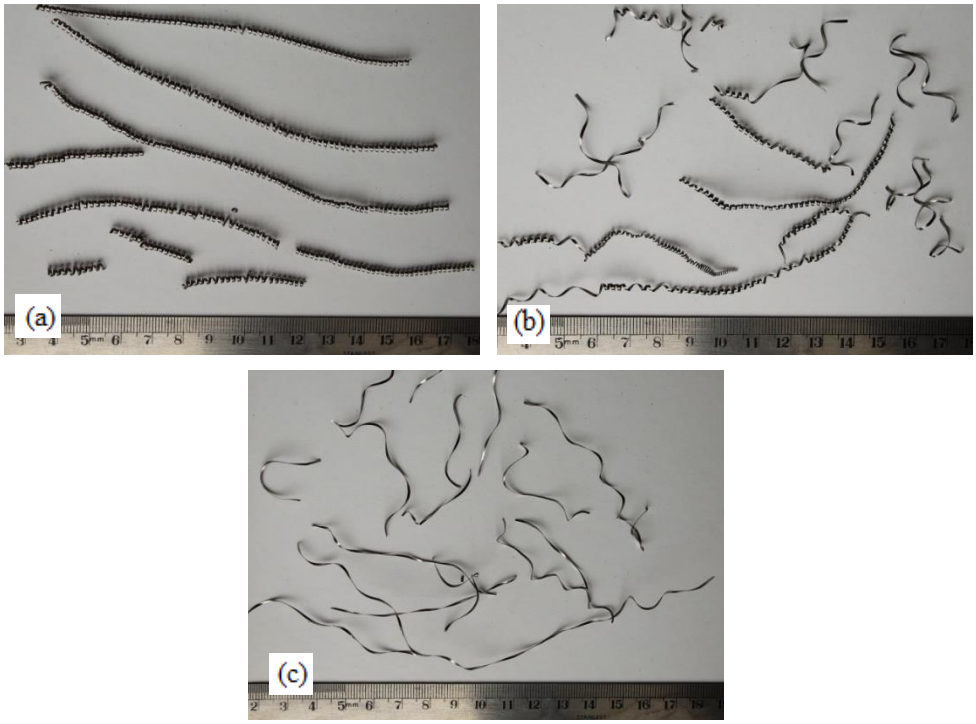
0,4 mm kesme derinliği, 0,25 mm/dev ilerleme hızında ve 30, 40 ve 50 m/dak kesme hızlarında kaplamasız CBN kesici uç kullanarak tornalama sonrası elde edilen talaş formları sırasıyla Şekil 4.6 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir. 40 m/dak kesme hızı, 0,4 mm kesme derinliğinde ve 0,15, 0,25 ve 0,35 mm/dev ilerleme hızlarında kaplamasız CBN kesici uç kullanarak tornalama sonrası elde edilen talaş formları sırasıyla Şekil 4.7 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir. 40 m/dak kesme hızı ve 0,25 mm/dev ilerleme hızında, 0,2, 0,4 ve 0,6 mm kesme derinliklerinde kaplamasız CBN kesici uç kullanarak tornalama sonrası elde edilen talaş formları sırasıyla Şekil 4.8 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir.




**Şekil 4.6:** (a) 30, (b) 40 ve (c) 50 m/dak kesme hızları ile CBN kesici uç kullanılarak uygulanan tornalama işlemi sonrası talaş formları.




**Şekil 4.7:** (a) 0,15 (b) 0,25 ve (c) 0,35 mm/dev ilerleme hızları ile CBN kesici uç kullanarak tornalama sonrası talaş formları




**Şekil 4.8:** (a) 0,2 (b) 0,4 ve (c) 0,6 mm kesme derinlikleri ile CBN kesici uç kullanarak tornalama sonrası talaş formları

Şekil 4.6'da kaplamasız CBN kesici uç ile elde edilen talaş formları incelendiğinde 30 m/dak kesme hızında, uzun burgu ve helisel talaş formları, 40 m/dak kesme hızında helisel ve spiral şeklinde talaş formları ve 50 m/dak kesme hızında karışık boyutlu helisel talaş form oluşumları gözlenmiştir. Talaş boyutları açısından bakıldığında 30 m/dak kesme hızında 5-30 cm arasında değişen; 40 m/dak kesme hızında 1-8 cm arasında değişen ve 50 m/dak kesme hızında 1-18 cm arasında değişen uzunluklarda talaşlar elde edilmiştir. 30 m/dak kesme hızında burgu talaş oluşumundan dolayı istenmeyen talaş formu gözlenirken, 40 m/dak ve 50 m/dak kesme hızlarında kabul edilebilir form olan helisel talaş formu oluşmuştur. Tüm kesme hızlarında özellikle 50 m/dak kesme hızında talaş boyları oldukça karmaşıktır. Talaş rengi açışından bakıldığında benzer renk oluşumu göstermişlerdir. Genel olarak kaplamasız CBN kesici uç ile tornalama işleminde kesme hızının artması ile talaş formunun iyileştiğini söyleyebiliriz.

Şekil 4.7'de kaplamasız CBN kesici uç ile elde edilen talaş formları incelendiğinde, 0,15 mm/dev ilerleme hızında şerit ve spiral talaş formları, 0,25 mm/dev ilerleme hızında uzun spiral ve spiral boru talaş formları ve 0,35 mm/dev ilerleme hızında oldukça belirgin helisel şekilli talaş formları gözlenmiştir. Artan ilerleme hızı ile talaş formları tamamen helise dönmüştür. 0,15 mm/dev ve 0,25 mm/dev ilerleme hızlarında talaş kırılmaları düzgün olmasına rağmen düzensiz ve farklı formlarda talaşlar oluşmuştur. Talaş boyutlarına bakıldığında 0,15 mm/dev

ilerleme hızında 4-16 cm arasında değişen uzunluklarda, 0,25 mm/dev ilerleme hızında 2-12 cm arasında değişen uzunluklarda ve 0,35 mm/dev ilerleme hızında 2-6 cm arasında değişen uzunluklarda talaşlar elde edilmiştir. Artan ilerleme hızı ile beraber talaş boyu da kısalmıştır. 0,15 mm/dev ilerleme hızında istenmeyen form olan şerit talaş oluşumu gözlenmişken diğer ilerleme hızlarında kabul edilebilir formlar gözlenmiştir. Talaş renklerinde bir değişme gözlenmemiştir. Genel olarak kaplamasız CBN kesici uç ile tornalama işleminde ilerleme hızının artmasıyla şerit formdan spiral forma ve daha da artmasıyla helisel forma dönmüştür.

Şekil 4.8'de kaplamasız CBN kesici uç ile elde edilen talaş formları incelendiğinde 0,2 mm kesme derinliğinde karışık boyutlu tamamen helisel talaş formları, 0,4 mm kesme derinliğinde uzun helisel ve spiral talaş formları ve 0,6 mm kesme derinliğinde ise kısa burgu ve spiral talaş formları gözlenmiştir. Talaş boyutları açısından bakıldığında 0,2 mm kesme derinliğinde 2-15 cm arasında değişen, 0,4 mm kesme derinliğinde 5-16 cm arasında değişen ve 0,6 mm kesme derinliğinde 4-20 cm arasında değişen uzunluklarda talaşlar elde edilmiştir. 0,2 mm ve 0,4 mm kesme derinliklerinde talaş kırılmaları düzgün olmasına rağmen düzensiz ve farklı formlarda talaşlar oluşumu gözlenmiştir. 0,4 mm kesme derinliğinde boyutsal heterojenlik daha belirgindir. Artan kesme derinliği talaş formunu kısa burgu ve spiral şekle sokmuştur. 0,6 mm kesme derinliğinde oluşan burgu talaş oluşumu istenmeyen talaş formu kapsamına girerken, azalan kesme derinliklerinde helisel ve spiral talaş formları kabul edilebilir kapsama girmektedir. Tüm kesme derinliklerinde talaş rengi benzerdir. Genel olarak kaplamasız CBN kesici uç ile tornalama işleminde kesme derinliğinin artmasıyla talaş formu ve boyutu kayda değer şekilde değişiklik göstermiştir.

## 4.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

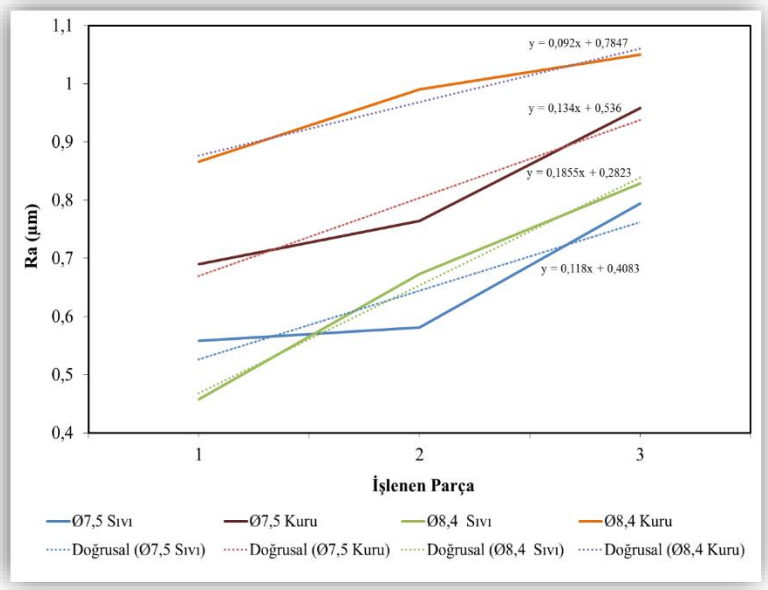
Talaşlı imalatın en önemli amaçlarından biri de, işlenmiş yüzeylerin kalitesinin iyi olmasıdır. İşlenen parça yüzeyinin pürüzlülük değerleri ürün kullanım yerine göre farklılık gösterebilir. Yüzey pürüzlülüğü, işlenen parçanın ve kesici ucun özelliği, kesme parametreleri, soğutucu ortam cinsi ve işleme tezgâhı gibi birçok faktöre bağlıdır. Yüzey pürüzlülük değerini etkileyen faktörler birbirinden bağımsız olabilecekleri gibi birbirleri ile ilişki içinde de olabilirler (Tekaslan,2016). Tez çalışmasının bu bölümünde, elde edilen tüm yüzey pürüzlülük değerleri Ti6Al4V alaşımı parçaların delme, frezeleme ve tornalama işlemlerinin kesme parametreleri, kesici türleri ve soğutucu ortam gibi değişkenleri göz önüne alınarak ölçülmüştür.

### 4.2.1. Delme İşlemi Sonrası Elde Edilen Yüzey Pürüzlülük Değerleri

Tablo 4.1'de kuru ve kesme sıvısı kullanılarak Ø7,5 mm ve Ø8,4 mm çapında elmas karbür matkap uçları kullanılarak işlenen Ti6Al4V alaşımı parçalarının delik yüzeylerinin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri verilmektedir. Her bir parametre için üç parçaya üçer delik açılmıştır. Açılan her bir deliğin yüzeyinden farklı noktalardan altı adet ölçüm yapılarak ortalamaları alınmıştır. Böylece kademe kademe açılan delik yüzeyleri incelenerek yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Değişen kesme koşullarına ve matkap çapına göre delinen yüzeylerdeki pürüzlülük değerlerinin değişimini daha net anlamak için grafik gösterimi Şekil 4.9'da verilmiştir.

**Tablo 4.1:** Delme işlemi sonrası ortalama Ra değerleri

| Matkap çapı, mm | İşleme ortamı | İşlenen parça | Ortalama Ra, µm |
|---|---|---|---|
| 7,5 | Kuru | 1.parça | 0,69 |
| | | 2.parça | 0,764 |
| | | 3.parça | 0,958 |
| | Sıvı | 1.parça | 0,558 |
| | | 2.parça | 0,581 |
| | | 3.parça | 0,794 |
| 8,4 | Kuru | 1.parça | 0,866 |
| | | 2.parça | 0,99 |
| | | 3.parça | 1,05 |
| | Sıvı | 1.parça | 0,458 |
| | | 2.parça | 0,673 |
| | | 3.parça | 0,829 |




**Şekil 4.9:** Ø7,5 ve Ø8,4 mm matkap ucu ile kuru ve sıvı ortamda işlenen parça sayısına göre Ra değişimleri

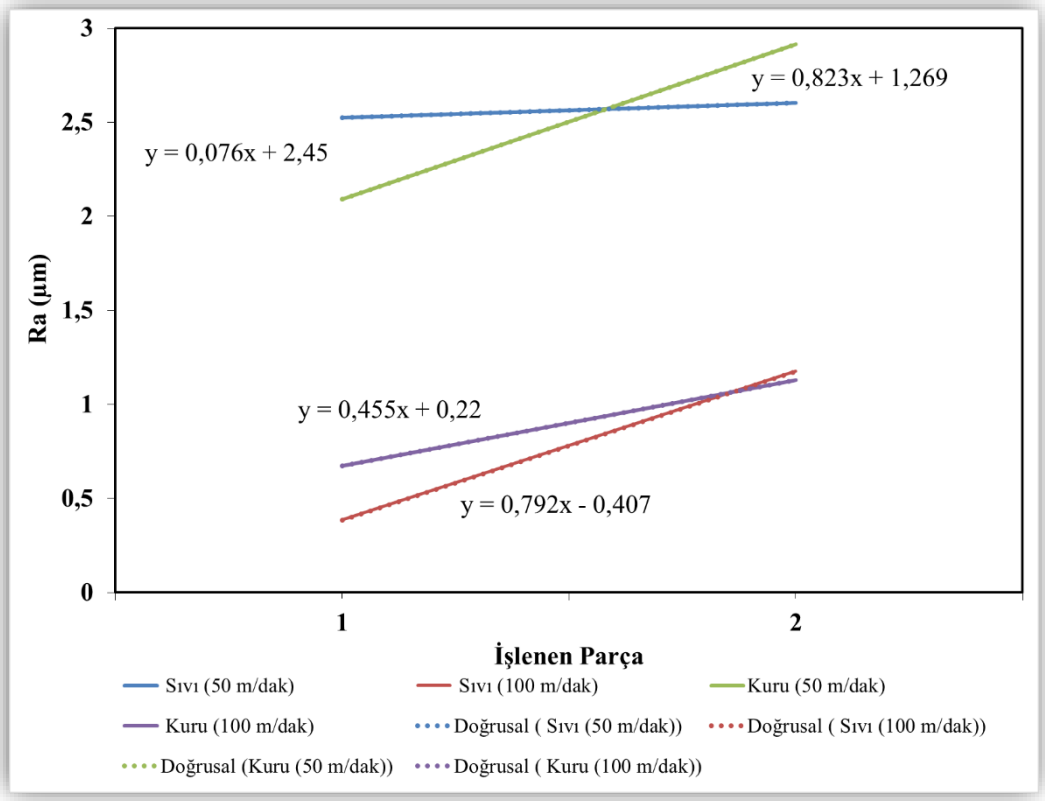
Tablo 4.1 ve Şekil 4.9 değerlendirildiğinde kuru ve kesme sıvısı ile işlemede delinen parça sayısının artması ile ortalama yüzey pürüzlülük değerinin arttığı görülmektedir. Ø7,5 mm ve Ø8,4 mm çapında elmas karbür matkap uçları kullanılarak kesme sıvısı ile işlenen Ti6Al4V alaşımı parçalarının yüzey pürüzlülük değerleri kuru işlemeye göre daha düşük, yüzey kalitesi daha iyidir. Matkap çapı 7,5 mm'den 8,4 mm'ye çıktığında hem kuru işleme hem de kesme sıvısı ile işleme kıyaslandığında, delinen parçaların yüzey pürüzlülük değerleri artmıştır. En yüksek ortalama yüzey pürüzlülük değeri Ø8,4 mm çapında elmas karbür matkap uç kullanılarak kuru kesme ortamında, en düşük Ra değeri Ø7,5 mm çapında elmas karbür matkap uç kullanılarak kesme sıvısı ortamında tespit edilmiştir. Ti6Al4V alaşımı talaşlı işlem sırasında ortaya çıkan yüksek sıcaklık ve basınç değerlerinde mukavemetini korurken, kesici uç koruyamamaktadır (Küçükköse, 2017). Bu çalışmada da artan matkap çapı ve kuru ortam, delinen yüzeye uygulanan sıcaklık ve basıncı arttırarak yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir. Kuru ortamda delinen delikten talaşların çıkmasını zorlaştırmakta, kesme alanını olumsuz etkilemektedir ve bu durum artan matkap çapı ile daha da artmaktadır. Sonuç olarak düşük çap ve kesme sıvısı kullanımında daha iyi yüzey kalitesi elde edilmektedir.

### 4.2.2. Frezeleme İşlemi Sonrası Elde Edilen Yüzey Pürüzlülük Değerleri

Tablo 4.2'de kuru ve soğutma sıvısı kullanılarak 50 m/dak ve 100 m/dak kesme hızı ile frezeleme işlemi sonrası Ti6Al4V alaşımı parçalarının yüzeylerinin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri verilmektedir. Her bir parametre için iki parça üç yüzeyinden freze ile işlenmiştir. Freze ile işlenen her bir yüzeyden farklı noktalardan altı ölçüm yapılarak ortalamaları alınmıştır. Böylece kademe kademe freze ile işlenen yüzeylerin yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Değişen kesme koşullarına ve kesme hızına göre işlenen yüzeylerdeki pürüzlülük değerlerinin değişimini daha net anlamak için grafik gösterimi Şekil 4.10'da verilmiştir.

**Tablo 4.2:** Frezeleme işlemi sonrası ortalama Ra değerleri

| Kesme Hızı, m/dak | İşleme Ortamı | İşlenen parça | Ortalama Ra, µm |
|---|---|---|---|
| 50 | Kuru | 1.parça | 2,092 |
| | | 2.parça | 2,915 |
| | Sıvı | 1.parça | 2,526 |
| | | 2.parça | 2,602 |
| 100 | Kuru | 1.parça | 0,675 |
| | | 2.parça | 1,133 |
| | Sıvı | 1.parça | 0,385 |
| | | 2.parça | 1,177 |

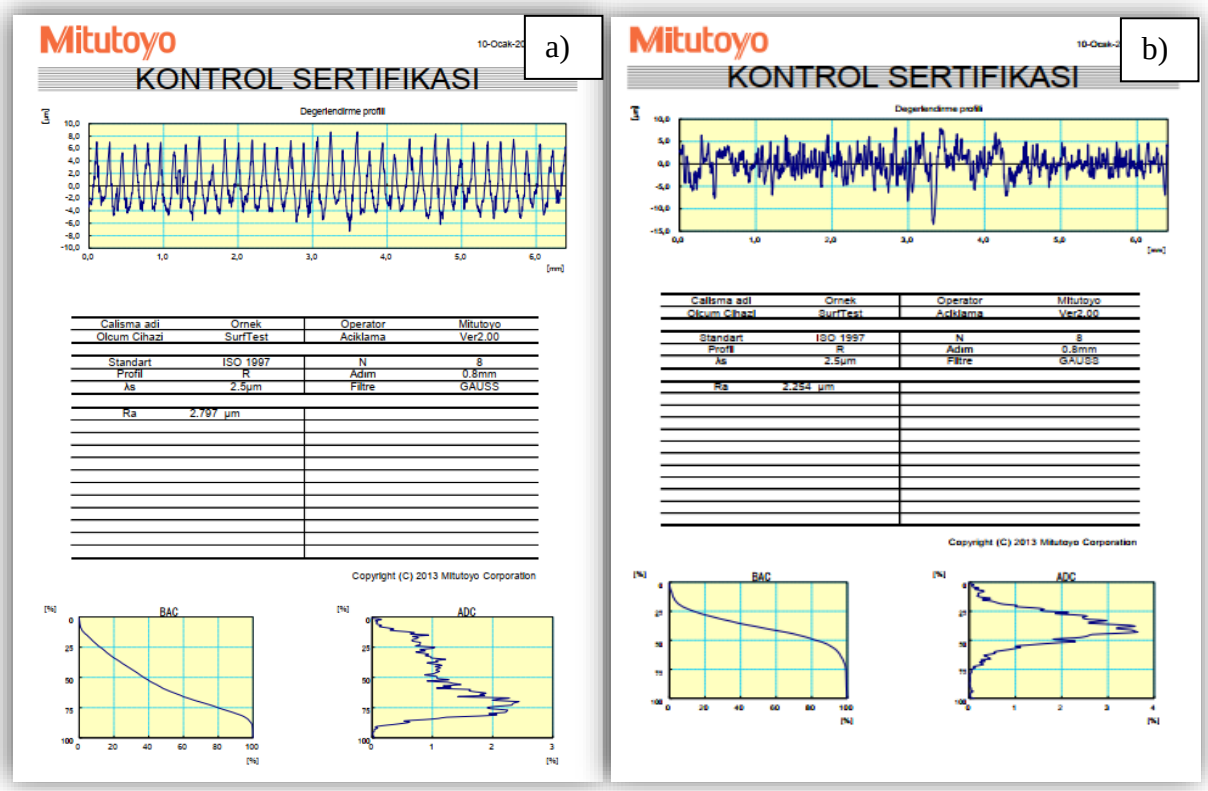



**Şekil 4.10:** 50 ve 100 m/dak kesme hızı ile kuru ve sıvı ortamda freze ile işlenen parça sayısına göre ortalama yüzey pürüzlülüğü değişimleri

Tablo 4.2 ve Şekil 4.10 değerlendirildiğinde kuru ve kesme sıvısı ile işlemede işlenen parça sayısının artması ile yüzey pürüzlülük değerinin arttığı, ancak 50 m/dak kesme hızında kesme sıvısı ile işlemede kayda değer bir değişim olmadığı görülmüştür. Kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 50 m/dak kesme hızı ile frezeleme işlemi sonrası Ti6Al4V alaşımı parçaların yüzey pürüzlülük değerleri 100 m/dak kesme hızı ile frezelemeden daha yüksektir. Her iki kesme hızında da kesme sıvısı ile işlemede yüzey pürüzlülük değerleri daha düşüktür. Kumar ve Thirumuruga (2012) yaptıkları çalışmada, soğutma sıvısı ile Ti6Al4V alaşımının frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünün kesme hızı arttıkça azaldığını belirtmişlerdir. Soğutma sıvısı ile kesme yüzeyinde oluşan ısının dağılması ile işlenen malzeme yüzeyinin sertlik değerinin değişmemesi sağlanarak talaş yapışmalarının önüne geçilmiş ve yüzey kalitesi arttırıldığını rapor etmişlerdir. Sonuç olarak frezeleme işleminde kesme hızının artmasıyla, yüzey pürüzlülük değeri azalmış ve kesme ortamının kurudan sıvıya geçmesi ile de yüzey özelliği iyileşmiştir.

### 4.2.3. Tornalama İşlemi Sonrası Elde Edilen Yüzey Pürüzlülük Değerleri

Talaşlı işlemlerde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülük üzerine etkileri çok büyüktür (Venugopal ve diğ. 2007). Kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği başta olmak üzere uygun kesme koşullarının seçimi, ürünün istenen boyutsal hassasiyet ve yüzey kalitesinde ürün elde edilmesi, kesici takım ömrü ve çalışma hızı açısından oldukça önemlidir. Tornalama işleminde farklı değerlerde kullanılan kesme hızı, ilerleme oranı ve kesme derinliğinin yüzey pürüzlüğüne etkisi, kaplamalı ve kaplamasız kesici uçlara göre ele alınıp değerlendirilmiştir. Tornalama ile işlenmiş Ti6Al4V alaşımının yüzeylerinden alınan yüzey pürüzlülük ölçümlerinde cihazdan elde ettiğimiz sonuçların ekran görüntüsü alınmıştır. 40 m/dak kesme hızında DNMG ve CBN ile tornalanan parçaların yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçlarına ait ekran görüntüleri Şekil 4.11'de verilmiştir.




