MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ti-5553 ALAŞIM MALZEMESİNİN FARKLI KESME KOŞULLARINDA İŞLENEBİLME PERFORMANSI

ARMIN GHARIBI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2018

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ti-5553 ALAŞIM MALZEMESİNİN FARKLI KESME KOŞULLARINDA İŞLENEBİLME PERFORMANSI

ARMIN GHARIBI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2018

MARMARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Armin GHARIBI'nin "Ti-5553 Alaşım Malzemesinin Farklı Kesme Kosullarında İşlenebilme Perfoımansı" başlıklı tez çalışması, 12.04.2018 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Doç.Dr. Yusuf KAYNAK (Danışman)
Marmara Üniversitesi Teknoloji Fak. Makine Müh. Bölümü .....

Prof.Dr. Erhan ALTAN (Üye)
Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Fak. Makina Müh. Bölümü .....

Prof. Dr. Mustafa BAKKAL (Üye)
İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fak. Makina Müh. Bölümü .....

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 21.05.2018 tarih ve 2018/13-02 sayılı kararı ile Armin GHARİBİ'nin Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Bülent EKİCİ

ÖNSÖZ

Herşeyden önce bana ileri düzey de araştırmalar yapmam için sonsuz imkanlar ve akademik destekler sağlayarak, Marmara Ünivesitesinde Lisans Üstü çalışmalar yapmama imkan sağladığı için tez danışmanım Sayın **Doç. Dr. Yusuf KAYNAK** Hocama çok teşekkür ederim.

Ayrıca tezimin deneyleri ve analizlerinde hiç yorulmadan yanımda olması ve bana verdiği yardımlar ve destekler için Sayın **Emre TAŞCIOĞLU**'na sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışma, **214M068** numaralı TÜBİTAK ARDEB Projesi kapsamında desteklenmiştir. TÜBİTAK ARDEB'e desteğinden dolayı çok teşekkür ederim.

Son olarak Babam **MANOUCHEHR**, Annem **ROGHAYYEH**, Kardeşim **AZİN** ve hayat arkadaşım **NASİM**' den beni bu yolda herzaman destekledileri ve motive ettikleri için ve bu yoldaki kolaylıkları ve zorlukları benimle yaşadıkları ve her zaman sabır gösterdikleri için derin sevgilerimi iletiyorum ve onların ailesinden bir parça olduğum için gurur duyuyorum ve onların başarasını Tanrı'dan istiyorum.

Tanrıdan bu yolda kazandığım bilgiler ve tecrübeleri insanlığa hizmet etmek, dünyada barışı arttırmak ve savaşı yok etmek için kullanmama yardımcı olmasını diliyorum.

"Her yerde barış olması dileğile"

Mart 2018 **Armin GHARIB**

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ..... **i**
İÇİNDEKİLER ..... **iii**
ÖZET ..... **v**
ABSTRACT ..... **vi**
TABLO LİSTESİ ..... **ix**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **x**
1. LİTERATÜR ÖZETİ **1**
1.1 Ti-5553 Alaşım Malzemesi ve Özellikleri 1
1.2 Ti-5553 Alaşımların Talaşlı İmalatı 5
1.3 Literatür Değerlendirmesi 6
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **7**
2.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan İş Malzemesi, Teknik Ekipmanlar ve Özellikleri 7
2.1.1 Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr Alaşım Malzemesi 7
2.1.2 CNC Tezgahı, Tutucular ve Kesici Takımlar 9
2.1.3 Soğutucu ve Yağlayıcılar 11
2.2 Kesme Parametreleri 12
2.3 Ölçümler ve Analizler 14
2.3.1 Kesme Kuvvetleri 14
2.3.2 Sıcaklık Ölçümü 15
2.3.3 Takım Aşınması Ölçümü 16
2.3.4 İş Parçası Boyutsal Doğruluğu Ölçümü 16
2.3.5 İşlenmiş Parçaların Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü 18
3. ÖN DENEYSEL ÇALIŞMALAR: KESME PARAMETRELERİNİN ETKİSİ **19**
3.1 Kuru Kesmede Kesme Parametrelerinin Etkisi 19
3.1.1 Talaş Sıcaklığı 19
3.1.2 Aşınma 22
3.1.3 Kesme Kuvvetleri 33
3.1.4 Talaş Kırılabilirliği 35
3.1.5 Yüzey Pürüzlülüğü 39
3.1.6 Değerlendirme ve Tartışma 41
3.2 Kesme Sıvısının Uygulanmasında Kesme Parametrelerinin Etkisi 42
3.2.1 Aşınma 43
3.2.2 Kesme Kuvvetleri 46
3.2.3 Talaş Kırılabilirliği 47

3.2.4 İş Parçası Yüzey Kalitesi....48
3.2.5 Kuru Kesme ve Kesme Sıvısında Elde Edilen Bulguların Kıyaslanması ve Değerlendirme....49
3.3 Minimum Miktarda Yağlamada Debinin Etkisi....51
3.4 Yüksek Basınçlı Soğutmada Basıncın Etkisi....54
3.4.1 Kesme Kuvvetleri....54
3.4.2 Kesici Takım Aşınması....56
3.4.3 Yüzey Pürüzlülüğü....61
3.4.4 Talaş Kırılabilirliği....62
3.4.5 Değerlendirme ve Tartışma....64
4. KESME PERFORMANSI VE TAKIM ÖMRÜ ÇALIŞMASI....65
4.1 Eğik Kesmede Soğutucu ve Yağlayıcıların Ti-5553 Alaşımın İşlenebilme Performansına Etkisi....65
4.1.1 Talaş Kaldırma Sıcaklığı....65
4.1.2 Kesici Takım Aşınması....67
4.1.3 Kesme Kuvvetleri....79
4.2 Takım Ömrü deneyleri ve Analizleri....87
4.2.1 Takım Aşınması....87
4.2.2 Takım Ömrü....93
4.3 Değerlendirme ve Tartışma....96
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER....99
KAYNAKLAR....102
ÖZGEÇMİŞ....106

Tİ-5553 ALAŞIM MALZEMESİNİN FARKLI KESME KOSULLARINDA İŞLENEBİLME PERFORMANSI

ÖZET

Bu projede yeni nesil Ti-5553 havacılık alaşım malzemesinin yüksek kesme hızlarıda dahil olmak üzere geniş kesme hızı aralığında talaşlı imalat sürecinde farklı soğutucu ve yağlayıcıların iş parçasının işlenebilme performansına etkisi araştırılmıştır.

İşlenebilme performansı çalışmaları kapsamında farklı kesme parametreleri ve kesme koşulları test edilmiştir. Özellikle kesme hızının ve kriyojenik, Minimum miktarda yağlama (MQL), yüksek basınçlı soğutma (HPC) ve kesme sıvısı gibi kesme koşullarının kesme kuvvetleri, kesme sıcaklıkları, takım aşınması ve ömrü, talaş kırılabilirliği ve morfolojisi gibi çıktılara etkileri araştırılmıştır. Özellikle bu koşulların yüksek kesme hızlarında malzemenin işlenebilme performansına etkisi araştırılmıştır. Yüksek basınçlı soğutma sisteminin yüksek kesme hızlarında dahi Ti-5553 alaşımın işlenebilme performansını diğer koşullara nazaran önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür. Kesme parametrelerinden kesme hızı kadar kesme derinliğinin de kritik bir rolünün olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ti-5553, Talaşlı imalat performansı, Soğutucu ve yağlayıcılar

MACHINING PERFORMANCE OF Tİ-5553 ALLOY UNDER VARIOUS CUTTING CONDITIONS

ABSTRACT

In this project, the effects of various cooling and lubrications under wide range of cutting speeds including high speed cutting on machining performance and surface integrity of Ti-5553 new generation aerospace alloys.

Machining performance of this alloy were tested considering various cutting parameters and conditions. In this particular, the effects of cutting speed and dry, MQL, flood cooling, cryogenic and high-pressure coolant on machining performance of this Ti-5553 alloy by measuring cutting forces, cutting temperature, cutting tool wear, tool life, chip breaking etc. were investigated. The influence of these conditions on machining performance of this alloy at high speed cutting was the focus of this research. This study showed that high pressure coolant applications provides important opportunity to improve machining performance of this alloy as compared with other conditions by substantially increasing tool life. Besides, depth of cut is found as critical factor as cutting speed by affecting machining performance.

.

Keywords: Ti-5553, Machining performance, Cooling and lubricant

SEMBOLLER

F_c : Kesme kuvveti

F_r : Radyal kuvvet

F_f : İlerleme kuvveti

R_a : Ortalama yüzey pürüzlülüğü

V_c : kesme hızı

a_p : kesme derinliği

f : ilerleme

VB_{max} : maksimum serbest yüzey aşınması

VB_c : ortalama burun yarıçapı

r_c : kesici takım burun yarıçapı

l_c : temas uzunluğu

W : malzemenin hacimsel aşınması

K : Archard aşınma katsayısı

F : Temas kuvveti

L : Kesme uzunluğu

H : Malzeme sertliği

KISALTMALAR

BCC **:** Hacim merkezli kristal yapı

HCP **:** sıkı paket hegzagonal

SEM **:** Taramalı elektron mikroskobu

HPC **:** Yüksek basınçlı soğutma

MQL **:** Minimum miktarda yağlama

BUE **:** Yığma ağız

MRR **:** Birim zamanda kaldırılan hacim

EDX **:** X-Ray difraksiyonu

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Ti-5553 malzemesinin yüzdesel kimyasal kompozisyonu 8
Tablo 2.2. Ti-5553 malzemesine ait mekanik özellikleri 8
Tablo 2.3. Eğik kesmede kullanılan kesici takım ve takım tutucu özellikleri 10
Tablo 2.4. Kuru kesme için belirlenen kesme koşul ve parametreleri 12
Tablo 2.5. Kesme sıvısı için belirlenen kesme koşul ve parametreleri 12
Tablo 2.6. MQL debisinin işleme performansına etkisinin tayini için belirlenen kesme parametreleri.13
Tablo 2.7. Farklı basınçların işleme performansına etkisinin belirlenmesi için yapılan testte kullanılan kesme parametreleri 13
Tablo 2.8. Farklı kesme koşullarında deneyler için belirlenen kesme koşul ve parametreleri. 13
Tablo 2.9. Takım ömrü testleri için belirlenen kesme koşul ve parametreleri. 14

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 α ve β titanyum alaşımların kafes yapısı [6] 1
Şekil 1.2 (a) Uçak motoru ve (b) iniş takımları [12,14] 2
Şekil 1.3 Boeing 787 iniş takımlarında Ti-5553 alaşımın kullanım alanları [15] 3
Şekil 1.4 Boeing 787 iniş takımlarında Ti-5553 alaşımın kullanım alanları [17] 3
Şekil 1.5. Ti-64 ve Ti-5553 alaşımların faz diyagramı[20] 4
Şekil 1.6. Ti 5553 alaşım malzemelerinin TTT diyagramı [24] 4
Şekil 2.1 Ti-5553 alaşım malzemesi 7
Şekil 2.2. a)Ø63x100 mm iş parçası, b) dilimlenme işlemi sonrası, c)oluşturulan numuneler 7
Şekil 2.3. (a) sıcak haddelenmiş Ti-5553 iş parçası malzemesinin optik mikroskop, (b) taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri, ... 8
Şekil 2.4'de işlem görmemiş Ti-5553 alaşım malzemesinden alınan numunenin kristalografik dokusunu temsil eden faz pikleri, bölgeleri ve düzlemleri (miller indisleri) yer almakŞekil 2.4. İş parçasının (Ti-5553 alaşımının) işlem görmemiş haline ait XRD sonucu 8
Şekil 2.5. eğik kesme operasyonunda kullanılan kesici takım ve takım tutucunun görüntüsü 10
Şekil 2.6. eğik kesmede kullanılan kesici takım..... 10
Şekil 2.7. Ti-5553 malzemesinin farklı soğutcu ve yağlayıcılarla eğik kesme tornalama operasiyonunda deney ve ölçüm düzeneği 11
Şekil 2.8. a) Dinamometre ve kesici takım tutucu sisteminin fotografı, b) amplifikatör ve veri toplayıcı 14
Şekil 2.9. Eğik kesmede ölçülen kuvvetlerin şematik gösterimi 15
Şekil 2.10. (a) İnfrared kamera, (b) eğik kesmede kamera pozisyonu, (c) yazılımdan alınan görüntü . 15
Şekil 2.11. Fırında ısıtılmış Ti5553 malzemesi 16
Şekil 2.12. 0.63 emissivity değerinde termal kamera ve termokupl'un ölçtüğü değerler 16
Şekil 2.13. Çapsal sapmaların ölçümünde kullanılan CMM cihazı ve ölçüm düzeneği 17
Şekil 2.14. CMM'de iş parçası numunesinden alınan ölçümlerin şematik gösterimi 17
Şekil 2.15. Deneylerde kullanılan yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı 18
Şekil 3.1. Kuru kesme koşulunda kesme derinliği 0.8 mm değerinde ölçülen maksimum sıcaklıklar . 20
Şekil 3.2. Kuru kesme koşulunda kesme derinliği 1.4 mm değerinde ölçülen maksimum sıcaklıklar . 20
Şekil 3.3. Kuru kesme koşulunda kesme derinliği 2 mm değerinde ölçülen maksimum sıcaklıklar 21
Şekil 3.4. 0.1 mm/dev ilerlemede kesici takımda oluşan serbest yüzey aşınması optik mikroskop görüntüleri 23
Şekil 3.5. Kuru kesme 0.1 mm/dev ilerlemede kesme derinliği ve kesme hızına bağlı olarak oluşan serbest yüzey aşınması 24
Şekil 3.6. 0.15 mm/dev ilerlemede kesici takımda oluşan serbest yüzey aşınma görüntüleri..... 25
Şekil 3.7. Kuru kesme 0.15 mm/dev ilerlemede, kesme derinliği ve kesme hızına bağlı olarak oluşan serbest yüzey aşınma miktarları 25

Şekil 3.8. 0.2 mm/dev ilerlemede kesici takımda oluşan serbest yüzey aşınmalarının optik mikroskop görüntüleri 26

Şekil 3.9. Kuru kesme 0.2 mm/dev ilerlemede, kesme derinliği ve kesme hızına bağlı olarak oluşan serbest yüzey aşınma miktarları 27

Şekil 3.10. İlerlemeye bağlı serbest yüzey aşınma grafikleri,(a) a_p= 2 mm,(b) a_p= 1.4 mm,(c) a_p= 0.8 mm..... 28

Şekil 3.11. 0.1 mm/dev ilerlemede kesici takımda oluşan burun aşınması görüntüleri 29

Şekil 3.12. Kuru kesme 0.1 mm/dev ilerlemede, kesme derinliği ve kesme hızına bağlı olarak oluşan burun aşınması miktarları 30

Şekil 3.13. 0.15 mm/dev ilerlemede kesici takımda oluşan burun aşınması görüntüleri 31

Şekil 3.14. Kuru kesme 0.15 mm/dev ilerlemede, kesme derinliği ve kesme hızına bağlı olarak oluşan burun aşınması miktarları 31

Şekil 3.15. 0.2 mm/dev ilerlemede kesici takımda oluşan burun aşınması görüntüleri 32

Şekil 3.16. Kuru kesme 0.2 mm/dev ilerlemede, kesme derinliği ve kesme hızına bağlı olarak oluşan burun aşınması miktarları 32

Şekil 3.17. 0.8 mm sabit kesme derinliği değerinde ölçülen ortalama kesme kuvvetleri..... 34

Şekil 3.18. 1.4 mm sabit kesme derinliği değerinde ölçülen ortalama kesme kuvvetleri..... 34

Şekil 3.19. 2 mm sabit kesme derinliği değerinde ölçülen ortalama kesme kuvvetleri..... 35

Şekil 3.20. 0.1 mm/dev ilerleme ve farklı kesme hızı ve derinliğinde elde edilen talaşların fotoğrafları 36

Şekil 3.21. 0.15 mm/dev ilerleme ve farklı kesme hızı ve derinliğinde elde edilen talaş fotoğrafları .. 37

Şekil 3.22. 0.2 mm/dev ilerleme ve farklı kesme hızı ve derinliğinde elde edilen talaşların fotoğrafları 38

Şekil 3.23. Kuru kesme 0.8 mm sabit kesme derinliğinde elde edilen aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri 39

Şekil 3.24. Kuru kesme 1.4 mm sabit kesme derinliğinde elde edilen aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri 40

Şekil 3.25. Kuru kesme 2 mm sabit kesme derinliğinde elde edilen aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri 40

Şekil 3.26. Farklı ilerleme ve kesme derinlikleri için hesaplanan talaş kesit alanları 42

Şekil 3.27. Kesme sıvısı koşullarında farklı kesme hızı,kesme derinliği ve ilerlemede kesici takım serbest yüzey aşınmasının optik mikroskop görüntüleri 43

Şekil 3.28. Kesme sıvısı koşullarında kesme hızı ve ilerlemenin kesici takım serbest yüzey aşınmasına etkisi (a_p= 0.8 mm) 44

Şekil 3.29. Kesme sıvısı koşullarında kesme hızı ve ilerlemenin kesici takım serbest yüzey aşınmasına etkisi (a_p= 2 mm) 44

Şekil 3.30. Kesme sıvısı koşullarında kesme hızı,kesme derinliği ve ilerlemenin kesici takım serbest yüzey aşınmasına etkisi 45

Şekil 3.31. Kesme sıvısı koşullarında kesme hızı ve ilerlemenin kesici takım burun aşınmasına etkisi (a_p= 0.8 mm) 45

Şekil 3.32. Kesme sıvısı koşullarında kesme hızı ve ilerlemenin kesici takım burun aşınmasına etkisi (a_p= 2 mm) 46

Şekil 3.33. Kesme sıvısı koşullarında farklı kesme hızı ve ilerlemenin kesme kuvvetlerine etkisi (a_p= 0.8 mm) 46

Şekil 3.34. Kesme sıvısı koşullarında farklı kesme hızı ve ilerlemenin kesme kuvvetlerine etkisi (a_p= 2 mm) 47

Şekil 3.35. Farklı kesme derinliğinde kesme sıvısı koşullarında farklı kesme hızı ve ilerlemenin talaş kırılabilirliğine etkisi 48

Şekil 3.36. 0.8 mm kesme derinliğinde kesme sıvısı koşullarında farklı kesme hızı ve ilerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (a_p= 0.8 mm) 49

Şekil 3.37. 0.8 mm kesme derinliğinde kesme sıvısı koşullarında farklı kesme hızı ve ilerlemenin kesme pürüzlülüğüne etkisi (a_p= 2 mm) 49

Şekil 3.38. 0.8 mm kesme derinliğinde kesme sıvısı ve kuru kesmede ölçülen serbest yüzey aşınması 50

Şekil 3.39. 0.8 mm kesme derinliğinde kesme sıvısı ve kuru kesmede ölçülen kesme kuvvetleri 50

Şekil 3.40. 0.8 mm kesme derinliğinde kesme sıvısı ve kuru kesmede işlenen parçaların aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü 51

Şekil 3.41. Farklı debilerde kesici takım serbest yüzey aşınmasına etkisi (V_c = 160 m/dak, a_p=1.4 mm, f=0.15 mm/dev) 52

Şekil 3.42. Minimum miktarda yağlama ön deneyleri akış oranı-yüzey pürüzlülüğü grafiği 53

Şekil 3.43. 21, 43,65 ml/h akış oranlarında elde edilen talaş görüntüleri 53

Şekil 3.44. 0.8 mm kesme derinliği ve farklı HPC basınçları ve kesme hızı değerlerinde ölçülen kesme kuvvetleri 55

Şekil 3.45. 2 mm kesme derinliği ve farklı HPC basınçları ve kesme hızı değerlerinde ölçülen kesme kuvvetleri 55

Şekil 3.46. 80 m/dak kesme hızı değerinde ve farklı talaş derinliğinde kesici takımda oluşan serbest yüzey aşınmasının optik mikroskop görüntüleri 56

Şekil 3.47. 160 m/dak kesme hızı değerinde ve farklı kesme derinliğinde kesici takımda oluşan serbest yüzey aşınmasının optik mikroskop görüntüleri 57

Şekil 3.48. 0.8 mm kesme derinliğinde kesme hızı ve HPC basıncına bağlı olarak oluşan serbest yüzey aşınması 57

Şekil 3.49. 2 mm kesme derinliğinde kesme hızı ve HPC basıncına bağlı olarak oluşan serbest yüzey aşınması 58

Şekil 3.50. 80 m/dak kesme hızı değerinde ve farklı kesme derinliğinde kesici takımda oluşan burun aşınması 59

Şekil 3.51. 160 m/dak kesme hızı değerinde ve farklı kesme derinliğinde kesici takımda oluşan burun aşınması 60

Şekil 3.52. 0.8 mm kesme derinliğinde kesme hızı ve HPC basıncına bağlı olarak oluşan burun aşınması 61

Şekil 3.53. 2 mm kesme derinliğinde kesme hızı ve HPC basıncına bağlı olarak oluşan burun aşınması 61

Şekil 3.54. 0.8 mm kesme derinliğinde kesme hızı ve HPC basıncına bağlı olarak ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri 62

Şekil 3.55. 2 mm kesme derinliğinde kesme hızı ve HPC basıncına bağlı olarak ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri 62

Şekil 3.56. Farklı kesme hızı ve kesme derinliğinde HPC basıncına bağlı olarak elde edilen talaş fotoğrafları 63

Şekil 3.57. Farklı kesme hızı ve kesme derinliğinde HPC basıncına bağlı olarak elde edilen talaş fotoğrafları 64

Şekil 4.1. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında talaştan ölçülen maksimum sıcaklıklar 67

Şekil 4.2. Farklı kesme hızlarına ve koşullarına bağlı olarak oluşan serbest yüzey aşınmasının optik mikroskop görüntüleri 68

Şekil 4.3. Farklı kesme koşullarında ve hızlarında kesici takım serbest yüzeyinde meydana gelen aşınma 69

Şekil 4.4. MQL ile talaş kaldırmada kullanılan kesici takım (V_c = 150 m/dak, f = 0.15 mm/dev, a_p =1,2 mm) 70

Şekil 4.5. Farklı kesme koşullarında ve hızlarında kesici takım burun bölgesinde oluşan aşınmanın optik mikroskop görüntüleri 71

Şekil 4.6. Kuru kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinden alınan SEM görüntüsü (V_c= 150 m/dak) 72

Şekil 4.7. Kuru kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinin EDS analizi 73

Şekil 4.8. MQL yardımıyla yapılan kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinden alınan SEM görüntüsü (V_c= 150 m/dak) 73

Şekil 4.9. MQL ile kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinin EDS analizi 74

Şekil 4.10. Kriyojenik kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinden alınan SEM görüntüsü (V_c= 150 m/dak) 75

Şekil 4.11. Kriyojenik ile kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinin EDS analizi 75

Şekil 4.12. Yüksek basınçlı Soğutma yardımıyla yapılan kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinden alınan SEM görüntüsü (V_c= 150 m/dak) 76

Şekil 4.13. Yüksek basınçlı Soğutma yardımıyla yapılan kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinin EDS analizi 76

Şekil 4.14. Kesme Sıvısı yardımıyla yapılan kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinden alınan SEM görüntüsü (V_c= 150 m/dak) 77

Şekil 4.15. Kesme Sıvısı yardımıyla yapılan kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinin EDS analizi 77

Şekil 4.16. Karbondioksit yardımıyla yapılan kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinden alınan SEM görüntüsü (V_c= 150 m/dak) 78

Şekil 4.17. Karbondioksit yardımıyla yapılan kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinin EDS analizi 78

Şekil 4.18. Kesme hızı ve kesme koşullarına bağlı olarak elde edilen ana kesme kuvvetleri 80

Şekil 4.19. Kesme hızı ve kesme koşullarına bağlı olarak elde edilen radyal kuvvetleri 81