**Şekil 4.11:** a) DNMG b) CBN ile tornalama işlemi yapılmış parçaların yüzey pürüzlülüğü sonuçlarının ekran görüntüleri

Tablo 4.3'de 0,4 mm kesme derinliği ve 0,25 mm/dev ilerleme hızında, 30, 40 ve 50 m/dak kesme hızlarında kaplamalı DNMG kesici uç kullanarak tornalama işlemi sonrası Ti6Al4V alaşımının yüzeylerinin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri verilmektedir. Tablo 4.4'de aynı kesme koşulları altında kaplamasız CBN kesici uç kullanarak tornalama işlemi sonrası Ti6Al4V

alaşım yüzeylerinin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri verilmektedir. Her bir parametreye ait yüzey pürüzlülük ölçümleri altı kez yapılmış ve ortalaması alınmıştır. Değişen kesme parametrelerinin, işlenen yüzeydeki pürüzlülük değerlerine etkisini daha net anlamak için birbiriyle kıyaslaması yapılmış ve Tablo 4.5'te verilmiştir. Tabloda kesme parametrelerindeki değişime göre Ra değerlerindeki artış ve azalmalarda % olarak verilmektedir.

**Tablo 4.3:** DNMG kesici uç ile tornalama işlemi sonrası ortalama Ra değerleri

| No | Kesme Hızı, m/dak | Kesme Derinliği, mm | İlerleme Hızı, mm/dev | Ortalama Ra, µm |
|---|---|---|---|---|
| 1 | | | 0,15 | 0,641 |
| 2 | | 0,2 | 0,25 | 1,517 |
| 3 | | | 0,35 | 2,617 |
| 4 | | | 0,15 | 0,625 |
| 5 | 30 | 0,4 | 0,25 | 1,517 |
| 6 | | | 0,35 | 2,755 |
| 7 | | | 0,15 | 0,673 |
| 8 | | 0,6 | 0,25 | 1,482 |
| 9 | | | 0,35 | 2,755 |
| 10 | | | 0,15 | 0,921 |
| 11 | | 0,2 | 0,25 | 1,453 |
| 12 | | | 0,35 | 2,719 |
| 13 | | | 0,15 | 0,911 |
| 14 | 40 | 0,4 | 0,25 | 1,479 |
| 15 | | | 0,35 | 2,772 |
| 16 | | | 0,15 | 0,797 |
| 17 | | 0,6 | 0,25 | 1,437 |
| 18 | | | 0,35 | 2,776 |
| 19 | | | 0,15 | 0,508 |
| 20 | | 0,2 | 0,25 | 1,398 |
| 21 | | | 0,35 | 1,680 |
| 22 | | | 0,15 | 0,610 |
| 23 | 50 | 0,4 | 0,25 | 1,419 |
| 24 | | | 0,35 | 1,747 |
| 25 | | | 0,15 | 0,721 |
| 26 | | 0,6 | 0,25 | 1,496 |
| 27 | | | 0,35 | 1,465 |

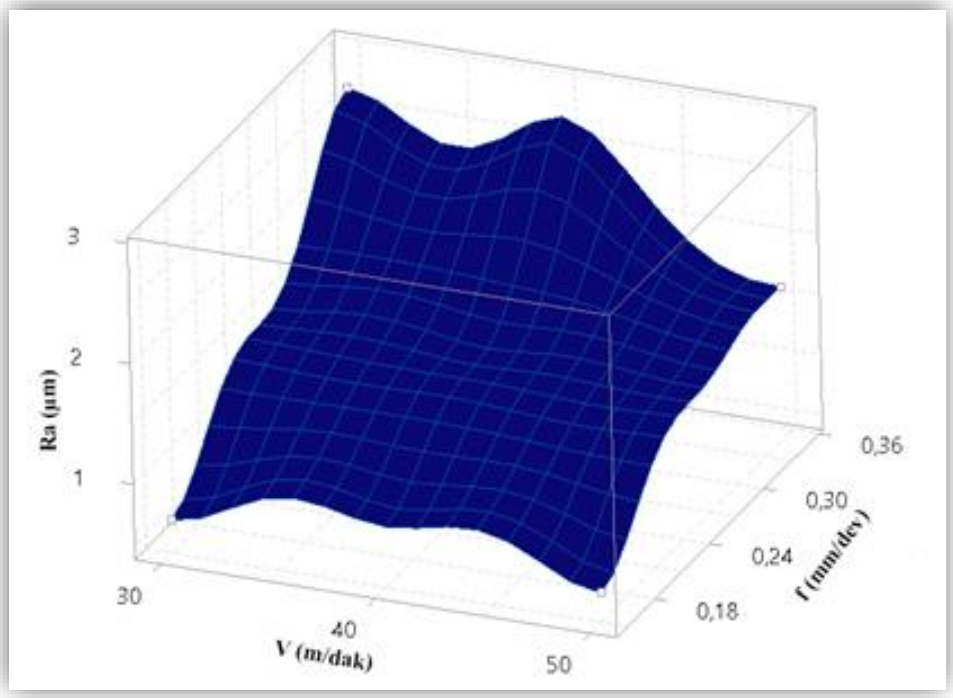
**Tablo 4.4:** CBN kesici uç ile tornalama işlemi sonrası ortalama Ra değerleri

| No | Kesme Hızı, m/dak | Kesme Derinliği, mm | İlerleme Hızı, mm/dev | Ortalama Ra, µm |
|---|---|---|---|---|
| 1 | | | 0,15 | 0,541 |
| 2 | | 0,2 | 0,25 | 1,210 |
| 3 | | | 0,35 | 2,010 |
| 4 | | | 0,15 | 0,720 |
| 5 | 30 | 0,4 | 0,25 | 1,498 |
| 6 | | | 0,35 | 2,674 |
| 7 | | | 0,15 | 0,555 |
| 8 | | 0,6 | 0,25 | 1,300 |
| 9 | | | 0,35 | 2,699 |
| 10 | | | 0,15 | 0,782 |
| 11 | | 0,2 | 0,25 | 1,336 |
| 12 | | | 0,35 | 2,254 |
| 13 | | | 0,15 | 1,018 |
| 14 | 40 | 0,4 | 0,25 | 1,715 |
| 15 | | | 0,35 | 2,638 |
| 16 | | | 0,15 | 0,688 |
| 17 | | 0,6 | 0,25 | 2,003 |
| 18 | | | 0,35 | 2,105 |
| 19 | | | 0,15 | 0,333 |
| 20 | | 0,2 | 0,25 | 1,002 |
| 21 | | | 0,35 | 0,958 |
| 22 | | | 0,15 | 0,690 |
| 23 | 50 | 0,4 | 0,25 | 1,318 |
| 24 | | | 0,35 | 1,572 |
| 25 | | | 0,15 | 0,778 |
| 26 | | 0,6 | 0,25 | 0,999 |
| 27 | | | 0,35 | 1,309 |

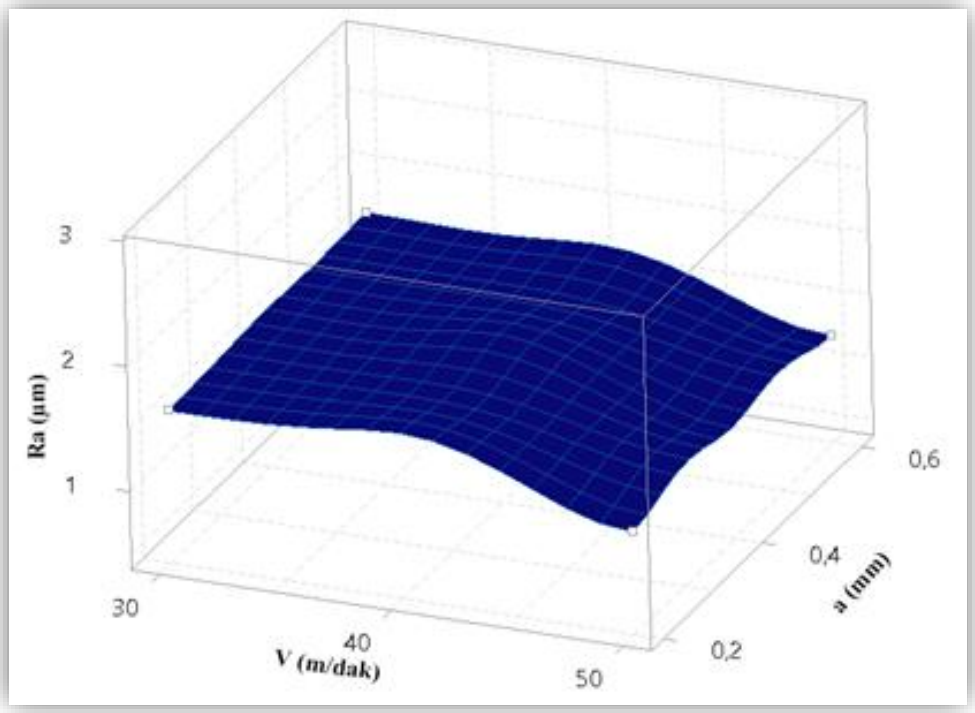
**Tablo 4.5:** Kesme parametreleri ve kesici uçlara göre ortalama Ra değerleri ve Ra değerlerindeki % değişim oranları

| Kesme parametreleri | | Ortalama Ra ve % değişim oranları | |
|---|---|---|---|
| | | **DNMG** | **CBN** |
| **Kesme Hızı** | 30 m/dak | 1,62 µm | 1,46 µm |
| | 40 m/dak | 1,69 µm | 1,61 µm |
| | 50 m/dak | 1,22 µm | 0,99 µm |
| | 30 m/dak'dan 40 m/dak'ya | % 4,68 artış | % 10,08 artış |
| | 40 m/dak'dan 50 m/dak'ya | % 27,65 azalma | % 38,37 azalma |
| | 30 m/dak'dan 50 m/dak'ya | % 24,26 azalma | % 32,16 azalma |
| **İlerleme Hızı** | 0,15 mm/dev | 0,71 µm | 0,67 µm |
| | 0,25 mm/dev | 1,46 µm | 1,37 µm |
| | 0,35 mm/dev | 2,36 µm | 2,02 µm |
| | 0,15 mm/dev'den 0,25 mm/dev'e | % 105,99 artış | % 102,80 artış |
| | 0,25 mm/dev'den 0,35 mm/dev'e | % 61,28 artış | % 47,14 artış |
| | 0,15 mm/dev'den 0,35 mm/dev'e | % 232,23 artış | % 198,42 artış |
| **Kesme Derinliği** | 0,15 mm | 1,49 µm | 1,15 µm |
| | 0,25 mm | 1,53 µm | 1,53 µm |
| | 0,35 mm | 1,51 µm | 1,38 µm |
| | 0,2 mm'den 0,4 mm'ye | % 2,83 artış | % 32,77 artış |
| | 0,4 mm'den 0,6 mm'ye | % 1,68 azalma | %10,16 azalma |
| | 0,2 mm'den 0,6 mm'ye | % 1,10 artış | % 19,28 artış |

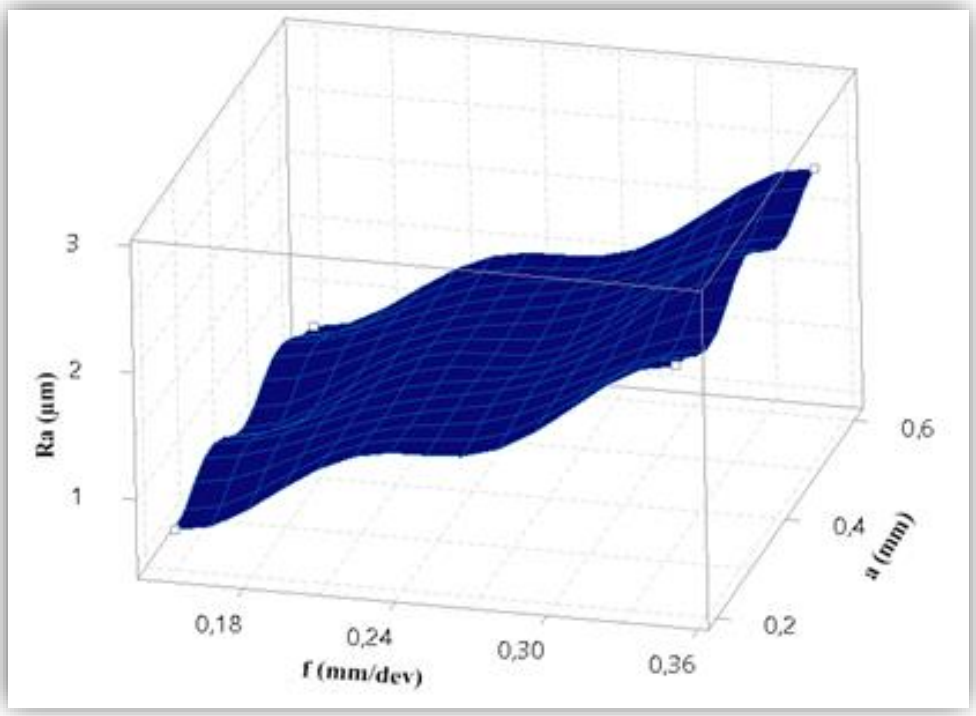
DNMG ve CBN kesici uçlarla torna ile işlenmiş yüzeylerin pürüzlülük değerleri üzerine kesme parametrelerin etkileri, Box-Behnken istatiksel deney tasarım yöntemi ve Minitab yazılımı kullanılarak grafiksel olarakta çizilerek değerlendirilmiştir. Şekil 4.12-4.14'de DNMG kesici uç ile işlenmiş parçaların yüzey pürüzlülüğüne sırasıyla, kesme hızı-ilerleme hızının, kesme hızı-kesme derinliğinin ve ilerleme hızı-kesme derinliğinin etkilerinin grafiksel görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.15-4.17'de CBN kesici uç ile işlenmiş parçaların yüzey pürüzlülüğüne sırasıyla kesme hızı-ilerleme hızının, kesme hızı-kesme derinliğinin ve ilerleme hızı-kesme derinliğinin etkilerinin grafiksel görüntüleri verilmiştir. DNMG ve CBN kesici uçlar ile işlenmiş parçaların yüzey pürüzlülüğüne kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliğinin etkilerini daha net değerlendirmek adına Şekil 4.18'de tüm veriler grafik gösterimi ile verilmiştir.



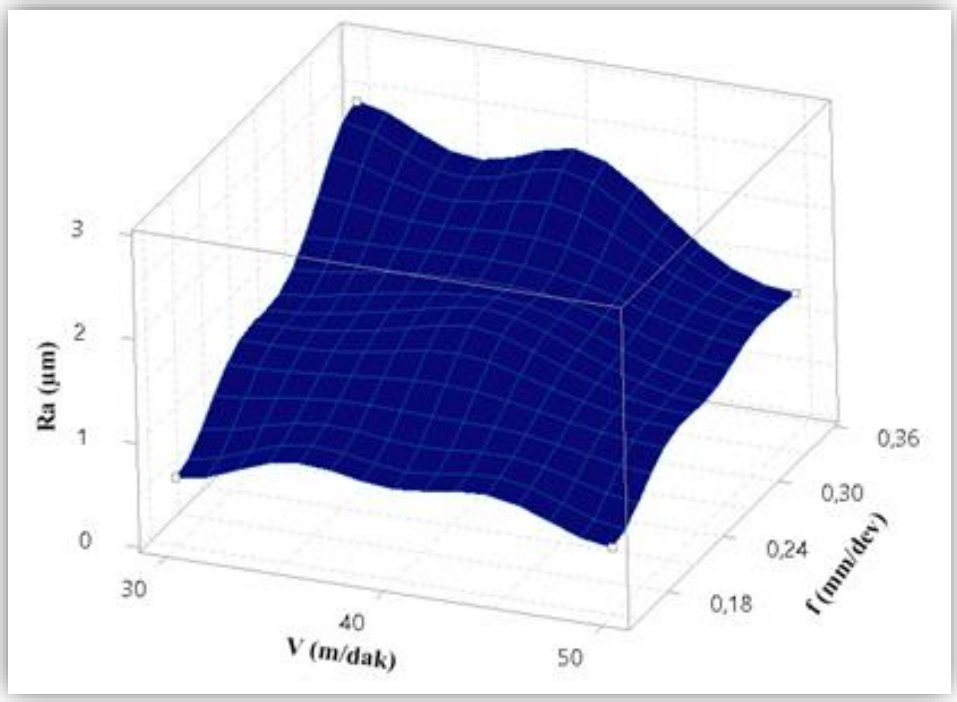

**Şekil 4.12:** DNMG kesici uç ile tornalanmış yüzeylerin Ra değerleri üzerine kesme hızı ve ilerleme hızının etkileri.



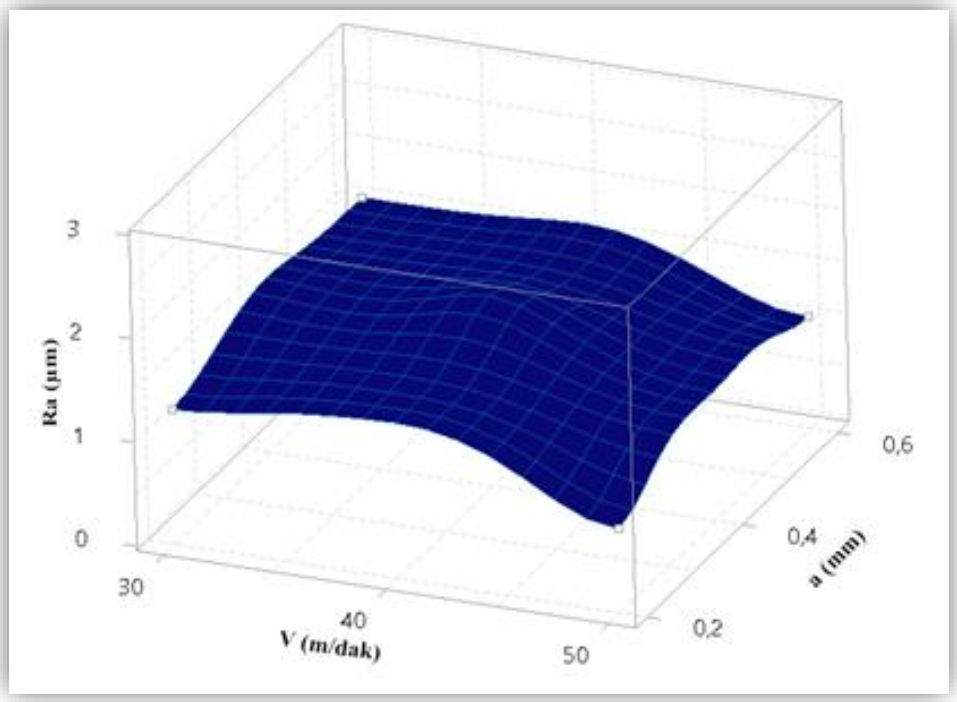

**Şekil 4.13:** DNMG kesici uç ile tornalanmış yüzeylerin Ra değerleri üzerine kesme hızı ve kesme derinliğinin etkileri.



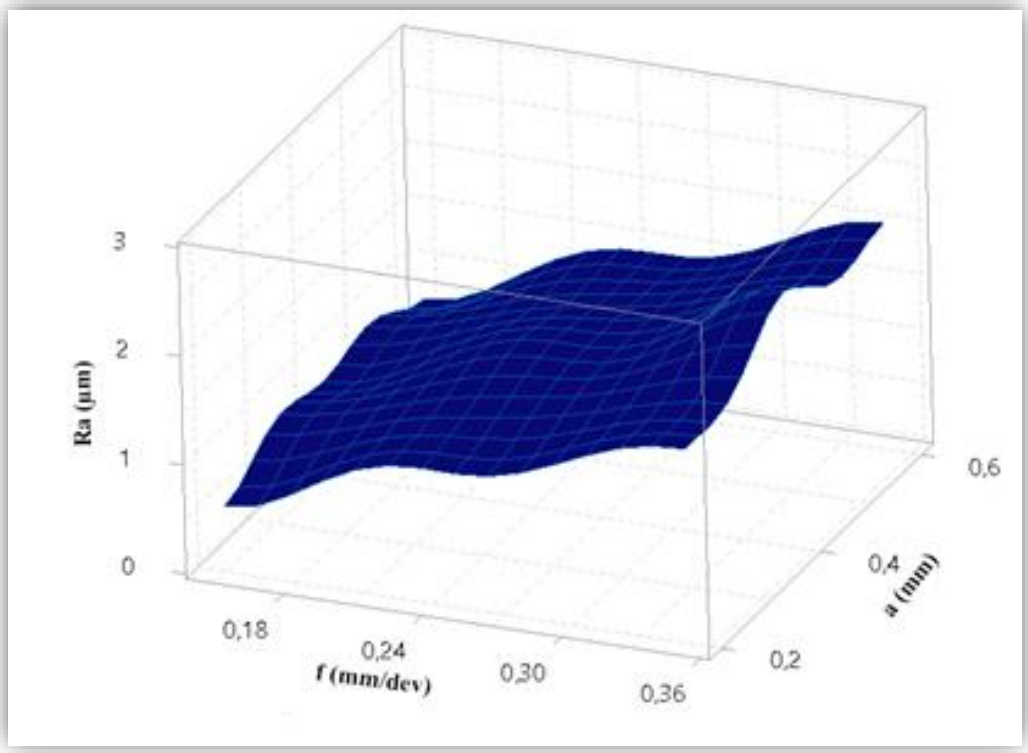

**Şekil 4.14:** DNMG kesici uç ile tornalanmış yüzeylerin Ra değerleri üzerine ilerleme hızı ve kesme derinliğinin etkileri.



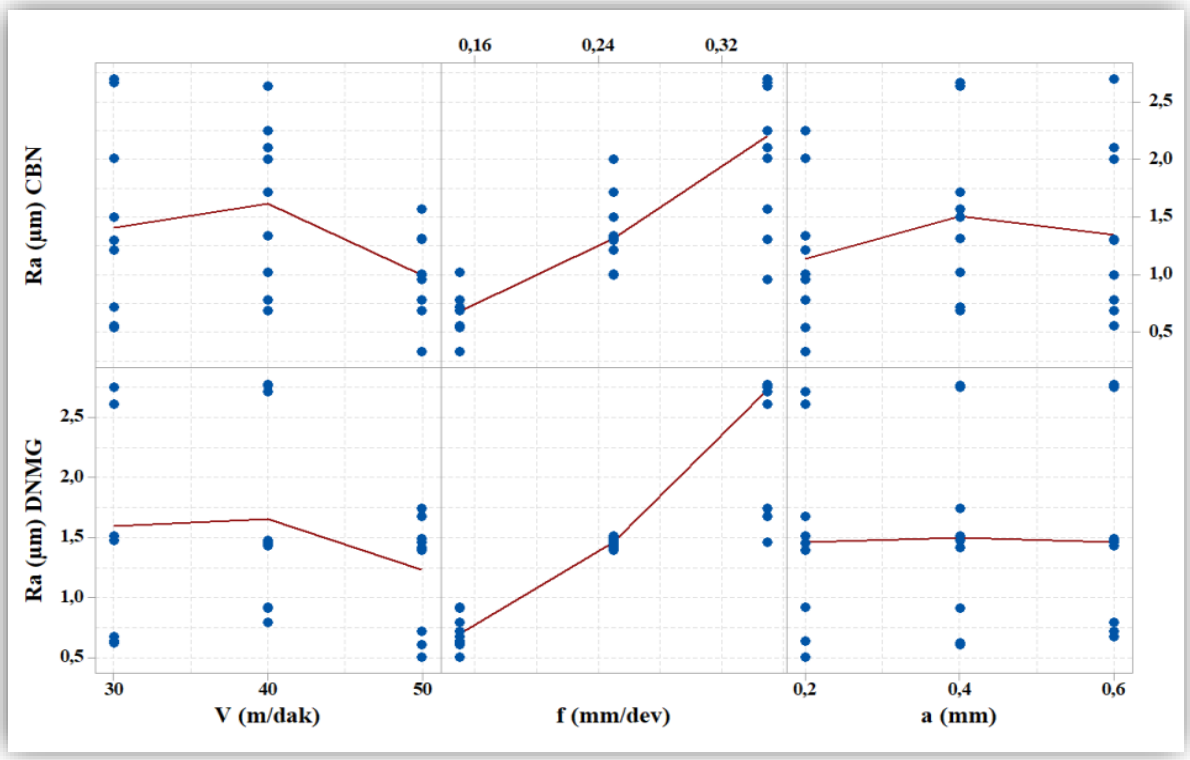

**Şekil 4.15:** CBN kesici uç ile tornalanmış yüzeylerin Ra değerleri üzerine kesme hızı ve ilerleme hızının etkileri.




**Şekil 4.16:** CBN kesici uç ile tornalanmış yüzeylerin Ra değerleri üzerine kesme hızı ve kesme derinliğinin etkileri.




**Şekil 4.17:** CBN kesici uç ile tornalanmış yüzeylerin Ra değerleri üzerine ilerleme hızı ve kesme derinliğinin etkileri.




**Şekil 4.18:** DNMG ve CBN ile tornalanmış yüzeylerin Ra değerlerine kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliğinin etkileri.

Tablo 4.3-4.5 ve Şekil 4.12-4.18 incelendiğinde, CBN ve DNMG kesici uçlar ile tornalama işlemi sonrası kesme hızının 30 m/dak'dan 40 m/dak'ya çıkarılması ile ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinde önemli bir değişiklik olmamıştır. Ancak 50 m/dak'ya çıkarıldığında, CBN kesici uç ile tornalamada % 32,16 azalma, DNMG kesici uç ile tornalamada %24,26 azalma tespit edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalara göre kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülük değerinde düşüş yaşanmasa artan sıcaklığa bağlı olarak deformasyonun ve talaş akışının kolaylaşmasından kaynaklanmaktadır. Bu durumu bazı araştırmacılar ortalama yüzey pürüzlülük değerinde artışa düşük kesme hızında işlenen malzemenin kesici uca yapışarak yığıntı talaş oluşumuna sebep vermesiyle açıklamışlardır (Gürbüz ve diğ, 2009).

Tüm şartlarda CBN ve DNMG kesici uçlar ile tornalama işlemi sonrası ilerleme hızının artması ile ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinde önemli artış meydana gelmiştir. DNMG kesici uç ile tornalama işleminde ilerleme hızı 0,15 mm/dev'den 0,25 mm/dev'e çıktığında, Ra değeri %102,80, ilerleme hızı 0,15 mm/dev'den 0,35 mm/dev'e çıktığında, Ra değeri %198,42 artmıştır. CBN kesici uç ile tornalama işleminde ilerleme hızı 0,15 mm/dev'den 0,25 mm/dev'e çıktığında, Ra değeri %105,99, ilerleme hızı 0,15 mm/dev'den 0,35 mm/dev'e çıktığında, Ra değeri %232,23 artmıştır. Yüzey pürüzlülük değerinin kesici ucun şekline ve ikincil hız olarak

ifade edilen ilerleme hızına bağlı olduğu birçok çalışmada ele alınmıştır (Sert, 2017; Ramesh ve diğ., 2008; Zhang ve diğ., 2022; Rotella ve diğ., 2014). Tornalama işlemi sırasında artan ilerleme hızı ile kesici uçta oluşan sıcaklık ve basınç değerleri artmaktadır. Ti6Al4V alaşımı işlenmesinde değişen şartlara rağmen mukavemet değerini korurken kesici uç koruyamamakta ve sıcaklığında etkisiyle uca yapışan talaşlar işlenen yüzeyin kalitesini bozmaktadır.

CBN kesici uç ile tornalama işleminde kesme derinliğinin artmasıyla ortalama yüzey pürüzlülük değerinin arttığı tespit edilmiştir. Kesme derinliğinin 0,2 mm'den 0,4 mm'ye çıkmasıyla, Ra değeri %32,77 artış, kesme derinliği 0,2 mm'den 0,6 mm'ye çıkmasıyla, Ra değeri % 19,28 artış göstermektedir. DNMG kesici uç ile tornalama işleminde, kesme derinliğinin yüzey pürüzlülüğü üzerine kayda değer bir değişim göstermediği belirlenmiştir. Kesme derinliğinin 0,2 mm'den 0,4 mm'ye çıkmasıyla, Ra değeri %2,83 artış, kesme derinliğinin 0,2 mm'den 0,6 mm'ye çıkmasıyla, Ra değeri % 1,1 artış göstermektedir.

Sonuç olarak her iki kesici uçta ilerleme hızının yüzey pürüzlülük değeri üzerine en etkili parametre olduğu görülmektedir. Artan ilerleme hızı ile ortalama yüzey pürüzlülüğü artarken, artan kesme hızı ile azalmış, artan kesme derinliğiyle ise fazla değişmemiştir. Kesme parametrelerinin birinin değişmesi ile ortalama yüzey pürüzlülüğü de değişmektedir. Yüzey kalitesinin değişmesine sebep olan faktörlerin etkileri birbirinden farklı olabileceği gibi aynı da olabilir. Kaplamasız CBN kesici uç ile işlemede, DNMG kesici uca göre daha düşük Ra değerleri elde edilmiştir. En iyi yüzey kalitesi CBN uçla kesme hızının 50 m/dak, ilerleme hızının 0,15 mm/dev ve kesme derinliğinin 0,2 mm olduğu kesme koşullarında elde edilmiştir.

## 4.3. SEM ANALİZLERİ

Talaşlı imalat işlemlerinde genellikle, maliyet açısından takım ömrü ve üretilen malzemenin kalitesi açısından işlenen yüzey kalitesi ölçüt olarak kabul edilir. Bu bölümde, bu ölçütler üzerinde etkili olan temel değişkenler talaşlı imalat yöntemi, kesici takım türü, kesme parametreleri ve soğutma ortamı göz önüne alınarak kesici uçların ve işlenen yüzeylerin SEM analizleri yapılmıştır.

### 4.3.1. Kesici Uçların SEM Görüntüleri

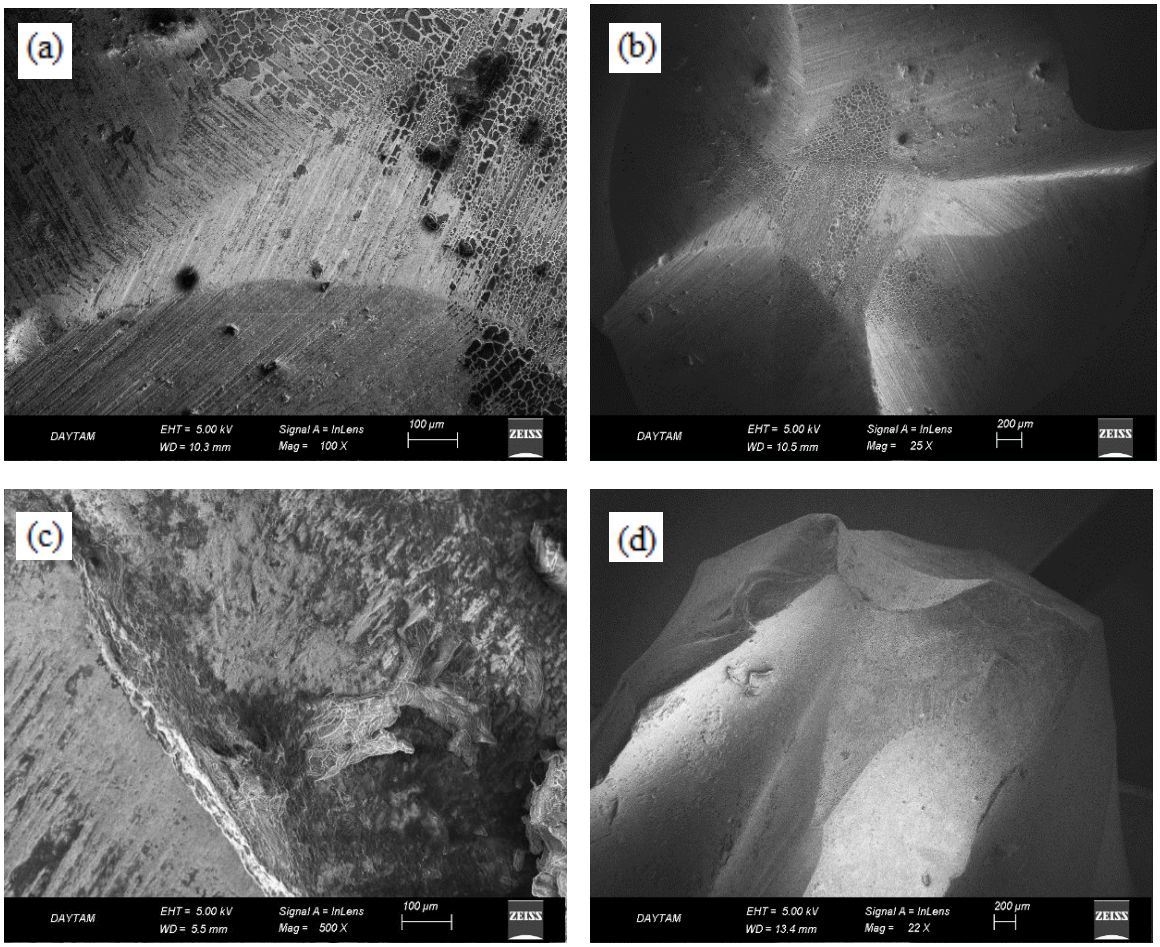
Talaşlı imalat esnasında kesici takım malzemesi yüksek ısıya, gerilmeye ve sürtünmeye maruz kalır. Yaşanan bu süreç sonucu kesici uç, iş parçası, kesme ortamı ve talaşlı imalat parametreleri arasındaki etkileşimin sonucudur. Talaşlı imalat sonrasında işlenen parçanın yüzey kalitesi,

ölçüm hassasiyeti ve işlemin verimliliği kesici takımların aşınmasından doğrudan etkilenmektedir (Lindvall ve diğ., 2021; Sert, 2015). Bu yüzden kesici uçlarda oluşan aşınma mekanizmalarının tanımlanması çok önemlidir. Bu çalışmada Ti6Al4V alaşımı parçaların delinmesinde, frezelenmesinde ve tornalanmasında kullanılan kesici uçların aşınma mekanizmaları uç tipine, kesme parametrelerine ve soğutma ortamına bağlı olarak değerlendirilmiştir. Kullanılan kesici uçlarda oluşan aşınmaların görüntü analizleri SEM ile yapılmıştır.

Aşınmış matkap ucu ile oluşturulan delikler parçanın kalitesini aşağı çeker ve ortaya çıkan ürünün kullanıcı tarafından reddedilmesine neden olabilir. Diğer talaşlı imalat yöntemlerinde olduğu gibi delme işleminde de kesici uç aşınmasının takip edilmesi ve kırılmadan önce değiştirilmesi literatürde yer almıştır (Wong ve diğ., 2008; Zhu ve diğ., 2017). Şekil 4.19 (a) ve (b)'de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak delme sonrası Ø7,5 mm çapında elmas karbür matkap ucunda meydana gelen aşınmaların, Şekil 4.19 (c) ve (d)'de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak delme sonrası Ø8,4 mm çapında elmas karbür matkap ucunda meydana gelen aşınmaların SEM görüntüleri verilmiştir. Kullanılan soğutucu sıvı, %5 ESTRA 320 mikro emülsiyon metal işleme sıvısı ve %95 su karışımıdır. Delme işlemlerinin tamamı 50 m/dak kesme hızı, 0,08 mm/dev ilerlemesi hızı ve 20 mm kör delme derinliği ile yapılmıştır.

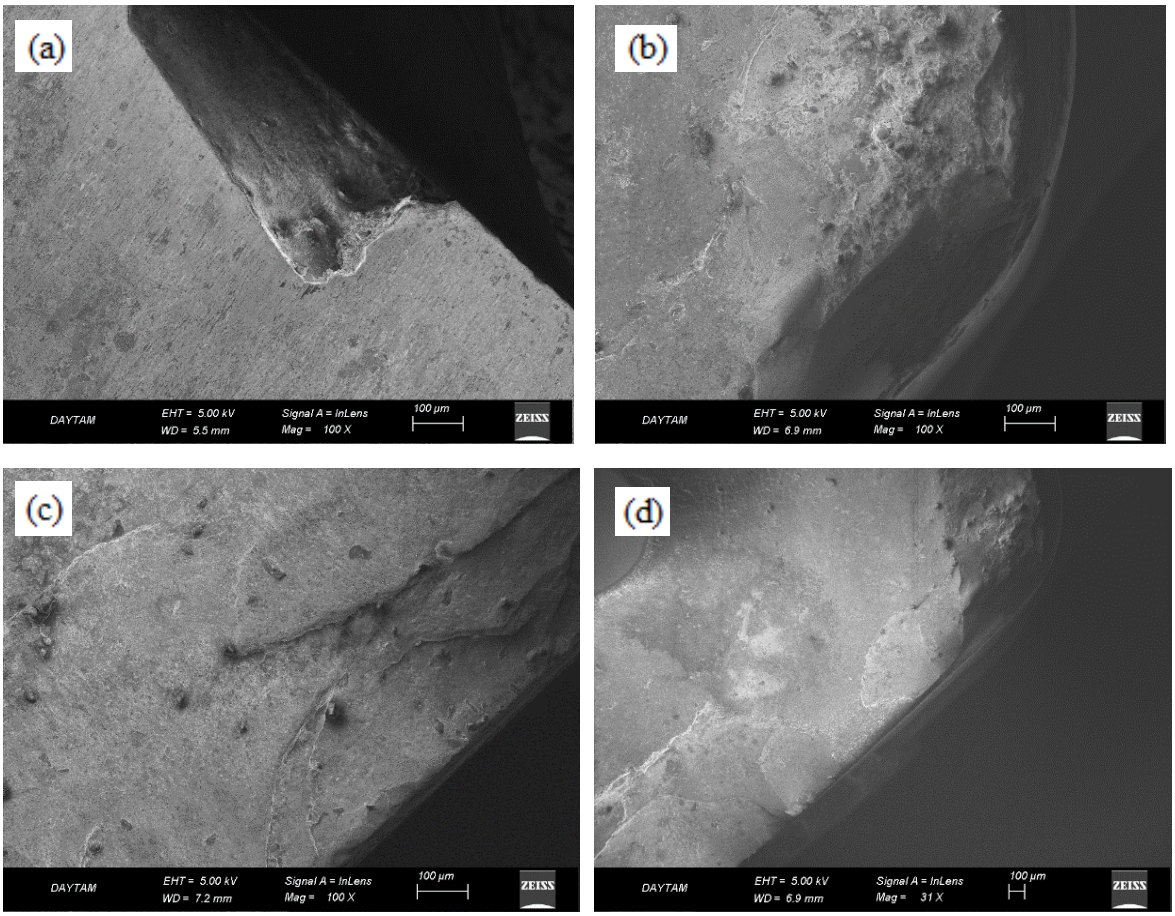
Şekil 4.19 (a) ve (c)'da sırasıyla Ø7,5 mm ve Ø8,4 çapında elmas karbür matkap ucu ile kuru delmeden sonra matkap ucu incelendiğinde burgu talaş oluşumundan kaynaklı matkap yüzeyinde aşınmalar oluşmuştur. Ayrıca kesici uç ve delinen yüzey arasında kuru işlemeden kaynaklı yüksek ısıyla ortaya çıkan malzeme kaybı yani adhezyon aşınması gerçekleşmiştir. Kuru işlemeden kaynaklı basınç ve sıcaklığa bağlı olarak talaş ve matkap ucu arasında oluşan difüzyon da aşınmaya neden olmuştur. Artan matkap çapıyla beraber kesici uçtaki aşınma da artmıştır. Kuru kesme ortamından kaynaklı matkap uçlarında oluşan adheziv aşınma yüzey kalitesinin düşmesine sebep olarak ortalama yüzey pürüzlülük değerlerini düşürmüştür. Bu durum önceki bölümde açıklanmıştır. Şekil 4.19 (b) ve (d)'de sırasıyla Ø7,5 mm ve Ø8,4 çapında elmas karbür matkap ucuyla kesme sıvısı ile delmeden sonra matkap ucu incelendiğinde kabul edilebilir sınırlar içinde kalan helisel formda talaş oluşumundan kaynaklı aşınma kuru işlemeye göre daha azdır. Kesici ucun işlem yapan yüzeyinde serbest yüzey aşınması meydana gelmiştir. Meydana gelen bu aşınma sonucunda yüzey aşınması matkap çapının artması ile artmıştır. Sonuç olarak kesme sıvısıyla yapılan işlemlerde aşınma azalmıştır. Artan matkap çapı ile her iki kesme ortamında da aşınma artmıştır. Tüm şartlarda oluşan

aşınmaların matkabın kesici ağzının merkeze yakın olan bölgesinde yan yüzey aşınması şeklinde olduğu ancak kuru kesme şartlarında matkabın dış kısmına yakın bölgelerde kırılma ağzı şeklinde gerçekleştiği görülmüştür.

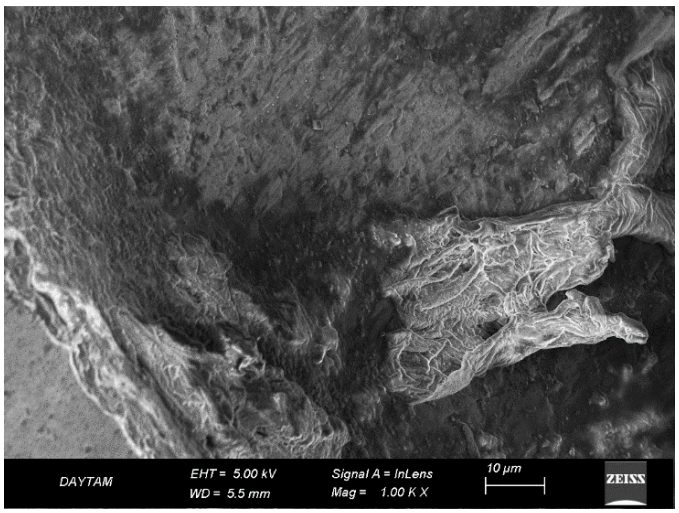



**Şekil 4.19:** (a) Ø7,5 mm uç ile kuru delme, (b) Ø7,5 mm uç ile kesme sıvısıyla delme, (c) Ø8,4 mm uç ile kuru delme ve (d) Ø8,4 mm uç ile kesme sıvısıyla delme sonrası kesici uçların SEM görüntüleri.

Şekil 4.20'de (a) ve (b) de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 50 m/dak kesme hızı ile frezeleme sonrası kesici uçta meydana gelen aşınmaların, Şekil 4.20 (c) ve (d)'de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 100 m/dak kesme hızı ile frezeleme sonrası kesici uçta meydana gelen aşınmaların SEM görüntüleri verilmiştir. Frezeleme işlemlerinin tümünde 0,25 mm/dev ilerlemesi hızı ve 0,4 mm kesme derinliği kullanılmıştır. Kuru ortamda 50 m/dak kesme hızı ile frezeleme sonrası kesici uçta meydana gelen aşınmada oluşan kırık bölgeden alınan SEM görüntüsü Şekil 4.21'de verilmiştir.



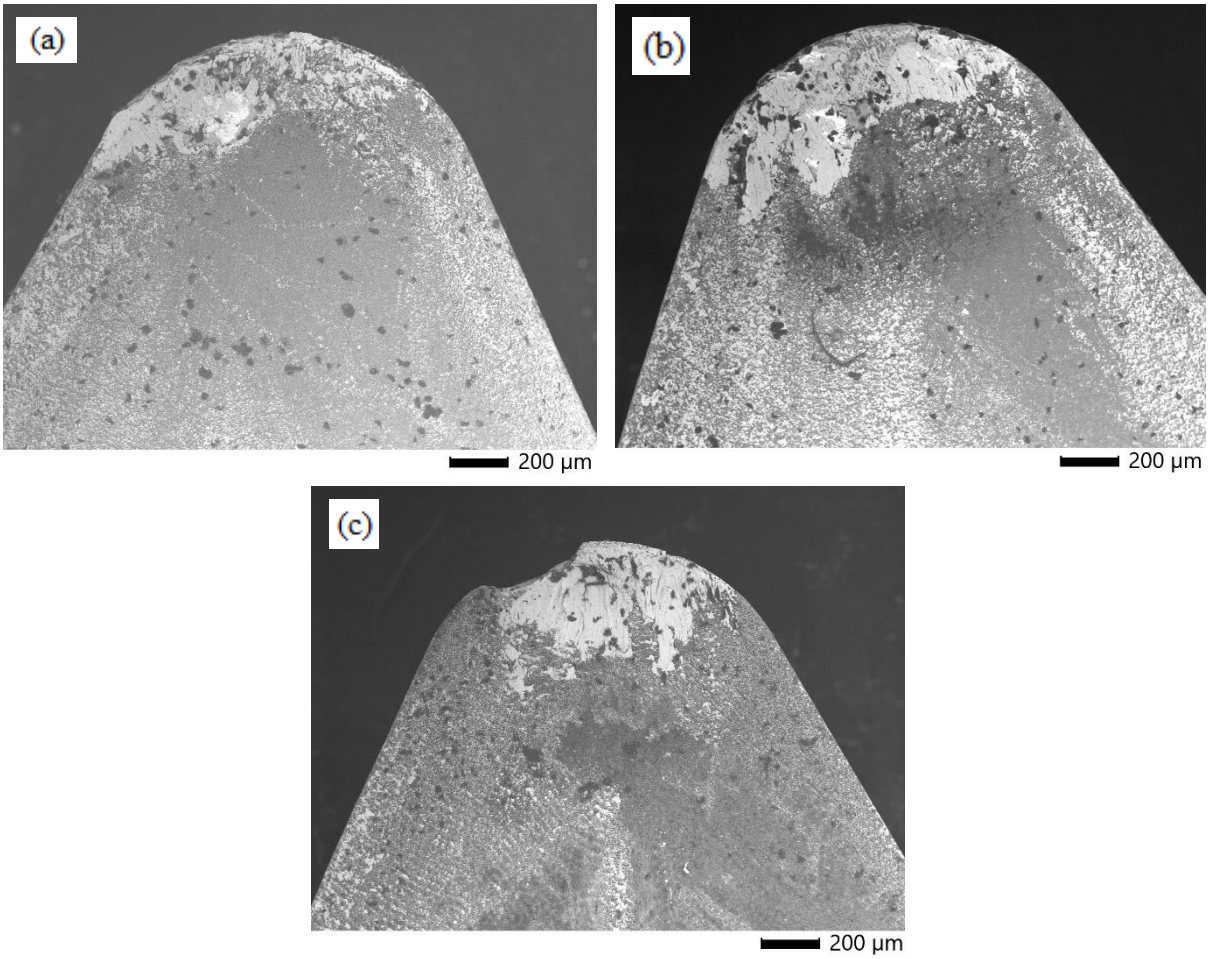

**Şekil 4.20:** (a) 50 m/dak kesme hızında kuru ortamda, (b) 50 m/dak kesme hızında kesme sıvısıyla, (c) 100 m/dak kesme hızında kuru ortamda ve (d) 100 m/dak kesme hızında kesme sıvısıyla frezeleme sonrası kesici uçların SEM görüntüleri.




**Şekil 4.21:** 50 m/dak kesme hızında kuru ortamda yapılan frezeleme sonrası kesici uçta oluşan kırık bölgenin SEM görüntüsü.

Şekil 4.20 (a) ve (b)'de 50 m/dak kesme hızı ile sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak frezeleme sonrası kesici uçlar incelendiğinde kuru kesmede kesici uçta kırılma olduğu, kesme sıvısı kullanımında ise yan yüzeyde aşınma olduğu gözlemlenmiştir. Kırılmaya kuru şartlarda oluşan karmaşık formlarda talaş oluşumları da sebep olabilir. Özellikle kuru kesmede talaş bölgesindeki sıcaklık ve titreşimin artması, kesici uç ve iş parçası arasındaki aşınmayı hızlandırarak kırılmaya sebep olabilir. Şekil 4.21'de kuru ortamda 50 m/dak kesme hızı ile frezeleme sonrası kesici takımın uç bölgesinde meydana gelen kırılmanın daha net görüntüsü incelendiğinde kuru kesme şartı altında gerçekleşen plastik deformasyonun sebep olduğu görülmektedir. Kesici takımdan sıcaklık etkisi ile parça kopması çentik aşınması olarak da nitelendirilebilir. Kırılma detayının verildiği alanda sıcaklık farkından kaynaklanan termal çatlaklar da görülmektedir. Şekil 4.20 (c) ve (d)'de 100 m/dak kesme hızı ile sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak frezeleme sonrası kesici uçlar incelendiğinde aşınmaların kesici uç kenarının serbest yüzeyinde oluştuğu görülmektedir. Talaş çıkışında ve sonrasında asıl kesen yüzey ve yardımcı yan yüzey işlenen parça ile temas halindedir. Bu aşınma şekli yaygın olan, normal sayılan ve emniyetli görülen bir aşınma türü olarak literatürde geçer (Sert, 2017). Bu sonuçlar değerlendirilecek olursa kesme sıvısı kullanıldığında kesici uç yüzeyine talaş yapışması önlenerek aşınmalar azaltılmıştır. Takım aşınmasının esas nedenin kesici uç ve işlenen parça arasındaki sürtünmeden kaynaklandığı ve sürtünme kaynaklı ısının ise aşınmayı hızlandırıcı etkisi vardır (Ensarioğlu ve Açkır, 2005). Bu çalışmada da kesme sıvısı kullanımı ile sürtünmeden kaynaklı olumsuz etkiler ortadan kaldırılmıştır. Artan ilerleme hızı ile aşınma azalmıştır. Buna istinaden bir önceki bölümde açıklandığı gibi frezelemede artan ilerleme hızı ile yüzey pürüzlülük değeri azalmıştır. Elde edilen sonuçlar birbirini desteklemektedir.