Şekil 4.20. Kesme hızı ve kesme koşullarına bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvvetleri 81

Şekil 4.21. Farklı kesme hızları ve kesme koşullarında talaş oluşumu 83

Şekil 4.22. Farklı kesme hızları ve kesme koşullarında elde edilen talaşların morfolojisi 84

Şekil 4.23. Farklı kesme hızları ve kesme koşullarında elde edilen talaşların kalınlıkları 85

Şekil 4.24. Farklı kesme hızı ve kesme koşullarında yapılan testlerden elde edilen numunelerin ortalama çapsal sapmaları (f = 0.15 mm/dev, a_p=1.2 mm) 86

Şekil 4.25. Takım ömrü testlerinde farklı kesme koşullarında kesici takım serbest yüzeyindeki aşınma fotoğrafları (V_c = 120 m/dak, f = 0.15 mm/dev, a_p= 1.2 mm) 88

Şekil 4.26. Takım ömrü testlerinde yüksek Basınçlı Soğutma koşullarında kesici takım serbest yüzeyindeki aşınma fotoğrafları (V_c = 90 m/dak, f = 0.15 mm/dev, a_p= 1.2 mm) 89

Şekil 4.27. Takım ömrü testlerinde kuru kesme koşullarında kesici takım serbest yüzeyindeki aşınma fotoğrafları (V_c = 90 m/dak, f = 0.15 mm/dev, a_p= 1.2 mm) 90

Şekil 4.28. Kuru kesmede yapılan takım ömrü testinde çapak oluşumu (V = 90 m/dak, f = 0.15 mm/dev, a_p= 1.2 mm)..... 91

Şekil 4.29. Farklı kesme koşullarında yapılan takım ömrü test sonuçları (V_c = 90 m/dak, f = 0.15 mm/dev, a_p= 1.2 mm)..... 91

Şekil 4.30. Farklı kesme koşullarında yapılan takım ömrü test sonuçları (V_c = 120 m/dak, f = 0.15 mm/dev, a_p= 1.2 mm)..... 92

Şekil 4.31. Farklı kesme koşullarında yapılan takım ömrü test sonuçları (V_c = 120 m/dak, f = 0.15 mm/dev, a_p= 0.6 mm)..... 93

Şekil 4.32. Farklı kesme koşullarında yapılan takım ömrü testi sonuçları (V_c = 120 m/dak, f = 0.15 mm/dev, a_p= 0.6 mm)..... 94

Şekil 4.33. Farklı kesme koşullarında yapılan takım ömrü testi sonuçları (f = 0.15 mm/dev, a_p= 1.2 mm) 94

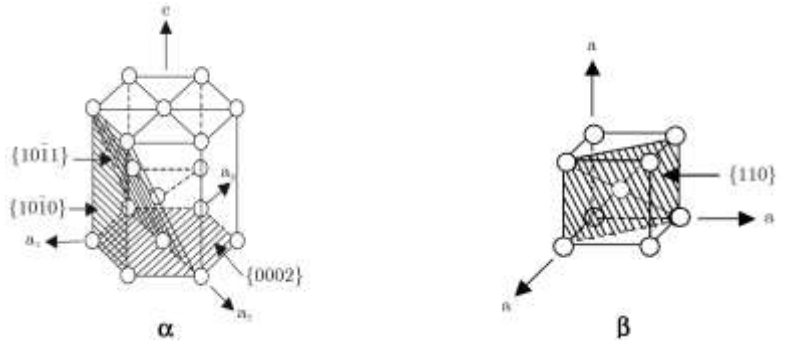
Şekil 4.34. Farklı kesme hızlarında ve koşullarda Ti-5553 alaşım malzemesinin işlenmesinde Taylor Takım Ömrü denklemi kullanılarak tahmin edilen takım ömürleri (f = 0.15 mm/dev, a_p= 1.2 mm).... 96

1. LİTERATÜR ÖZETİ

1.1 Ti-5553 Alaşım Malzemesi ve Özellikleri

Titanyum alaşımlar başta otomotiv, kimya, biyomedikal, havacılık endüstrisi olmak üzere gaz türbin motorları, nükleer atık depolama tankları, petrol rafineri, uçak motor bıçakları (compression blade) , uçak gövdesi, iniş takımları gibi yapısal komponentlerin üretilmesinde, yüksek mekanik özellikleri, hafiflik, yüksek korozyon direnci, kırılma tokluğu, yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruması gibi üstün özelliklerinden ötürü yaygın olarak kullanılırlar [1] [2]; [3], [4,5].

Saf titanyum allotropik özelliğe sahip olması dolayısıyla oda sıcaklığında α faz ve sıkı düzen hegzagonal (SDH) birim hücre yapıda iken, yüksek sıcaklıklarda (882 °C) β fazında ve hacim merkezli kübik (HMK) birim hücresi yapıda bulunmaktadır [6]. β faz hacim merkezli kübik (HMK) yapıya sahip titanyum alaşımları yüksek sıcaklıklarda kararlı mevcut kayma sistemine sahip olmaları dolayısıyla ikizlenme mekanizması çok sık görülmemektedir [6]. Titanyum alaşımlarında ikizlenme mekanizması (112) düzlemi ve [111] doğrultusunda gerçekleşmektedir [6]. α faz durumuna sahip Ti-64 alaşımın sahip olduğu sıkı düzen hegzagonal (SDH) kafes yapısına ait düzlemler bazal (0002) düzlemi, üç prizmatik $(10\bar{1}0)$ düzlem, altı $(10\bar{1}1)$ doğrusal piramit düzlem ve $[11\bar{2}0]$ doğrultusu iken, metastabil β Ti-5553 alaşımının kristal doğrultusu (110) düzleminde, [111] doğrultusundadır [7]. α ve β titanyum alaşımlarına ait kafes yapıları Şekil 1.1'de görülmektedir [6].

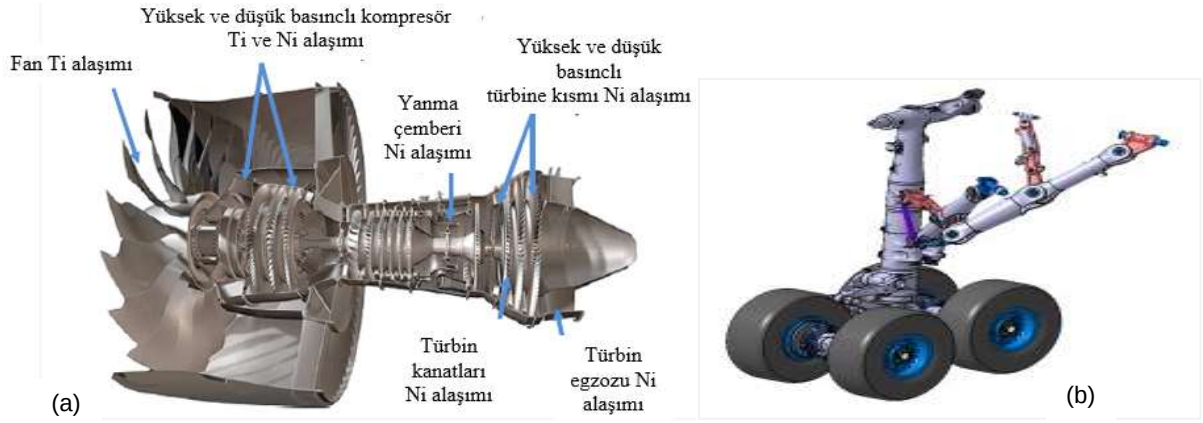


Şekil 1.1 α ve β titanyum alaşımların kafes yapısı [6]

Titanyum alaşımlarında yer alan elementler allotropik dönüşüm sıcaklığını ve alaşımın mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedirler [8].Titanyum alaşımları bileşimlerindeki

elementlere bağlı olarak α ve β olarak gruplandırılırlar. Al, Ga, Sn, Ge, La, O, N, B, C elementleri alaşım içerisinde α faz sabitleyici olarak yer alırken, Mo, V, Nb, Ta, Re, Fe, Cr, Ni, Cu, W, Co gibi elementler β faz sabitleyici olarak yer almaktadırlar [8];[2]. Ayrıca bileşimlerinde yer alan elementlerin yüzdece miktarı malzemenin mukavemet değerlerini ve dolayısıyla işlenebilirlik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Al elementi sertlik değerini etkilerken, Mo elementinin yüzde miktarı çekme dayanımını etkilemektedir [2]; [9]. Alaşımın mikroyapısı içerisinde ise α faz yoğunluğu kırılma tokluğu değerini doğrudan etkilerken, β fazına sahip tane içerisinde yer alan α fazlar çatlak oluşumunu ve ilerlemesini engelleyerek yapının yüksek tokluğa sahip olmasını sağlarlar [10].

Ti-5553 alaşım malzemeleri Boeing 787, Airbus A380 uçakları [8] başta olmak üzere havacılık sektöründe uçak iniş takımlarında kullanılmaktadırlar. Boing uçaklarında, uçak motor ve gövde kısımlarında bu malzemelerin yüzdece kullanım oranları sırasıyla % 18 ve 36'dır [11]. Boing'in yeni seri uçaklarından birisi olan Boing 787'de Ti alaşım malzemelerinin kullanım oranı artmıştır [12]. Bunun temel nedeni, Ti alaşım malzemelerinin sahip olduğu yüksek sıcaklık altında mukavemetini muhafaza etmesi, hafif olması, korozyona karşı direncinin yüksek olması, yorulma dayanımı gibi bazı önemli özellikleridir [1,13]. Bahsedilen özellikler bu malzemelerin havacılıkta ve uçaklarda, uçak motorları (Şekil 1.2a) ve iniş takımları (Şekil 1.2b) gibi en kritik yerlerde kullanılmalarını sağlamaktadır.

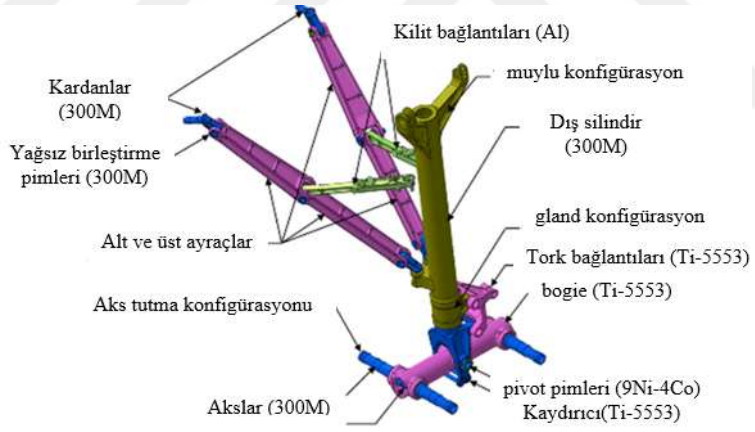


Şekil 1.2 (a) Uçak motoru ve (b) iniş takımları [12,14]



Şekil 1.3 Boeing 787 iniş takımlarında Ti-5553 alaşımın kullanım alanları [15]

Ti-5553 alaşımın Boeing 787 uçağı iniş takımlarında kullanıldığı parçalar detaylı olarak aşağıda Şekil 1.3'de sunulmuştur. Titanyum alaşımlarına, özellikle Ti-64 alaşımına alternatif olarak geliştirilen Ti-5553 alaşım malzemesi havacılıkta uçakların iniş takımlarında kullanılmaya başlanmıştır [16]. Şekil 1.4'de Ti-5553 alaşımın kullanıldığı iniş takımı görülmektedir.

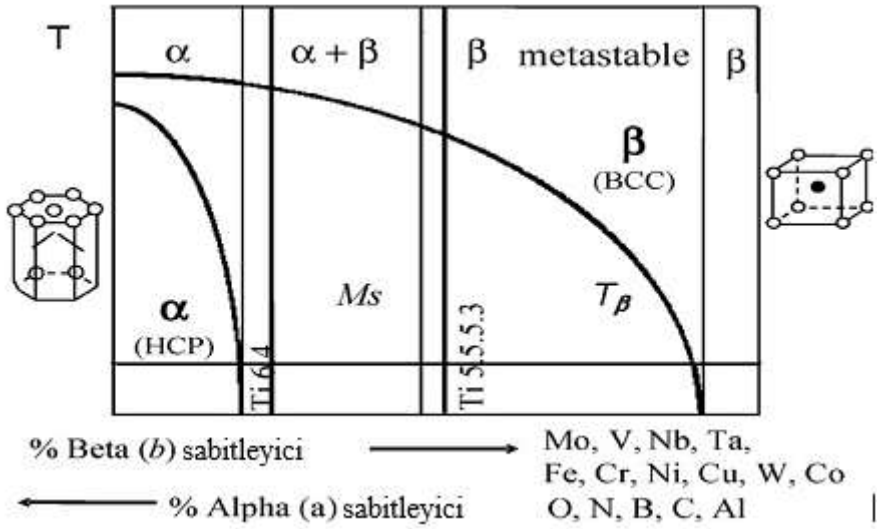


Şekil 1.4 Boeing 787 iniş takımlarında Ti-5553 alaşımın kullanım alanları [17]

Son zamanlarda özellikle havacılık sektöründe yüksek dayanım, kırılma tokluğu, uzun yorulma ömrü, hafiflik, düşük yakıt tüketimi ve emisyonunu, emniyet gibi kriterleri sağlamaları sebebiyle kullanım alanları artan bu malzemelerin performans özelliklerinin geliştirilmesi hususunda çalışmalar devam etmektedir [3].

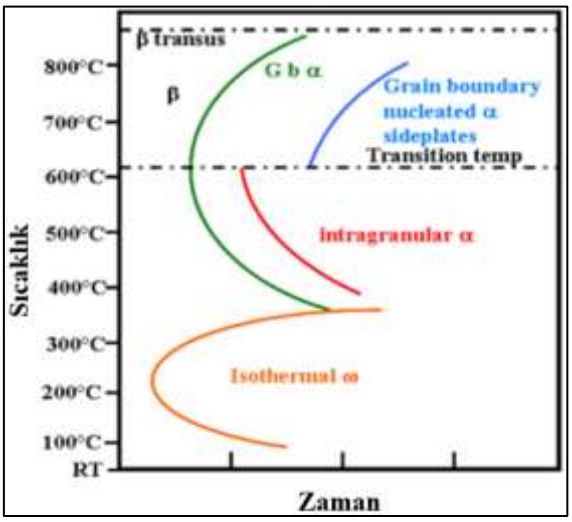
Havacılık endüstrisinde toplam titanyum ürünlerinin yaklaşık % 50 sini oluşturan ve bugün hala yaygın olarak kullanılmakta olan α+β Ti-64 alaşımı ve bu malzemeye alternatif olarak geliştirilen Ti-5553 alaşımlarına ait faz diyagramı Şekil 1.5'de gösterilmektedir. Ti-5553

alaşımının β faz dönüşüm sıcaklığı 850 °C [18] iken, Ti-64 alaşımı için bu değer 950-1000°C [19] aralığındadır.



Şekil 1.5. Ti-64 ve Ti-5553 alaşımların faz diyagramı[20]

Mekanik özelikler açısından değerlendirildiğinde Ti-5553 alaşım malzemesinin Ti-64 malzemesine göre çekme dayanımı %25, akma dayanımı %27, sertliği %18 daha fazladır [21]. İşlenebilirlik perspektifinden değerlendirildiğinde bu fark önemlidir çünkü Ti-64 malzemelerin işlenmesi esnasında 750-940 °C ısı oluşmakta ve α+β yapı korunmaktadır [22]. Ti-5553 alaşım Ti-64'e göre daha yüksek mekanik ve termal özellikleri dolayısıyla bu malzemenin talaşlı imalatı sırasında β dönüşüm sıcaklığı üzerinde daha yüksek ısı oluşumu gözlemlenebilir ve bu durum talaşlı imalatı sırasında malzemenin muhtemel faz dönüşümüne sebep olabilecektir [23]. Ti-5553 alaşım malzemelerine ait zaman sıcaklık dönüşüm (TTT) diyagramı Şekil 1.6'da verilmektedir.



Şekil 1.6. Ti 5553 alaşım malzemelerinin TTT diyagramı [24]

1.2 Ti-5553 Alaşımların Talaşlı İmalatı

α hekzagonal sıkı paket yapıdaki Ti 64 alaşımın yerine kullanılmaya başlanan bu malzemenin yüksek mekanik özelliklerinin yanı sıra tane boyutu, α-β fazlarının morfolojisi ve yüzdece bileşimi, oda sıcaklığın atomik dolgu faktörü %68 olan hacim merkezli kübik yapıda bulunması gibi mikroyapısal özellikleri işlenebilirlik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir [2]. Yapılan deneysel çalışmalarda Ti 5553 alaşımın işlenebilirliği Ti-6Al4V alaşıma göre yaklaşık %56 daha zor olduğu görülmüştür [2].

Bu malzeme düşük termal iletkenlik katsayısına sahip olmasından kaynaklı talaşlı imalatı sırasında kesici takım-talaş arayüzeyinde ısı transferi sınırlanır ve yüksek ısı oluşumu takım ömrünü azaltmakta buna ek olarak,düşük elastikiyet modülüne sahip olması, yüksek sıcaklılarda dayanımını koruması ve talaşlı imalat sürecinde pekleşme kabiliyeti sergilemesi talaşlı imalat açısından diğer olumsuz özellikler olarak göze çarpmaktadır [2,25]. Ti 5553 alaşım malzemesi bahsi geçen özelliklerinden dolayı "kesilmesi zor malzeme" grubunda yer alıp, talaşlı imalatında karşılaşılan en büyük zorluklar yüksek kesme hızlarında çalışılamaması, hızlı takım aşınması, kısa takım ömrü, yüksek kesme kuvvetleri oluşumu, yüksek dinamik yüklerin ve yüksek kesme sıcaklığının oluşması ve bütün bu tesirlerin sonucu yüksek talaş segmentasyon frekansı ve adyabatik kayma bandı oluşumu, iş parçasından kesici takıma yapışma eğiliminin artması olarak göze çarpmaktadır [25,26]. Talaşta yer alan adyabatik kayma bandı işleme sırasında ısı ve mekanik yükleri arttırarak difüzyon mekanizması ile talaş yüzeyinde hızlı aşınmaya yol açar [27]. Literatürde Ti-5553 alaşım malzemesinin işlenmesinde T-64 ile kıyaslandığında daha yüksek kesme kuvvetleri, daha fazla takım aşınması ve dolayısı ile daha kısa takım ömrü ve daha yüksek sıcaklıklar gözlemlenmiştir [2,27].

Bilindiği üzere talaşlı imalat sürecinde birçok mühendislik malzemesinin özellikle Ti alaşım malzemelerininde dahil olduğu işlenmesi zor malzemelerin takım aşınmasını ve kesme kuvvetlerini azaltmak suretiyle işleme performansını arttırmak için farklı yağlayıcı ve soğutucular literatürde ve endüstride yoğun olarak kullanılmaktadır. Özellikle işlenmesi zor malzemelerin talaşlı imalatında hiçbir yağlayıcı veya soğutucunun kullanılmadan (kuru kesme) talaş kaldırma uygulamaları endüstride yok denilecek kadar azdır. Literatüre bakıldığında, özellikle farklı yağlayıcı veya soğutucuların kullanılması ile takım ömründe ciddi iyileştirmeler olduğu aşikardır. Ti-5553 alaşımın talaşlı imalat sürecinde şimdiye kadar

yapılan çalışmalar daha çok problemlerin tespitine yönelik olup bu malzeme için bahsi geçen problemleri çözmeye yönelik yukarıda bahsedilen yağlama ve soğutma yöntemleri ile ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur.

Braham ve Ark. [28] Ti-5553 alaşımın işlenmesinde yüksek basınçlı soğutmanın kesme kuvvetleri, kesici takım aşınması, talaş kırılabilirliği gibi talaşlı imalat performansına etkisini incelemişlerdir. Yüksek basınçlı soğutma desteği ile özgül kesme kuvveti %23 azalmış, talaş kırılabilirliği artmış daha iyi bir yüzey kalitesi elde edilmiştir. Bu yöntem yüzey bütünlüğü karakteristikleri perspektifinden yüzey pürüzlülüğü değerini düşürmüştür [28]. Sun ve Ark. [27] bu malzemenin işlenmesinde karşılaşılan bahsi geçen sorunların çözümüne yönelik minimum miktarda yağlama (MQL) ve sıvı azot (LN_2) yöntemini kullanarak elde edilen bulguları geleneksel kesme sıvısı ile kıyaslayarak değerlendirmişlerdir. Kriyojenik yöntem, MQL ve kesme sıvısı yöntemlerine göre kesme kuvvetlerinde %30 azalmaya ve dolayısıyla daha az kesici takım aşınması elde edilmesini sağlarken MQL yöntemi diğer yöntemlere kıyasla kesme boyunca iş parçası sıcaklığını arttırarak daha yüksek süneklik oluşumu sağlayarak yüzey kalitesini geliştirmiştir [27]. Tarek Braham ve Ark [16] laser desteği ile ısıl yumuşa sağlayarak malzemenin işlenebilirlik özelliklerini geliştirmişlerdir.

1.3 Literatür Değerlendirmesi

Özellikle sahip oldukları üstün özelliklerden dolayı havacılıkta kullanılmaya başlanan bu malzemelerin talaşlı imalatı konusundaki çalışmalar yukarıda özet olarak sunulmuştur. Ancak çalışmaların bunlarla sınırlı olduğu düşünülmektedir. Bu anlamda halen bu konuda sistematik ve sonuç odaklı çalışmalar konusunda literatür yeterli noktaya henüz ulaşmamıştır. Özellikle Ti-5553 alaşımın işlenebilme performansına etki eden parametrelerin tayin edilmesi ve buna bağlı olarak çalışmaların devamı önemlidir. Örneğin farklı koşullarda takım ömrünün tayini aşınma ile iş parçası yüzey kalitesinin değişimi gibi hususlar önem arz etmekte olup, maalesef henüz literatürde yeterli çalışma yer almamıştır. Özellikle havacılık alaşımlarında yüzey bütünlüğü konusundaki çalışmaların ayrı bir önemi olduğu düşünülmektedir. İmalat sürecinin kontrolünde en önemli hususlardan biride imalatı yapılan parçanın güvenilirliğidir ki bunu belirleyecek ölçülebilen parametrelerden en önemlileri yüzey kalitesi parametreleri olarak değerlendirilebilir. Bu perspektiftende bakıldığında literatürdeki eksikliklerin halen var olduğu görülmektedir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan İş Malzemesi, Teknik Ekipmanlar ve Özellikleri

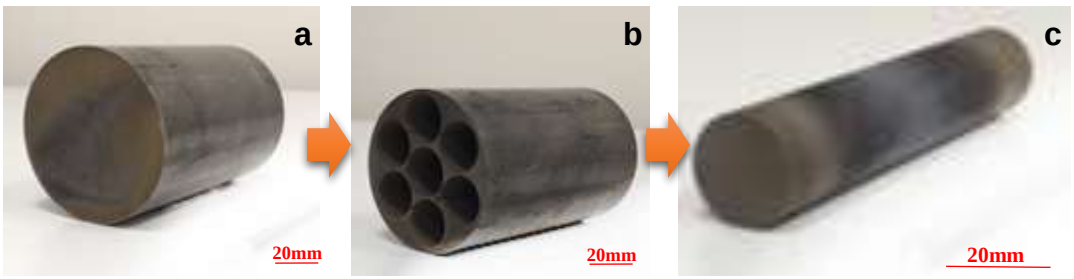
2.1.1 Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr Alaşım Malzemesi

Ø63 x 1000 mm boyutlarında 15 kg ağırlığında 4 adet Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr (Ti-5553) malzeme sıcak haddelenmiş olarak Amerikan menşeili Grandis Titanium firmasından temin edilmiştir. Ti-5553 alaşım malzeme Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 Ti-5553 alaşım malzemesi

İş parçası israfını minimize edebilmek için 63 mm çapında tedarik edilen bu parçalar, tel erezyon kullanılarak daha küçük boyutlarda numunelere dönüştürülmüştür. Böylece temin edilen malzeme ile daha fazla sayıda deney yapabilme imkanı elde edilmiş ve aynı zamanda fazla maliyetin önüne geçilmiştir. Ti-5553 alaşım malzemesi tornalama operasyonu eğik kesme deneyleri için Ø18.2x100 mm. Tel erezyon işleminden kaynaklı işleme izleri ve kalıntıların kesme esnasında neden olabileceği vibrasyonun önlenmesi maksadıyla boyutları Ø18.2x100 olan numuneler, Ø18x100 mm olacak şekilde 0.2 mm temizleme operasyonu uygulanarak tornalama işlemine tabii tutularak talaşlı imalat deneyleri için hazır hale getirilmiştir. Tel erozyon ile eğik kesme deneyleri için numune hazırlama aşamalarının fotografları Şekil 2.2'de görülmektedir.