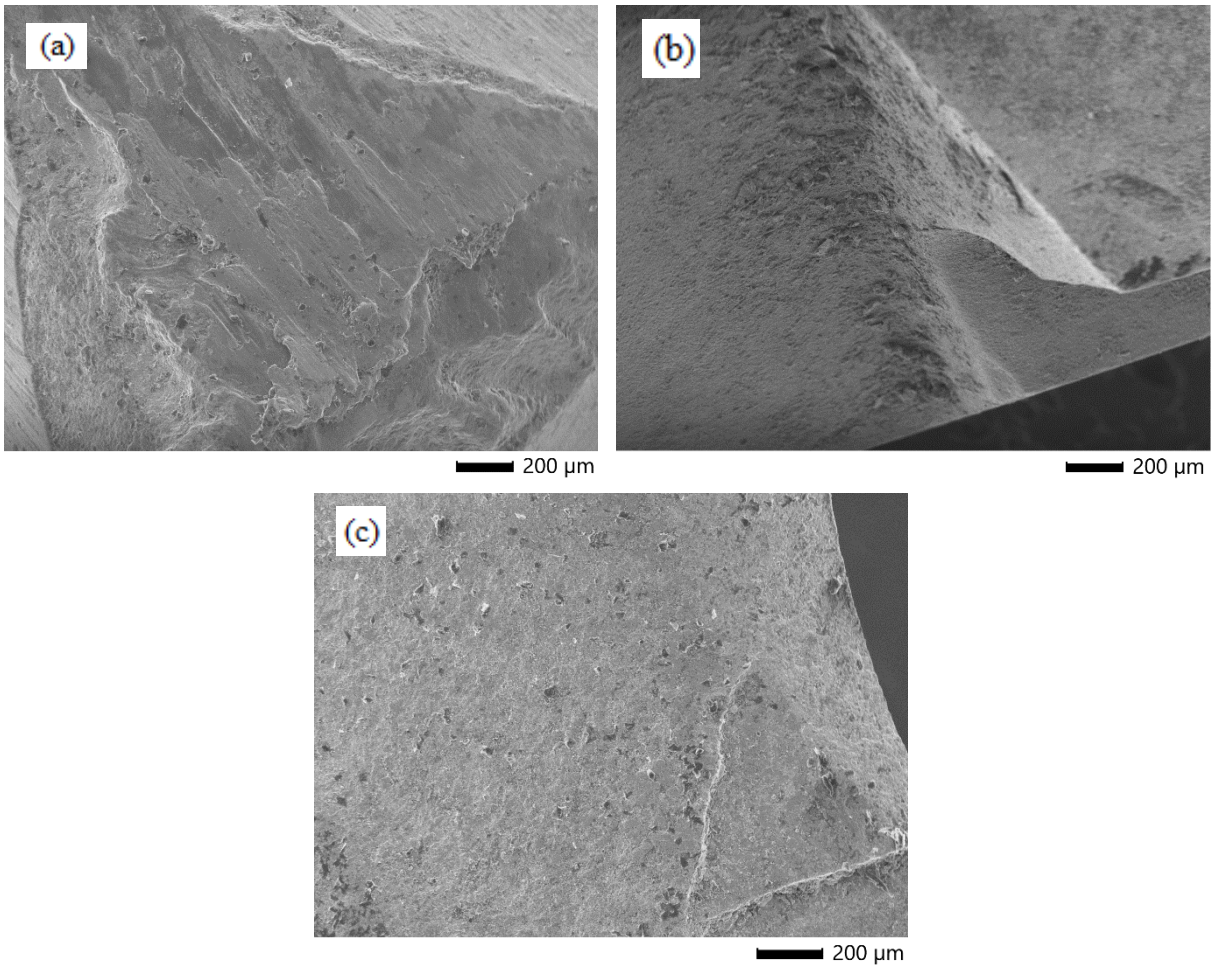
Tornalama işleminde kullanılan kesici uçlardaki aşınma kaplamalı DNMG ve kaplamasız CBN kesici uçların farklı kesme hızları ile işlenmeleri sonucu görüntülerinden değerlendirilmiştir. 0,4 mm kesme derinliği, 0,25 mm/dev ilerleme hızında ve 30, 40 ve 50 m/dak kesme hızlarında, kaplamalı DNMG kesici uç kullanarak tornalama sonrası kesici uçta meydana gelen aşınmalar sırasıyla Şekil 4.22 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir. Şekil 4.23 (a), (b) ve (c)'de ise 0,4 mm kesme derinliği, 0,25 mm/dev ilerleme hızında ve 30, 40 ve 50 m/dak kesme hızlarında kaplamasız CBN kesici uç kullanarak tornalama sonrası kesici uçta meydana gelen aşınmalar verilmiştir.




**Şekil 4.22:** (a) 30, (b) 40 ve (c) 50 m/dak kesme hızları ile DNMG kesici uç kullanılarak tornalama sonrası kesici uçların SEM görüntüleri.

Şekil 4.22'de tornalama sonrası DNMG kesici uçların SEM görüntüleri incelendiğinde, kesme hızı arttıkça kesici uçlarda aşınmanın arttığı çok net olarak görülmektedir. Kuru ortamda işleme sonrası kesici takımın kesme kenarı ve yan yüzeyinde sürtünme aşınması ile serbest yüzey aşınması oluşmuştur. Kesme sırasında artan kesme hızıyla sıcaklık artışı ve yığıntı talaş sertliğinin artışı sonrası mukavemet azalır. Azalan dayanım kesici ucun kenarında kopmalara sebebiyet verir. Özellikle kaplamalı uçlarda kaplamanın kopması çok karşılaşılan bir durumdur. Kopan parçalar aşınmayı da hızlandırır. Literatürde yapılan birçok çalışmada bunu desteklemektedir (Arrazola ve diğ., 2009; Venugopal ve diğ., 2007; Pervaiz ve diğ., 2014; Muthukrishnan ve Davim 2011; Ramesh ve diğ., 2008). 50 m/dak kesme hızı ile işleme sonrası kaplamalı DNMG kesi ucun burun kısmında oluşan kırılma Şekil 4.22 (c)'de görülmektedir. Bu kırılma işleme sırasında özellikle yüksek kesme hızında açığa çıkan yüksek sıcaklıktan dolayı kesici ucun burun kısmının plastik deformasyon maruz kalmasından kaynaklanmaktadır. Bu şartlarda kesici ucun kaplama yapısı bozulur ve kaplama yerinden atarak kopar. Sert (2017) yaptığı çalışmada Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde kesici takımların performanslarını

incelemiştir. AlCrN kaplamalı kesici takımın kullanımında belli bir süre sonra kesici uç kısmında talaş yığılması oluştuğunu ve oluşan bu talaş yığıntısının uzaklaşırken kaplamanın da kopmasına neden olduğunu rapor etmiştir.




**Şekil 4.23:** (a) 30, (b) 40 ve (c) 50 m/dak kesme hızları ile CBN kesici uç kullanılarak tornalama sonrası kesici uçların SEM görüntüleri.

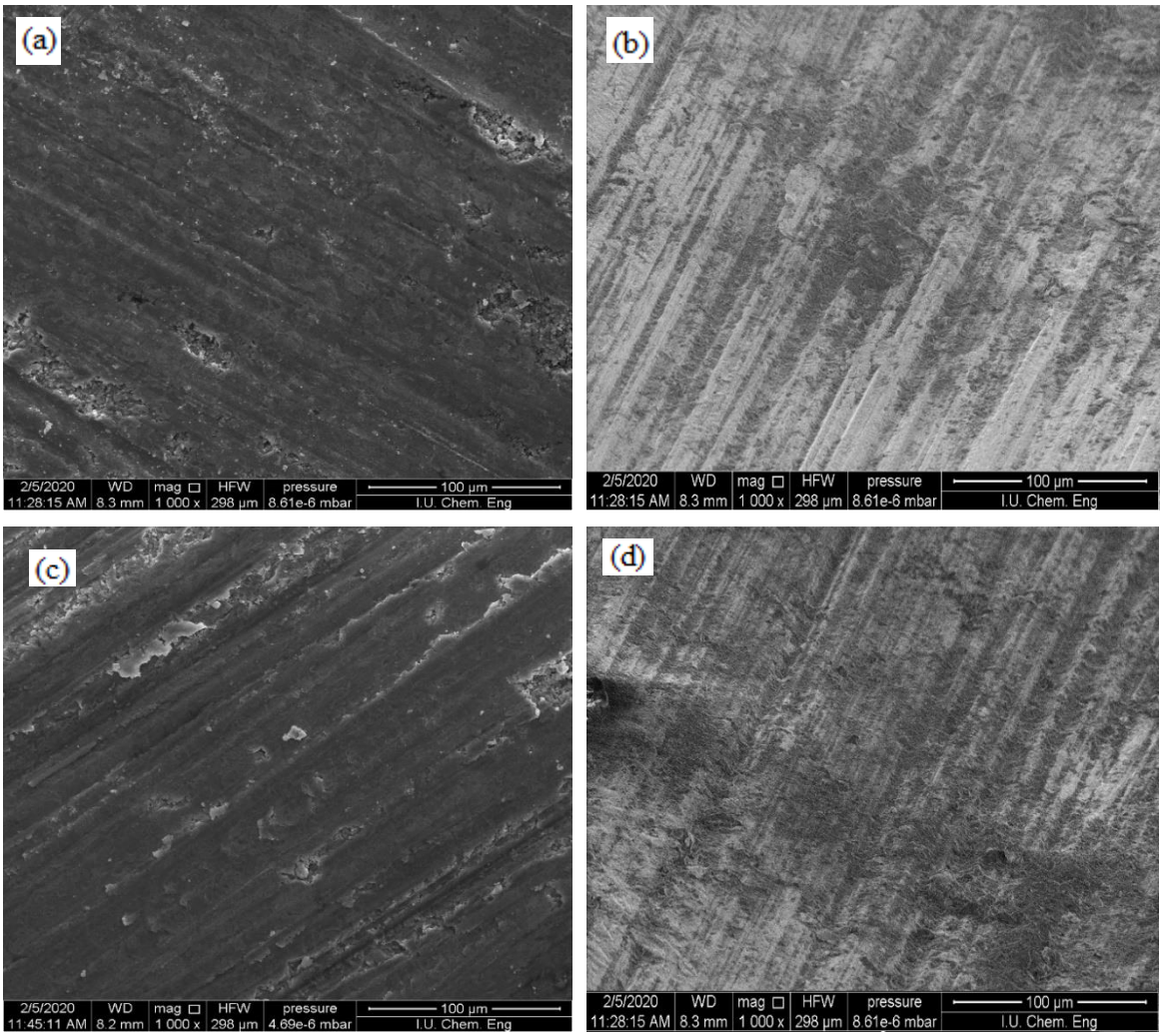
Şekil 4.23'de tornalama sonrası CBN kesici uçların SEM görüntüleri incelendiğinde, kaplamalı uçların tersine kesme hızı arttıkça kesici uçlarda aşınmanın azaldığı görülmektedir. Kaplamasız uçlarda kaplama kopması söz konusu olmadığından aşınma mekanizması, takımın kesme bölgesinde serbest yüzey aşınması oluşumu gözlemlenmiştir. Bu aşınmaya sebep olan abrazyon aşınması olarak bilinen aşınma mekanizmasıdır. Kesici takımın talaşı kestiği bölge malzemeden kaldırılan talaşların kaydığı alandır. SEM görüntülerinde bu alan ile talaş yüzey bölgesi arasında oluşan sıcaklık değişmelerinden kaynaklı deformasyonlar görülmektedir. Kesici takımın talaş yüzeyi iş parçasından kaldırılan talaşın kaydığı yüzeydir. Bu yüzeyle talaş yüzeyi arasında meydana gelen sıcaklık değişimlerinden dolayı malzeme kopar ve krater aşınması meydana gelir. Krater aşınması takımın ömrünü önemli oranda etkilemez ve hatta kesme

kuvvetlerinin azaltılması gibi olumlu etkileri de vardır ancak aşırı krater aşınması takım kenarlarında zayıflamaya sebep olur buna bağlı olarak da takımda kırılmalar meydana gelir. Artan kesme hızı ile bir önceki bölümde bahsedilen yüzey pürüzlülük değerlerinin de azalması kesici ucun daha az aşınması ile de açıklanabilir. Literatürde yer alan bilimsel çalışmalara göre, artan kesme hızı ile yüzey pürüzlülüğü azalarak daha iyi kalitede yüzey elde edilmektedir. Bunu artan kesme hızı ile sıcaklığın da artması ve kesilen bölgenin deformasyon ve çıkan talaşın ortamdan uzaklaşmasının kolaylığı ile açıklamışlardır (Kam ve Şeremet; 2021, Gupta ve diğ., 2022). Düşük kesme hızında, işlenen parçanın kesici takıma yapışarak BUE olarak ifade edilen yığıntı talaş oluşturması, yüzey pürüzlülük değerinde artışa sebep olacaktır, ancak bu durum kesme hızının gereğinden fazla artışının kesici takımın körelmesine neden olacağından dolayı bir süre sonra işlenen parçanın yüzey kalitesi kötüleşecektir (Güney, 2016). Bu konuya da dikkat edilmesi yüzey kalitesi açısından önemlidir. Ancak bizim çalışmamızda çok yüksek kesme hızları ile çalışılmadığından bu durum gözlemlenmemiştir. Sonuç olarak en az kesici takım aşınması kaplamasız CBN kesici uçlar ile yüksek kesme hızlarında elde edildi. Kaplamalı DNMG kesici uçlarla ve artan kesme hızı ile tornalama sonrası kesici takımda en fazla aşınma meydana geldi.

### 4.3.2. İşlenen Yüzeylerin SEM Görüntüleri

Titanyum alaşımlarının talaşlı imalatı esnasında düşük elastik modülüne sahip olmasından dolayı oluşan titreşimler yüzey kalitesi üzerine oldukça etkilidir (Çelik, 2018). Kesici takım performanslarının değerlendirilmesi, talaşlı imalat sonrası işlenmiş yüzeyler görüntülenerek de yapılmaktadır. Bu çalışmada Ti6Al4V alaşımı parçaların delinmesi, frezelenmesi ve tornalanması sonrası elde edilen işlenmiş parçaların yüzey görüntüleri uç tipine, kesme parametrelerine ve soğutma ortamına bağlı olarak değerlendirilmiştir. Yüzey görüntü analizleri SEM ile yapılmıştır.

Şekil 4.24 (a) ve (b)'de sırasıyla, kuru ve kesme sıvısı kullanılarak Ø7,5 mm çapında elmas karbür matkap ucu ile delme sonrası aşınan yüzeylerin, Şekil 4.24 (c) ve (d)'de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak Ø8,4 mm çapında elmas karbür matkap ucu ile delme sonrası aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri verilmiştir. Delme işlemlerinin tamamı 50 m/dak kesme hızı, 0,08 mm/dev ilerleme hızı ve 20 mm kör delme derinliği ile yapılmıştır.

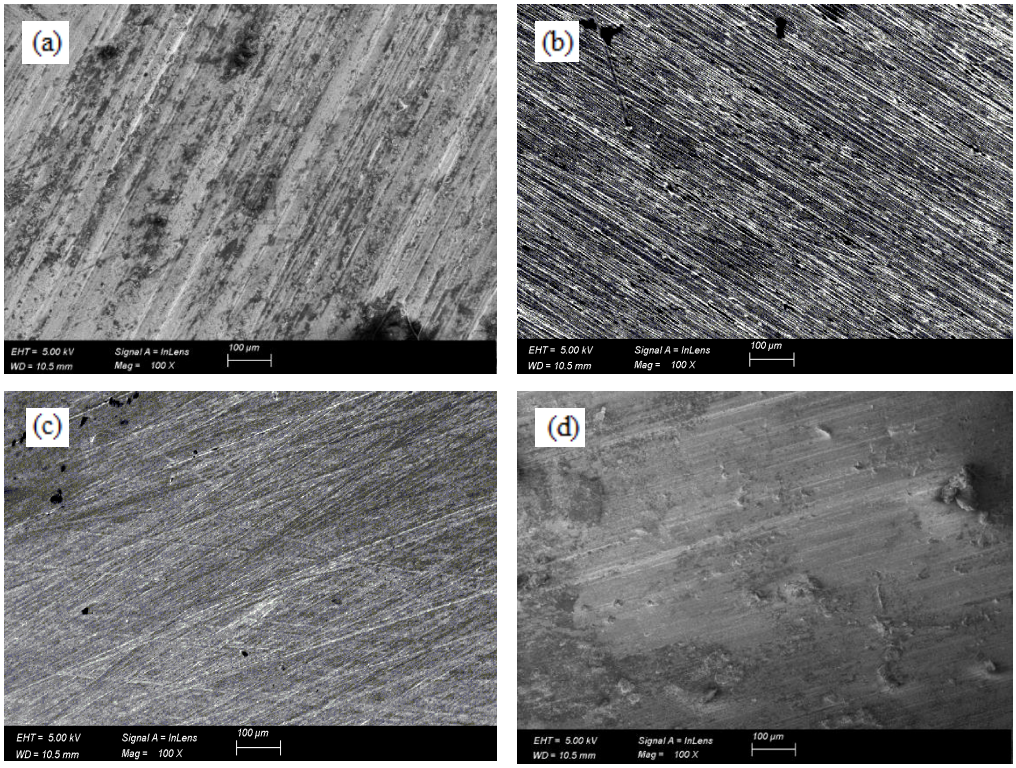



**Şekil 4.24:** (a) Ø7,5 mm uç ile kuru delme, (b) Ø0,75 mm uç ile kesme sıvısıyla delme, (c) Ø8,4 mm uç ile kuru delme ve (d) Ø8,4 mm uç ile kesme sıvısıyla delme sonrası aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri.

Ti6Al4V alaşımı düşük elastikiyet modülüne ve ısıl iletkenliğe sahip olduğundan özellikle delik delme gibi kaba işlemlerde daha güçlü takımlara ihtiyaç duyulur. Matkap ucu ile delik delinmesinde yaşanan en büyük problem, talaşın delikten dışarı atılmasında zorluk ve artan sıcaklıktır. Bu durum kesici uçta sürtünme, yüzeyde bozukluk ve boyutsal sapmalara sebep olur. Ayrıca artan sıcaklık ve sürtünme ile çıkan talaşlar matkap ile delik yüzeyi arasında sıkışarak matkap yüzeyine yapışır ve yığıntı talaş oluşumuna sebep olur. Yaşanan talaş yapışması sonucu işlenen yüzeyler daha kaba olmaktadır (Çakıroğlu ve Acır, 2013). Şekil 4.24'de kuru ve kesme sıvısı kullanılarak Ø7,5 mm ve Ø8,4 mm çaplarında elmas karbür matkap ucu ile delme sonrası aşınan yüzeylerde oluşan beyaz çizgiler iki ilerleme (besleme) arasındaki tepelerdir. Bazı kaynaklar oluşan bu çizgileri düzensiz bir plastik deformasyon akışı sonucu kesici kenarda termomekanik koşulların değişmesine bağlamaktadır (Özçatalbaş, 2014;

Zurecki ve diğ., 2003). Ø7,5 mm matkap ucu ile yapılan delme işlemlerinde aynı şartlar altında Ø8,4 mm matkap çapı ile delme işleminden daha iyi kalitede yüzeyler elde edilmiştir. Matkap çapının artması ile paralel olarak oluşan aşınma çizgileri arasındaki mesafenin arttığı da görülmektedir. Kuru ortamda işleme sonucu elde edilen SEM görüntüleri incelendiğinde derin yarık dışında kopmuş parçacıkların taşınırken yapıştıkları ve dalgalı yüzeylerin oluşumuna sebep oldukları görülmektedir. Kesme sıvısı ile delinen yüzeylere paralel olarak oluşan aşınma çizgileri arasındaki mesafenin azaldığı görülmektedir. Her iki matkap ucundaki delme işlemleri sonucunda kuru kesme ortamında işlenmiş yüzey görüntülerinde yüzeye yapışmış malzeme kalıntıları görülmektedir. Delinen parçaların aşınan yüzeylerinin görüntüleri, önceki bölümlerde verilen yüzey pürüzlülük ve takım aşınması sonuçlarını desteklemektedir.

Şekil 4.25 (a) ve (b)'de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 50 m/dak kesme hızı ile frezeleme sonrası aşınan yüzeylerin, Şekil 4.25 (c) ve (d)'de sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 100 m/dak kesme hızı ile frezeleme sonrası aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri verilmiştir. Frezeleme işlemlerinin tümünde 0,25 mm/dev ilerlemesi hızı ve 0,4 mm kesme derinliği kullanılmıştır.

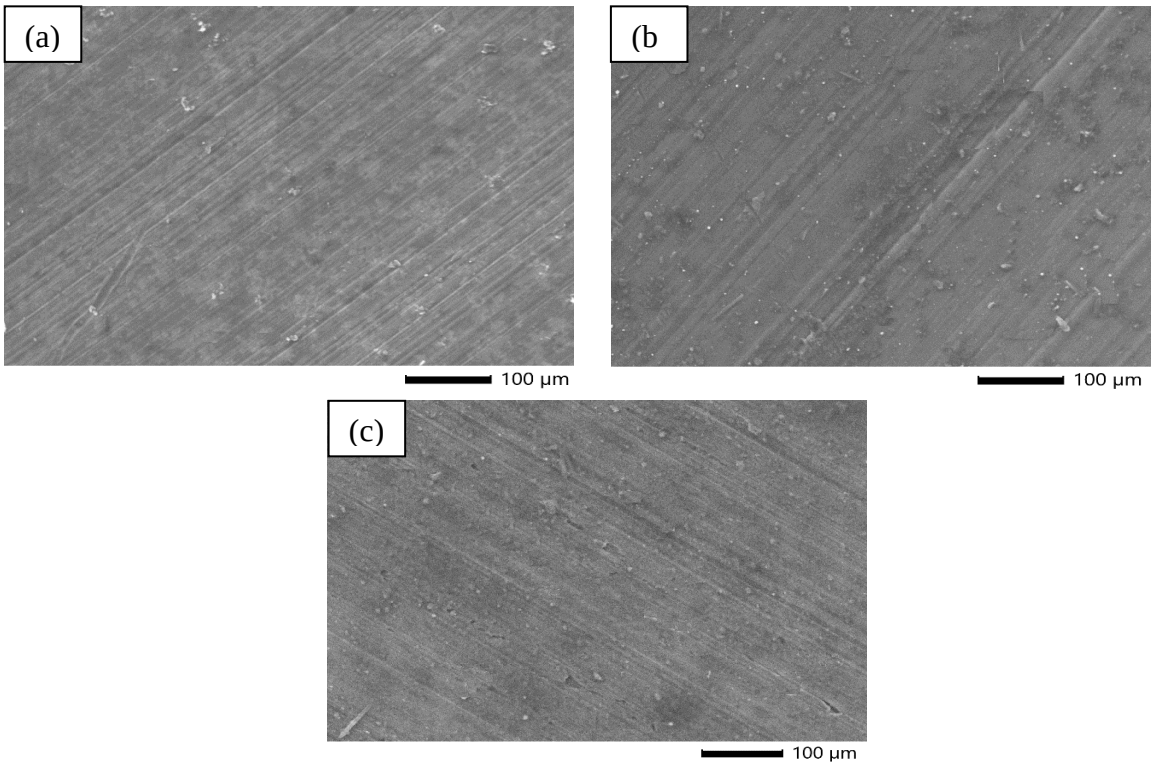



**Şekil 4.25:** (a) 50 m/dak kesme hızında kuru ortamda, (b) 50 m/dak kesme hızında kesme sıvısıyla, (c) 100 m/dak kesme hızında kuru ortamda ve (d) 100 m/dak kesme hızında kesme sıvısıyla frezeleme sonrası aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri.

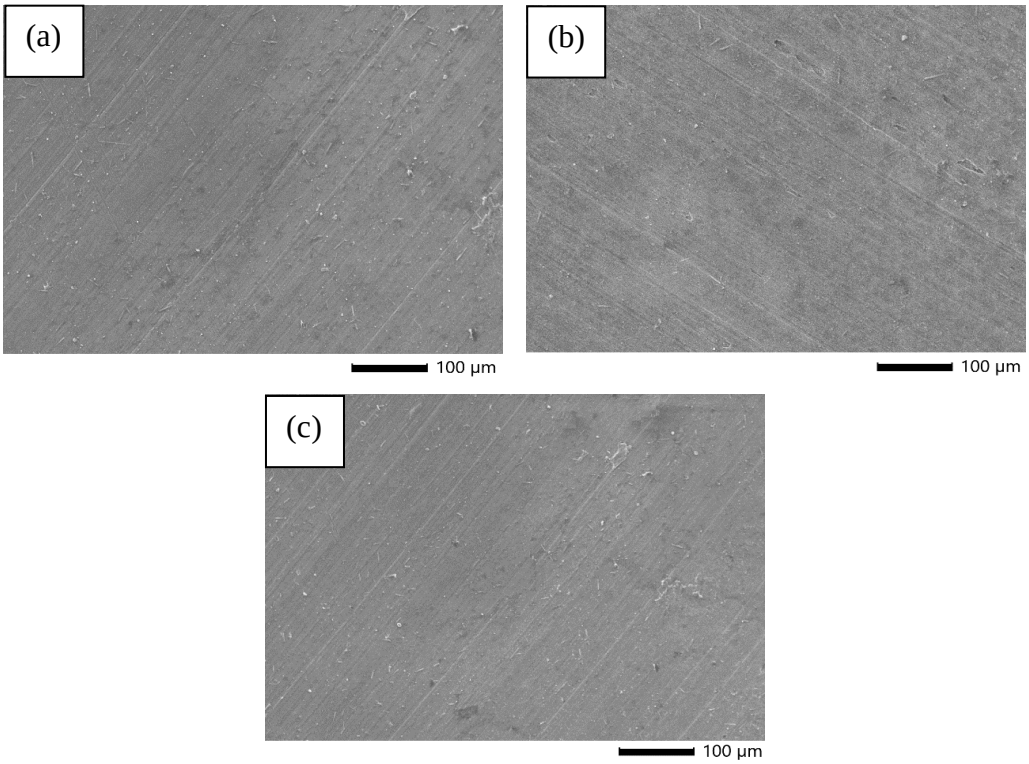
Şekil 4.25'te kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 50 m/dak ve 100 m/dak kesme hızları ile frezeleme sonrası aşınan yüzeylerin görüntüleri incelendiğinde artan kesme hızı ile yüzeysel aşınmanın azaldığı görülmektedir. Kuru ortamda işleme sonucu elde edilen yüzeylerin sıvı ortamda işlenenen yüzeylere göre her iki kesme hızında da bozulduğu belirlenmiştir. Azalan kesme hızı ve kuru kesme ortamına geçişle işlenen yüzeyin bütünlüğü bozulmuş, aşınma izleri daha da belirginleşmiştir. Önceki bölümde verilen yüzey pürüzlülük sonuçları ile uyum içerisindedir. Kuru işlemelerde deformasyon sonucu oluşan ilerleme veya besleme çizgilerinin arasındaki tepeler net bir şekilde ortaya çıkmakta ve artan kesme hızı ile azalmaktadır. Her iki kesme hızında da freze ile işlenmiş yüzeye yapışmış malzeme kalıntıları görülmektedir. Sonuç olarak; hem kesme hızının hem de kesme ortamının işlenen parçanın yüzey kalitesi üzerine etkisi vardır. Bu çalışmada kesme hızının etkisi, keme ortamına göre daha baskındır.

Tornalama işleminde işlenen yüzeylerdeki aşınma kaplamalı DNMG ve kaplamasız CBN kesici uçların farklı kesme hızları ile işlenmeleri sonucu elde edilen görüntülerinden değerlendirilmiştir. 0,4 mm kesme derinliği, 0,25 mm/dev ilerleme hızında ve 30, 40 ve 50 m/dak kesme hızlarında kaplamalı DNMG kesici uç kullanarak tornalama sonrası işlenen yüzeylerdeki aşınmalar sırasıyla, Şekil 4.26 (a), (b) ve (c)'de verilmiştir. Şekil 4.27 (a), (b) ve (c)'de ise 0,4 mm kesme derinliği, 0,25 mm/dev ilerleme hızında ve 30, 40 ve 50 m/dak kesme hızlarında kaplamasız CBN kesici uç kullanarak tornalama sonrası işlenen yüzeylerdeki aşınmalar verilmiştir.

Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'de 30, 40 ve 50 m/dak kesme hızlarında sırasıyla DNMG ve kaplamasız CBN kesici uçlar kullanılarak tornalama sonrası işlenen yüzeylerdeki aşınmalar incelendiğinde, artan kesme hızı ile kesme işlemini oluşturduğu besleme izlerinin azaldığı ve daha iyi kalitede düzgün yüzeylerin elde edildiği görülmektedir. Özellikle kesme hızı 30 m/dak'dan 50 m/dak'ya çıkarıldığında yüzey aşınmasında belirgin bir şekilde azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Kaplamasız CBN kesici uçlarla elde edilen yüzeylerin kalitesi aynı şartlardaki DNMG uçla işlenmiş yüzeylerden nispeten daha düzgün ve yüzey aşınması daha azdır. Bu durum kesici takımdaki kaplamasının yerinden atıp kesici ucu ve dolayısıyla işlenen yüzeyi bozmasıyla ilgilidir. Önceki bölümde verilen yüzey pürüzlülük sonuçları ile uyum içerisindedir. CBN kesici uçlar ile işlenmiş yüzeye yapışmış malzeme kalıntısı DNMG uçlara göre daha az olduğu da görülmektedir. SEM görüntülerinde açıkça aşınma çizgilerinin birbirine paralel ve hemen hemen eşit aralıklarda olduğu tespit edilmiştir.




**Şekil 4.26:** (a) 30 , (b) 40 ve (c) 50 m/dak kesme hızları ile DNMG kesici uç kullanılarak tornalama sonrası aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri.




**Şekil 4.27:** (a) 30, (b) 40 ve (c) 50 m/dak kesme hızları ile CBN kesici uç kullanılarak tornalama sonrası aşınan yüzeylerin SEM görüntüleri.

## 4.4. TAKIM ÖMRÜ

Talaşlı imalat işlemlerinde kesici takımın kullanım ömrünün arttırılması, kesme parametrelerinin ve kesme şartlarının optimizasyonu ile mümkündür. Takım ömründe yapılan iyileştirmeler üretim maliyetini doğrudan etkilediği için büyük önem taşır (Çelik, 2018). Bu çalışmada da kullandığımız üzere çoğunlukla takım ömrü kriteri olarak yüzey aşınması kullanılır. Takımın ömrünü tamamlaması için belirlediğimiz şartlar:

- İşlenen parçanın yüzey kalitesinin bozulması durumunda,
- Kesici uçta oluşan ortalama serbest yüzey aşınması 200 μm'den fazla olduğunda,
- Kesici uçta kopma veya kırılma gerçekleşmişse kesici takım ömrünü tamamlamıştır.

Yukarıdaki durumları gerçekleşmesi halinde, kesme işlemine devam edilmeyerek işlem sonlandırılmıştır. Kesme işlemleri sırasında önemli olan takım ömrünün aşınma nedeniyle tamamlandığı kesme süresinin belirlenmesidir. Çalışmanın tamamında kullanılan takım ömürlerini belirleyen kesici ucun aşınma süresi olan kesme süreleri, delme işleminde matkap ucu çapı ve soğutma ortamına, frezeleme işleminde kesme hızına, soğutma ortamına ve uç tipine, tornalama işleminde ise değişen kesme hızı ve farklı kesici uç kriterleri ele alınarak değerlendirilmiştir.

Ti6Al4V alaşımının delme işlemi için takım ömrü kriteri olan kesici ucun aşınma süresi soğutma ortamına ve uç çapına göre belirlenmiş ve Tablo 4.6'da verilmiştir. Delme işlemlerinin tamamı; 50 m/dak kesme hızı, 0,08 mm/dev ilerlemesi hızı ve 20 mm kör delme derinliği ile yapılmıştır.

**Tablo 4.6:** Delme işleminde kesici uçların aşınma süreleri.

| Matkap Çapı, mm | Aşınma Süresi, dak | |
|---|---|---|
| | Kuru işleme | Kesme sıvısı ile işleme |
| Ø7,5 | 20 | 22 |
| Ø8,4 | 14 | 18 |

Ti6Al4V alaşımının frezeleme işlemi için takım ömrü kriteri olan kesici ucun aşınma süresi, soğutma ortamına ve kesme hızına göre belirlenmiş ve Tablo 4.7'de verilmiştir. Frezeleme işlemlerinin tümünde 0,25 mm/dev ilerlemesi hızı ve 0,4 mm kesme derinliği kullanılmıştır.

**Tablo 4.7:** Frezeleme işleminde kesici uçların aşınma süreleri.

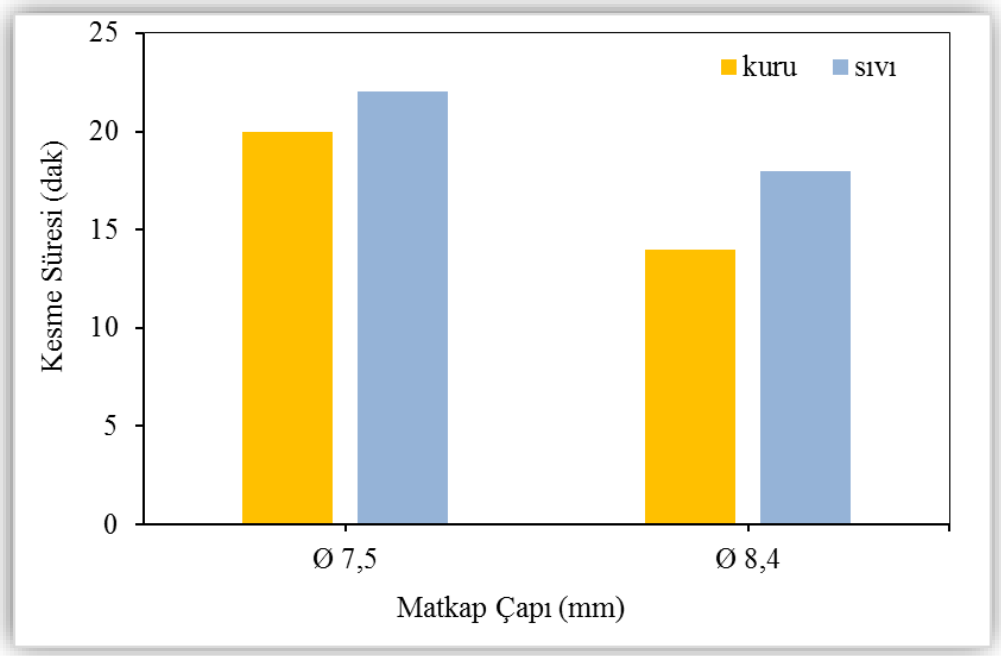
| Kesme Hızı, m/dak | Aşınma Süresi, dak | |
|---|---|---|
| | Kuru işleme | Kuru işleme |
| 50 | 13 | 13 |
| 100 | 17 | 17 |

Ti6Al4V alaşımının tornalama işlemi için takım ömrü kriteri olan kesici ucun aşınma süresi kesici uç tipine ve kesme hızına göre belirlenmiş ve Tablo 4.8'de verilmiştir. Tornalama işlemlerinin tümünde 0,4 mm kesme derinliği ve 0,25 mm/dev ilerleme hızı kullanılmıştır.

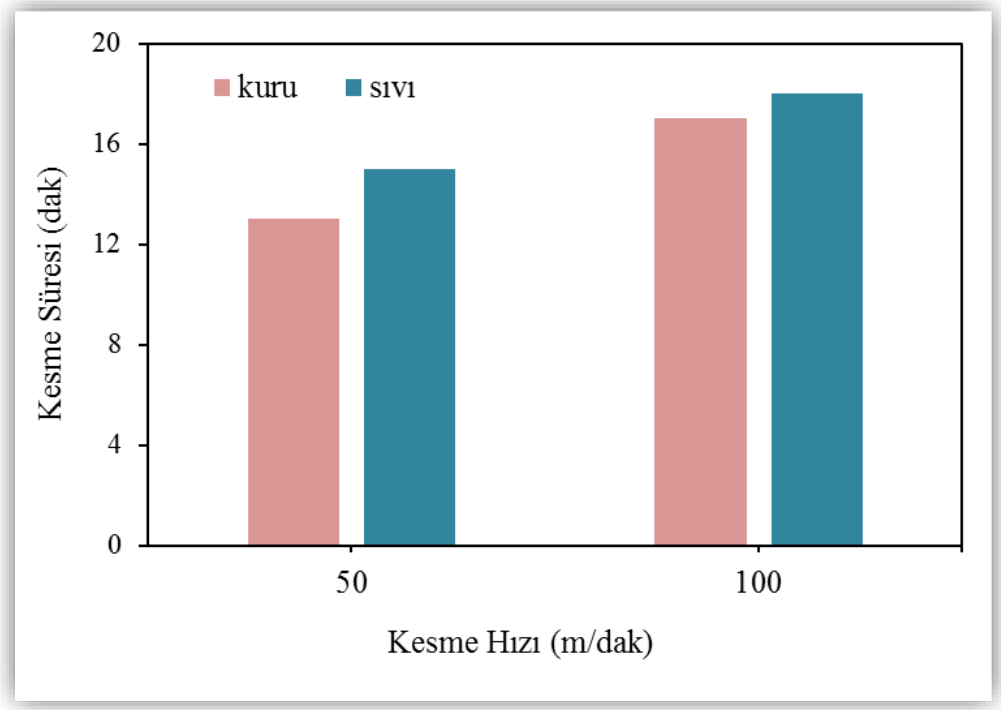
**Tablo 4.8:** Tornalama işleminde kesici uçların aşınma süreleri.

| Kesme Hızı, m/dak | DNMG kesici uçlarda Aşınma Süresi, dak | CBN kesici uçlarda Aşınma Süresi, dak |
|---|---|---|
| 30 | 16 | 18 |
| 40 | 15 | 17 |
| 50 | 18 | 22 |

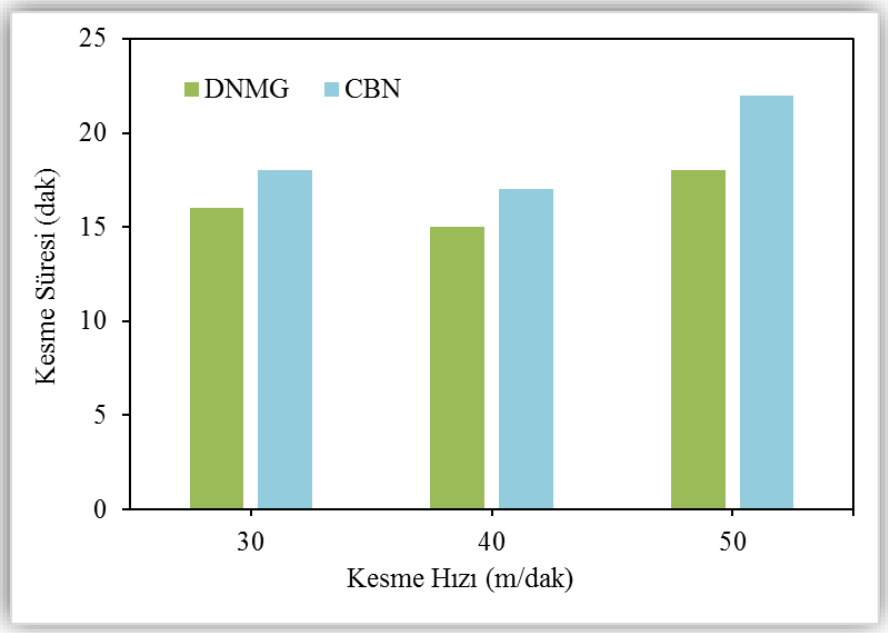
Kesici takım ömrünü belirleyen ve tabloda verilen değerlerin, daha net anlaşılması için delme, frezeleme ve tornalama işleminin sonuçlarını sütun grafikler üzerinde de gösterilmiştir. Şekil 4.28'de Ti6Al4V alaşımının delme sonrası matkap ucu çapı ve soğutma ortamına göre, Şekil 4.29'de frezeleme sonrası kesme hızına ve soğutma ortamına göre, Şekil 4.30'de tornalama sonrası kesme hızı ve kesici uç tipine göre kesici ucun aşınma süreleri yani kesme süreleri grafik görüntüsü ile verilmiştir.




**Şekil 4.28:** Matkap çapına göre, kuru ve kesme sıvısı ortamlarında delme sonrası kesici uçların aşınma süreleri.




**Şekil 4.29:** Kesme hızına göre, kuru ve kesme sıvısı ortamlarında frezeleme sonrası kesici uçların aşınma süreleri.




**Şekil 4.30:** Kesme hızına göre, DNMG ve CBN kesici uçların tornalama sonrası aşınma süreleri.

Tablo 4.6 ve Şekil 4.28'de verilen delme sonrası matkap uç çapı ve soğutma ortamına göre kesicin matkap ucunun aşınma süreleri incelendiğinde Ø7,5 ve Ø8,4 mm çapındaki matkap uçları ömürlerinin kesme sıvısı kullanımında kuru işlemeye göre daha uzun olduğu görülmektedir. Ø7,5 mm çapındaki matkap uçunda % 9,1 artış tespit edilirken bu oran Ø8,4 mm çapında %22,23 olarak tespit edilmiştir. Aynı şartlar altında matkap çapına göre değerlendirildiğinde küçük çapta matkap kullanımında kesme sürelerinin daha uzun olduğu tespit edilmiştir. Kuru ortamda matkap çapının Ø8,4 mm'den Ø7,5 mm'ye düşmesiyle matkap ömründe %42 artış belirlenmiştir. Sıvı ortamda delmede ise matkap çapının Ø8,4 mm'den Ø7,5 mm'ye düşmesiyle matkap ömründe %22 artış belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar delme sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük, takım aşınması ve işlenen yüzeyin aşınma sonuçları ile uyum içindedir. Sonuç olarak kuru ortamda delme ve büyük matkap ucu kullanımının kesici ucun kullanım ömrünü azalttığı söylenebilir.

Tablo 4.7 ve Şekil 4.29'da verilen frezeleme sonrası kesme hızına ve soğutma ortamına göre kesici freze ucunun aşınma süreleri incelendiğinde 50 m/dak ve 100 m/dak kesme hızlarında kesme sıvısı ile işlemede freze uçları ömürlerinin kuru işlemeye göre daha uzun olduğu görülmektedir. Kesme sıvısı kullanımını kuru ortam ile kıyasladığımızda 50 m/dak kesme hızında freze ucunda %13,34 artış tespit edilirken bu oran 100 m/dak kesme hızında %5,56 olarak tespit edilmiştir. Artan kesme hızı ile her iki kesme ortamında da kesici uç ömrünün

arttığı tespit edilmiştir. Kuru ortamda frezelemede kesme hızının 50 m/dak'dan 100 m/dak'ya çıkarılmasıyla kesici uç ömründe %23,53 artış olmuştur. Sıvı ortamda frezelemede ise kesme hızının 50 m/dak'dan 100 m/dak'ya çıkarılmasıyla kesici uç ömründe %16,67 artış tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar frezeleme sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük, takım aşınması ve işlenen yüzeyin aşınma sonuçları ile uyum içindedir. Sonuç olarak frezeleme işleminde kesme sıvısı kullanımının ve kesme hızının artmasının kesici uç ömrü üzerine olumlu etkisi olmuştur.

Tablo 4.8 ve Şekil 30'da verilen tornalama sonrası kesme hızı ve kesici uç tipine göre kesici ucun aşınma süreleri incelendiğinde kaplamasız CBN kesici uç ile tornalama sonrası kesici uç ömürlerinin kaplamalı DNMG kesici uç ile işlemeye göre daha uzun olduğu görülmektedir. 30 m/dak kesme hızında işlemede CBN uçlarının ömürleri DNMG uçlarının ömrüne göre %11,12 daha uzun olduğu tespit edilmiştir. Kesme hızının 30 m/dak'dan 40 m/dak'ya çıkarılmasıyla CBN uçlarının ömürleri DNMG uçlarının ömrüne göre %11,76 daha uzun olduğu tespit edilmiştir. Kesme hızının 40 m/dak'dan 50 m/dak'ya çıkarılmasıyla CBN kesici uçlarının ömürleri DNMG kesici uçlarının ömrüne göre %18,18 daha uzun olduğu tespit edilmiştir. Kesme hızına göre incelendiğinde her iki uç ile işlemede artan kesme hızı ile kesici uç ömrünün arttığı belirlenmiştir. DNMG kesici uçlarda kesme hızının 30 m/dak'dan 40 m/dak'ya çıkarılmasıyla kesici takım ömründe %6,67 azalma tespit edilirken, kesme hızının 30 m/dak'dan 50 m/dak'ya çıkarılmasıyla kesici takım ömründe %11,11 artış meydana gelmiştir. CBN kesici takımlarda ise kesme hızının 30 m/dak'dan 40 m/dak'ya çıkarılmasıyla %5,88 azalma tespit edilirken, kesme hızının 30 m/dak'dan 50 m/dak'ya çıkarılmasıyla kesici takım ömründe %18,18 artış meydana gelmiştir. Elde edilen sonuçlar tornalama sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük, takım aşınması ve işlenen yüzeyin aşınma sonuçları ile uyum içindedir. Sonuç olarak tornalama işleminde artan kesme hızı ile ve kaplamasız CBN kesici uç kullanımı ile kesici takım ömürleri artmıştır.

# 5. TARTIŞMA

İşlenebilirlği zor olan malzemeler içerisinde yer alan Ti6Al4V alaşımı parçaların delinmesinde, frezelenmesinde ve tornalanmasında farklı kesici uçlar, kesme parametreleri ve soğutma ortamları kullanılarak işlem sonucu çıkan talaşların morfolojileri, işlenen parçaların yüzey pürüzlülükleri, kesici uçların aşınma mekanizmaları ve işlenen yüzeylerin görüntüleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar, konuyla ilgili yapılmış bilimsel çalışmalar ışığı altında değerlendirilerek bu bölümde ela alınmış ve belirli bir düzen dahilinde aşağıda verilmiştir. Çalışmanın devamlılığı ve önemi açısından bölüm sonunda çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

## 5.1. TALAŞ MORFOLOJİLERİ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Talaş oluşum mekanizması ve talaş formu, işlenmiş malzeme yüzeyinin kalitesi üzerinde belirleyici rol oynar. İşlenen parçanın işleme esnasında karşılaştığı zorluklar, kesici ucun aşınma mekanizmalarını açıklamak açısından da önemlidir. Talaşın oluşum mekanizması, kesilen bölgede oluşan plastik deformasyon, kesici uçta yığıntı talaş oluşumları gibi karmaşık süreçler içerir. Bu çalışmada Ti6Al4V alaşımı parçalarının farklı talaşlı imalat yöntemleri ile işlenmesi sonucu çok farklı formlarda talaş oluşumları gözlenmiştir. Elde edilen sonuçların literatür çalışmaları ile ele alınarak değerlendirilmesi aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Bu çalışmada delme, frezeleme ve tornalama işlemlerinden sonra elde edilen talaş formlarının, işlenen yüzeyin kalitesinin ve kesici uç aşınma mekanizmasının arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir.