Şekil 2.2. a) Ø63x100 mm iş parçası, b) dilimlenme işlemi sonrası, c)oluşturulan numuneler

Ti-5553 alaşım malzemesinin kimyasal kompozisyonu Tablo 2.1'de sunulmuştur.

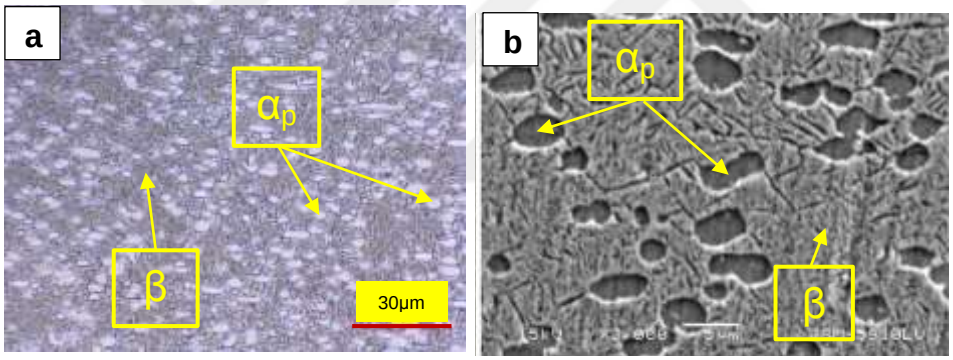
Tablo 2.1. Ti-5553 malzemesinin yüzdesel kimyasal kompozisyonu

İş parçası	**Al**	**V**	**Mo**	**Cr**	**Fe**
Ti-5553	5,532	4,96	5,09	2,96	0.34

Tablo 2.2. Ti-5553 malzemesine ait mekanik özellikleri

İş Parçası	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	% Uzama	Sertlik (HV)	Beta (β) fazına dönüşüm sıcaklığı (°C)	Isıl İletim Katsayısı (W/m°C)
Ti-5553	1171	1412	10	317±5	850	8

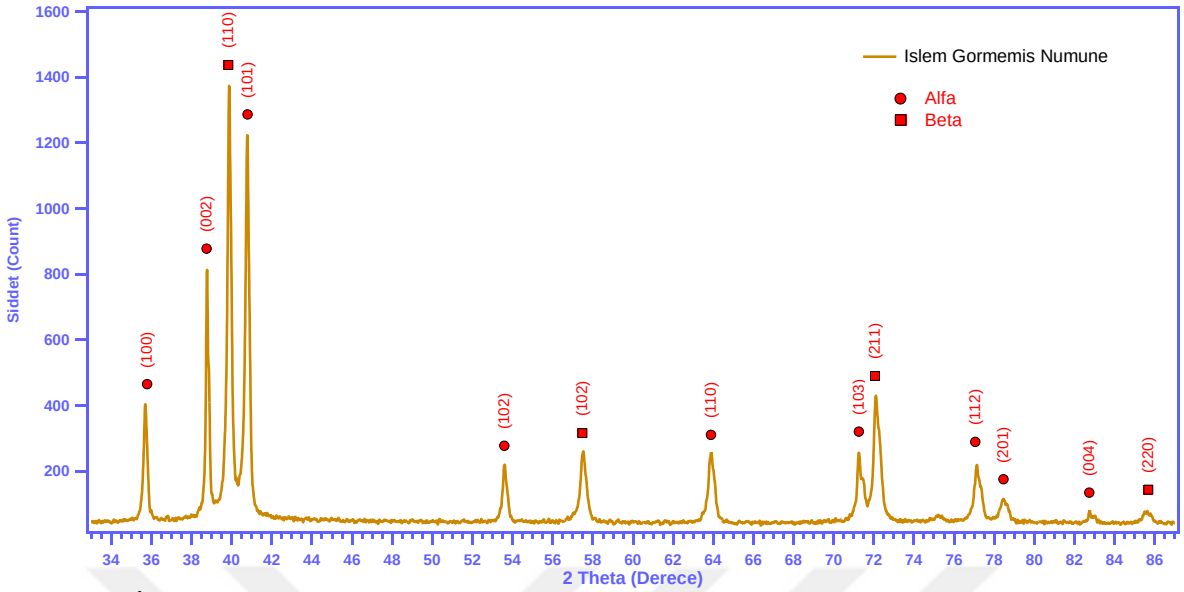
Ti-5553 numunelerinin talaş kaldırma operasyonu öncesi işlem görmemiş (as-received) mikroyapılarına ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 2.3 (a) 'da gösterilmektedir. Şekil 2.3 (b)' de Ti-5553 malzemesine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) yöntemi ile elde edilen mikroyapı görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 2.3. (a) sıcak haddelenmiş Ti-5553 iş parçası malzemesinin optik mikroskop, (b) taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri,

Ti-5553 alaşım malzemeleri yarı kararlı β alaşım grubundadır ve mikroyapı-özellik ilişkileri bakımından bimodal (BM) veya lamelli mikroyapılara sahip olabilmektedir [29-31]. Titanyum alaşımlarının mekanik özellikleri alaşımın kimyasal bileşimi ve bu elementlerin yüzdece miktarı ile [32] büyük ölçüde malzemenin tane boyutu, morfolojisi, α ve β fazların hacimsel miktarına, tanelerin mikroyapı içinde dağılımı ve oryantasyonu gibi mikroyapı karakteristiklerine bağlıdır [33-36].

Şekil 2.4'de işlem görmemiş Ti-5553 alaşım malzemesinden alınan numunenin kristalografik dokusunu temsil eden faz pikleri, bölgeleri ve düzlemleri (miller indisleri) yer almaktadır.

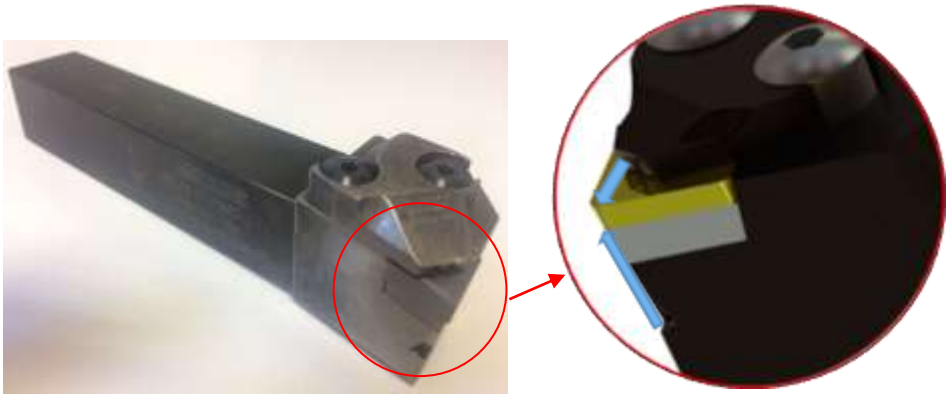


Şekil 2.4. İş parçasının (Ti-5553 alaşımının) işlem görmemiş haline ait XRD sonucu

2.1.2 CNC Tezgahı, Tutucular ve Kesici Takımlar

Deneysel çalışmada Doosan Puma GT2100 model maksimum 4500 RPM iş mili devrine,18.5 kW motor gücü ve 183 Nm torka sahip 8 inç aynalı CNC torna tezgahı kullanılmıştır. deneysel çalışmaların hepsinde aynı tezgah ve ekipmanlar kullanılmıştır. Ti-5553 alaşımının tornalama işlemi için kullanılan kesici takım tutucu Şekil 2.5'de gösterilmiştir. Tornalama operasyonunda PCLNL 2525M12 tip jet kateri kullanılmıştır. Şekil 2.5'de bu katerlerin fotoğrafları görülmektedir.

Titanyum ve alaşımlarının özelliklede Ti-5553 alaşımın farklı talaşlı imalat süreçlerinde kaplamalı (TiCN,TiAlN, vb) [27,37] ve kaplamasız kesici takımlar [38] kullanılmıştır. Her ne kadar Ti-5553 alaşımların talaş kaldırma operasyonunda kaplamalı kesici takımlar tercih edilmiş olsada, Ti-64 literatüründe kaplamasız takımlarda yoğun şekilde kullanılmaktadır [39]. Buna ek olarak Ti-5553 konusunda yapılan çalışmada [40] kaplamalı takımların kesici takım ömrüne katkısının dikkate alınmayacak kadar az olduğu vurgulanmıştır. Bunlar dikkate alınarak ve özellikle de bu iş parçasının düşük ısıl iletkenliğe sahip olduğu ve kaplamanın ısı yayılımına negatif etkisi olabileceği de dikkate alınarak, kaplamasız kesici takımlar kullanılmıştır.



Şekil 2.5. Eğik kesme operasyonunda kullanılan kesici takım ve takım tutucunun görüntüsü

Eğik kesme oprerasyonunda CNMG 120408, 883 kalite kesici takımlar kullanılmıştır. 883 kalite kesici takım ISO S serisinden olup, ısıl dirence sahip yüksek alaşım malzemelerin işlenmesi için önerilmektedir. Şekil 2.6'da kesici ucun görüntüsü verilmiştir. Tornalama operasyonunda kullanılan kesici takım ve takım tutucuların teknik özellikleri Tablo 2.3'de sunulmuştur.



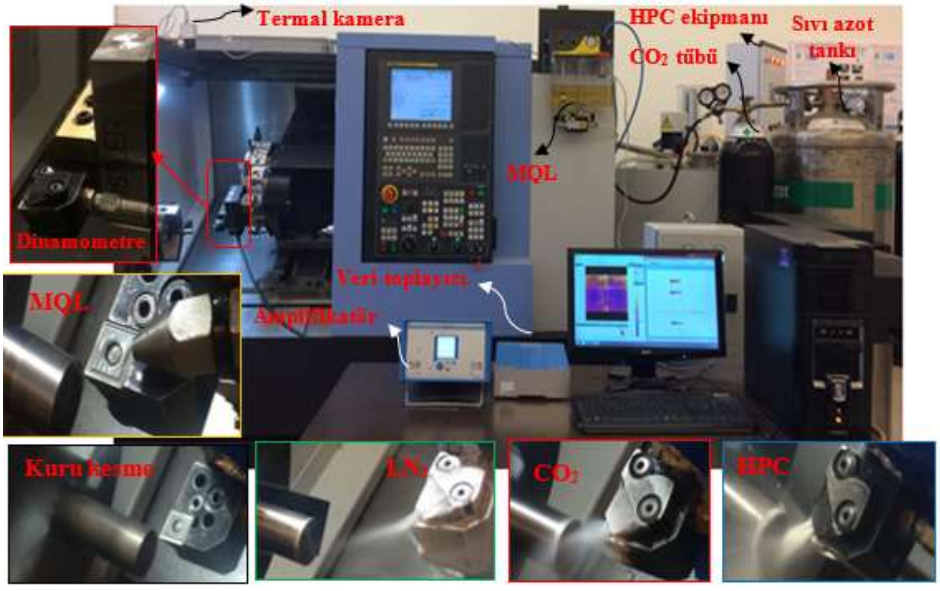
Şekil 2.6. Eğik kesmede kullanılan kesici uç

Tablo 2.3. Eğik kesmede kullanılan kesici takım ve takım tutucu özellikleri

Kesici uç		**Takım tutucu**	
ISO kod	CNMG 120408	**ISO kod**	PCLNL 2525M12
Kalite	883	**Serbest boşluk açısı**	-6°
Kaplama tipi	Kaplamasız	**Talaş açısı**	-6°
Köşe yarıçapı	0.8mm	**Boyut**	25x25
Talaş kırıcı	M1	**Uç Yuvası**	12
Uç Yuvası	12	**Nozul tipi**	Serbest ve talaş yüzeyinden jet nozul
Kesme kenarı sayısı	4		
Operasyon	Eğik kesme	**Operasyon**	Eğik kesme

2.1.3 Soğutucu ve Yağlayıcılar

Kesme sürecinde değişik yağlayıcılar ve soğutucular kullanılmıştır ve elde edilen sonuçlar kuru kesme ile karşılaştırılmıştır. yağlayıcılar ve soğutucular olarak kesme sıvısı, yüksek basınçlı soğutma (HPC), minimum miktarda yağlama (MQL), Kriyojenik soğutucular (LN_2 ve CO_2) kullanılmıştır. Eğik kesme deneylerinde kesme sıvısı 400 lt/saat akış oranında talaş yüzeyinden kesme bölgesine uygulanmıştır. Yüksek basınçlı soğutma takım tutucunun jet nozulu vasıtasıyla serbest yüzey ve talaş yüzeyinden kesme bölgesine gönderilmiştir. Yüksek basınclı soğutmanın basıncının tayin edilmesi için deneyler yapılmıştır ve 50 bar basınçın kullanılmasına karar verilmiştir. Yüksek basınçlı soğutma (HPC) kullanılarak yapılan deneylerinde yarı sentetik QualıChem Xtreme Cut290 kesme sıvısı %5 katılarak kullanılmıştır. LN_2 ve CO_2 kullanılan deneylerde ise, soğutucular takım tutucu vasıtasıyla serbest yüzey ve talaş yüzeyinden kesme bölgesine gönderilmiştir. Sıvı azotun kullanıldığı deneyler boyunca sabit basınçı (15 Bar) tutabilmek adına azami gayret sarfedilmiştir. Basınçın düştüğü veya yükseldiği durumlarda basınç ayar valfi aktif hale getirilerek tekrar 15 Bar basınç elde edilmiş ve deneyler yapılmıştır. CO_2 kullanılan deneylerde basınç 54 bar'da tüpü ısıtarak sabit tutulmuştur ve basınç düştüğünde tüp değiştirilip deneylere devam edilmiştir. Minimum miktarda yağlama (MQL) sisteminde 21 ml/saat debi miktarı kullanılmıştır. MQL yağı olarak kaynama noktası 232 ˚C, viskozitesi 40 ˚C sıcaklıkta 68 olan Hangsterfer's CC22 kesme yağı kullanılmıştır. Ti-5553 malzemesinin farklı soğutucu ve yağlayıcılarla eğik tornalama operasiyonu deney ve ölçüm düzeneği Şekil 2.7'de sunulmuştur.



Şekil 2.7. Ti-5553 malzemesinin farklı soğutcu ve yağlayıcılarla eğik kesme tornalama operasyonunda deney ve ölçüm düzeneği

2.2 Kesme Parametreleri

Projede birden fazla deney serisi bulunmaktadır. Bunlar kesme parametrelerinin tayini için yapılan farklı ilerleme, kesme hızı ve kesme derinliklerinin kullanıldığı deneyler, MQL uygulamalarında uygun debinin tayini için yapılan çalışmalar, HPC uygulamasında uygun basınçın tayinedilmesi için yapılan deneyler, sabit kesme derinliklerinde ve ilerlemelerde farklı kesme hızlarında yapılan eğik kesme deneyleridir.

Uygun kesme parametre aralığının belirlenmesi aşamasındada dikkate alınan bir husus vardır. Bu çalışmada özellikle Ti-5553 alaşımın yüksek hızlarda işlenmesi ve bunun işleme performansına etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Literatürde bu malzemenin işlenmesinde bilindiği kadarıyla seçilen en yüksek kesme hızı 90 m/dak'dır [16,28]. Dolayısı ile bu çalışmada bu değerin üzerinde ve altında değerler seçilmiştir. Seçilen ilerleme ve kesme derinliği de literatürdeki mevcut çalışmalar dikkate alındığı bir aralıkta seçilmiştir[28].

Tablo 2.4'de kuru kesme koşullarında farklı kesme derinlikleri ve ilerlemelerde geniş kesme hızı aralığında yapılan deneylerin kesme parametreleri ve koşulları sunulmuştur. Burada ifade edilmesi gereken husus, tüm deneylerde Full-Faktöriyel tasarım esas alınmış ve gerekli deneylerin hepsi yapılmıştır. Tablo 2.4'de sunulduğu üzere toplamda 45 deney yapılmıştır. Bu çalışmada amaçlanan ise Ti-5553 alaşım malzemesinin özellikle farklı kesme koşullarında işleneceği kesme koşullarının tayin edilmesi ve uygun aralığa karar verilmesidir.

Tablo 2.4. Kuru kesme için belirlenen kesme koşul ve parametreleri

Kesme hızı, V_c (m/dak)	**Kesme Koşulları**	**Kesme derinliği, a_p (mm)**	**İlerleme, f (mm/dev)**
40	Kuru kesme	0.8	0.1
80		1.4	0.15
120		2	0.2
160			
200			

Tablo 2.5'de kesme sıvısı kullanılarak farklı kesme parametrelerinin test edildiği deneysel çalışmanın deney tasarımı sunulmuştur.

Tablo 2.5. Kesme sıvısı için belirlenen kesme koşul ve parametreleri

Kesme hızı, V_c (m/dak)	**Kesme koşulları**	**Kesme derinliği, a_p (mm)**	**İlerleme, f (mm/dev)**
120	Kesme sıvısı	0.8	0.1
160		2	0.2
200			

Tablo 2.6'de ise minimum miktarda yağlama (MQL) uygulamasında MQL debisinin işleme performansına etkisinin tayin edilmesi için yapılan deneylerin kesme koşul ve parametreleri sunulmaktadır. İki farklı hızın kullanıldığı bu bölümde üç farklı MQL debisi kullanılmıştır.

Tablo 2.6. MQL debisinin işleme performansına etkisinin tayini için belirlenen kesme parametreleri.

Kesme hızı, V_c (m/dak)	**MQL Debisi (ml/saat)**	**Kesme derinliği, a_p (mm)**	**İlerleme, f (mm/dev)**
80	21	0.8	0.15
160	43	1.4	
	65		

Havacılıkta kullanılan yapısal malzemelerin talaşlı imalat süreçlerinde önemli bir yere sahip yüksek basınçlı soğutma uygulamasında yüksek basınçlı kesme sıvısının farklı basınçlarda kullanılmasının Ti-5553 alaşımın işleme performansına etkisi Tablo 2.7'de sunulan parametreler kullanılarak test edilmiştir.

Tablo 2.7. HPC uygulamasında farklı basınçların işleme performansına etkisinin belirlenmesi için yapılan deneyde kullanılan kesme parametreleri

Kesme hızı, V_c (m/dak)	**HPC Basıncı (Bar)**	**Kesme derinliği, a_p (mm)**	**İlerleme, f (mm/dev)**
80	12	0.8	0.15
160	25	2	
	37		
	50		

Tablo 2.8'deki deney serisinde ise farklı kesme koşullarının geniş aralıklı kesme hızlarında Ti-5553 alaşımın işlenmesi için yapılan deneysel çalışmanın kesme parametreleri sunulmuştur.

Tablo 2.8. Farklı kesme koşullarında deneyler için belirlenen kesme koşul ve parametreleri.

Kesme hızı, V_c (m/dak)	**Kesme koşulları**	**Kesme derinliği, a_p (mm)**	**İlerleme, f (mm/dev)**
30	Kuru Kesme	1.2	0.15
90	Kesme Sıvısı		
120	HPC (50 Bar)		
150	MQL (21 ml/saat)		
210	Kriyojenik (Sıvı azot, LN_2)		
	Karbondioksit (CO_2)		

Ti-5553 alaşımların işlenmesinde karşılaşılan önemli sorunlardan biri olarak kısa takım ömrü [28] kabul edilmektedir. Farklı kesme koşullarının takım ömrüne etkisinin araştırıldığı deneylerde Tablo 2.9'da sunulan parametreler kullanılmıştır.

Tablo 2.9. Takım ömrü deneyleri için belirlenen kesme koşul ve parametreleri.

Kesme hızı, V_c (m/dak)	**Kesme koşulları**	**Kesme derinliği, a_p (mm)**	**İlerleme, f (mm/dev)**
90	Kuru Kesme	0.6	0.15
120	Kesme Sıvısı	1.2	
	HPC (50 Bar)		
	MQL (21 ml/saat)		
	Kriyojenik (Sıvı azot, LN_2)		
	Karbondioksit (CO_2)		

2.3 Ölçümler ve Analizler

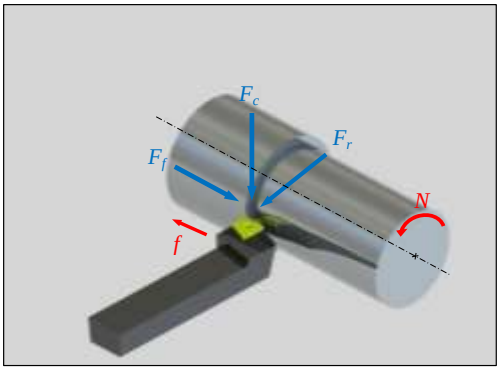
2.3.1 Kesme Kuvvetleri

Eğik kesme operasiyonlarında Fx, Fy, Fz kesme kuvvetleri 10 kN'a kadar ölçüm yapabilen ve 0-70 °C sıcaklık aralığında çalışabilen Kistler 9129AA tipi dinamometre kullanılarak ölçülmüştür ve elde edilen ölçümler ve datalar Dynoware yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Kistler 9129AA ve ölçüm sistemi Şekil 2.8'de sunulmuştur.



Şekil 2.8. a) Dinamometre ve kesici takım tutucu sisteminin fotografı, b) amplifikatör ve veri toplayıcı

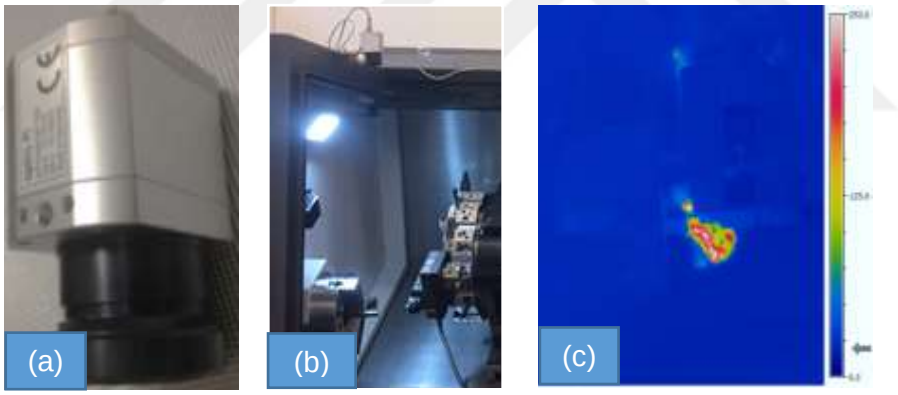
Eğik kesme sürecinde ölçülen kuvvet komponentleri şematik olarak aşağıda Şekil 2.9'da görülmektedir. Bilindiği üzere, F_c kuvveti eğik kesmede ana kesme kuvvetini ifade etmekte, F_r kuvveti kesici radyal kuvveti ve F_f kuvveti ise ilerleme kuvvetini ifade etmektedir.