- Delme işlemi sonucu Ø7,5 mm çapında matkap ucuyla kuru işlemede istenmeyen talaş tipi olan burgu talaş oluşumu, kesme sıvısı ile işlemede ise kabul edilebilir sınırın en altında olan helisel talaş oluşumu gözlemlenmiştir. Yavuz ve diğ. (2017) burgu talaş formunun talaşlı işlemede, talaş boşaltma kanalında kolayca talaşın sıkışmasına sebep olacağından dolayı istenmediğini vurgulamışlardır. Ø8,4 mm çapında matkap ucuyla kuru işlemede istenmeyen talaş tipi olan burgu talaş oluşumu düzensiz olarak farklı boyutlarda kesme sıvısı ile işlemede ise burgu ve helisel talaş formları bir arada,

boyutları birbirinden farklı talaş oluşumları gözlemlenmiştir. Ø8,4 mm çapında matkap ucuyla kuru işlemede ise boyutsal düzensizlik oldukça belirgindir. Ti6Al4V alaşımının işlenmesindeki en ciddi sorun talaş ve kesici uç arasında oluşan bölgesel sıcaklıktır. Isıl farkların oluşturduğu kesici uç üzerinde genleşme ve büzülmeler burgu ve helisel form olarak adlandırılan kıvrımlı talaş oluşumunun baş aktörüdür (An vd., 2014). Sonuç olarak, talaş formu üzerine kesme ortamının etkisi matkap çapından daha belirgindir. Kesme sıvısı ile yapılan delme işlemlerinde, kabul edilebilir sınırın en altında kalan helisel talaş oluşumu gözlemlenirken, kuru ortamda delmede istenmeyen ve işlem sırasında deliği tıkayarak talaş çıkışına sebep olan burgu talaş oluşumu gözlemlenmiştir. Bu talaş formlarının kesici takım ömrü üzerine olumsuz etkisi olduğu bazı çalışmalarda belirtilmiştir (Strano vd., 2015; Ant, 2014; Yavuz, 2017). Delme işlemlerinde tüm şartlarda oluşan talaş renkleri birbirine benzerdir.

- Frezeleme işlemi sonucu 50 m/dak kesme hızıyla freze ile işleme sonrası elde edilen talaş formları kuru işlemede kısa helisel, kısa boru ve kısa virgül şeklinde olup, kesme sıvısı ile işlemede ise kısa helisel şekilde gözlemlenmiştir. Kuru işlemede düzensiz ve farklı formlarda talaşlar düzgün formlarda kırılarak oluşmuş. Kesme sıvısı ile işlemede tek tip talaş formu gözlemlenmiştir. 100 m/dak kesme hızıyla freze ile işleme sonrası elde edilen talaş formları kuru işlemede karmaşık uzun spiral şekilde olup, kesme sıvısı ile işlemede ise daha homojen ve kısa spiral şekilde gözlenmiştir. 100 m/dak kesme hızıyla frezelemede kabul edilebilir talaş formları oluşumu ve talaş kırılmaları düzgün bir şekilde gerçekleşmiştir. Kesme hızının artmasıyla talaş formları daha düzenli hale gelmiştir. Genel olarak talaş formu üzerine kesme hızının etkisi, kesme ortamından daha baskındır. Talaş rengi ise 50 m/dak kesme hızıyla frezelemede, 100 m/dak kesme hızıyla frezelemeye göre daha koyudur.

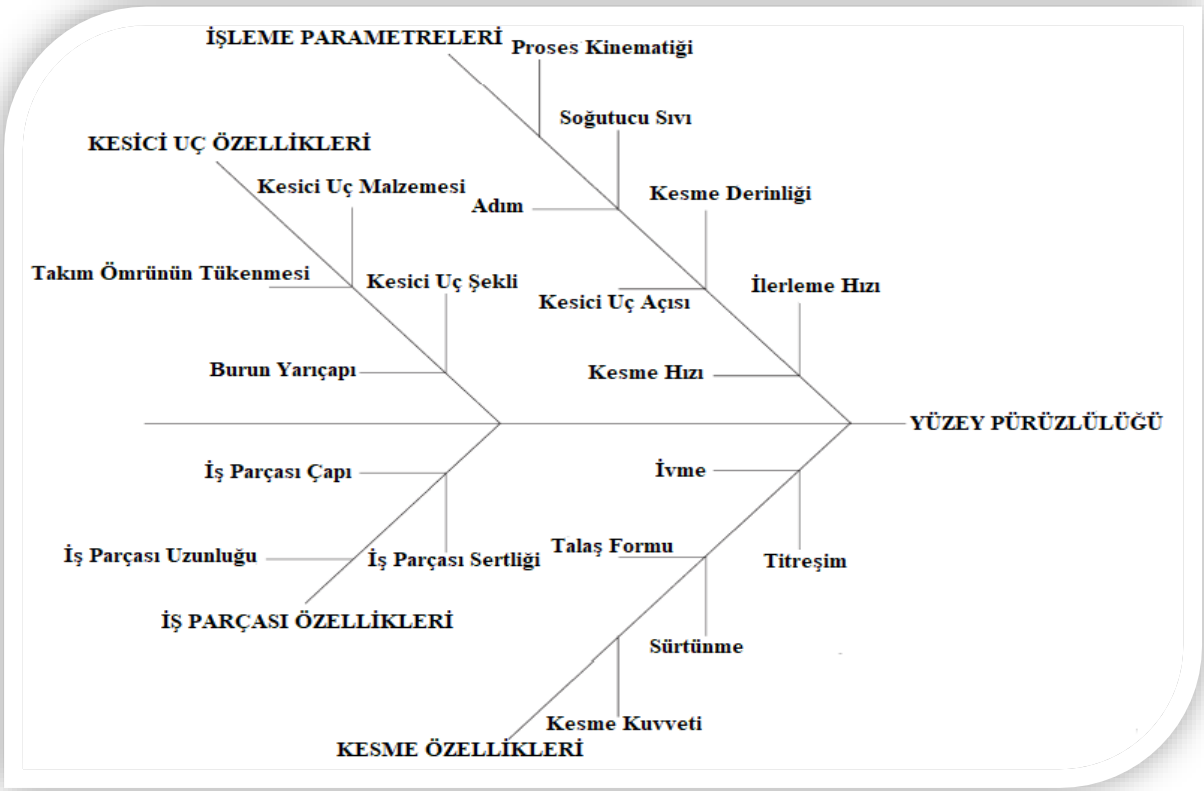
- Tornalama işlemi sonucu kaplamalı DNMG kesici uç ile elde edilen talaş formları 30 m/dak kesme hızında kısa burgu ve helisel formda olup, 40 m/dak kesme hızında uzun burgu helisel ve spiral formda oluşmuş ve 50 m/dak kesme hızında karışık boyutlu helisel talaş form oluşumları gözlemlenmiştir. Artan kesme hızıyla istenmeyen burgu talaş formundan kabul edilebilir sınırlar içinde kalan helisel talaş formuna ve daha kısa talaş boyuna geçilmiştir. Kaya ve diğ. (2010) yaptıkları çalışmada, kesme hızının talaş formları üzerine oldukça belirleyici olduğunu ve artan kesme hızıyla beraber birincil deformasyon bölgesindeki şekil değiştirme hızının da arttığını belirtmişlerdir.

Literatürde şerit, dolaşık ve burgu şekilli talaş formları işlenebilirliği zor, kabul edilemez talaşlar olarak değerlendirilirken, kısa veya uzun şekilli helisel talaş formları kabul edilebilir olarak değerlendirilmektedir (Akyol, 2007). Aynı kesici uçla 0,15 mm/dev ilerleme hızında uzun helisel talaş formları, 0,25 mm/dev ve 0,35 mm/dev ilerleme hızlarında kısa helisel ve uzun boru şeklinde talaş formları gözlemlenmiştir. Artan ilerleme hızı ile beraber talaş formları daha karmaşık şekilli ve talaş boyu daha kısa olmuştur. Çalışmada kullanılan ilerleme hızlarında kabul edilebilir formlarda talaş oluşumu gerçekleşmiştir ve talaş renkleri benzerdir. Aynı kaplamalı kesici uçla 0,2 mm ve 0,4 mm kesme derinliklerinde karışık boyutlu burgu ve helisel talaş formları, 0,6 mm kesme derinliklerinde oldukça uzun helisel talaş formları elde edilmiştir. Kesme derinliği 0,2 mm'den 0,4 mm'ye yükselmesi ile talaş form ve boyutu benzerken, artan kesme derinliği ile daha kabul edilebilir helisel talaş formuna ve daha uzun talaş boyuna geçilmiştir. Kesme derinliği ile talaş boyutları değişmemiştir.

- Tornalama işlemi sonucu kaplamasız CBN kesici uç ile elde edilen talaş formları 30 m/dak kesme hızında, uzun burgu ve helisel formda, 40 m/dak kesme hızında helisel ve spiral formdadır ve 50 m/dak kesme hızında karışık boyutlu helisel talaş form oluşumları gözlemlenmiştir. Düşük kesme hızında istenmeyen burgu talaş formu gözlemlenirken artan kesme hızı ile kabul edilebilir form olan helisel talaş formuna geçilmiştir. 30 m/dak kesme hızında talaş boyu daha uzun ancak 50 m/dak kesme hızında talaş boyları oldukça karmaşıktır. Artan kesme hızı ile talaş formunun iyileşmiş talaş rengi değişmemiştir. Aynı kaplamasız kesici uçla 0,15 mm/dev ilerleme hızında şerit ve spiral şeklinde, 0,25 mm/dev ilerleme hızında uzun spiral ve spiral boru şekilli ve 0,35 mm/dev ilerleme hızında helisel şekilli talaş formları gözlemlenmiştir. İlerleme hızının artmasıyla şerit formdan, spiral forma ve daha da artmasıyla kabul edilebilir olan helisel talaş formuna dönmüştür. Artan ilerleme hızı ile beraber talaş boyu da kısalmış ve talaş renklerinde bir değişme gözlemlenmemiştir. Aynı kaplamasız kesici uçla 0,2 mm kesme derinliğinde karışık boyutlu tamamen helisel, 0,4 mm kesme derinliğinde uzun helisel ve spiral formda ve 0,6 mm kesme derinliğinde kısa burgu ve spiral talaş formları gözlemlenmiştir. Talaş boyutları birbirine yakındır. Artan kesme derinliği ile istenmeyen burgu talaş formu gözlenmiştir. Kesme derinliğinin azalması ile düzensiz ve farklı formlarda talaşlar oluşumları tespit edilmiştir. Kesme derinliği ile talaş renkleri değişmemiştir.

## 5.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Talaşlı imalat yöntemleri ile işlenen malzemenin yüzey kalitesi birçok değişkene bağlıdır. İşlenmiş yüzeyin kalitesini belirleyen en önemli kriterlerden biri yüzey pürüzlülüğü değeridir. Yüzey pürüzlülüğü, aşınma, yağlama, sürtünme gibi tribolojik faktörlerin yanı sıra elektrik-ısı iletimi, kaplama, hidrodinamik, sızdırmazlık gibi özellikler açısından da önemlidir. Konuyla ilgili yapılan çalışmaların çoğunda, yüzey pürüzlülüğünün kesme parametreleri, kesici uç özellikleri, kesme ortamı ve tezgâh rijitliği gibi birçok faktörden etkilendiği ifade edilmiştir (Andriya ve diğ., 2012; Krishnaraj ve diğ., 2014; Muthukrishnan ve Davim, 2011; Ramesh ve diğ., 2008; Rao ve diğ., 2011; Safari ve diğ., 2015; Sharif ve Rahim, 2007; Taylan ve Oral, 2018; Yang ve diğ., 2010). Şekil 5.1'de yüzey pürüzlülüğünü belirleyen faktörler bir bütün halinde verilmiştir.




**Şekil 5.1:** Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen faktörler (Benardos ve Vosniakos, 2003)

İşlenebilirliği zor olan titanyum ve alaşımlarının yüzey kalitesi ancak doğru kesici uç kullanımı, uygun kesme ortamı ve doğru işleme parametreleri ile mümkündür. Genelde bu faktörlerin seçimi kesici takım veya tezgâh kataloglarından, operatörün tecrübesinden yararlanarak

belirlenir. Ancak bu yaklaşımlar doğru yüzey kalitesini sağlamak için yeterli değildir. Özellikle zor işlenen malzemelerin işlenebilirlik özelliğini iyileştirmek için bilimsel çalışmalara ağırlık verilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada da Ti6Al4V alaşımı parçaların delme, frezeleme ve tornalama işlemleri sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri kesme parametreleri, kesici türleri ve soğutucu ortam gibi değişkenleri göz önüne alınarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçların literatür çalışmaları ile ele alınarak değerlendirilmesi aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Bu çalışmada; delme, frezeleme ve tornalama işlemlerinden sonra elde edilen işlenmiş yüzeylerin yüzey kalitesi ile kesici ucun aşınma mekanizması arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir.

- Delme işlemi sonucu; Ø7,5 mm ve Ø8,4 mm çapında matkap uçları kullanılarak kesme sıvısı ile işlenen Ti6Al4V alaşımının ortalama yüzey pürüzlülük değerleri kuru işlemeye göre daha düşük, yüzey kalitesi daha iyidir. Matkap çapı Ø7,5 mm'den Ø8,4 mm'ye çıktığında hem kuru işlemede hem de kesme sıvısı ile işlemede delinen parçaların yüzey pürüzlülük değerleri artmıştır. Ti6Al4V alaşımının düşük termal özelliklerinden dolayı işlenen parça ve kesici uç arasında sıcaklık artar. Artan sıcaklıkla bölgesel ısıl değişimleri olur, işlenen parça mukavemet değerlerini korurken, kesici uç koruyamaz (Çiftçi ve Gökçe, 2019). Bu çalışmada da artan matkap çapı ve kuru ortam, delinen yüzeye uygulanan sıcaklık ve basıncı arttırarak yüzey kalitesini olumsuz etkilemektedir. Kuru ortamda delinen delikten talaşların çıkmasını zorlaşmakta, kesme alanını olumsuz etkilemektedir ve bu durum artan matkap çapı ile artan kesme alanından dolayı daha da artmaktadır. Heinemann ve diğ. (2006) delinebilirlik üzerine yaptıkları çalışmada soğutucu ortamın takım aşınmasını yavaşlatarak daha iyi kalitede yüzey elde edildiğini belirtmişlerdir.

- Frezeleme işlemi sonucu kuru ve kesme sıvısı kullanarak 100 m/dak kesme hızı ile frezeleme işlemi sonrası Ti6Al4V alaşımının ortalama yüzey pürüzlülük değerleri 50 m/dak kesme hızı ile frezelemeden daha düşüktür. Kesme sıvısı ile frezeleme işlemleri kuru ortama göre daha iyi yüzey kalitesi elde edilmesine neden olmuştur. Ti6Al4V alaşımının işelenebilirliği üzerine yapılan çalışmalarda kesme alanında artan ısıyı düşürmek, kesici takım aşınmasını azaltmak, yüzey kalitesini iyileştirmek, işleme süresi ve maliyetini düşürmek için soğutucu sistemlerinin kullanılmasının önemi vurgulanmıştır (Kumar ve Thirumuruga, 2012; Amin, 2007; Shokrani ve diğ., 2016).

- CBN ve DNMG kesici uçlar ile tornalama işlemi sonrası kesme hızının 30 m/dak'dan 40 m/dak'ya çıkarılması ile ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinde kayda değer bir değişiklik olmamıştır. Kesme hızı 50 m/dak'ya çıkarıldığında ise CBN kesici uç ile tornalamada ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinde %32,16 azalma, DNMG kesici uç ile tornalamada %24,26 azalma belirlenmiştir. Bazı araştırmacılar bu durumu düşük kesme hızı ile işlemelerde yığıntı talaş oluşumu olarak bilinen ve işlenen parçanın kesici uca yapışmasına ve işlenen yüzeyin bozulmasına bağlamaktadır (Gupta ve Sood; 2017; Gürbüz ve diğ, 2009). Ayrıca artan kesme hızı ile artan sıcaklığa bağlı olarak deformasyon ve onun sonucu olarak talaş akışının kolaylaşmasından dolayı yüzey özellikleri iyileşebilir (Bruschi ve diğ. 2016). CBN ve DNMG kesici uçlar ile tornalama işlemi sonrası ilerleme hızının artması ile ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinde önemli artış meydana gelmiştir. Ti6Al4V alaşımının torna ile işlenebilirliği üzerine yapılan birçok çalışmada yüzey pürüzlülük değerinin en fazla ilerleme hızından etkilendiği vurgulanmaktadır. Yine aynı çalışmalarda artan ilerleme hızının kesici uçta sıcaklık ve basınç değerlerini arttırarak talaş formu ve sonrasında yüzey kalitesini bozduğunu belirtmişlerdir (Gupta ve diğ., 2022; Kam ve Şeremet, 2021; Venugopal ve diğ., 2007). CBN kesici uç ile tornalama işleminde kesme derinliğinin artmasıyla ortalama yüzey pürüzlülük değerinin çok az miktarda arttığı, DNMG kesici uç ile tornalama işleminde ise kayda değer bir değişim göstermediği belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülük değerlerindeki artış artan ilerleme hızı ve kesme derinliğinin takım üzerinde sıvanma, aşınma ve çentik etkisi bırakmasıyla da açıklanabilir (Tekaslan ve diğ., 2016). Zeyveli ve Demir (2009), yüzey pürüzlülüğü üzerine kesme parametrelerinin etkilerini araştırdığı çalışmasında kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığını ve ilerleme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığını rapor etmiştir.

## 5.3. KESİCİ UÇ AŞINMA SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Ti6Al4V alaşımı düşük ısıl iletkenliği ve genleşmesinden dolayı işlenebilirliğinin zor ve kesme işlemi sırasında açığa çıkan ısı miktarı aşağı indirilemediği için doğrudan kesici uç aşınmasını tetikler. Bu anlamda yaşanılan en büyük problem sıklıkla kesici takım değiştirilmesi ve bununda işleme maliyeti ve zamanını arttırmasıdır. Kesici takım üzerinde oluşan bu olumsuzlukları en aza indirmek takım aşınmasını azaltmak için doğru kesme parametreleri, kesme ortamı ve tezgâh ayarı gibi unsurları dikkate almak gerekmektedir (Chowdhury ve diğ., 2021; Lindvall ve diğ., 2021). Bu çalışmada da Ti6Al4V alaşımı parçaların delinmesinde,

frezelenmesinde ve tornalanmasında kullanılan kesici uçların aşınma mekanizmaları uç tipi, kesme parametreleri ve soğutma ortamı gibi değişkenleri göz önüne alınarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçların literatür çalışmaları ile ele alınarak değerlendirilmesi aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Delme işlemi sonucu Ø7,5 mm ve Ø8,4 çapında matkap ucu ile kuru delmeden sonra matkap ucunda burgu formlu talaş oluşumundan dolayı aşınmalar tespit edilmiştir. Kuru ortamda delme ani ısı artışını da tetiklediği için malzeme kaybı yani adhezyon aşınması da gözlenmiştir. Kuru işlemeden kaynaklı basınç ve sıcaklığa bağlı olarak talaş ve matkap ucu arasında oluşan difüzyonda aşınmaya neden olmuştur. Sharif ve Rahim (2007), titanyum alaşımlarının yüksek hızda işlenmesi esnasında takım aşınmasını azaltmada kesme bölgesine uygulanan soğutma ve yağlama sıvılarının oldukça etkin olduğunu açıklamışlardır. Artan matkap çapıyla beraber kesici uçtaki aşınmada artmıştır. Ø7,5 mm ve Ø8,4 çapında matkap ucu ile kesme sıvı kullanarak delmeden sonra kesici ucun işlem yapan yüzeyinde serbest yüzey aşınması meydana gelmiştir. Her iki kesme ortamında da artan matkap çapıyla beraber kesici uçtaki aşınmada artmıştır. Tüm şartlarda oluşan aşınmaların matkabın kesici ağzının merkeze yakın olan bölgesinde yan yüzey aşınması şeklinde olduğu ancak kuru kesme şartlarında matkabı dış kısmında yakın bölgelerde kırılma ağzı şeklinde gerçekleştiği görülmüştür. Çiftçi ve Gökçe (2019), Ti6Al4V alaşımının delinebilirliği üzerine yaptıkları çalışmada gerçekleşen matkap ucu aşınmaların kesici ağzın merkeze yakın olan bölümleri ve yan yüzeyinde olduğunu, matkap ucu kırılmalarının da dışa doğu ağız kırılması şeklinde gerçekleştiğini açıklamışlardır. Ti6Al4V alaşımının delinmesi üzerine yapılan çalışmalara bakıldığında uygun matkap geometrisi, malzemesi, işlem değişkenleri ve soğutma yöntemlerinin optimize edilmesi amacıyla çok sayıda araştırmanın olduğu görülmektedir (Isbilir ve Ghassemieh, 2011; Kıvak ve Şeker, 2015; Sharif, ve Rahim, 2017). Bu çalışmada da kesici uç aşınmasın soğutma ortamının matkap çapından daha fazla etkilediği belirlenmiştir.
- Frezeleme işlemi sonucu 50 m/dak kesme hızı ile kuru kesmede kesici uçta kırılma olduğu kesme sıvısı kullanımında ise yan yüzeyde aşınma olduğu gözlenmiştir. Kuru kesme şartlarında talaş bölgesinde sıcaklık ve titreşimin artması, uç ve iş parçası arasında ki aşınmayı hızlandırarak kırılmaya neden olmuştur. Kırılmaya kuru şartlarda oluşan karmaşık formlarda talaş oluşumları da sebep olabilir. Özellikle kuru kesmede talaş bölgesindeki sıcaklık ve titreşimin artması, kesici uç ve iş parçası arası aşınmayı

hızlandırarak kırılmaya sebep olmuştur. Kasim ve diğ. (2013) yaptıkları çalışmada frezelemede talaş ile kesici takım arasındaki sıcaklık farklılığından kesici uçta termal çatlaklar oluştuğunu ve bununda talaş yığılması ile kırılmaya neden olduğunu açıklamışlardır. Bu çalışmada kuru ortamda 50 m/dak kesme hızı ile frezeleme sonrası kesici takımın uç bölgesinde meydana gelen kırılma daha büyük büyütmelerle yakından incelendiğinde kuru kesme şartı altında gerçekleşen plastik deformasyonun olduğu ve sıcaklık etkisi ile parça kopmasına neden olan termal çatlaklardan kaynaklı çentik aşınması olduğu belirlenmiştir. 100 m/dak kesme hızı ile sırasıyla kuru ve kesme sıvısı kullanılarak frezeleme sonrası aşınmaların kesici kenarın serbest yüzeyinde oluştuğu belirlenmiştir. Wang ve diğ. (2005), Ti6Al4V alaşımının frezelemesinde oluşan aşınma mekanizmalarını adhezyon, difüzyon, yıpranma ve çözünme olarak tespit edilmiştir. Kesme sıvısı kullanımı ile sürtünmeden kaynaklı olumsuz etkiler ortadan kaldırılmıştır. Artan ilerleme hızı ile aşınma azalmıştır. Literatürde Ti6Al4V alaşımı üzerine yapılan bazı çalışmalarda kesici uç ve işlenen parça arasındaki sürtünmeden kaynaklı aşınmaların azaltılmasında kesme ortamının etkisinin büyük olduğu vurgulanmaktadır (Ensarioğlu ve Açkır, 2005; Bruschi ve diğ., 2016; Venugopal ve diğ., 2007).