Şekil 2.9. Eğik kesmede ölçülen kuvvetlerin şematik gösterimi

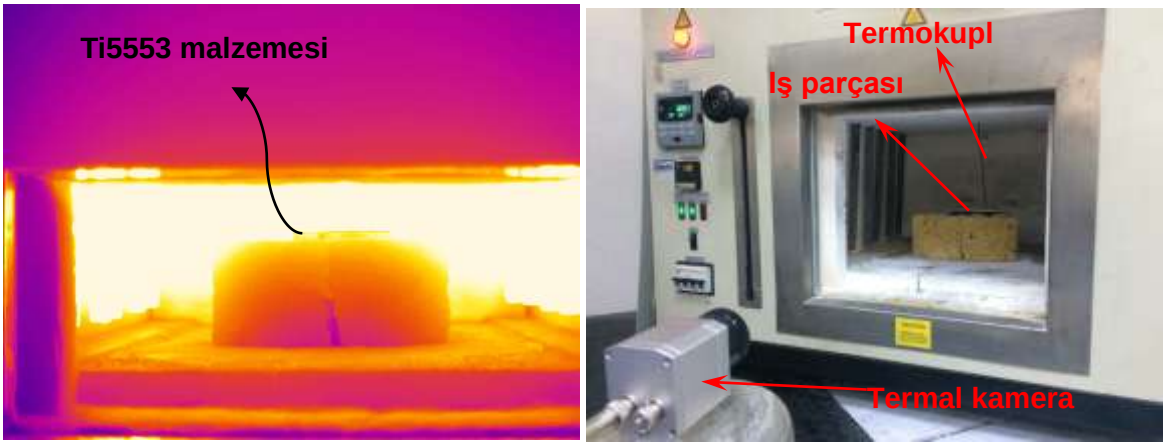
2.3.2 Sıcaklık Ölçümü

Eğik kesmede talaş kaldırma sürecinde sıcaklık ölçümleri ±2°C veya %±2 hassasiyetinde ve 382x288 piksel çözünürlükte Optris PI 400 infrared kamera ile yapılmıştır. Kamera ile -20-100, 0-250, 150-900 ve 200-1500 °C temel aralıklarında sıcaklık ölçümleri yapılabilmektedir. Infrared kamera fotografı, kameranın pozisyonlanması ve yazılımdan elde edilen görüntüler aşağıda Şekil 2.10'da sunulmuştur.

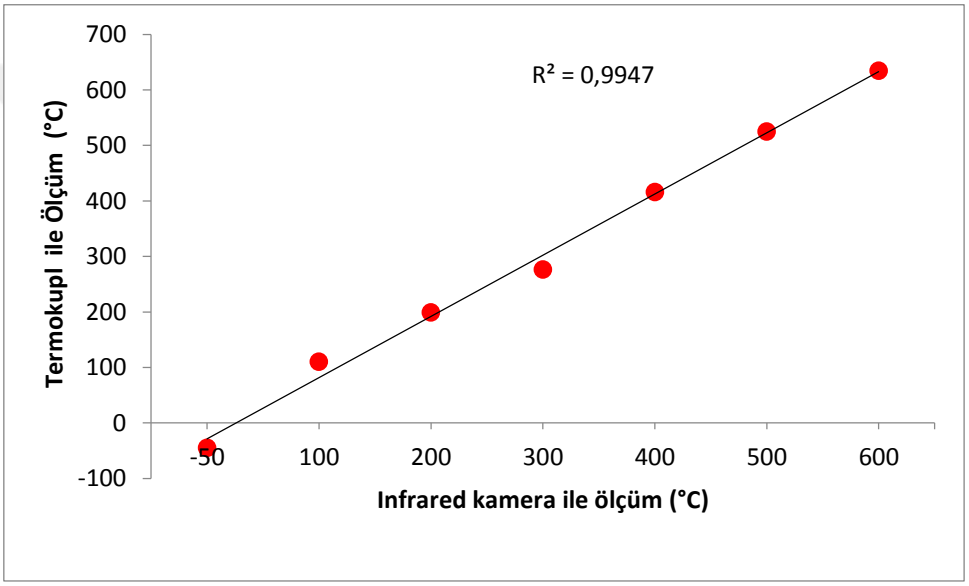


Şekil 2.10. (a) İnfrared kamera, (b) eğik kesmede kamera pozisyonu, (c) yazılımdan alınan görüntü

Sıcaklık ölçümlerinde emissivity değeri literatürde 0.63 olarak sunulmuştur [41]. Literatürdeki bilgiye ek olarak,, emissivity için kalibrasyon yapılmıştır. Kailbrasyon işleminde ısıtma için İnstron-SLF fırın kullanılarak yüksek sıcaklıkta (100-600 °C) (Şekil 2.11) emissivity değeri, düşük sıcaklıklar için (-50 °C) ise karbon dioksit kullanılmıştır. Emissivity'nin 0.63 alınarak yapıldığı bu kalibrasyonda elde edilen sonuçlar Şekil 2.12'de görülmektedir.



Şekil 2.11. Fırında ısıtılmış Ti5553 malzemesi



Şekil 2.12. 0.63 emissivity değerinde termal kamera ve termokupl'un ölçtüğü değerler

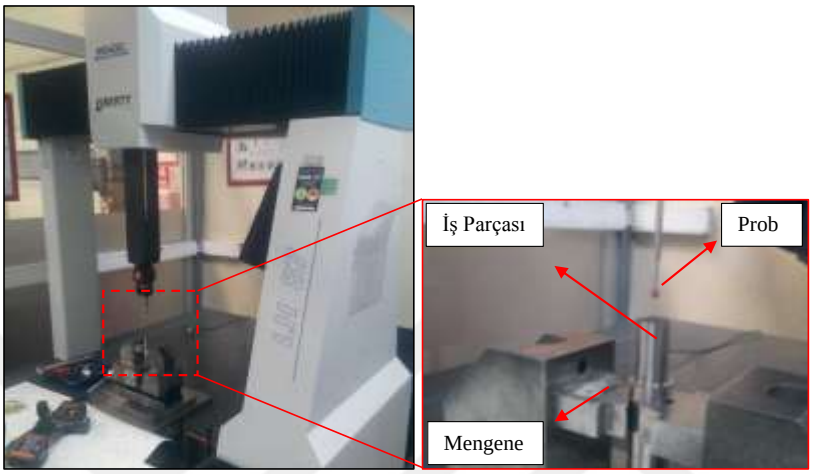
2.3.3 Takım Aşınması Ölçümü

Tek pasolu deneylerde, deney sonrasında kesici takımda meydana gelen aşınmalar (serbest yüzey aşınmaları, krater aşınmaları gibi) ölçülmüştür. Buna ek olarak, takım ömrü deneylerinde ise belli periyotlarda deney durdurulmak suretiyle kesici takımda meydana gelen aşınmalar ölçülmüştür. Ölçümlerde Dino-Lite digital mikroskop ve Dino Capture 2.0 software yazılımı başta olmak üzere taramalı Elektron Mikroskobuda (SEM) kullanılmıştır.

2.3.4 İş Parçası Boyutsal Doğruluğu Ölçümü

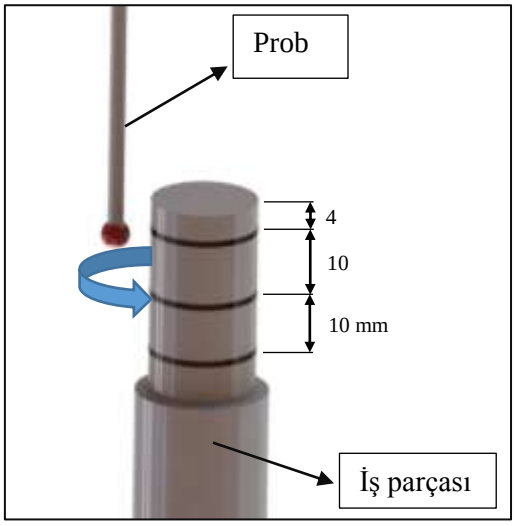
Tek paso olarak yapılan talaş kaldırma operasyonları sonucu elde edilen parçaların nominal çaplarından sapmaları ölçülmüştür. Böylece seçilen kesme koşullarının ve parametrelerinin kullanılmasıyla elde edilen ürünün boyutsal doğruluğu analiz edilmiştir.

Boyutsal doğruluğu ölçmek için Liberty LH 87 model 3 boyutlu koordinat ölçüm cihazı (CMM) Şekil 2.13'de sunulmuştur. Bu ölçümler endüstriyel firmalarla görüşmelerimiz, firmaların özellikle farklı işleme koşullarında iş parçası boyutsal doğruluğu ile ilişkisinin belirlenmesinin endüstriyel uygulamalara katkı sağlayacağını ifade etmiş olmaları nedeniyle yapılmıştır.



Şekil 2.13. Çapsal sapmaların ölçümünde kullanılan CMM cihazı ve ölçüm düzeneği

İki farklı kesme hızında (V_c= 90 m/dak ve 150 m/dak) farklı kesme koşullarında yapılan tek paso deneylerinde elde edilen Ti-5553 numuneleri aşağıdaki Şekil 2.14'de şematik olarak sunulduğu şekilde çapları ölçülmüştür. Her bir çaptan 9 noktadan değer alınmış ve böylece o bölgedeki çap ölçülmüştür. Bir numune üzerinde üç farklı noktadan yapılan ölçümler dikkate alınarak, her bir numune için nominal çaptan ortalama sapma değeri tayin edilmiştir.



Şekil 2.14. CMM'de iş parçası numunesinden alınan ölçümlerin şematik gösterimi

2.3.5 İşlenmiş Parçaların Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Deneysel çalışmalar kapsamında talaş kaldırma dneyleri yapılan parçaların yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Ölçümlerde parçaların Aritmetik Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü, R_a, dikkate alınmıştır. Şekil 2.15'de gösterilen Mitutoyo SJ-210 yüzey pürüzlülüğü cihazı ve ölçüm standı kullanılmıştır. Bir numunenin Artimetik Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü değerini belirlemek için dörtten az olmamak üzere ölçüm yapılmıştır. Sonrasında ise bu ölçümlerin ortalaması alınarak ortalama R_a değeri belirlenmiştir.



Şekil 2.15. Deneylerde kullanılan yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

3. ÖN DENEYSEL ÇALIŞMALAR: KESME PARAMETRELERİNİN ETKİSİ

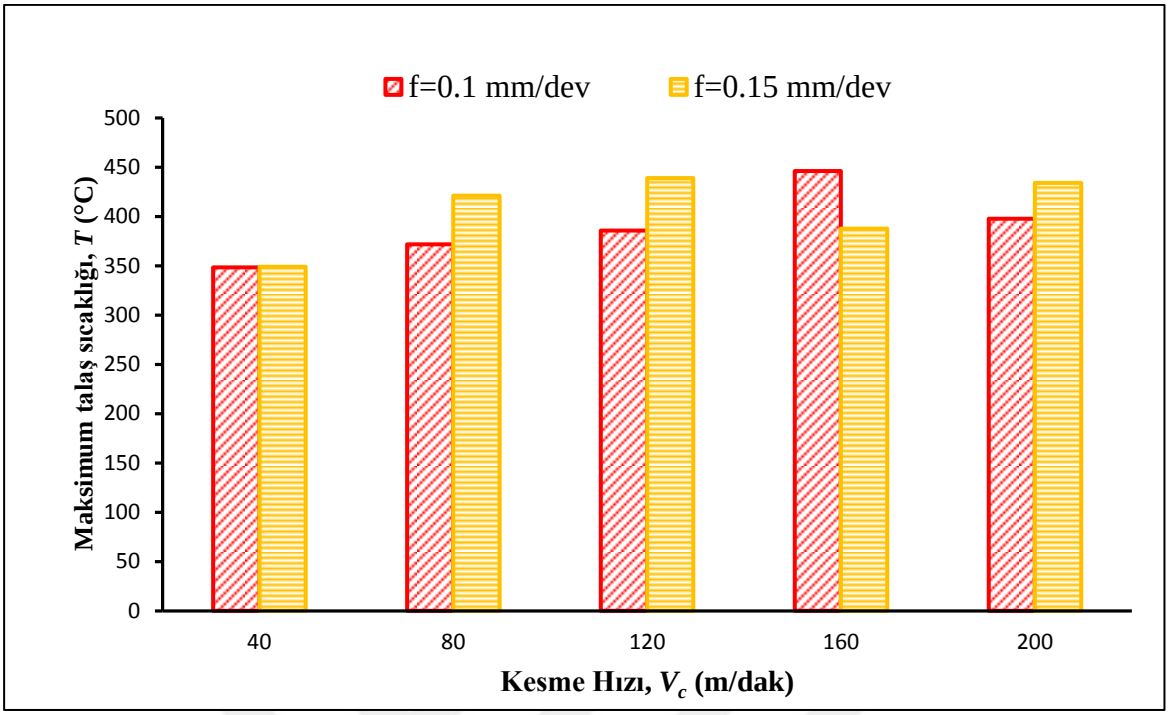
3.1 Kuru Kesmede Kesme Parametrelerinin Etkisi

Eğik kesme (Tornalama) sürecinde Ti-5553 alaşım malzemesinden talaş kaldırma süreci kapsamlı olarak ele alınmış ve incelenmiştir. Bu çerçevede öncelikli olarak kesme derinliği, kesme hızı ve ilerlemenin etkisinin malzemenin işlenebilme performansına etkisinin araştırıldığı deneyler gerçekleştirilmiştir.

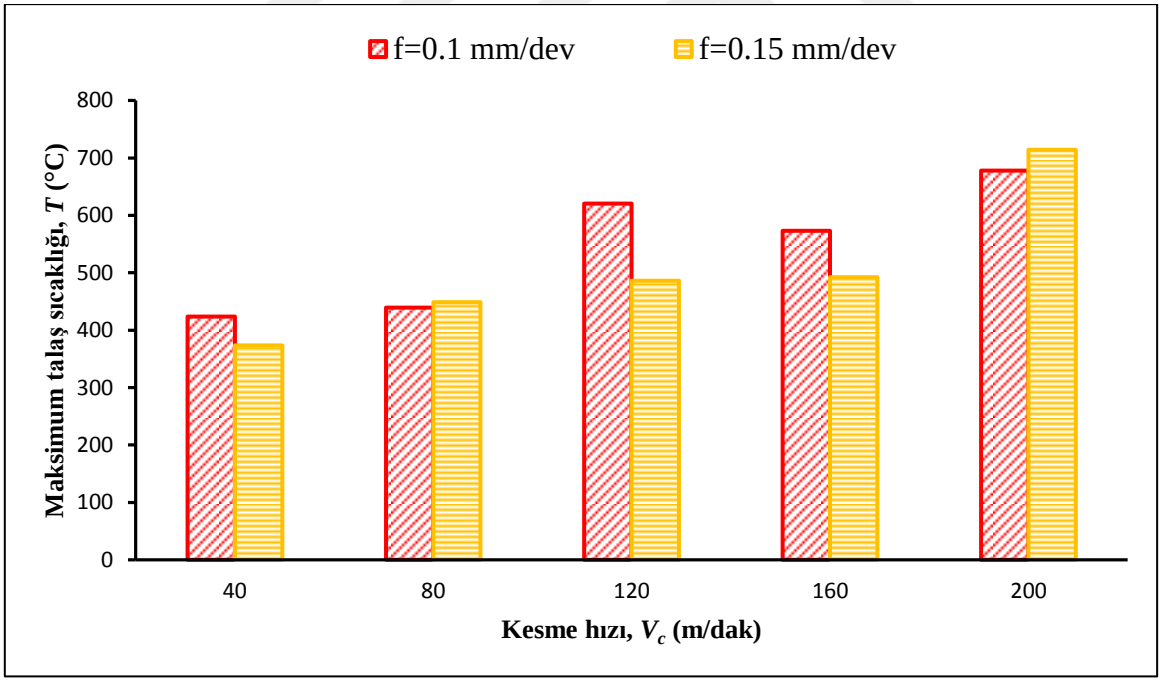
İlgili literatür de dikkate alınarak, kesme hızları bu deneylerde 40 ile 200 m/dk aralığında seçilmiştir. Böylece hem düşük hızların hem de yüksek kesme hızlarının etkisini gözlemleyebilme imkanı olmuştur. Bu deneylerde ilerleme 0.1 ile 0.2 mm/dev aralığında seçilmiştir. Kesme derinliği ise 0.8 ile 2 mm aralığında seçilmiştir. Herhangi bir soğutucu ve yağlayıcının kullanılmadığı deneylerde kullanılan kesme parametreleri Tablo 2.4'de sunulmuştur. Ölçülen temel çıktılar ise, talaş sıcaklığı, aşınma (serbest yüzey aşınması ve burun aşınması), kesme kuvvetleri, talaş kırılabilirliği ve aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğüdür. Projenin bu aşamasında yapılan çalışmalardan elde edilen bulgular aşağıda sistematik olarak sunulmuştur.

3.1.1 Talaş Sıcaklığı

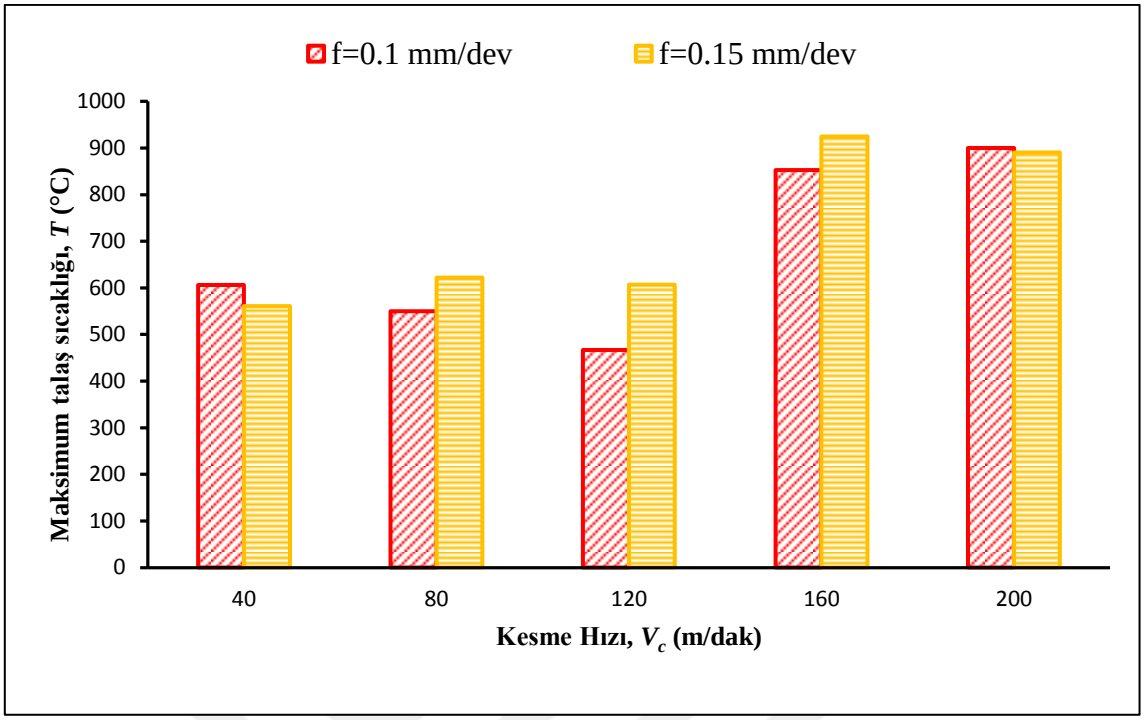
Talaşlı imalat sırasında kesme bölgesinde oluşan sıcaklık; termal yumuşama, kesme kuvveti oluşumu ve bunlara bağlı olarak kesici takım aşınması, sertlik değişimi, tane küçülmesi, kalıntı gerilme oluşumu v.b yüzey bütünlüğü karakteristikleri gibi pek çok yönden süreci etkileyen önemli bir etkendir. Eğik kesme sürecinde kesici-takım talaş temas yüzeyinden sıcaklık ölçümü oldukça güçtür. Özellikle termal kamaranın pozisyonlanması düşünüldüğüne (Şekil 2.10b) bunun oldukça zor olduğu görülebilir[42]. Çeliklere nazaran ısıl iletim katsayısı daha düşük olan Ti-5553 alaşımlarda oransal olarak buna benzer bir davranışın görülmesi kaçınılmazdır. Bu anlamda kesici takım-talaş arayüzündeki sıcaklığın ölçülmesinin mümkün olmadığı bu deney serisinde talaşın sıcaklığı ölçülmüştür. Ölçüm örneği Şekil 2.10'da sunulmuştur. Elde edilen bulgular Şekil 3.1,3.2 ve 3.3'da sunulmuştur.



Şekil 3.1. Kuru kesme koşulunda kesme derinliği 0.8 mm değerinde ölçülen maksimum sıcaklıklar



Şekil 3.2. Kuru kesme koşulunda kesme derinliği 1.4 mm değerinde ölçülen maksimum sıcaklıklar



Şekil 3.3. Kuru kesme koşulunda kesme derinliği 2 mm değerinde ölçülen maksimum sıcaklıklar

Elde edilen bulgular Ti-5553 alaşım malzemesinin talaşlı imalat sürecinde özellikle kesme koşullarına da bağlı olarak 120 ve üzeri kesme hızlarında 600 °C'nin üzerine çıktığını göstermektedir. Elde edilen bu ölçümler kesme esnasında talaşın sıcaklığıdır. Kesme bölgesindeki sıcaklığın talaş sıcaklığından çok daha yüksek olduğu düşünüldüğünde, kuru kesme koşullarında karbür kesici takım ile yüksek kesme hızlarında sıcaklığın karbür kesici takımın yumuşama sıcaklığına ulaştığı söylenebilir. Dolayısı ile kuru kesmenin yüksek kesme hızlarında verimli bir sonuç vermeyeceği sıcaklığı dikkate alarak söylemek mümkündür. Bu bulgularla ilgili not edilmesi gereken bir husus, kesme hızı ve/veya kesme derinliği ve ilerlemenin artmasına rağmen bazı deneylerde sıcaklıkların düştüğü görülmektedir. Bu durum sıcaklık ölçüm düzeneğinden kaynaklanmaktadır. Diğer bir ifade ile, Ti-5553 alaşım malzemesinin talaş kırılabilirliği düşüktür ve kesme bölgesinde talaş yığılması olması durumunda yeni kesilen talaşın sıcaklığını kamera talaş yığılmasından dolayı okuyamamaktadır, bu durumda maksimum sıcaklık düşük gibi bir durum ortaya çıkmaktadır.

3.1.2 Aşınma

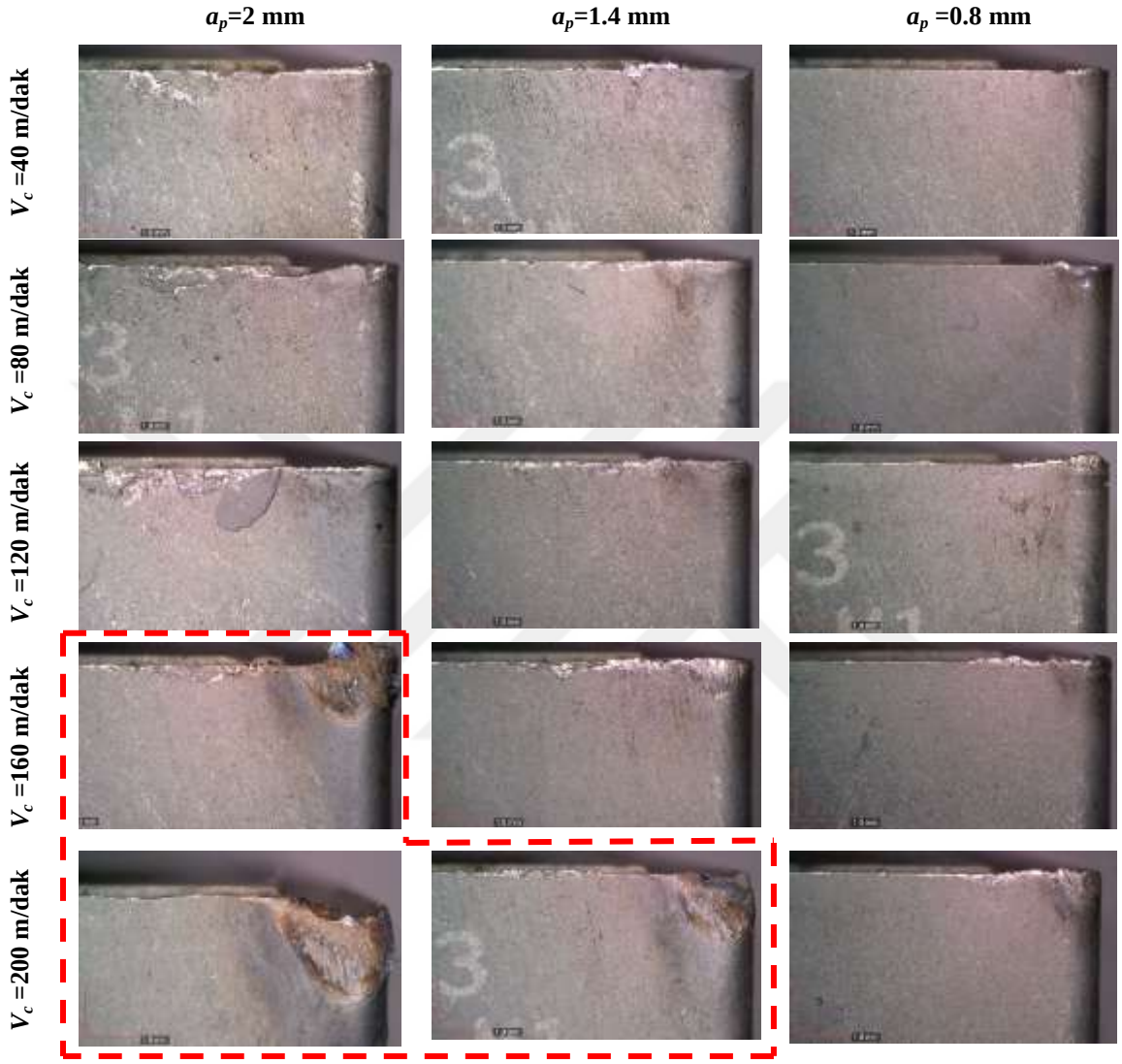
3.1.2.1 Kesici Takım Serbest Yüzeyinde Aşınma

Talaşlı imalat performansı perspektifinden süreci en iyi yansıtan çıktılardan bir tanesi de kesici takım aşınmasıdır. Kuru kesme koşulunda yapılan deneylerde kesme hızı, ve kesme derinliğine göre elde edilen kesici takım serbest yüzey aşınmalarını gösteren optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.4' de görülmektedir.

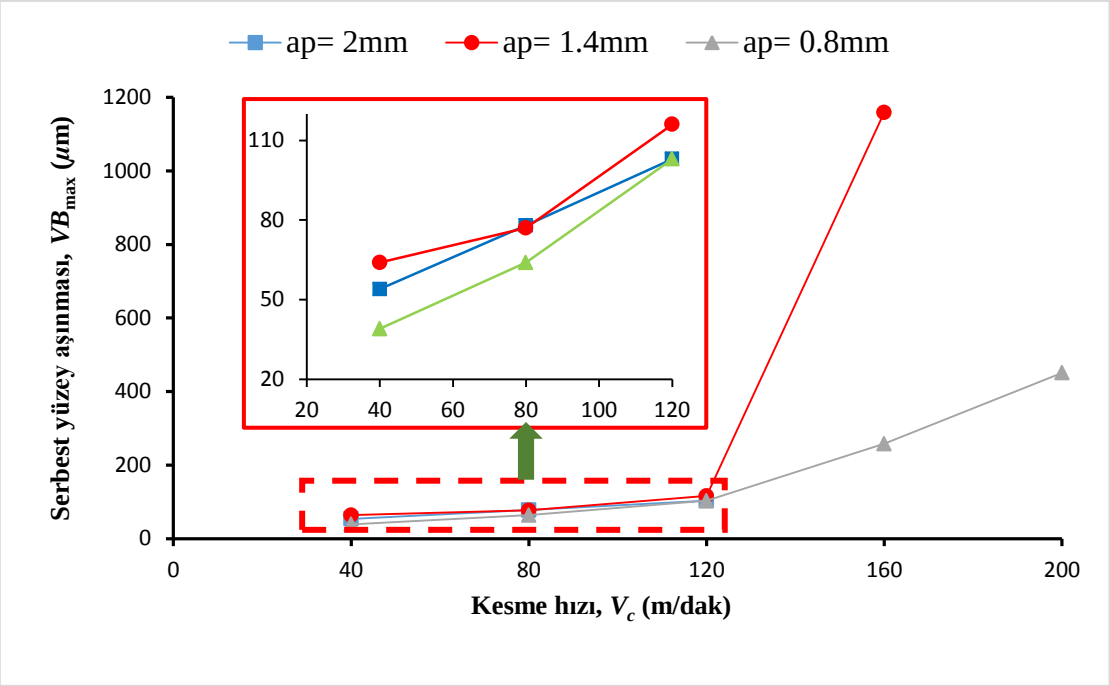
Şekilde görüldüğü üzere, özellikle 160 ve 200 m/dk kesme hızlarında serbest yüzey aşınmasının oldukça arttığı görülmektedir. Kesme uzunluğunun 35 mm olduğu dikkate alındığında bu aşınma miktarının oldukça yüksek olduğu söylenebilir. Özellikle 160 ve 200 m/dak kesme hızından sonra büyük kesme derinliklerinde kesici takımlar kullanılamaz duruma gelmiştir. Dolayısı ile kesici takımların geometrileri aşırı aşınma etkisiyle bozulmuştur (kesikli çizgiyle gösterilen takımlar). Elde edilen bu sonuç, 160 ve üzeri kesme hızlarında kuru kesmede Ti-5553 alaşım malzemesinin işlenebilirliğinin oldukça kötü olduğunu göstermiştir. Diğer bir sonuç ise, kesme derinliğinin etkisinin bariz şekilde görülmesidir. Düşük kesme derinliğinde (0.8 mm), 160 m/dak kesme hızında dahi aşınma, diğer kesme derinliklerine nazaran daha azdır. Yüksek kesme derinliğinde (2 mm) talaş vurması sonucu ana kesici ağızda bölgesel kırılmalar görülmüştür. Farklı malzemelerin işlenmesinde gözlemlenen talaşın sebep olduğu (chip hammering) kırılmalar kesme derinliğinin dışında oluşmakta olup, doğrudan kesmeyi etkilememektedir ancak talaş kaldırma sürecinin devam etmesi durumunda kesici takımı ciddi şekilde zayıflatması söz konusudur. Literatürde Ti esaslı malzemelerin işlenmesinde benzer problemlerle karşılaşılmıştır [43] ancak buradaki durumda kesme derinliğininde rol oynadığı görülmektedir. Optik mikroskop görüntülerinde net olarak elde edilen bir diğer bulgu ise yığma ağız problemidir. Birçok kesme parametresinde bu problem görülmektedir. İş parçası malzemesinin yapışma eğilimi göstermesi ve talaş kaldırma esnasında artan sıcaklıklar bu soruna sebep olmuştur.

Elde edilen serbest yüzey aşınmasının sayısal değerleri Şekil 3.5'de sunulmuştur. Burada not edilmesi gereken husus, aşınma değerleri çok yüksek çıkan (1200 μm ve üzeri) sonuçlar grafiklerde sunulmamış sadece optik mikroskop görüntülerine şekillerde yer verilmiştir. Şekil 3.6'da görüldüğü üzere,120 m/dak kesme hızına kadar farklı kesme derinlikleri arasındaki farklılık sınırlı iken, 120 m/dak kesme hızından sonra takım aşınmasında ciddi artış söz konusudur. Seçilen kesme hızları literatürdeki kesme hızlarını da kapsamakla birlikte, literatürde sunulandan çok daha yüksek kesme hızlarında denenmiştir.

Dolayısı ile yüksek kesme hızları ve kesme derinliklerinde sürdürülebilir talaş kaldırma süreci olamayacağı aşikardır. Sonuç olarak kesme derinliğinin kesici takım aşınmasına kayda değer etki ettiği görülmektedir.



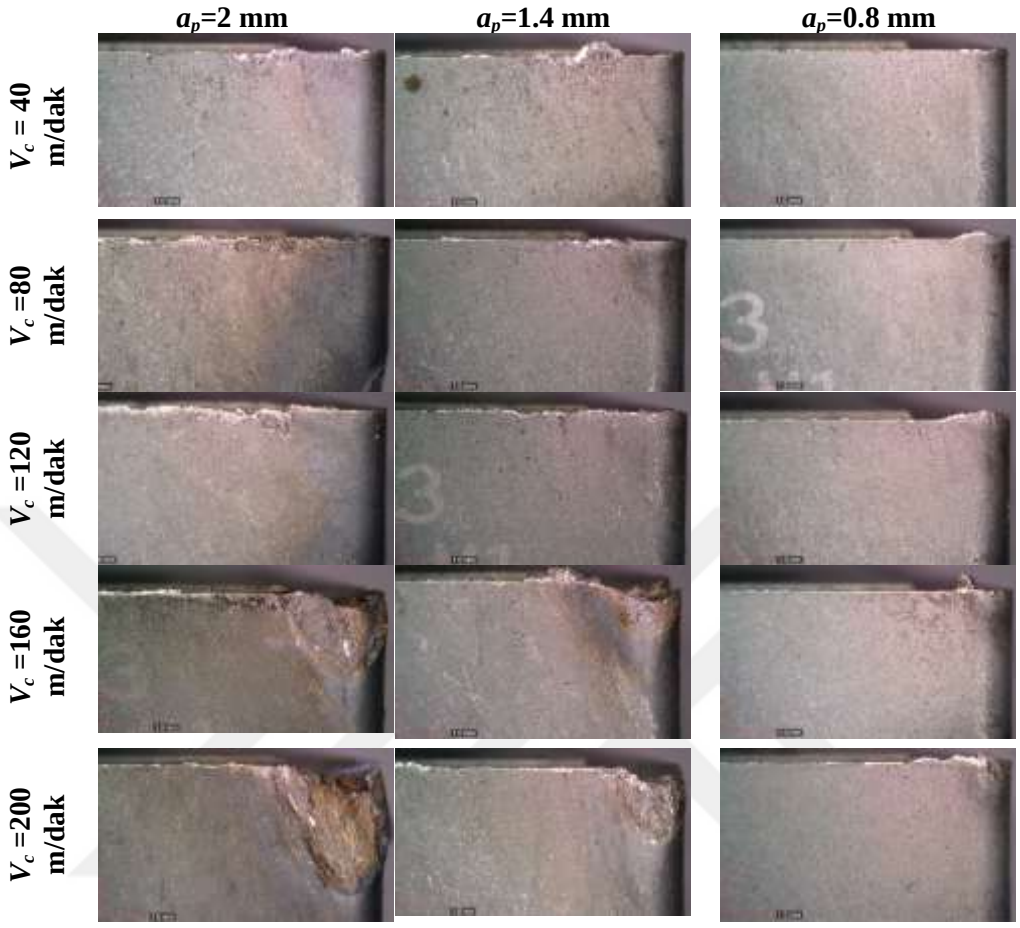
Şekil 3.4. 0.1 mm/dev ilerlemede kesici takımda oluşan serbest yüzey aşınması optik mikroskop görüntüleri



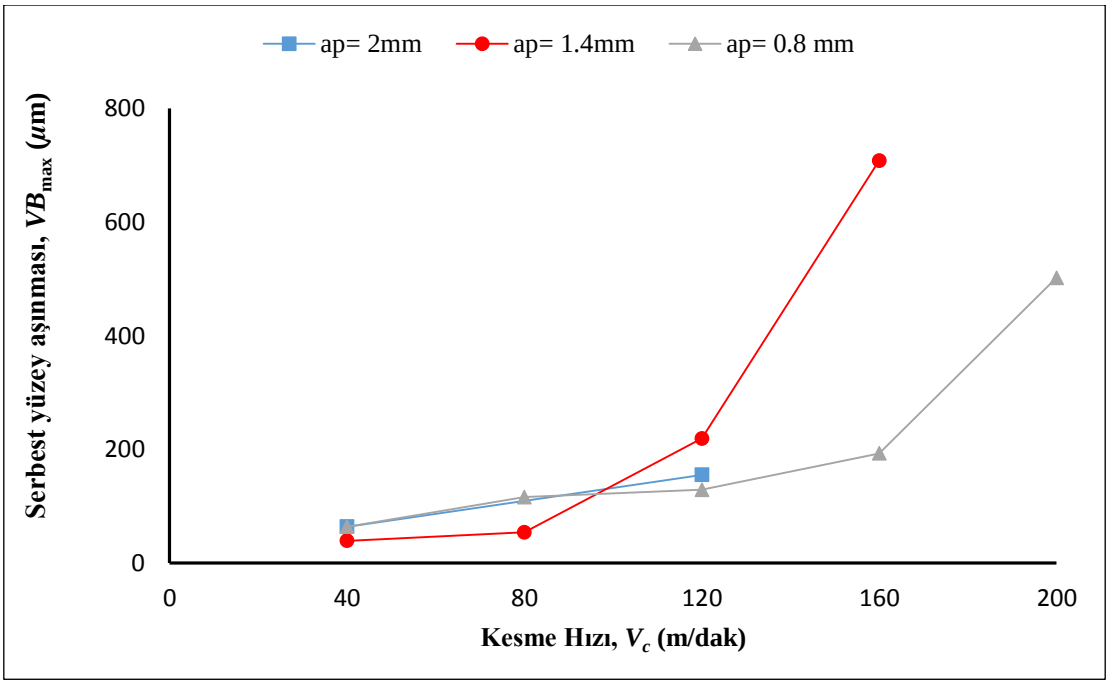
Şekil 3.5. Kuru kesme 0.1 mm/dev ilerlemede kesme derinliği ve kesme hızına bağlı olarak oluşan serbest yüzey aşınması

Şekil 3.7'da 0.15 mm/dev sabit ilerleme ile farklı kesme hızlarında ve talaş derinliklerinde yapılan kuru kesmenin sonucunda kesici takımlarda meydana gelen serbest yüzey aşınması sunulmaktadır. Kesme hızı perspektifinden bakıldığında, kesme hızının etkisi burada da net olarak görülmektedir. Özellikle yüksek kesme hızında ve büyük talaş derinliğinde meydana gelen serbest yüzey aşınması, düşük ilerlemeye nazaran çok daha büyüktür. Dolayısı ile ilerlemenin artması yüksek kesme hızlarında serbest yüzey aşınmasında artışa neden olmuştur. Ancak bu ilerlemenin düşük kesme hızlarında talaş vuruntusunu azalttığı da net olarak görülmektedir. Buna ek olarak düşük kesme derinliklerinde (0.8 mm) yığma ağız sorununun bu ilerleme değerinde de devam ettiği görülmektedir.

İlerlemenin ve kesme derinliğinin artması kesilen talaşın kesitini arttırmakta ve bunun sonucunda plastik deformasyon için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum sonucunda artan ısı ve sürtünme ile aşınmanın arttığı görülmektedir. Kesme derinliğindeki değişimin serbest yüzey aşınmasına etkisinin sayısal değerlerinin yer aldığı Şekil 3.8'de görüldüğü üzere 120 m/dak kesme hızında kesme derinliği 0.8 mm de ölçülen maksimum serbest yüzey aşınması 129 µm iken bu değer 1.4 mm kesme derinliğinde aynı hız için 219 µm olmuştur. Kesme hızının 160 m/dak'ya ulaşmasında ise iki kesme derinliği arasındaki fark oldukça ciddi oranda artış göstermiştir.

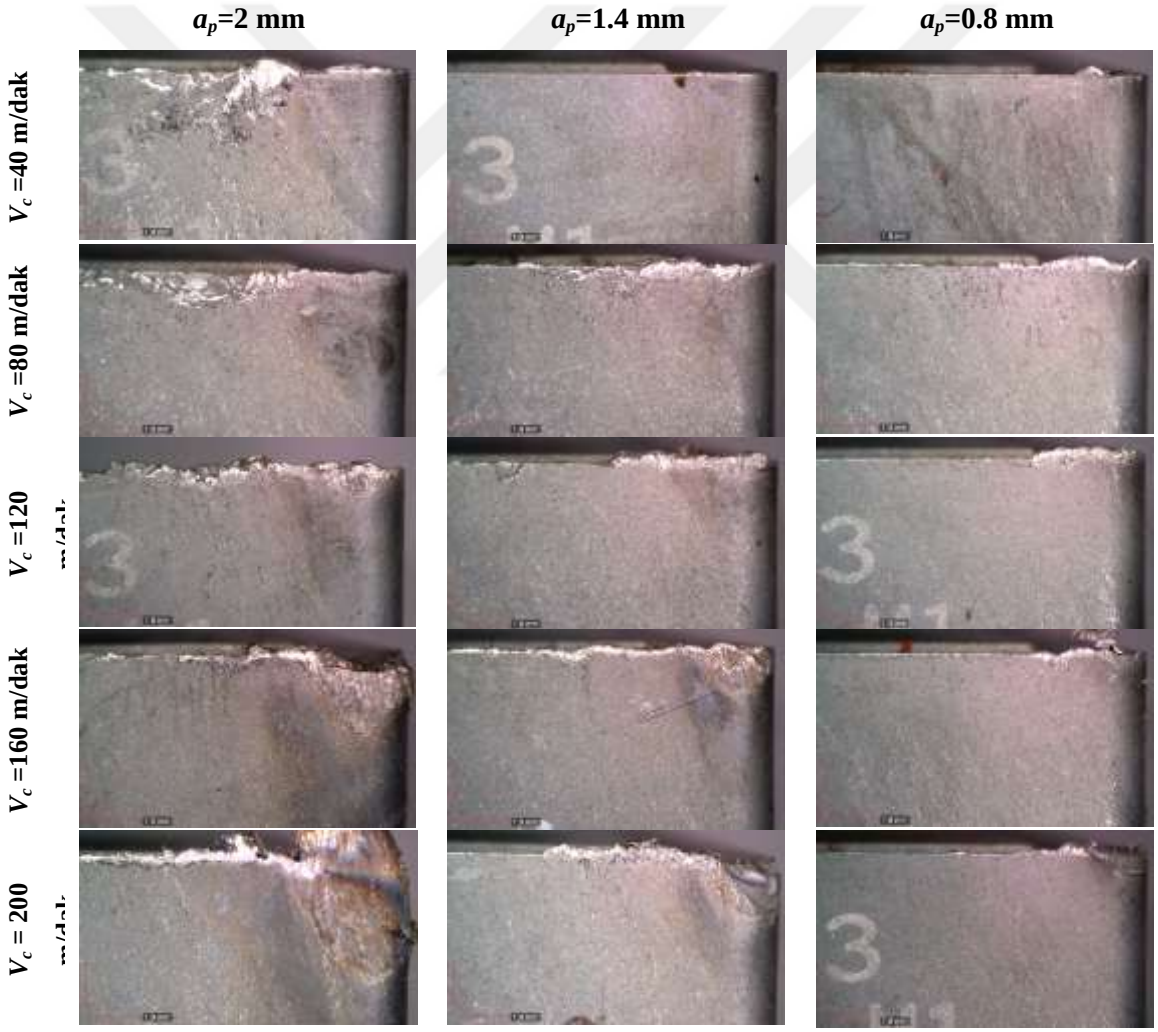


Şekil 3.6. 0.15 mm/dev ilerlemede kesici takımda oluşan serbest yüzey aşınma görüntüleri



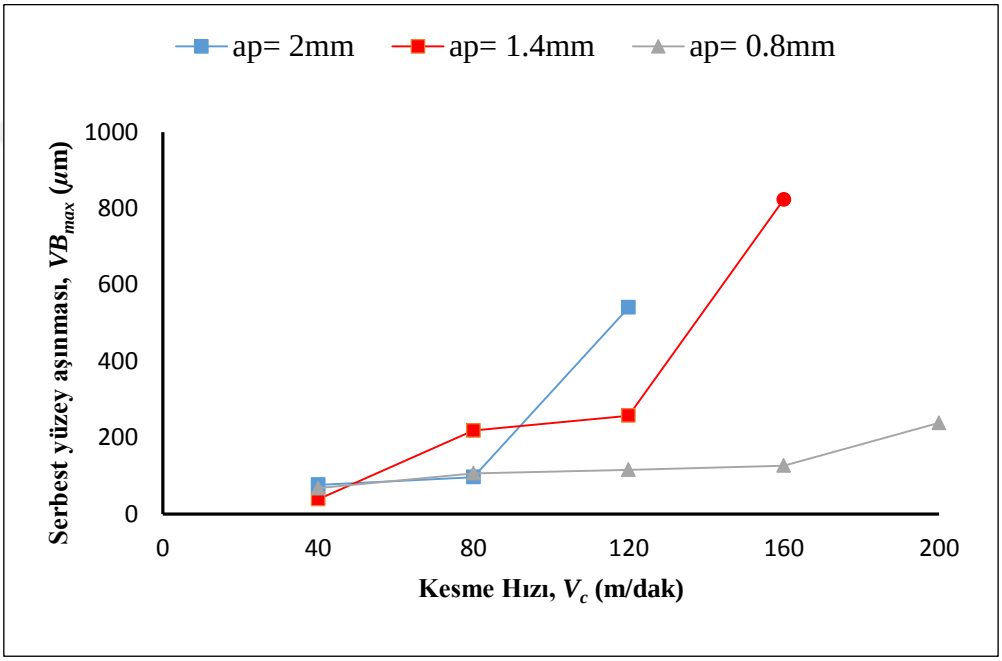
Şekil 3.7. Kuru kesme 0.15 mm/dev ilerlemede, kesme derinliği ve kesme hızına bağlı olarak oluşan serbest yüzey aşınma miktarları

Şekil 3.8'de ilerleme 0.2 mm/dev iken farklı kesme derinliklerinde yapılan talaş kaldırma deneylerinde kesici takım serbest yüzey aşınmalarının optik mikroskop görüntüleri sunulmuştur. Burada elde edilen sonuçlar düşük ilerlemelerde elde edilen sonuçlardan pek farklı olmayıp ek olarak, yüksek kesme hızlarında ve kesme derinliklerinde mekanik zorlamanın artmasıyla oluşan kesici ağız bölgesinde kopmalar görülmektedir. 2 mm kesme derinliklerinde talaş vuruntularının kesici takımda önemli hasarlara neden olduğu görülmektedir. Seçilen ilerlemede ve 200 m/dak kesme hızında kesici takım burun geometrilerinin tamamen değiştiği (aşınma ile) görülmektedir. Sayısal sonuçların yer aldığı Şekil 3.9'de ise örneğin 120 m/dak kesme hızında kesme derinliği 0.8 mm iken ölçülen serbest yüzey aşınması 116 µm iken 2 mm kesme derinliğinde 541 µm olarak ölçülmüştür.