- Tornalama işlemi sonucu kaplamalı DNMG kesici uçlarla işlemede kesme hızı arttıkça kesici uçlarda aşınma artmıştır. Kesici takımın kesme kenarı ve yan yüzeyinde sürtünme aşınması ile serbest yüzey aşınması oluşmuştur. Artan kesme hızı sıcaklık artışıyla beraber sertlik ve mukavemet kaybını da beraberinde getirmektedir. Bu durumda kesici ucun kenarında özellikle kaplama varsa kopmalara neden olmaktadır (Arrazola ve diğ., 2009; Venugopal ve diğ., 2007; Pervaiz ve diğ., 2014; Muthukrishnan ve Davim, 2011; Ramesh ve diğ., 2008). 50 m/dak kesme hızı ile işleme sonrası kaplamalı DNMG kesici ucun burun kısmında oluşan kırılma, açığa çıkan yüksek sıcaklıktan dolayı kesici ucun burun kısmının plastik deformasyona maruz kalmasından ve kaplamanın atmasından kaynaklanmaktadır. Corduan ve diğ. (2007) yapığı çalışmada, Ti6Al4V alaşımının tornalama işleminde, artan kesme hızı ile çentik aşınmasının arttığını belirtmişlerdir. Sert (2017) yaptığı çalışmada Ti6Al4V alaşımının AlCrN kaplamalı kesici takım ile işlenmesinde kesici uç burnunda talaş yığılmasından kaynaklı kaplamada kopma olduğunu belirtmiştir. Tornalama işlemi sonucu kaplamasız CBN kesici uçlarla işlemede kaplamalı uçların tersine kesme hızı arttıkça kesici uçlarda aşınmanın azaldığı görülmektedir. Artan kesme hızı ile sıcaklığın da artması ve kesilen bölgenin deformasyon ve çıkan talaşın ortamdan uzaklaşması kolaylaşır. Bu uçlarda kaplama

kopması olmadığından aşınma mekanizması olarak takımın kesme bölgesinde serbest yüzey aşınması olduğu gözlenmiştir. Abrazyon aşınması olarak bilinen aşınma mekanizması talaş yüzey bölgesi arasında oluşan sıcaklık değişmelerinden kaynaklı deformasyonlar şeklinde oluşmuştur (Kam ve Şeremet, 2021; Gupta ve diğ., 2022). Düşük kesme hızında, işlenen parçanın kesici takıma yapışarak yığıntı talaş oluşturması kesi uç aşınmasını artıracaktır (Güney, 2016). Sonuç olarak en az kesici takım aşınması kaplamasız CBN kesici uçlar ile yüksek kesme hızlarında en fazla aşınma kaplamalı DNMG kesici uçlarla meydana gelmiştir. Nahbani (2001) yaptığı çalışmada titanyum alaşımlarının işlenmesinde PCBN ve PCD takımların işleme performansını kaplamalı karbür takımla karşılaştırılmıştır. PCD ve CBN takımın ortalama yan kenar aşınması kaplamalı karbürden oldukça daha az çıkmıştır. Kaplamasız takımlarda işleme sırasında yüksek sıcaklık ve plastik deformasyon oluşması ile kaplamadan işlenen parça üzerine malzeme geçişi olmakta ve olumsuz koşullar yaratmaktadır. Kaplamalı takımlarda kaplama kopması sonucu kesici uç kullanılamazken, kaplamasız takımlarda kesici uç bileme işlemi yapılarak tekrar kullanılabilir. Uçların maliyet oranı göz önüne alındığında kaplamasız uç kullanımı oldukça ekonomiktir (Çelik ve Kılıçkap 2018).

## 5.4. İŞLENEN YÜZEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Ti6Al4V alaşımı düşük termal iletkenlik ve elastik modülüne sahip olması talaşlı işleme sırasında yüzey kalitesinde düşüşlere sebep verir. Bu çalışmada da Ti6Al4V alaşımı parçaların delinmesi, frezelenmesi ve tornalanması sonrası elde edilen işlenmiş parçaların yüzey görüntüleri uç tipine, kesme parametrelerine ve soğutma ortamına bağlı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçların literatür çalışmaları ile ele alınarak değerlendirilmesi aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Delme işlemi sonucu kuru ve kesme sıvısı kullanılarak Ø7,5 mm ve Ø8,4 mm çaplarında matkap ucu ile delme sonrası aşınan yüzeylerde termomekanik koşulların değişmesiyle ilerleme çizgileri belirli aralıklarla oluşmuştur. Bu oluşumu destekleyen bazı çalışmalar mevcuttur (Hasak, 2018; Zurecki ve diğ., 2003). Matkap çapının artması ile paralel olarak oluşan aşınma çizgileri arasındaki mesafe artmış ve yüzey kalitesi bozulmuştur. Kesme sıvısı kullanımında yüzeyde birbirine paralel olarak oluşan aşınma çizgileri arasındaki mesafe azalmıştır. Kuru ortamda kopmuş parçacıkların dalgalı yüzeylerin oluşumuna sebep oldukları görülmektedir.

- Frezeleme işlemi sonucu kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 50 m/dak ve 100 m/dak kesme hızlarında artan kesme hızı ile yüzeysel aşınmasının azaldığı görülmektedir. Kuru ortamda frezeleme sonucu elde edilen yüzeylerin sıvı ortamla kıyaslandığında daha düşük kalitede olduğu belirlenmiştir. Bu durum kendini bütünlüğü bozulmuş yüzey ve belirgin aşınma izleriyle göstermiştir. Kuru işlemeden kaynaklı deformasyon sonucu oluşan ilerleme çizgileri net bir şekilde görülmekte ancak artan kesme hızı ile azalmaktadır. Bu çalışmada frezeleme işleminde kesme hızının ve kesme ortamının işlenen parçanın yüzey kalitesi üzerine etkisi bulunmakta, ancak kesme hızının etkisi, kesme ortamına göre daha baskındır.
- Tornalama işlemi sonucu DNMG ve kaplamasız CBN kesici uçlar kullanılarak tornalama sonrası işlenen yüzeylerdeki aşınmalarda artan kesme hızı ile besleme izlerinin azaldığı ve daha iyi kalitede düzgün yüzeylerin elde edildiği belirlenmiştir. Gupta ve diğ., (2022) titanyum alaşımlarının tornalanması üzerine yaptıkları çalışmada, artan kesme hızı ile artan deformasyon sonucu talaşların daha kolay atıldığını ve yüzey kalitesinin daha iyi olduğunu açıklamışlardır. Günay (2016) ise düşük kesme hızında, işlenen parçadan çıkan talaşların kesici takıma yapışarak yığıntı talaş oluşturmasıyla kesilen yüzeyi bozduğunu belirtmiştir. Kaplamasız CBN kesici uçlarla elde edilen yüzeylerin kalitesi aynı kesme koşullarında DNMG uçla işlenmiş yüzeylerden nispeten daha düzgün ve yüzey aşınması daha azdır. Bu durum kesici takımdaki kaplamasının yerinden atıp kesici ucu ve dolayısıyla işlenen yüzeyi bozmasından kaynaklanmaktadır. Nahbani (2001) bu durumu kaplamalı takımların aşınma durumunda kopan kaplama yüzeylerinin işlene parçanın yüzey kalitesini bozmasıyla açıklamıştır.

## 5.5. TAKIM ÖMRÜ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Kullanım ömrünü tamamlamış bir kesici takım ile özellikle Ti6Al4V gibi pahalı ve işlenebilirliği zor bir malzemeyi işlemek yüzey kalitesini olumsuz etkiler ve tezgâha zarar verebilir. Bu yüzden takım ömrünün belirlenmesi talaşlı imalat süreçlerinde oldukça önemlidir. Takım ömrünü belirleyici unsur olarak literatürde kesici takım yüzey aşınması çoğunlukla kullanılmaktadır (Chowdhury, 2021; Rahman ve diğ., 2016; Çelik, 2018). Bu çalışmada da Ti6Al4V alaşımı parçaların delinmesi, frezelenmesi ve tornalanması sonrası kesici uçların kullanım ömrü kesici ucun aşınma süresi olan kesme süreleri, delme işleminde matkap ucu çapı ve soğutma ortamına, frezeleme işleminde kesme hızına, soğutma ortamına ve uç tipine, tornalama işleminde ise değişen kesme hızı ve farklı kesici uç kriterleri ele alınarak

değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçların literatür çalışmaları ile ele alınarak değerlendirilmesi aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Delme işlemi sonucu Ø7,5 mm çapında matkap uç ömürlerinin kuru ve kesme sıvısı kullanımında Ø8,4 mm çapında matkap uç ömürlerine göre daha uzun olduğu belirlenmiştir. Kuru ortamda delme her iki matkap ucunda da, kesme sıvısı kullanımına göre kesici ucun kullanım ömrünü azaltmıştır. Titanyum alaşımlarının düşük ısıl iletkenliklerinden dolayı oluşan ısının kesme alanında dar bir bölgede kalmasına neden olmaktadır. Yaşanan bu sorun delme işleminde diğer yöntemlere istinaden daha belirgindir. Çünkü talaşın delinen bölgeden tahliyesi zor ve yavaştır. Bu yüzden oluşan ısının çoğu kesme bölgesinde kalır ve matkap ucunun kullanım ömrünü azaltmaktadır (Çiftçi ve Gökçe, 2019). Bu bağlamda delinebilirlik üzerine kesici takım ömrü açısından sonuçlarımız önem taşımaktadır.
- Frezeleme işlemi tornalama ve delme işlemlerinden farklı olarak, kesici takımın ömrü kesici ucun iş parçasına defalarca temasından dolayı uçta oluşan deformasyon, çatlak ve kırıklara bağlıdır (Aykut ve diğ., 2007). Bu çalışmada frezeleme işlemi sonrası 50 m/dak ve 100 m/dak kesme hızlarında kesme sıvısı ile işlemede kesici uçların ömürleri kuru işlemeye göre daha yüksektir. Muthukrishnan ve Davim (2011) Ti6Al4V alaşımının işlenebilirliği üzerine yaptıkları çalışmada, takım ömrünün kesme sıvısı ile yaklaşık olarak %30 arttığını tespit etmişlerdir. Artan kesme hızı ile her iki kesme ortamında da kesici uç ömrünün arttığı tespit edilmiştir.
- Tornalama işlemi sonrası, kaplamasız CBN kesici uç ile tornalama sonrası kesici uç ömürlerinin kaplamalı DNMG kesici uç ile işlemeye göre daha uzun olduğu belirlenmiştir. Her iki uç ile tornalamada artan kesme hızı ile kesici uç ömrünün arttığı belirlenmiştir. Kesme hızının artmasıyla CBN kesici uçlarının ömürleri DNMG kesici uçlarının ömrüne göre artmıştır. Wong ve arkadaşları (2008) Ti6Al4V alaşımının işlenebilirlik çalışmalarında, artan kesme hızı ile takım ömrünün arttığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak tornalama işleminde artan kesme hızı ile ve kaplamasız CBN kesici uç kullanımı ile kesici takım ömürleri artmıştır. Kıvak ve Şeker (2015) Ti6Al4V alaşımının işlenmesi üzerine yaptıkları çalışmada kaplanmış uç kullanımında kesme işleminde yaklaşık %14 azalma olduğunu belirtmişlerdir.

# 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ti6Al4V alaşımı parçaların delinmesinde, frezelenmesinde ve tornalanmasında, farklı kesici uçlar, kesme parametreleri ve soğutma ortamları kullanılarak işlem sonucu çıkan talaşların morfolojileri, işlenen parçaların yüzey pürüzlülükleri, kesici uçların aşınma mekanizmaları, işlenen yüzeylerin görüntüleri ve kesici takım ömürlerinin detaylı bir şekilde incelenmesi ile elde edilen sonuçlar "Genel Sonuçlar" başlığı altında maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

Talaşlı imalat yöntemleri, hemen hemen tüm endüstri dallarında yaygın şekilde uygulama alanı bulan şekillendirme yöntemleridir. Üretim sanayinde kaliteden ödün vermeden maliyeti düşürmek temel hedeflerdendir. Talaşlı imalat işlemlerinde bu hedefe ulaşmak için kesici takım, kesme parametreleri, kesme ortamı, işlenen malzeme, işleme tezgâhı ve yan aparatları gibi konular üzerine yıllardır ülkemizde ve uluslararası bilimsel kurumlarda araştırma ve geliştirmeler yapılmaktadır. Her türlü talaşlı işlemede iyi bir işlenebilirlik için kesme şartlarının ve parametrelerinin optimizasyonu çok önemlidir. Ti6Al4V alaşımı gibi işlenmesi zor olan malzemelerin işlenebilirliğinin iyileştirilmesi için bundan sonra yapılacak çalışmalara öneriler "Çalışma Kapsamında Öneriler" başlığı altında maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

## 6.1. GENEL SONUÇLAR

- Delme işleminde talaş formu üzerine, kesme sıvısının etkisi matkap çapından daha belirgindir. Kesme sıvısı ile yapılan delme işlemlerinde, kabul edilebilir sınırın en altında kalan helisel talaş oluşumu gözlenirken, artan matkap çapı ve kuru kesme şartlarında istenmeyen talaş tipi olan burgu talaş oluşumu gözlenmiştir
- Frezeleme işleminde talaş formu üzerine, kesme hızının etkisi kesme ortamından daha belirgindir. 50 m/dak kesme hızıyla kuru işlemede kısa helisel, kısa boru ve kısa virgül şeklinde talaşlar; kesme sıvısı ile işlemede kısa helisel talaş oluşumu gözlenmiştir. 100 m/dak kesme hızıyla kuru işlemede karmaşık uzun spiral talaş, kesme sıvısı ile işlemede ise daha homojen ve kısa spiral talaş oluşumu gözlenmiştir.
- DNMG kesici uç ile tornalama işleminde talaş formu üzerine, kesme hızının aratmasının olumlu, ilerleme hızının artmasının olumsuz ve kesme derinliğinin artmasının az belirleyici etkileri olmuştur. CBN kesici uç ile tornalama işleminde kesme hızının artması ile talaş formunun iyileştiğini, ilerleme hızının artmasıyla şerit formdan, spiral

forma ve daha da artmasıyla helisel forma dönüştüğü ve kesme derinliğinin artmasıyla talaş formunun değişmediği belirlenmiştir.

- Delme işleminde düşük çap ve kesme sıvısı kullanımında daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. Kuru ortam ve artan matkap çapı ile delinen deliklerden talaşların çıkması zorlaşmış ve kesme alanı olumsuz etkilenmiştir.
- Frezeleme işleminde kesme hızının artmasıyla, yüzey pürüzlülük değeri azalmış ve kesme ortamının kurudan sıvıya geçmesi ile de yüzey özelliği iyileşmiştir.
- CBN ve DNMG kesici uçlar ile tornalama işleminde kesme hızının 30 m/dak'dan 40 m/dak'ya çıkarılması ile ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinde önemli bir değişiklik olmamıştır. Ancak 50 m/dak'ya çıkarıldığında ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinde azalma olmuştur. İlerleme hızının artması ile her iki kesici uç ile işlemede ortalama yüzey pürüzlülük değerlerinde önemli artış meydana gelmiştir. Kesme derinliğinin artmasıyla CBN kesici uçla işlenen yüzeylerin ortalama yüzey pürüzlülük değerinde artış olurken, DNMG kesici uçla işlenen yüzeylerin ortalama yüzey pürüzlülük değerinde bir değişim olmadığı belirlenmiştir.
- Delme işleminde kesme sıvı kullanılarak gerçekleştirilen delmede kesici uç aşınması azalmıştır. Artan matkap çapı ile her iki kesme ortamında da aşınma artmıştır. Tüm şartlarda oluşan aşınmaların matkabın kesici ağzının merkeze yakın olan bölgesinde yan yüzey aşınması şeklinde olduğu ancak kuru kesme şartlarında matkabı dış kısmında yakın bölgelerde kırılma ağzı şeklinde gerçekleştiği görülmüştür.
- Frezeleme işleminde, kesme sıvısı kullanımı ile sürtünmeden kaynaklı olumsuz etkiler ortadan kaldırılmıştır. Artan ilerleme hızı ile kesici uç aşınması azalmıştır. Kuru ortamda 50 m/dak kesme hızı ile frezeleme sonrası kesici takımın uç bölgesinde kırılma oluşmuştur. Kuru ve kesme sıvısı kullanılarak 100 m/dak kesme hızı ile frezelemede aşınmaların kesici kenarın serbest yüzeyinde oluştuğu belirlenmiştir.
- DNMG kesici uçlarla tornalamada kesme hızı arttıkça kesici uçlarda aşınma artmıştır. Bu aşınmalar kesici takımın kesme kenarı ve yan yüzeyinde sürtünme aşınması ile serbest yüzey aşınması olarak kendini göstermiştir. 50 m/dak kesme hızı ile tornalama sonrası DNMG kesi ucun burun kısmında kaplamanın kopmasıyla kırılma oluşmuştur. CBN kesici uçlarla tornalamada, DNMG kesici uçların tersine kesme hızı arttıkça kesici uçlarda aşınma azalmıştır. Kaplamasız CBN uçlarda kaplama kopması söz konusu olmadığından aşınma mekanizması takımın kesme bölgesinde serbest yüzey aşınması şeklinde kendini göstermiştir.

- Delme işleminde kesme sıvısının kullanımı delinen yüzeylere paralel olarak oluşan aşınma çizgileri arasındaki mesafeyi azaltmıştır. Artan matkap çapı ile aşınma çizgileri arasındaki mesafe artmıştır.
- Frezeleme işleminde kuru ortamda işleme sonucu elde edilen yüzeylerin sıvı ortamda işlenen yüzeylere göre tüm kesme hızlarında bozulduğu belirlenmiştir. Azalan kesme hızı ve kuru kesme ortamına geçişle işlenen yüzeyin bütünlüğü bozulmuş, aşınma izleri daha belirginleşmiştir. Kuru işlemelerde deformasyon sonucu oluşan ilerleme veya besleme çizgilerinin arasındaki tepeler net bir şekilde ortaya çıkmış ve artan kesme hızı ile azalmıştır.
- CBN kesici uçlarla tornalama sonrası elde edilen yüzeylerin kalitesi aynı şartlardaki DNMG uçla işlenmiş yüzeylerden nispeten daha düzgün ve yüzey aşınması daha azdır. Bu duruma neden olan etken, DNMG uç yüzeyindeki kaplamanın koparak işlenen yüzeyi bozması olarak belirlenmiştir. CBN kesici uçlar ile işlenmiş yüzeye yapışmış malzeme kalıntısı DNMG uçlara göre daha az olduğu görülmüştür. Her iki uçta da aşınma çizgileri birbirine paralel ve yaklaşık eşit aralıklarda olarak tespit edilmiştir.
- Delme işleminde kesme sıvısı kullanımı ve küçük matkap çapı, frezeleme işleminde kesme sıvısı kullanımı ve kesme hızının artması ve tornalama işleminde artan kesme hızı ile ve kaplamasız CBN kesici uç kullanımı ile kesici takım ömrü artmıştır.
- Titanyumun talaşlı işlenmesindeki en ciddi sorun işlem esnasında kesici uçta oluşan dar alana sıkışmış bölgesel sıcaklıktır. Bu çalışmada kesme sıvısı kullanımında bu sorunun yarattığı olumsuzluklar aşağı çekilmiştir. Isı dar bir alanda etkili olduğundan kesme sıvısı çok yayılmadan tam olarak kesme alanına verilmelidir.

## 6.2. ÇALIŞMA KAPSAMINDA ÖNERİLER

- Ti6Al4V alaşımının ısıl iletkenliği oldukça düşük olduğundan talaşlı işlemede ısının büyük bir bölümü kesme alanında kalarak kesici takımın ömrünü aşağı çekmektedir. Yeni bir teknik olan kesici takımlara buzul işlem uygulanması ile titanyum alaşımının işlenebilirliği araştırılabilir.
- Tüm talaşlı imalat yöntemlerinde kesici ucun işlenen malzemenin yüzey kalitesi üzerine rolü çok büyüktür. Farklı kesici uç malzemeleri ve farklı takım geometrilerine sahip talaş açılı veya talaş kırıcılı kesici takımlar ile işlenebilirliği araştırılabilir.
- Talaşlı imalat ile işlenen malzemenin mikroyapısal ve mekanik özellikleri işlenebilirlik üzerine oldukça etkili faktörlerdir. Titanyum allotropik özellik taşıyan yani farklı

sıcaklıklarda mikroyapısında farklı kristal yapılar içeren bir malzemedir. Alfa-beta alaşımı grubundan olan Ti6Al4V alaşımı da ısıl işleme çok uygundur. Çeşitli ısıl işlem yöntemleri ile Ti6Al4V alaşımının özellikleri değiştirilerek, bu değişimin işlenebilirlik özellikleri üzerine etkileri incelenebilir.

- Ti6Al4V alaşımı gibi talaşlı imalatta oluşan ısının kesici takım ucunda biriktiği malzemelerde, takım ucunda meydana gelen sıcaklığın ölçülerek işlenebilirliğinin değerlendirilmesi yapılabilir.
- Ti6Al4V alaşımının talaşlı işlenmesinde oluşan ısının daha etkin bir şekilde kontrol edilmesi için farklı kesme sıvıları, soğutucu ortamlar veya yağlayıcılar kullanılarak işlenebilirlik çalışmaları yapılabilir.
- Düşük elastisiteye sahip Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde karşılaşılan başka bir sorunda titreşimdir. Kötü yüzey kalitesi, aşırı gürültü, takım aşınması, düşük üretim hızı, takım tezgâhı kırılması, hurda artışı, enerji artışı ve yüksek maliyet, titreşimin getirdiği dezavantajlardır. Bu bağlamda işleme tezgâhının maruz kaldığı titreşim ölçümleri yapılarak işlenebilirlikle ilişkisi belirlenmelidir.

# KAYNAKLAR


Akdaş Y. F., Termal Oksidasyon Yöntemi ile Cp-Ti ve Ti6Al4V Alaşımının Yüzey Modifikasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 172142.

Aktaş, E., 2021, Çeliklerin talaşlı imalat prosesinde işlenebilirlik performansı ile işletme maliyeti optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Uşak Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Akyol, S., 2007, Ti6Al4V Titanyum Alaşımının İşlenebilirliğinin Isıl İşlem Yardımıyla Arttırılması, Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Amin, A.K.M.N., Ismail, A.F., Nor Khairusshima, M.K., 2007, Effectiveness of uncoated WC–Co and PCD inserts in end milling of titanium alloy—Ti–6Al–4V, *Journal of Materials Processing Technology*, 192-193, 147-158.

An, Q., Wang, C., Xu, J., Liu, P., Chen, M., 2014, Experimental investigation on hard milling of high strength steel using PVD-AlTiN coated cemented carbide tool, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 43, 94-101.

Andriya, N., Rao, P. V., Ghosh, S., 2012, Dry machining of Ti-6Al-4V using PVD coated TiAlN tools. In Proceedings of the World Congress on Engineering, London, UK, 4-6.

Arrazola, P. J., Garay, A., Iriarte, L. M., Armendia, M., Marya, S., Le Maître, F., 2009, Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555. 3). *Journal of materials processing technology*, 209 (5) , 2223-2230.

Aykut, Ş., Bagci, E., Kentli, A., Yazıcıoğlu, O., 2007, Experimental observation of tool wear, cutting forces and chip morpgology in face milling of cobalt based süper-alloy with physical vapour deposition coated and uncoated tool, *Materials & Design*, 28, 1880-1888.

Benardos, P. G., Vosniakos, G. C., 2003, Predicting surface roughness in machining: a review. *International journal of machine tools and manufacture*, 43(8), 833-844.

Bingul, E., Kacal, A., 2013, Hard turning of powder metallurgical cold work tool steel tempered in different tempering temperature, *Journal of Scientific and Industrial Research*, 72 (8), 498-505.

Bruschi, S., Bertolini, R., Bordin, A., Medea, F., Ghiotti, A., 2016, Influence of the machining parameters and cooling strategies on the wear behavior of wrought and additive manufactured Ti6Al4V for biomedical applications. Tribol. Int., 102: 133-142.

Boyer, R., Briggs, R.D., 2005, The use of titanium alloys in the aerospace industry, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 681-685.

Canter, N., 2009, The possibilities and limitations of dry machining. Tribology and Lubrication Technology, 40–44.

Cantero, J. L., Tardio, M. M., Canteli, J. A., Marcos, M. ve Miguelez, M. H., 2005, Dry drilling of alloy Ti–6Al–4V. *Int. J. of Mach. Tool. Manu*., 45(11): 1246-1255.

Campbell, F.C., 2006, Chapter 4 - Titanium, Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials, Elsevier Science, Oxford, p. 119-174.