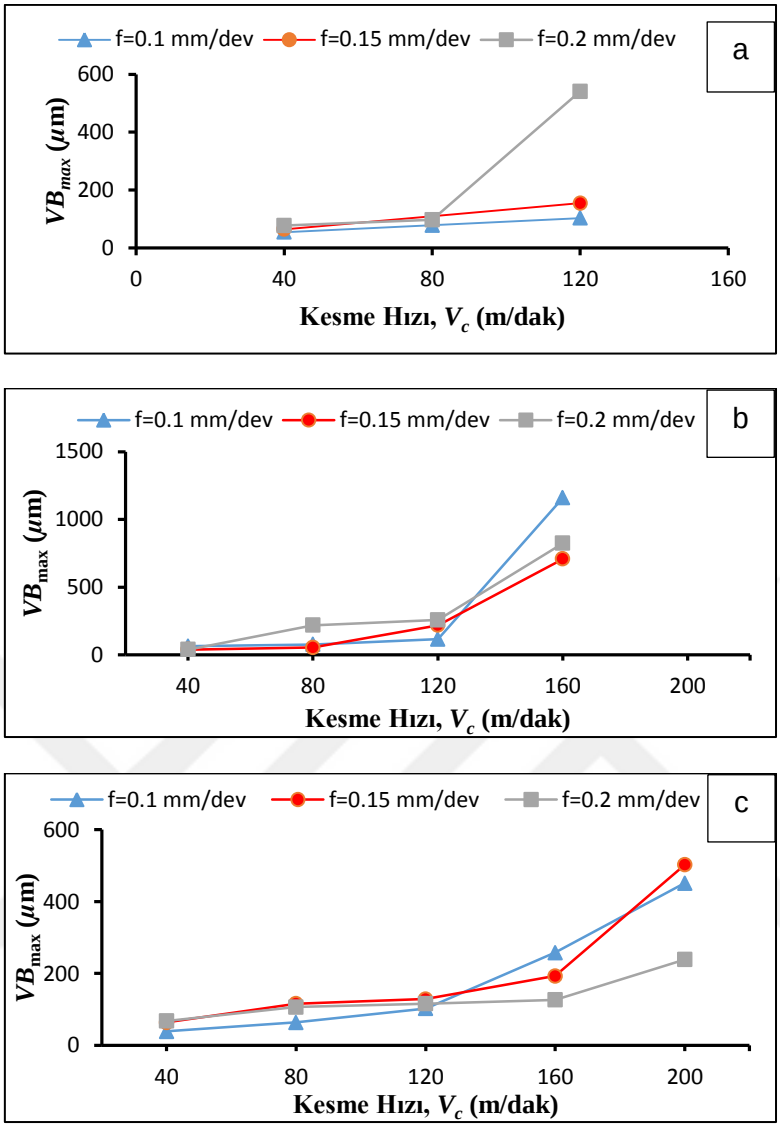
Şekil 3.8. 0.2 mm/dev ilerlemede kesici takımda oluşan serbest yüzey aşınmalarının optik mikroskop görüntüleri

Yüksek ilerlemede kesme derinliklerinin arasındaki fark aynı olmasına rağmen aşınmaya etkileri daha fazla olmaktadır. Dolayısı ile kritik kabul edilebilecek kesme hızından (120 m/dak) sonra diğer iki kesme parametrelerinden (ilerleme ve kesme derinliği) herhangi birindeki artış kesici takım aşınma davranışı üzerinde oldukça fazla etki etmektedir. Dolayısı ile asıl belirleyici unsur kesme hızı olmakla beraber düşük kesme derinliğinde (0.8 mm) yapılacak talaş kaldırmada seçilen tüm kesme hızlarında ve ilerlemelerde kontrol edilebilir serbest yüzey aşınması gözlemlenmiştir. 0.8 mm kesme derinliğinde genel olarak kritik kabul edebileceğimiz 120 m/dak kesme hızı ve üstünde dahi, ölçülebilir aşınmalar gözlemlenmiştir.



Şekil 3.9. Kuru kesme 0.2 mm/dev ilerlemede, kesme derinliği ve kesme hızına bağlı olarak oluşan serbest yüzey aşınma miktarları

Şekil 3.10'de ise ilerlemeye ve kesme hızına bağlı olarak farklı kesme derinliklerinde ölçülen maksimum serbest yüzey aşınmaları sunulmuştur. Esasında bu bulgular Şekil 3.1-3.9 arasında sunulan bulguların ilerlemeye bağlı gösterimidir. Kesme derinliğinde olduğu gibi ilerlemenin etkisinin de net olarak ortaya çıktığı kesme hızı 120 m/dak olmuştur. Burada not edilmesi gereken husus, esasında serbest yüzey aşınması 120 m/dak kesme hızından daha düşük hızlarda da farklı ilerleme ve kesme derinliğinde daha belirgin olarak görülebilir ancak bu deneyler tek paso şeklinde yapılan deneyler olması nedeniyle nispeten kısa işleme süresinde farklılık net olarak görülmeyebiliyor.

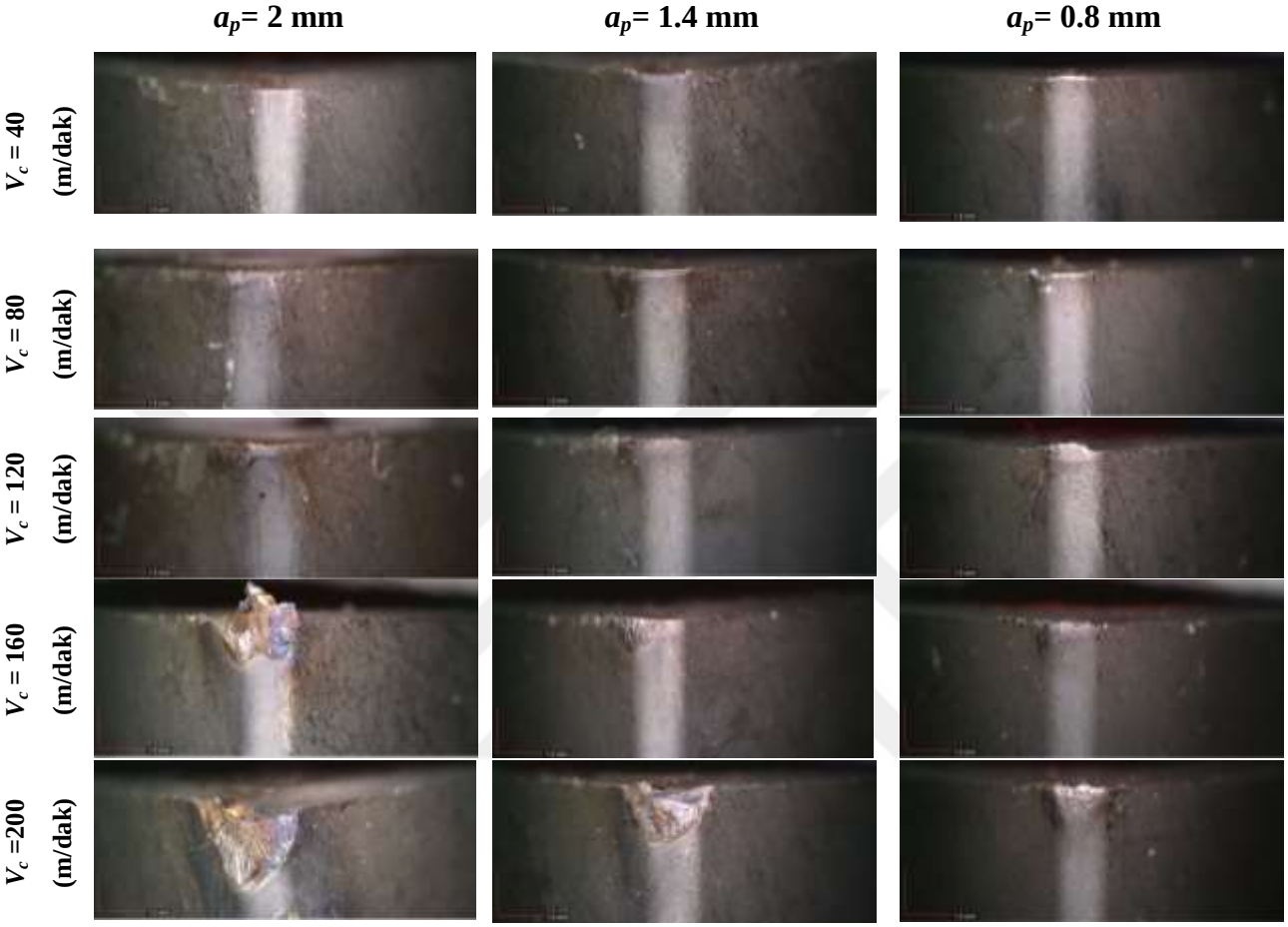


Şekil 3.10. İlerlemeye bağlı serbest yüzey aşınma grafikleri, (a) a_p= 2 mm, (b) a_p= 1.4 mm,(c) a_p= 0.8 mm

3.1.2.2 Kesici Takım Burun Aşınması

Kesici takım ömrü ve işlenen parçaların yüzey morfolojisi gibi yüzey bütünlüğü karakteristikleri açısından ve özellikle işlenen parçaların boyutsal doğruluğu açısından önemli olan bir diğer aşınma türü kesici takım burun aşınması miktarlarıdır. Kuru kesme koşulunda yapılan deneylerde sabit ilerleme ve farklı kesme hızı ve derinliklerine bağlı olarak elde edilen kesici takım burun aşınması görüntüleri Şekil 3.11' de gösterilmektedir. Görüldüğü gibi burun aşınmasının ciddi artış gösterdiği kesme hızları yine 120 m/dak'nın üzerindeki kesme hızlarıdır. Kesme derinliğinin de burun aşınmasına etkisinin olduğu aşikar şekilde görülmektedir. Şekil 3.12'de sayısal ölçüm sonuçları görülen burun aşınma miktarlarının, 120 m/dak kesme hızına kadar kararlı bir artış gösterdiği ancak bu değerden sonra aniden ve ciddi

bir artış olduğu görülmektedir. Özellikle 160 m/dak hızda kesme derinliği 1.4 ve 2'de ve 200 m/dak kesme hızında tüm kesme derinliklerinde kesici takım burun geometrisinin aşırı aşınmadan dolayı önemli şekilde değişime uğradı görülmektedir.

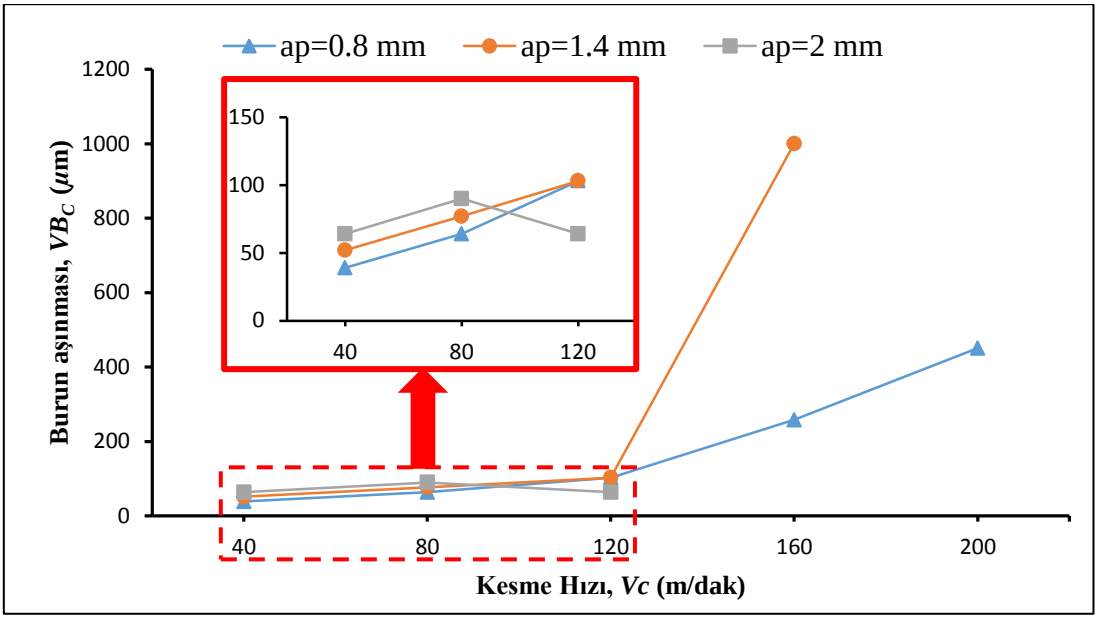


Şekil 3.11. 0.1 mm/dev ilerlemede kesici takımda oluşan burun aşınması görüntüleri

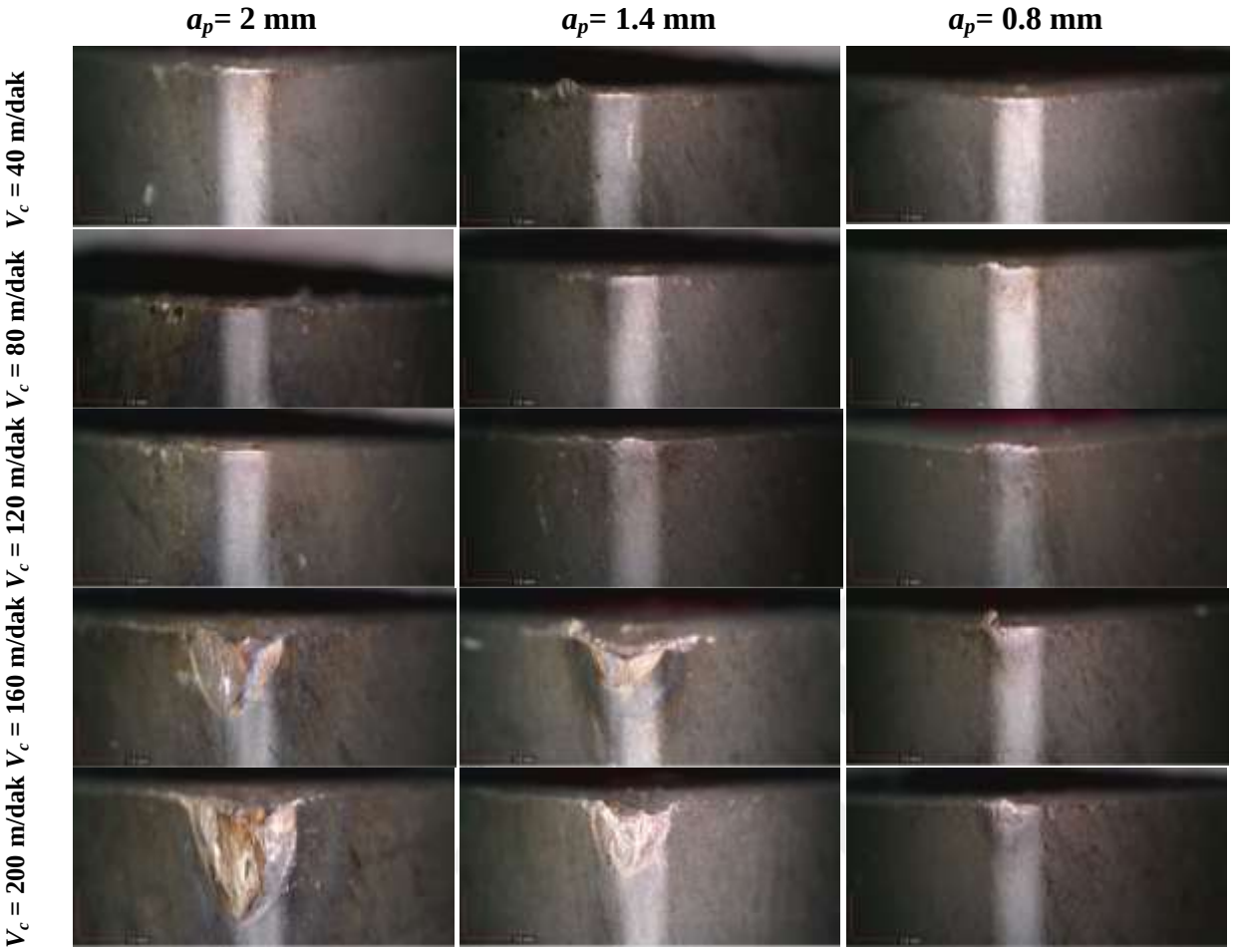
0.1 mm/dev ilerlemede, farklı kesme derinliği ve kesme hızlarında ölçülen burun aşınmalarının sayısal değerlerini gösteren grafik Şekil 3.12'de sunulmuştur. Şekilde görülen sonuçlar da yine kritik kesme hızının 120 m/dak olduğunu göstermektedir.

0.1 mm/dev ilerlemede görülen burun aşınması davranışına benzer bir davranışı 0.15 mm/dev ilerleme ile yapılan deneylerde de görmek mümkün. Şekil 3.13'da görüldüğü üzere, yüksek kesme hızlarında kesici takım burun ucunda ciddi bir kütlesel kayıp ve burun aşınması söz konusudur. Ancak düşük kesme hızlarında burun aşınması kabul edilebilir değerlerdedir. Sayısal sonuçların sunulduğu Şekil 3.14 incelendiğinde görüleceği gibi, 120 m/dak kesme hızına kadar kararlı ve kontrol edilebilir bir artış söz konusuyken, bu değerden sonra aşınma aniden artış göstermektedir. Benzeri davranışı en yüksek ilerlemede (0.2 mm/dev) yapılan deney sonuçlarında da görmek mümkündür (Şekil 3.15). Şekil 3.15'de görüldüğü üzere

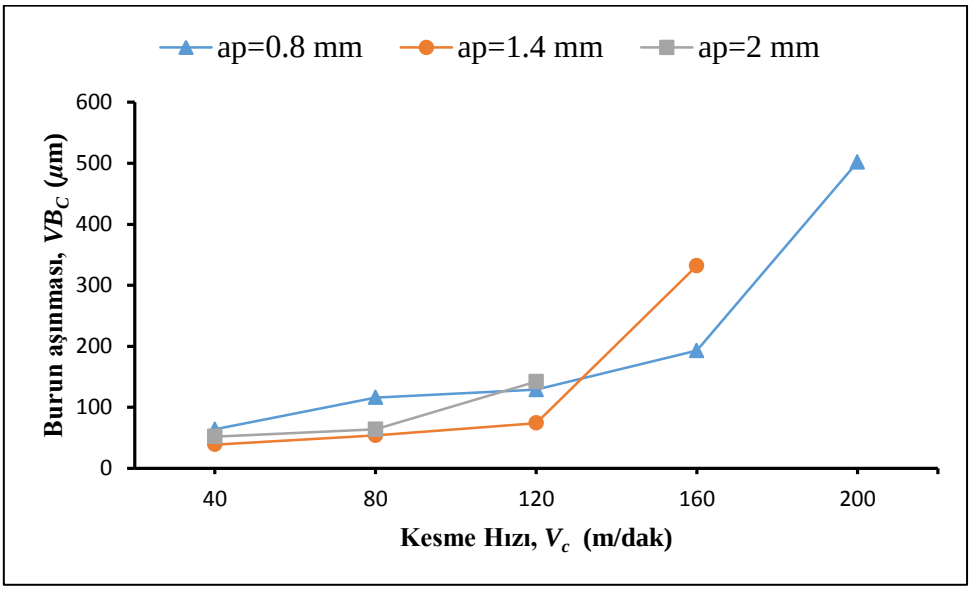
yüksek kesme hızlarında burun aşınmasında kayda değer bir artış oluşmaktadır. Ancak bu ilerleme değerinde 80 m/dak kesme hızında da oluşan burun aşınmasının kayda değer derecede büyük olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır. 35 mm kesme uzunluğu sonucunda burunda oluşan aşınmanın yaklaşık 90 µm olması (Şekil 43.16) bir süre sonra burundaki aşınmanın ciddi bir noktaya ulaşıp, işlenen parçanın boyutsal doğruluğunu etkileyeceği aşikardır.



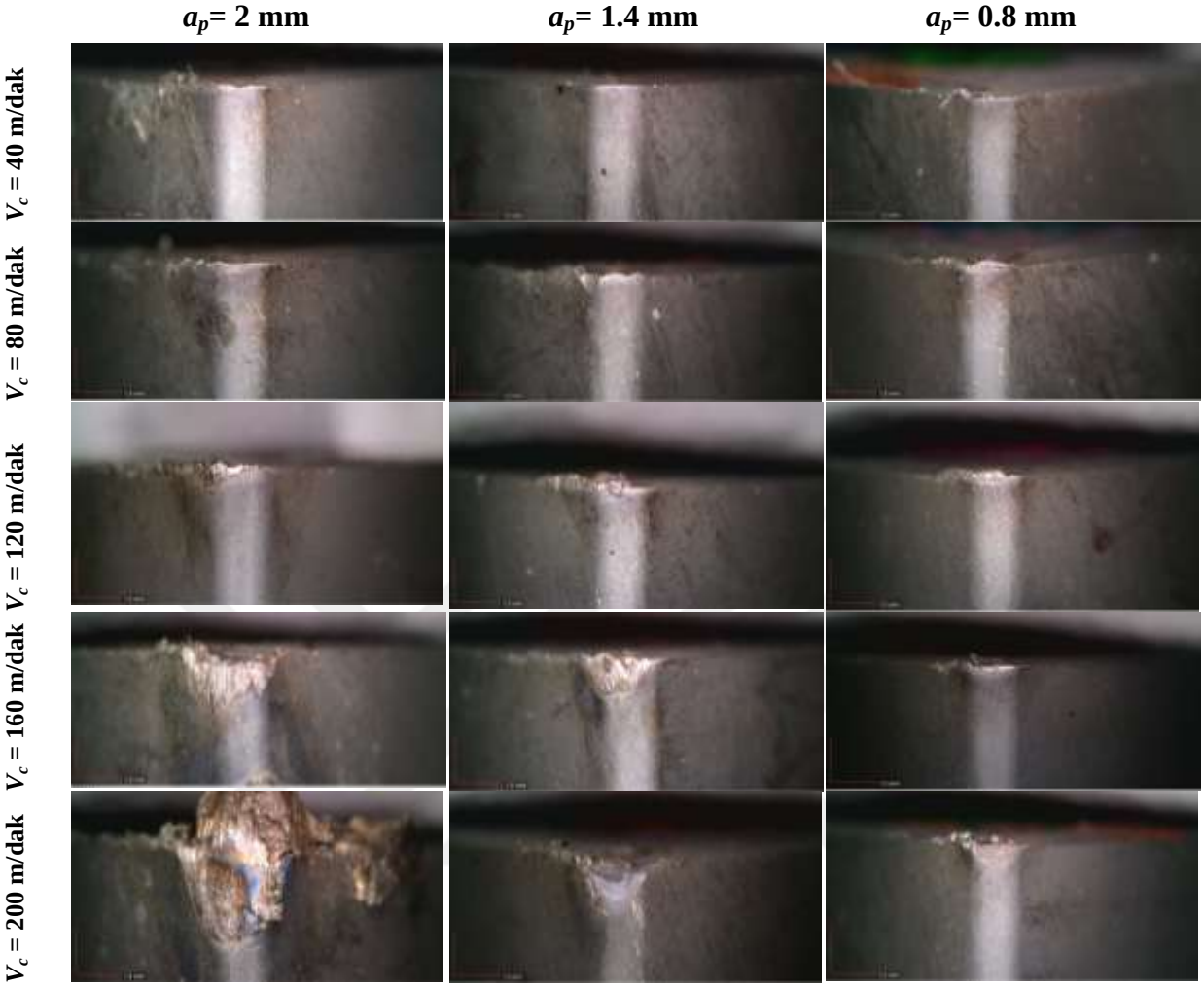
Şekil 3.12. Kuru kesme 0.1 mm/dev ilerlemede, kesme derinliği ve kesme hızına bağlı olarak oluşan burun aşınması miktarları