Chunxiang, C., BaoMin, H., Lichen, Z., Shuangjin, L., 2011, Titanium alloy production technology, market prospects and industry development, *Materials and Design*, 32, 1684–1691.

Chowdhury, M. S. I., Bose, B., Rawal, S., Fox-Rabinovich, G. S., Veldhuis, S. C., 2021, Investigation of the Wear Behavior of PVD Coated Carbide Tools during Ti6Al4V Machining with Intensive Built Up Edge Formation. *Coatings*, 11(3), 266.

Corduan, N., Hirnbert, T., Poulachon, G., Dessob, M., Lambehn, M., Mgneau, J, Payod, B., 2007, Wear mechanisms of new tool materials for TiBAI4V high performance machining, *Journal of Materials Processing Technology*, 192-193; 281-286.

Çakır, M., 2006, Modern talaşlı imalat yöntemleri, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, ISBN: 975-591-979-1.

Çakıroğlu, R., Acır, A., 2013, Al2014 malzemesinin delinmesinde takım talaş ara yüzey sıcaklıkları ve kesme kuvvetinin Taguchi metodu ile optimizasyonu. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 10(2), 73-86.

Çelik, Y. H., Kılıçkap, E., 2018, Titanyum alaşımlarından Ti-6Al-4V'nın işlenmesinde karşılaşılan zorluklar: Derleme. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji, 6(1), 163-175.

Çiftçi, İ., Gökçe, H., 2019, Ti6Al4V Titanyum alaşımının delinmesinde delme yönteminin aşınmaya etkisinin incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 22(3), 627-631.

Darsin, M., Pasang, T., Chen, Z., 2017, Performance of TiAlN PVD Coated Carbide Drill when Drilling Titanium 6246 Alloy, MATEC Web of Conferences, doi: 10.1051/matecconf/20171090200.

Davim, J. P., 2008, *Machining: fundamentals and recent advances.* Springer Science & Business Media.

Davim, J. P., 2010, Surface integrity in machining (Vol. 1848828742). London: Springer.

Ensarioğlu, C., ve Çakır, M.C., 2005, Titanyum ve alaşımlarının işlenebilirlik etüdü, *Bölüm I. Mühendis ve Makina,* 46 (546), 36-46.

Eser, A., 2006, AA 6082 alüminyum alaşımlarında kesme parametrelerinin işlenebilirlik üzerine etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Erdi, O., 2012, Çelik Talaş Takviyeli Plastik Matrisli Kompozitin Düşük Hızlı Darbe Davranışı, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Ertunç, H. M., Sevim, İ., 2011, Kesici takımların aşınmasını gözlemleme üzerine yapılan çalışmalar. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(1), 55-62.

Ezugwu, E. O., 2005, Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *Int J Mach Tools Manuf* ,45 (12–13), 1353–1367.

Feldshtein, E., 2011, The influence of machining conditions on burr shapes when drilling reach-through holes in difficult-to-cut materials. *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 35(4), 75-83.

Gavas, M., Yaşar, M., Aydın, M., Altunpak, Y., 2013, Üretim yöntemleri ve imalat teknolojileri, Seçkin Yayıncılık San. ve Tic. A. Ş., Ankara, ISBN:978-975-02-2470-6.

Griffiths, B. J., 2001, Manufacturing surface technology, in: Surface integrity and functional performance, Penton Press. London.

Groover, M.P., 2010, Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems; 4th edn; John Wiley & Sons: New York, 585.

Gupta, M. K., Korkmaz, M. E., Sarıkaya, M., Krolczyk, G. M., ve Günay, M., 2022, In-process detection of cutting forces and cutting temperature signals in cryogenic assisted turning of titanium alloys: An analytical approach and experimental study. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 169, 108772.

Güney, M., 2016, Ti-6Al-4V'nin tornalanmasında takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğüne etki eden parametrelerin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi.

Gürbüz, H., Kafkas, F. ve Şeker, U., 2009, Kesici takıma farklı yöntemle uygulanmış kaplamaların kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisinin deneysel olarak araştırılması, International Advanced Technologies Symposium, Sayı 6, 27-32.

Habrat, W., Markopoulos, A. P., Motyka, M., ve Sieniawski, J., 2019, *Machinability*, Nanocrystalline Titanium, In: Garbacz, H., Semenova, I. P. (ed.), Bölüm 11, Elsevier, ISBN: 978-0-12-814599-9, 209-236.

Hasak, S. M. A, 2018, Cu-Ni-Mo alaşımlı demir toz metal malzemesinin işlenebilirlik performansının incelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Hourmand, M., Sarhan, A. A., Sayuti, M., ve Hamdi, M., 2021, A comprehensive review on machining of titanium alloys. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(8), 7087-7123.

https://www.yenasoft.com/urunlerimiz/esprit/freze/ (Erişim Tarihi: 10.05.2022).

https://metaldunyasi.com.tr/tr/guncel/120/aluminyum-islemede-iyilestirmeler.html (Erişim Tarihi: 10.05.2022).

https://www.kovokon.cz/en/services/cnc-turning/ (Erişim Tarihi: 10.05.2022).

Huang, P., Li, J., Sun, J., Zhou, J., 2013, Vibration analysis in milling titanium alloy based on signal processing of cutting force, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 64 (5–8), 613–621.

İşbilir, O., Ghassemieh, E., 2011, Finite element analysis of drilling of titanium alloy, Procedia Engineering, 10: 1877-1882.

Jaffery, S. I., Mativenga, P. T., 2009, Assessment of the machinability of Ti-6Al-4V alloy using the wear map approach. *Int J Adv Manuf Technol*, 40(7–8), 687–696.

Jahedi, M., Zahiri, S., Gulizia, S., Tiganis, B., Tang, C., Fraser, D., 2009, Direct manufacturing of titanium parts by cold spray. Material Science Forum, 618–619, 505–508.

Kadirgama, K., Noor, M. M., Zuki, M.N.N.M., Rahman, M.M., Rejab, M.R.M., Daud, R., ve Abou-El-Hossein, K.A., 2008, Optimization of surface roughness in end milling on mould aluminium alloys (AA6061-T6) using response surface method and radian basis function network, *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2(4), 209-214.

Kam, M. ve Şeremet, M., 2021, Experimental investigation of the effect of machinability on surface quality and vibration in hard turning of hardened AISI 4140 steels using ceramic cutting tools. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, *Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 235(5), 1565-1574.

Kaplan, B., Odelros, S., Kritikos, M., Bejjani, R. ve Norgren, S., 2018, Study of tool wear and chemical interaction during machining of Ti6Al4V, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 72, 253-256.

Kara, F., Aslantaş, K., Çiçek, A., 2010, Ortogonal kesme işleminde kaplama malzemesinin talaş morfolojisi üzerinde etkisinin araştırılması, 2. Uluslararası Tasarım ve İmalat Analiz Kongresi, 11-12 Kasım Balıkesir Türkiye, 95-104.

Katta, S. ve Chaitanya, G., 2017, Key improvements in machining of Ti6al4v alloy: A review. In AIP conference proceedings, (2017, July), (Vol. 1859, No. 1, p. 020048). AIP Publishing LLC.

Kasim, M.S., Che Haron, C.H., Ghani, J.A., Sulaiman, M.A., Yazid, M.Z.A., 2013, Wear mechanism and notch wear location prediction model in ball nose end milling of Inconel 718, Wear, 302, 1171-1179.

Kıvak, T. ve Şeker, U., 2015, Effect of cryogenic treatment applied to M42 HSS drills on the machinability of Ti-6Al-4V alloy. *Mater. Technol*, 49, 949-956.

Klocke, F., 2010, Simulation in manufacturing technology: lecture 8, principles of cutting, Fraunhofer Institute for Production Technology, Aachen.

Krishnaraj, V., Samsudeensadham, S., Sindhumathi, R. ve Kuppan, P., 2014, A study on high speed end milling of titanium alloy, *Procedia Engineering*, 97, 251-257.

Kumar, J.P. ve Thirumurugan, K., 2012, Optimization of machining parameters for milling titanium using taguchi. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 3, 108-113.

Küçükköse, M., 2017, aC: N/TiAlN kaplamaların karakterizasyonu ve aşınma davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Lazoglu, I., Ehsan Layegh Khavidaki, S., ve Mamedov, A., 2014, Mechanics of titanium machining. In Machining of titanium alloys, Springer, Berlin, Heidelberg, 57-78.

Leyens, C. ve Peters, M., 2006, Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications .John Wiley & Sons Media, 2-37.

Li, R., Shih, A. J., 2007, Tool temperature in titanium drilling, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 129, 740-749.

Li, R., Hegde, P., Shih, A. J., 2007, High-throughput drilling of titanium alloys. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47(1), 63-74.

Lindvall, R., Lenrick, F., M'Saoubi, R., Ståhl, J. E., ve Bushlya, V., 2021, Performance and wear mechanisms of uncoated cemented carbide cutting tools in Ti6Al4V machining. Wear, 477, 203824.

Livingston, J. J., 2011, The microstructural evaluation and constitutive analysis for a physical simulation of friction stir processing of Ti-6Al-4V, The Ohio State University.

Lütjering, G. ve Williams, J. C., 2007, Titanium: Edition:2 Springer Science & Business Media 15-18.

Matthew Jr, J. D., 2001, Heat treating titanium and its alloys. Heat Treat. Prog, 47, 47-57.

Motorcu, A. R., 2009, Nikel Esaslı Süperalaşımların ve Titanyum Alaşımlarının İşlenebilirliği 1. Bölüm: Sinterlenmiş Karbür Takımların Performanslarının Değerlendirilmesi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 25(1), 302-330.

Motorcu, A. R., 2010, Nikel Esaslı Süperalaşımların ve Titanyum Alaşımlarının İşlenebilirliği III. Bölüm: Kübik Bor Nitrür (CBN) Kesici Takımların Performanslarının Değerlendirilmesi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(3), 1-21.

Motyka M., Kubiak K., Sieniawski J. ve Ziaja W., 2012, Titanium Alloys – Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications, Editor: Amin N., Hot Plasticity of Alpha Beta Alloys, 1st ed., InTech, Rijeka, 87-116.

Muthukrishnan, N., Davim, P., 2011, Influence of coolant in machinability of titanium alloy (Ti-6Al-4V), *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*.

Nabhani F., 2001, Machining of Aerospace Titanium Alloys, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 17, 99-106.

Niknam, S. A., Khettabi, R., ve Songmene V., 2014, *Machinability and Machining of Titanium Alloys: A Review, Machining of Titanium Alloys*, Materials Forming, Machining and Tribology, In: Davim J.P., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2195-0911, 01-30.

Norberto López de Lacalle, L., Campa, F.J., Lamikiz, A., 2011, Chapter 3. Milling, Modern Machining Technology: A Practical Guide, Woodhead Publishing, p. 213-30.

Ohkubo C., Watanabe I., Ford J.P., Nakajima H., Hosoi T., Okabe T., 2000, The Machinability of Cast Titanium and Ti- 6Al-4V, *Biomaterials*, 21, 421-428.

Özçatalbaş, Y. (2002). Kesici takım aşınması ve iş malzemesi mekanik özelliklerinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerine etkisi. *Politeknik Dergisi*, 4(Özel Sayı), 47-52.

Özcatalbas, Y., 2003, Chip and built-up edge formation in the machining of in situ Al4C3–Al composite. *Materials & Design*, 24(3), 215-221.

Özçatalbaş, Y., 2014, Machinability of Elongated Coarse Grain Fe-Based Superalloys. *Machining Science and Technology*, 18(4), 626-637.

Özyürek D. ve Tekeli S., 2011, Wear Properties of Titanium and Ti6Al4V Titanium Alloy by Mechanical Milling, *High Temperature Materials and* Processes, 30, 175-180.

Pervaiz, S., Rashid, A., Deiab, I., Nicolescu, M., 2014, Influence of tool materials on machinability of titanium-and nickel-based alloys: a review. *Materials and Manufacturing Processes*, 29 (3), 219-252.

Pramanik, A., 2014, Problems and solutions in machining of titanium alloys. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 70 (5), 919-928.

Pramanik, A., ve Littlefair, G., 2015, Machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V)—theory to application. Machining science and technology, 19 (1), 1-49.

Quintana, G., Ciurana, J., 2011, Chatter in machining processes: a review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 51, 363–376.

Rahman Rashid, R. A., Palanisamy, S., Sun, S., ve Dargusch, M.S., 2016, Tool wear mechanisms involved in crater formation on uncoated carbide tool when machining Ti6Al4V alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83 (9), 1457-1465.

Ramesh, S., Karunamoorthy, L. ve Palanikumar, K., 2008, Surface roughness analysis in machining of titanium alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 23 (2), 174-181.

Rao, B., Dandekar, C.R., Shin, Y.C., 2011, An experimental and numerical study on the face milling of Ti–6Al–4V alloy: Tool performance and surface integrity, *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 294-304.

Rhim, S., Oh, S., 2006, Prediction of serrated chip formation in metal cutting process with new flow stress model for AISI 1045 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 171 (3), 417–422.

Ribeiro, M. V., Moreira, M.R.V., Ferreira, J.R., 2003, Optimization of titanium alloy (6Al–4V) machining, *Journal of Materials Processing Technology*, 143–144, 458–463.

Rotella, G., Dillon, O. W., Umbrello, D., Settineri, L. ve Jawahir, I.S., 2014, The effects of cooling conditions on surface integrity in machining of Ti6Al4V alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71 (1), 47-55.

Safari, H., Sharif, S., Izman, S., Jafari, H., 2015, Surface integrity characterization in high-speed dry end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78 (1), 651-657.

Sandvik, 2020, Cutting tools for rocks Turning RC 100/ Sandvik product catalogue

Šalak, A., Selecká, M., Danninger, H., 2005, Machinability of powder metallurgy steels, Cambridge Int Science Publishing, Cambridge UK, ISBN: 1-898326-82-7.

SenthilKumar, M., Prabukarthi, A.,Krishnaraj, V., 2013, Study on tool wear and chip formation during drilling carbon fiber reinforced polymer (CFRP)/titanium alloy (Ti6Al4V) stacks. *Procedia engineering*, 64, 582-592.

Sert, A., 2017, Ti6AI4V alaşımının buzul işlem uygulanmış WC-Co karbür takımlar ile talaşlı imalatının iyileştirilmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Sette, A.A.I., Diniz, A.E. Pederiva, R., 2010, Vibration analysis of cutting force in titanium alloy milling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50 (1), 65–74.

Sharif, S., Rahim, E. A., 2007, Performance of coated-and uncoated-carbide tools when drilling titanium alloy—Ti–6Al4V. *Journal of materials processing technology*, 185(1-3), 72-76.

Shokrani, A., Dhokia, V. ve Newman, S. T., 2016, Investigation of the effects of cryogenic machining on surface integrity in CNC end milling of Ti–6Al–4V titanium alloy. *J. Manuf. Process.*, 21, 172-179.

Strano, M., Albertelli, P., Chiappini, E., Tirelli, S., 2015, Wear behaviour of PVD coated and cryogenically treated tools for Ti-6Al-4V turning, *International Journal of Material Forming*, 8, 601-611.

Soren, T. R., Kumar, R., Panigrahi, I., Sahoo, A. K., Panda, A. ve Das, R.K., 2019, Machinability behavior of aluminium alloys: a brief study, *Materials Today: Proceeding*, 18, 5069-5075.

Sun, S., Brandt, M., Dargusch, M. S., 2009, Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of Titanium alloys, *Int J Mach Tools Manuf*, 49(7–8), 561–568.

Şahin, Y., 2001, Talaş kaldırma prensipleri II, Nobel Yayın Dağıtım Ltd. Şti., Ankara, ISBN:975-591-219-3.

Şahin, Y., 2003, Talaş kaldırma prensipleri I, Gazi Kitapevi Tic. Ltd. Şti., Ankara, ISBN:975-8640-57-7.

Şeremet, M. Ve Kam, M., 2019, AISI 4140 ıslah çeliğinin tornalama işleminde parametrelerin yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasına etkisi üzerine bir değerlendirme, Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi. 3-5 Kasım, Kocaeli, 2202-2209.

Tanga, W.X., Songa, Q.H., Yub, S.Q., Suna, S.S., Li, B.B., Dua, B., Aia, X., 2009, Prediction of chatter stability in high-speed finishing end milling considering multi-mode dynamics. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 2585–2591.

Taylan, F. ve Oral, N., 2018, Ti-6Al-4V Eli Malzemesinin Tornalama İşleminde Yüksek Basınçlı Jet Soğutmanın Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 10(1), 31-46.

Tekaslan, Ö., Gerger, N. ve Şeker, U., 2016, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerde kesme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüklerinin araştırılması, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10, 3-12.

Thepsonthi, T. ve Özel, T., 2012, Multi-objective process optimization for micro-end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63(9), 903-914.

Trent, E.M., Wright, P.K., 2000, Metal Cutting; 4th edn.; Butterworth-Heineman: Boston, MA.

Uzun G., Yaşar, S. A., Korkut, İ., 2017, Ti-6Al-4V Alaşımının delinmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvvetlerine ve delik kalitesine etkisinin incelenmesi, *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(2), 469-475.

Venugopal, K. A., Paul, S., Chattopadhyay, A. B., 2007, Tool wear in cryogenic turning of Ti-6Al-4V alloy. *Cryogenics*, 47(1), 12-18.

Veiga, C., Davim, J. P. ve Loureiro, J. R., 2012, Properties and applications of titanium alloys: a brief review, Advenced Study Center Co.Ltd., Portugal, 134-135.

Vipindas, K., Mathew, J., 2021, Analysis of chip morphology to understand the machining mechanism of micro end milling while machining Ti-6Al-4V. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7204-7209.

Yalçın B., 2007, Toz Metalurjisi Yöntemiyle İmal Edilen Titanyum Alaşımı İmplantların Temel Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 200076.

Yang, Z., Zhang, D., Yao, C., Ren, J., Huang, X., 2010, Surface integrity in high-speed milling of Titanium alloy TC11. In 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, 3334-3337.

Yavuz, M., Gökçe, H., Şeker, U., 2017, Matkap geometrisinin takım aşınması ve talaş oluşumu üzerine etkisinin araştırılması, *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi* (GMBD), 3(1), 11-19.

Yıldız H., 2010, Biyomedikal Uygulamalarda Kullanılan Ti6Al4V Alaşımının Yüzey Modifikasyonu ve İn Vitro Biyoaktivitesinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 295797.

Yiğit, C., 2020, Ti6Al4V Malzemesinin Farklı Geometrideki Matkaplarla Delinmesi Esnasında Matkap Sıcaklığının İncelenmesi, Yüksek lisans tezi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye.

Wang, B., ve Liu, Z., 2014, Investigations on the chip formation mechanism and shear localization sensitivity of high-speed machining Ti6Al4V. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(5), 1065-1076.

Wang, Z.G., Rahman, M., Wong, Y.S., 2005,Tool wear characteristics of binderless CBN tools used in high-speed milling of titanium alloys, *Wear*, 258; 752–758.

Wong. F. R., Sharif. S., Kamdani. K., Rahim. E. A., 2008, The effect of drill point geometry and drilling technique on tool life when drilling titanium alloy, Ti-6Al-4V, Proceedings of International Conference on Mechanical & Manufacturing Engineering (ICME2008), 21-23 May, Johor Bahru, Malaysia.

Zareena, A. R., Rahman, M. Wong, Y. S., 2001, High speed machining of aerospace alloy Ti6Al4V, International SAMPTE Technical Conference, (33); 739-750.

Zeyveli, M., Demir, H., 2009, AISI 01 soğuk iş takım çeliğinin işlenebilirliğinin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü açısından araştırılması, *Engineering Sciences*, 4 (3), 323-331.

Zhang, R., Li, A., ve Song, X., 2022, Surface quality adjustment and controlling mechanism of machined surface layer in two-step milling of titanium alloy. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1-17.

Zhu, Z., Sui, S., Sun, J., L,i J., Li, Y., 2017, S. Sui, J. Sun, J., Li, Y. Li, Investigation on performance characteristics in drilling of Ti6Al4V alloy, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, doi: 10.1007/s00170-017-0508-6.

Zurecki, Z., Ghosh, R., Frey, J.H., 2003, Finish turning of hardened powder metallurgy steel using cryogenic cooling, *2003 International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials*, Las Vegas,, 22-36.

# İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

Mustafa ERSOY Yüksek Lisans Tezi

ORİJİNALLİK RAPORU

| %20 | %18 | %5 | %6 |
|---|---|---|---|
| BENZERLİK ENDEKSİ | İNTERNET KAYNAKLARI | YAYINLAR | ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ |

BİRİNCİL KAYNAKLAR

| | | |
|---|---|---|
| 1 | acikbilim.yok.gov.tr<br>İnternet Kaynağı | %2 |
| 2 | acikerisimarsiv.selcuk.edu.tr:8080<br>İnternet Kaynağı | %2 |
| 3 | dspace.gazi.edu.tr<br>İnternet Kaynağı | %2 |
| 4 | imcofe.org<br>İnternet Kaynağı | %1 |
| 5 | docplayer.biz.tr<br>İnternet Kaynağı | %1 |
| 6 | iats17.firat.edu.tr<br>İnternet Kaynağı | %1 |
| 7 | dergipark.gov.tr<br>İnternet Kaynağı | %1 |
| 8 | dergipark.org.tr<br>İnternet Kaynağı | %1 |
| 9 | www.scribd.com<br>İnternet Kaynağı | %1 |

# ETİK KURUL İZİN YAZISI

**Uyarı:** Canlı denekler üzerinde yapılan tüm araştırmalar için Etik Kurul Belgesi alınması zorunludur.

☐ **Etik Kurul izni gerekmektedir.**

☒ **Etik Kurul izni gerekmemektedir.**

Mustafa ERSOY
(İmza)

# KURUM İZNİ YAZILARI

**Uyarı:** Canlı ve cansız deneklerle yapılan tüm çalışmalar için kurum izin belgelerinin eklenmesi zorunludur. Gizlilik ve mahremiyet içeren durumlarda kurum adı kapatılmalıdır.

☐ **Kurum izni gerekmektedir.**

☒ **Kurum izni gerekmemektedir.**

Mustafa ERSOY
(İmza)

# ÖZGEÇMİŞ

| Kişisel Bilgiler | |
|---|---|
| Adı Soyadı | Mustafa ERSOY |
| Doğum Tarihi | 09.01.1991 |
| Uyruğu | ☑ T.C. ❒ Diğer: |
| E-Posta Adresi | ersymustafa@gmail.com |
| Web Adresi | |



| Eğitim Bilgileri | |
|---|---|
| **Lisans** | |
| Üniversite | İstanbul Üniversitesi |
| Fakülte | Mühendislik Fakültesi |
| Bölümü | Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü |
| Mezuniyet Yılı | 2016 |
| **Yüksek Lisans** | |
| Üniversite | İstanbul Üniversitesi |
| Enstitü Adı | Mühendislik Fakültesi |
| Anabilim Dalı | Metalurji ve Malzeme Mühendisliği A.B.D. |
| Programı | Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı |

| Makale ve Bildiriler |
|---|
| • Beköz Üllen, N., Ersoy, M., The Characterization After Normalizing Treatment of Hot Forged 16MnCr5 and 20MnCr5 Cementation Steels, IMMC2021-International Metallurgy and Materials Congress, 10 - 12 Haziran 2021, ss.151-154.<br>• Beköz Üllen N., Ersoy M. , "Achievable properties after different heat treatments of low alloy steel produced by powder metallurgy", PPM 2015 International Porous and Powder Materials Symposium and Exhibition, İZMİR, TÜRKİYE, 15-18 Eylül 2015, pp.472-477<br>• Beköz Üllen N., Ersoy M. , "MAG Kaynağı ile Birleştirilen Makina Parçalarının Mikroyapısal Özellikleri Üzerine Isıl İşlemin Etkisi", 4. Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Sergisi, GAZİANTEP, TÜRKİYE, 11-13 Mayıs 2016, pp.1604-1612<br>• Beköz Üllen N., Ersoy M. , "Toz Metal Dişlilerin Aşınma Davranışı Üzerine Farklı Isıl İşlem Proseslerinin Etkisi", 16. Uluslararası Malzeme Sempozyumu, DENİZLİ, TÜRKİYE, 12-14 Ekim 2016 |