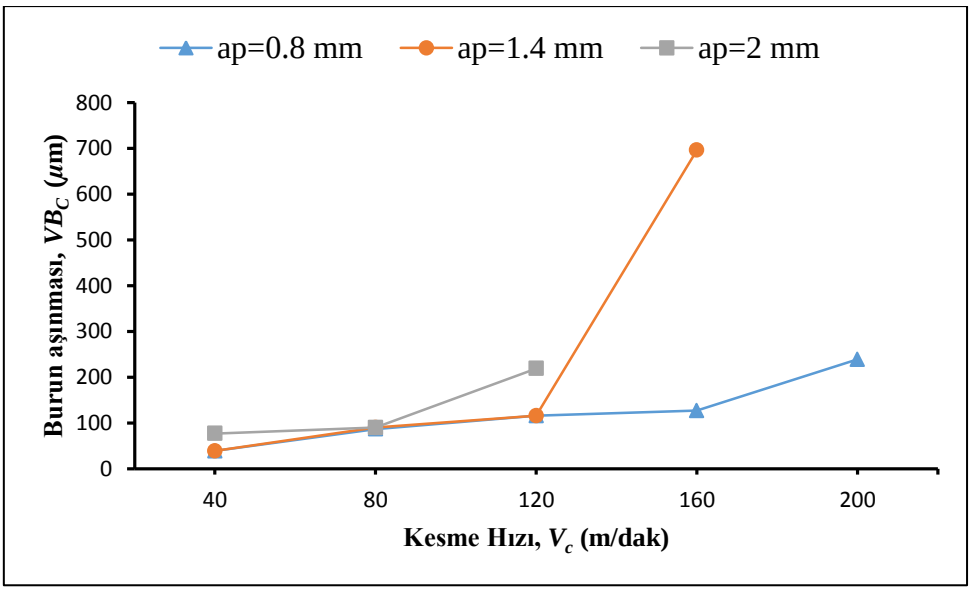
Şekil 3.13. 0.15 mm/dev ilerlemede kesici takımda oluşan burun aşınması görüntüleri



Şekil 3.14. Kuru kesme 0.15 mm/dev ilerlemede, kesme derinliği ve kesme hızına bağlı olarak oluşan burun aşınması miktarları



Şekil 3.15. 0.2 mm/dev ilerlemede kesici takımda oluşan burun aşınması görüntüleri

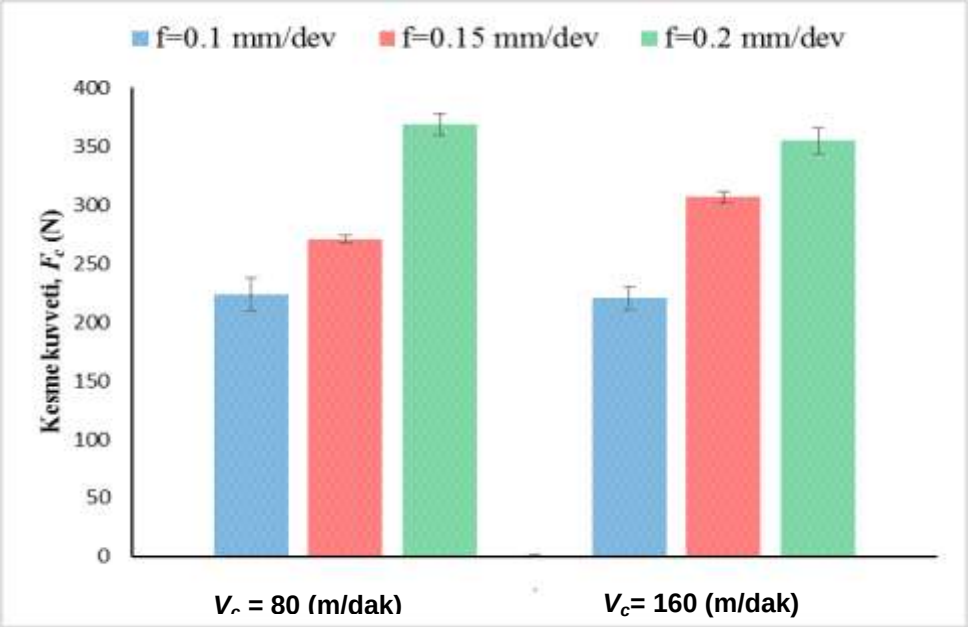


Şekil 3.16. Kuru kesme 0.2 mm/dev ilerlemede, kesme derinliği ve kesme hızına bağlı olarak oluşan burun aşınması miktarları

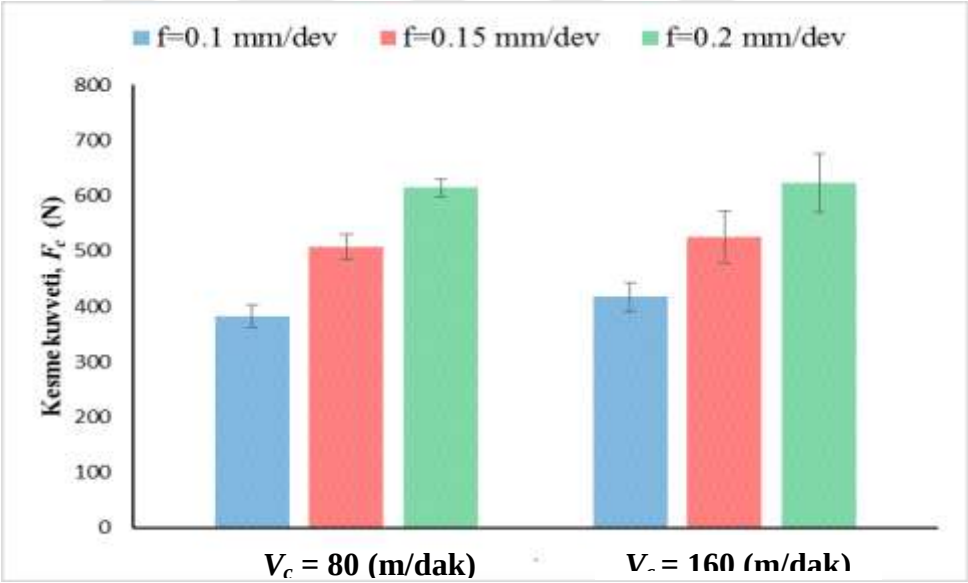
Ti-5553 malzemenin kuru işleme şartlarında 0.1, 0.15, 0.2 mm/dev ilerlemede farklı kesme hızları (40-200 m/dak) ve 0.8,1.4, ve 2 mm kesme derinliklerinde ölçülen burun aşınma sonuçları yukarıda sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar net olarak göstermektedir ki artan kesme hızı serbest yüzey aşınmasında olduğu gibi burun aşınmasının artmasına neden olmuştur. Diğer taraftan ilerleme ve kesme derinliğinin (1.4 ve üzeri) belli bir değerin üzerine çıkması da burun aşınmasına ivme kazandırmıştır. Genel anlamda değerlendirildiğinde, belli başlı aşınma mekanizmalarının dominant rol oynadığı ve bu mekanizmaları tetikleyen ana unsurun kesme hızı olduğu görülmektedir. Ancak kesme hızının belli değere ulaşmasıyla diğer faktörlerin de bu aşınma mekanizmalarını önemli derecede etkilediği görülmüştür.

3.1.3 Kesme Kuvvetleri

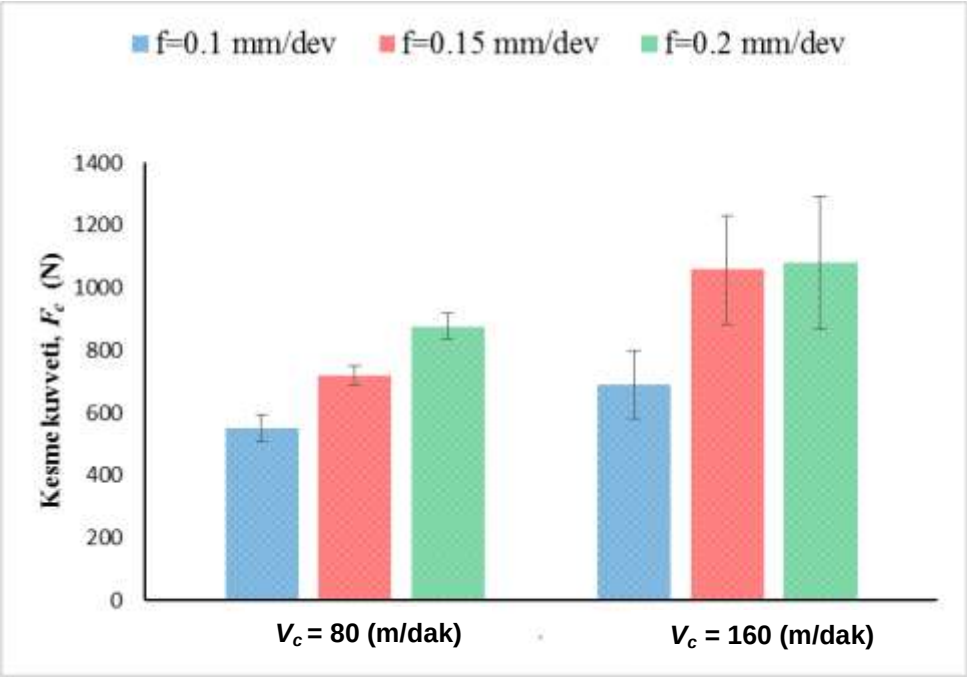
Kuru kesme şartlarında kesme kuvvetlerinin ölçümü için 80 ve 160 m/dak kesme hızlarında farklı kesme derinlikleri ve ilerlemeler dikkate alınmıştır. Şekil 3.17'de en düşük kesme derinliği olan 0.8 mm kesme derinliğinde 80 ve 160 m/dak kesme hızlarında ve üç farklı ilerlemede elde edilen ana kesme kuvvetleri sunulmuştur. Kesme kuvvetleri kesme hızının değişimi ile önemli ölçüde değişmediği görülmektedir. 0.8 mm kesme derinliğinde kesme hızının değişimi aşınmayı önemli ölçüde etkilememiştir, dolayısı ile kesme kuvvetinde kayda değer şekilde değişim göstermemiştir. Aynı şekilde 0.8 mm kesme derinliğinde ilerlemedeki değişim de aşınmayı kayda değer şekilde etkilememiştir (Şekil 3.10c) dolayısı ile kuvvetlerde önemli değişim görülmemiştir. Diğer taraftan ilerlemenin artışı talaş kesit alanı arttığı için kesme kuvvetlerinde doğal olarak artışa neden olmuştur. Kesme derinliği arttığı zaman elde edilen bulgularda farklılıklar görülmüştür. 1.4 mm kesme derinliğinde 80 m/dak kesme hızına nazaran 160 m/dak kesme hızında farklı ilerleme değerlerinde kuvvetlerde artış görülmüştür (Şekil 3.18). 2 mm talaş derinliğinde (Şekil 3.19) ise artışların yüzdesel olarak oldukça fazla olduğu görülmektedir. Örneğin 0.1 mm/dev ilerleme kuvvetteki artış yaklaşık olarak %25 iken; 0.15 mm/dev ilerlemede bu oran yaklaşık olarak %47 civarında ve 0.2 mm/dev ilerlemede ise yaklaşık %24 olmuştur. Dolayısı ile kesici takımlardaki aşınmanın artışına bağlı olarak kesme kuvvetlerinde de önemli sayılabilecek artış eğilimleri görülmüştür.



Şekil 3.17. 0.8 mm sabit kesme derinliği değerinde ölçülen ortalama kesme kuvvetleri



Şekil 3.18. 1.4 mm sabit kesme derinliği değerinde ölçülen ortalama kesme kuvvetleri

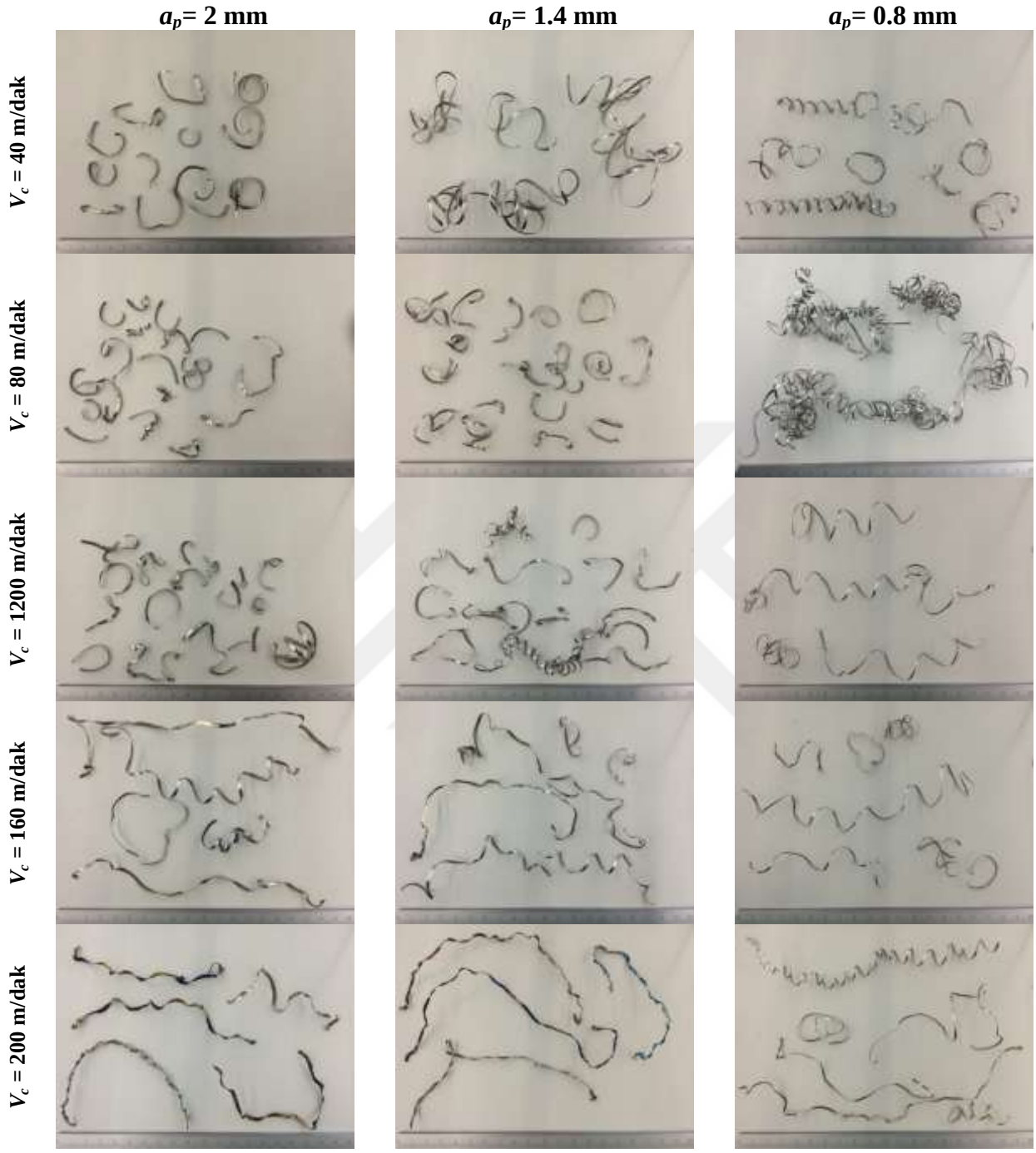


Şekil 3.19. 2 mm sabit kesme derinliği değerinde ölçülen ortalama kesme kuvvetleri

3.1.4 Talaş Kırılabilirliği

Kuru kesme ile yapılan deneylerde odaklanılan bir başka değişken ise talaş geometrisi ve kırılabilirliği olmuştur. Titanyum gibi süneklik özelliği ve pekleşme davranışı gösteren malzemelerde talaş kırılabilirliği dikkate alınması gereken işlenebilirlik parametresidir. Kırılamayan talaş talaşlı imalat sürecinin kontrol altına alınmasını hayli güçleştirmektedir. Talaşın kesici takım, takım tutucu ve iş parçasına sarması ciddi sorunlara sebep olabilmektedir. Bu bakımdan talaşın kırılabilir olması ve küçük boyutlarda elde edilmesi önem arz etmektedir. Diğer taraftan küçük boyuttaki talaşlar geri dönüşüm perspektifinden de önem arz etmekte ve geri dönüşüm maliyetini olumlu etkilemektedir. Tüm bunlar dikkate alınarak seçilen kesme parametrelerinin Ti-5553 alaşım malzemesinin talaşının kırılabilirliğine etkisi araştırılmıştır.

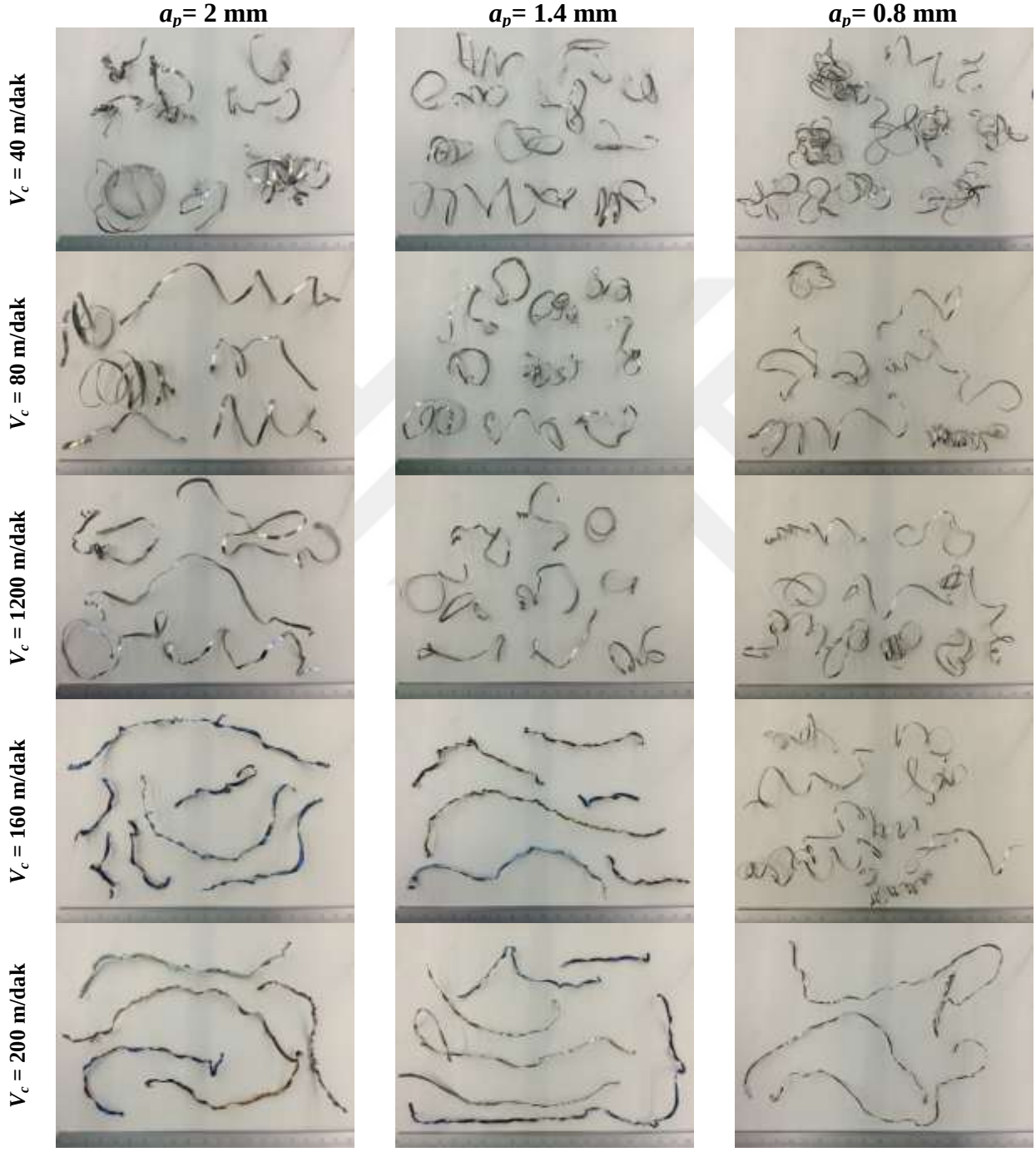
Şekil 3.20'de 0.1 mm/dev sabit ilerlemede ve farklı kesme hızı ve kesme derinliğinde elde edilen talaşların fotoğrafları gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi farklı koşullarda farklı boyutlarda talaşlar oluşmuştur. Bu sonuçlarda kesme hızının ve kesme derinliğinin talaş kırılabilirliğine etkisi net olarak görülmektedir. Düşük kesme hızında talaş kırılabilirliği iyi dolayısı ile talaşın boyu kısa iken, kesme hızı arttıkça talaş kırılabilirliğinin azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.20. 0.1 mm/dev ilerleme ve farklı kesme hızı ve derinliğinde elde edilen talaşların fotoğrafları

Buna ek olarak düşük kesme hızlarında daha düzenli bir talaş geometrisi elde edilebilirken, kesme hızının artmasıyla, talaş geometrisinin daha düzensizleştiği görülmektedir. Talaş derinliğinin artmasıda talaş kırılabilirliğini olumlu etkilemiştir. Bu durumda beklenilen bir durumdur. Talaş derinliğinin düşük olması sürekli talaş oluşumuna neden olmaktadır. Aynı durum Ti-5553 alaşımların işlenmesinde de gözlemlenmiştir.

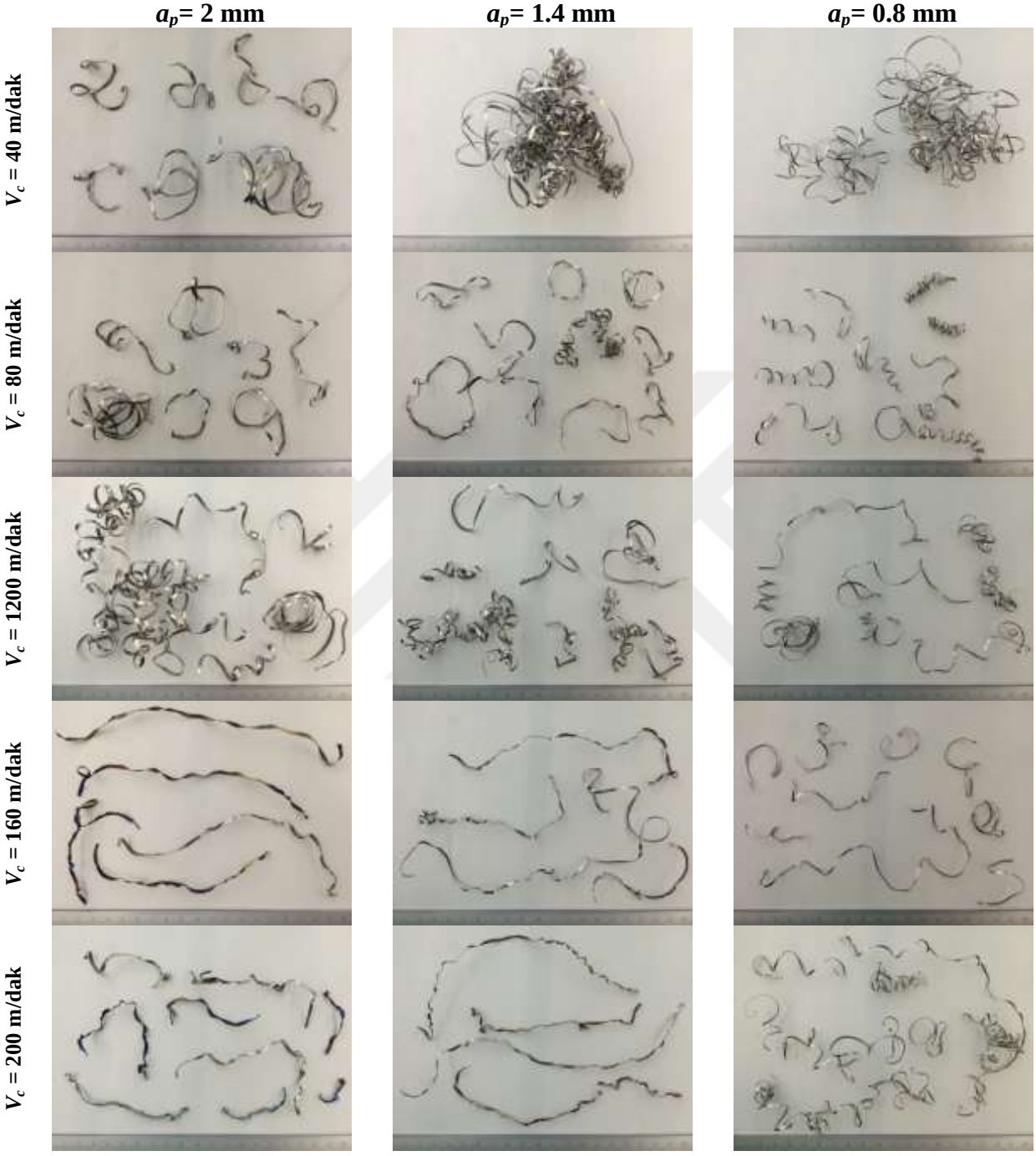
İlerlemenin artmasının talaş kırılabilirliğine pozitif etki etmesi beklenmektedir. Ancak Ti-5553 alaşımın talaşlı imalat deneylerinde, ilerlemenin 0.1 den 0.15'e çıkarılmasına rağmen, Şekil 3.21'de görüldüğü üzere talaş kırılabilirliğinde ciddi bir değişim gözlemlenmemiştir. Buna ek olarak yüksek kesme hızlarında artan sıcaklık dolayısı ile talaş renkleri değişmiştir.



Şekil 3.21. 0.15 mm/dev ilerleme ve farklı kesme hızı ve derinliğinde elde edilen talaş fotoğrafları

0.2 mm/dev ilerleme değerinde farklı kesme hızları ve kesme derinliklerinde elde edilen talaşların fotografları Şekil 3.22'de görülmektedir. Talaş kırılabilirliğinde ve talaş

geometrisinde kayda değer bir değişim görülmemektedir. Ancak not edilmesi gereken bir husus; düşük kesme hızlarında talaşın nispeten daha iyi bir kırılabilirlik gösterdiğidir.



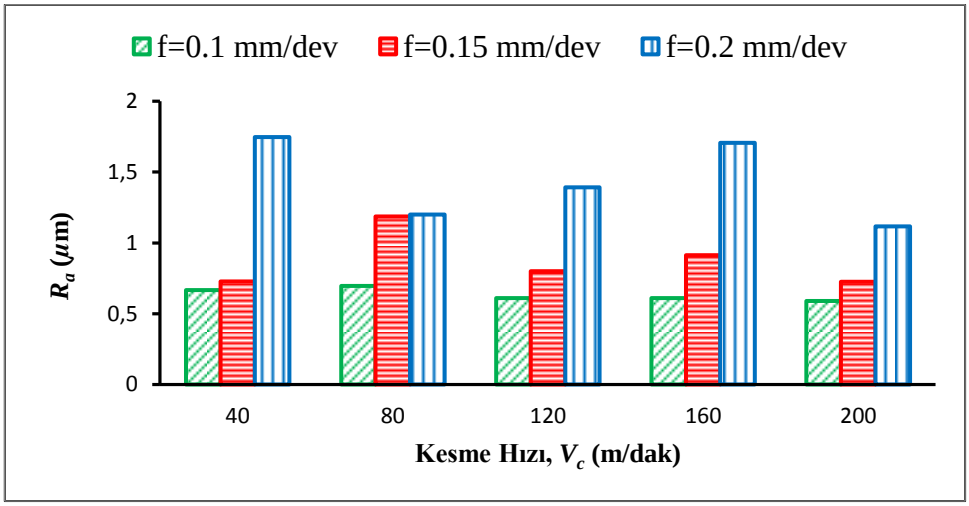
Şekil 3.22. 0.2 mm/dev ilerleme ve farklı kesme hızı ve derinliğinde elde edilen talaşların fotoğrafları

Şekil 3.20,3.21 ve 3.22'de kesme parametrelerindeki değişim sonucu Ti-5553 alaşımın talaşlı imalat sürecinde elde edilen talaşların boyutları ve formları sunulmuştur. Genel itibari ile seçilen kesme parametre aralığında kesme parametrelerinin talaş kırılabilirliğine çok ciddi

etkisinin olduğunu söylemek zordur. Ancak düşük kesme hızlarında nispeten daha kısa talaş boyutları elde edilmiştir.

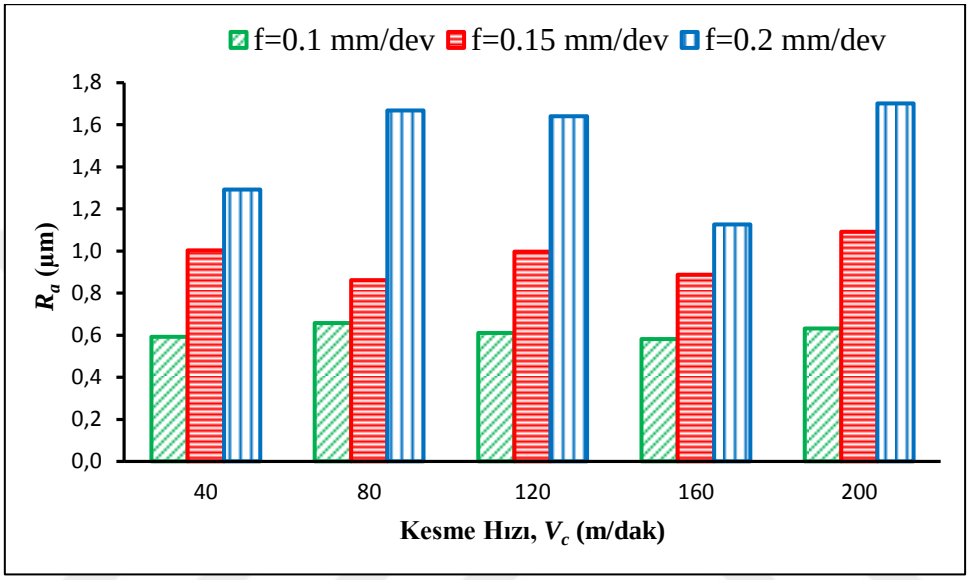
3.1.5 Yüzey Pürüzlülüğü

Talaşlı imalat yöntemlerini diğer imalat yöntemlerinden ayıran en önemli özelliklerden birinin daha iyi bir yüzey kalitesi elde edilmesi olduğundan şüphe yoktur. Bu perspektiften bakıldığında işlenen parçaların yüzey kalitesinin belli bir değerde olması beklenmektedir. Havacılık gibi hassas parçaların işlendiği alanda ise yüzey kalitesinin ayrı bir önemi vardır. Talaşlı imalat süreci sonunda elde edilen parçaların yüzey kalitesinin olabildiğince iyi olması arzu edilir. Bunu sağlamanın yolu ise yüzey pürüzlülüğünü minimize etmekle mümkündür. Kuru deneyler sonucunda işlenen parçaların yüzey pürüzlülükleri Şekil 3.23,3.24, ve 3.25'de sunulmuştur. Şekil 3.23'da 0.8 mm sabit kesme derinliğinde yapılan farklı kesme hızlarında ve ilerlemelerde elde edilen aritmetik ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri sunulmuştur. İlerlemenin artması ile yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı görülmektedir. Örneğin 40 m/dak kesme hızında 0.1 mm/dev ilerlemede yüzey pürüzlülük değeri 0.6 μm civarında iken, ilerlemenin 0.15 mm/dev'e yükselmesiyle R_a değeri 0.73 μm olmuştur. İlerlemenin 0.2 mm/dev olmasıyla ise yüzey pürüzlülüğünde ciddi bir artış gözlemlenmiştir. Diğer deney sonuçları da benzer eğilimler vermektedir. İşlenen parçaların yüzey pürüzlülüğü ile kesme hızı arasında doğrudan kontrol edilebilir bir ilişki görülmemektedir. Kesme hızının artmasıyla artan yüzey pürüzlülüğü eğilimi mevcut iken en yüksek kesme hızında pürüzlülükte bir azalma görülmüştür. Bu durum kesici takım burun yarıçapındaki aşınma ile ilişkilidir.

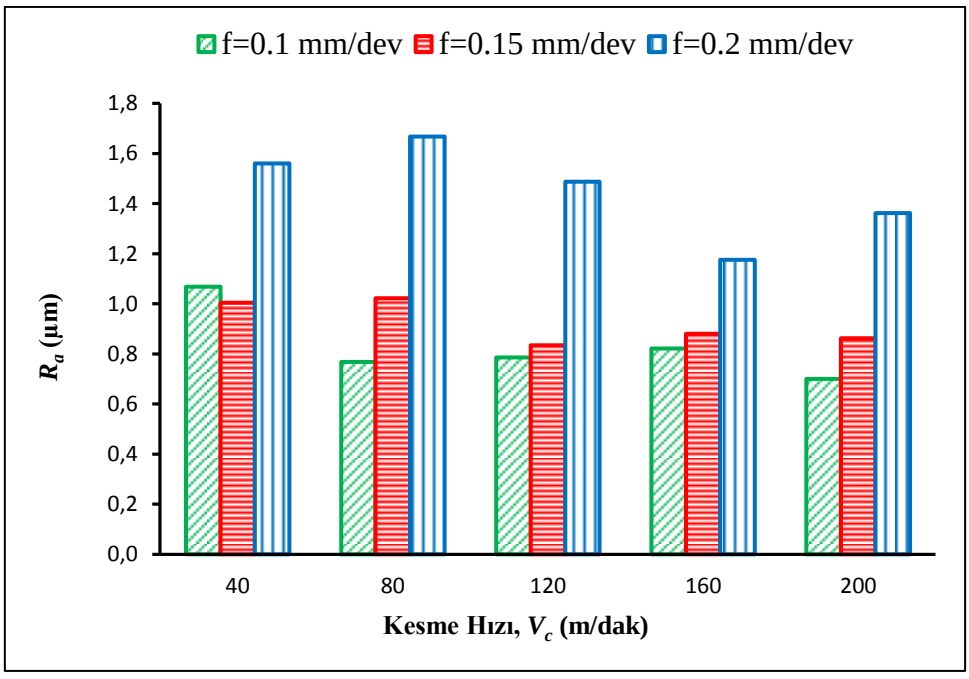


Şekil 3.23. Kuru kesme 0.8 mm sabit kesme derinliğinde elde edilen aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri

Şekil 3.24'de 1.4 mm sabit kesme derinliğinde farklı kesme hızı ve ilerlemede elde edilen sonuçlar, Şekil 3.25'de ise 2 mm sabit kesme derinliğinde farklı kesme hızı ve ilerlemelerde elde edilen yüzey pürüzlülükleri görülmektedir. Genel olarak elde edilen yüzey kalitesi dikkate alındığında yüzey pürüzlülük değerleri özellikle 0.1 ve 0.15 mm/dev ilerleme değerlerinde 1 μm civarında olduğu görülmektedir. Bu yüzey kalitesi havacılık endüstrisi tarafından kabul görebilecek değerde olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 3.24. Kuru kesme 1.4 mm sabit kesme derinliğinde elde edilen aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri



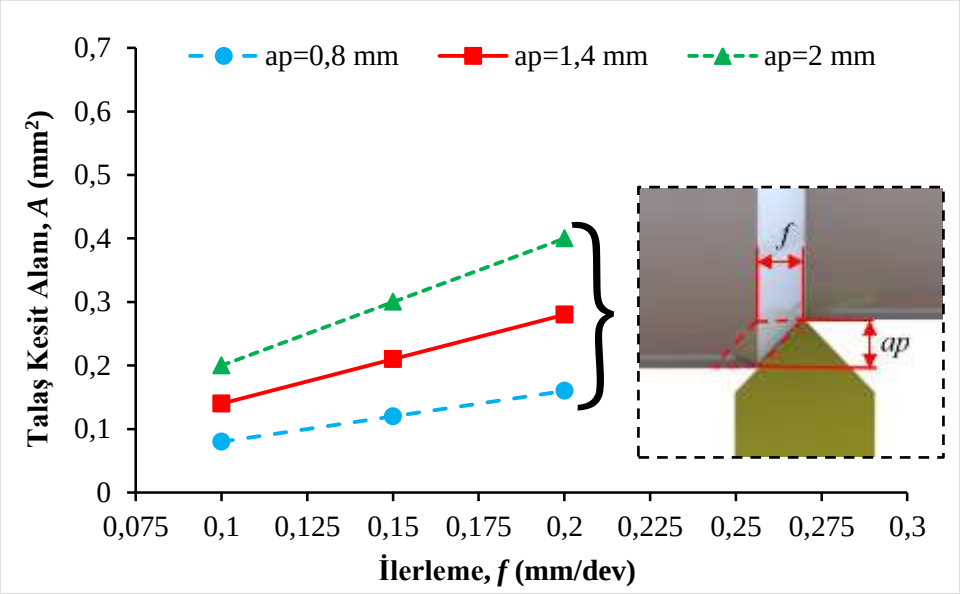
Şekil 3.25. Kuru kesme 2 mm sabit kesme derinliğinde elde edilen aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri

3.1.6 Değerlendirme ve Tartışma

Kuru kesme ile farklı kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliklerinde yapılan deneyler ve elde edilen bulgular yukarıda kapsamlı olarak sunulmuştur. Elde edilen bulgular ışığında Ti-5553 alaşım malzemesinin talaşlı imalat sürecinde 120 m/dk kesme hızının üstündeki hızlarda aşırı derecede aşınmanın olduğu gözlemlenmiştir. İlerleme olarak ise, 0.15 mm/dev'in üzerine çıkılması durumunda ise işleme performansının negatif bir seyir aldığı görülmüştür. Ancak kesme hızına bağlı olarak 0.2 mm/dev ilerlemenin kullanılabileceği elde edilen sonuçlar ışığında varılan neticedir. Kesme derinliği açısından değerlendirildiğinde ise yapılan operasyonun yarı finiş veya finiş operasyonu olarak düşünüldüğünde 1.4 mm kesme derinliğinin kabul edilebilir sonuçlar verdiği görülmektedir. 2 mm kesme derinliği özellikle yüksek hızlarda aşınmayı ciddi miktarda arttırmaktadır.

Literatür incelendiğinde 20-90 m/dak kesme hızı aralığında, 0.1-0.3 mm/dev ilerleme ve 0.1-1 mm kesme derinliklerinde kuru kesme deneylerinin yapıldığı görülmektedir[28]. Ancak özellikle aşınmanın kıyaslandığı kesme parametreleri (kesme derinliği ve kesme hızı) bu çalışmada elde edilen ve kritik olarak değerlendirilen değerlerin altındadır. Bu anlamda bu çalışmada özellikle kesme hızı ve kesme derinliği dikkate alındığında en geniş aralık seçilmiştir. Ancak literatürde özellikle Ti-6Al4V alaşımları yüksek hızlarda ve kesme derinliklerinde işlenebilmektedir [44]. Literatürde özellikle Ti-6Al4V malzemelerin karbür uçlarla yüksek kesme hızları olarak 300 m/dak kesme hızlarına kadar çıkıldığı görülmektedir[45]. Bu dikkate alındığında şüphesiz projedeki çıkılan hız daha düşüktür ancak Ti-6Al4V alaşıma oranla Ti-5553 alaşım sahip olduğu yüksek akma ve çekme mukavemet değerlerinden dolayı[2] özellikle aşınmada ISO standartlarında belirtilen, kaba tornalama için 0.7 mm değerlerinin de üzerine çıkmıştır. Ancak burada dikkate alınması gereken husus, bu kadar yüksek değerlere çıkan aşınmada temel belirleyici unsur kesme hızı olmamıştır. Bununla beraber kesme derinliği de önemli rol oynamıştır. Şekil 3.26'da farklı kesme derinlikleri ve ilerlemeler dikkate alınarak, temel talaş kaldırma mekaniği yaklaşımları kullanılarak hesaplanan talaş kesit alanları görülmektedir. Artan kesme derinliğinin talaş kesit alanını dolayısı ile kesici takıma gelen kuvvetleri önemli derecede arttırdığı görülmektedir. Bu durum sonucunda hem talaş kaldırma sıcaklıklar atmış ve ilerlemeninde yüksek olduğu deneylerde 900 °C sıcaklıklar talaş üzerinde ölçülmüştür ki kesici takım talaş temas bölgesinde çok daha yüksek olduğu değerlendirilmektedir. Bunun sonucunda kesici takım aşınması hayli önemli derecede artarak kesici burun bölgesinin ciddi hacimsel kayba

uğramasına neden olmuştur. Artan sıcaklıklar aynı zamanda adezyon mekanizmasını tetikleyerek yığma ağız sorununu ortaya çıkarmışlardır. Özellikle Ti ve Ni esaslı pekleşme kabiliyeti de olan alaşım malzemelerde görüldüğü gibi [1] Ti-5553 alaşımının kuru kesme koşullarında işlenmesindede yığma ağız sorunu oldukça sık rastlanan bir durum olmuştur.



Şekil 3.26. Farklı ilerleme ve kesme derinlikleri için hesaplanan talaş kesit alanları

Sonuç itibariyle, her üç değişken parametrenin (kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği) eş zamanlı artırılmasıyla birim zamanda kaldırılan talaş hacmi artış göstermekle birlikte, sadece birinin artırılmasıda da birim zamanda kaldırılan talaş hacmi açısından önemlidir. Özellikle kullanılacak farklı soğutucu ve yağlayıcılar ile kesme sıcaklığı nispeten kontrol edilebilir bir noktaya taşındığında yüksek kesme hızlarının halen kullanımı mümkün olabilecektir. Not edilmesi gereken bulgulardan biri ise kesme derinliğinin yüksek seçilmesi durumunda Ti-5553 alaşımdan talaş kaldırma sürecinin kontrolü oldukça zorlaşmaktadır. Bu anlamda, kesme derinliği yerine kesme hızında artışın olması kesme sürecinin kontrolü ve aynı zamanda birim zamanda kaldırılan talaş hacminin kontrolü açısından daha doğru bir yaklaşım olabileceği bulgular ışığında değerlendirilmektedir.

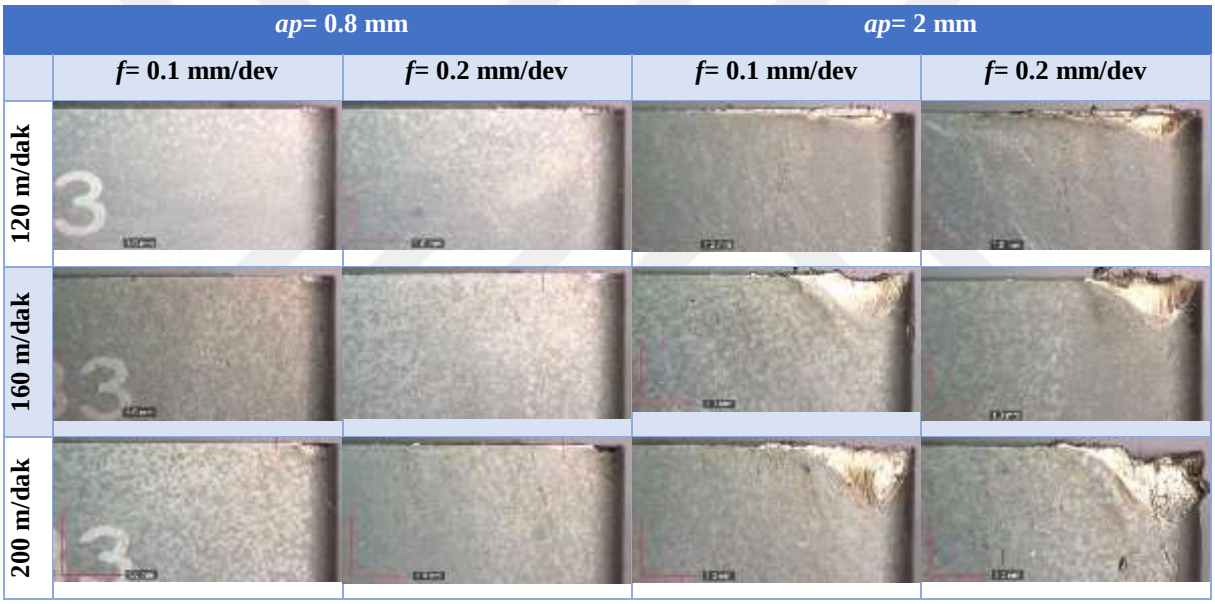
3.2 Kesme Sıvısının Uygulanmasında Kesme Parametrelerinin Etkisi

Kuru kesme şartlarında yapılan deneylerde gözlemlenen aşınma davranışı, kuvvetler, talaş kırılabilirliği ve işlenen parçaların yüzey kalitesinin kesme sıvısı uygulandığı durumlardaki değişiminin gözlemlenmesi ve analizi için kuru kesmede kullanılan ilerleme ve kesme derinliğinde alt ve üst sınırlar, kesme hızında ise; kuru kesmede kritik kesme hızı olarak görülen 120 m/dak ve üstü dikkate alınarak deneyler yapılmıştır. Böylece kesme

sıvısının kullanıldığı talaş kaldırma koşullarında farklı kesme parametrelerinin etkisi belirlenmiş olunacaktır.

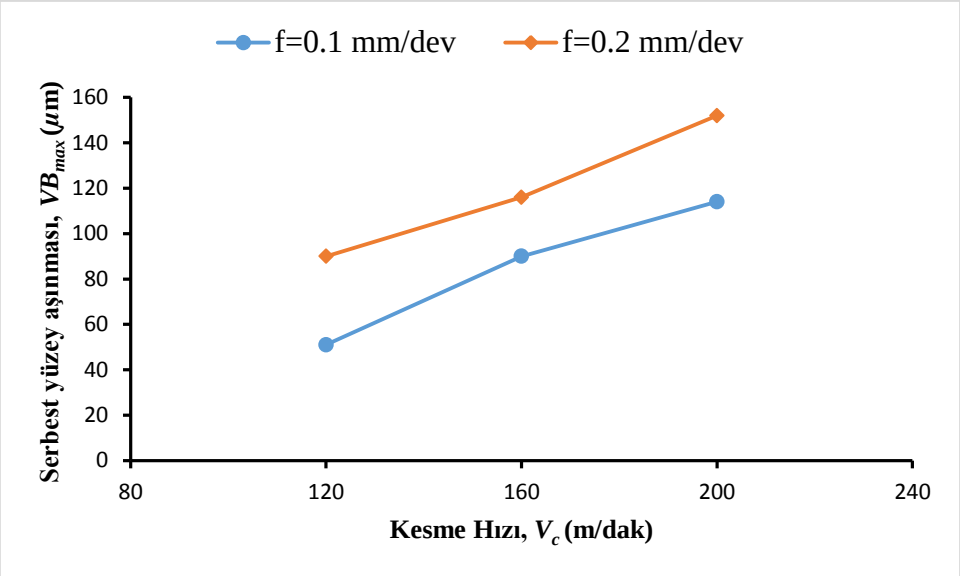
3.2.1 Aşınma

Şekil 3.27'da üç farklı kesme hızında, iki farklı ilerleme ve kesme derinliklerinde kullanılan kesici takımların serbest yüzey aşınmalarının optik mikroskop görüntüleri sunulmaktadır. Kesme hızı yükselmiş olmasına rağmen, düşük kesme derinliklerinde aşınma davranışında ani bir değişim görülmemiştir, oysa büyük talaş derinliğinde aşınma oldukça belirgin ve yığma ağız mekanizması oldukça aktif görülmektedir. Optik mikroskop görüntülerine ait serbest yüzey aşınmalarının 0.8 mm kesme derinliği için sayısal verileri Şekil 3.28'de sunulmuştur. İlerlemenin serbest yüzey aşınmasında kayda değer etkisi şekilde

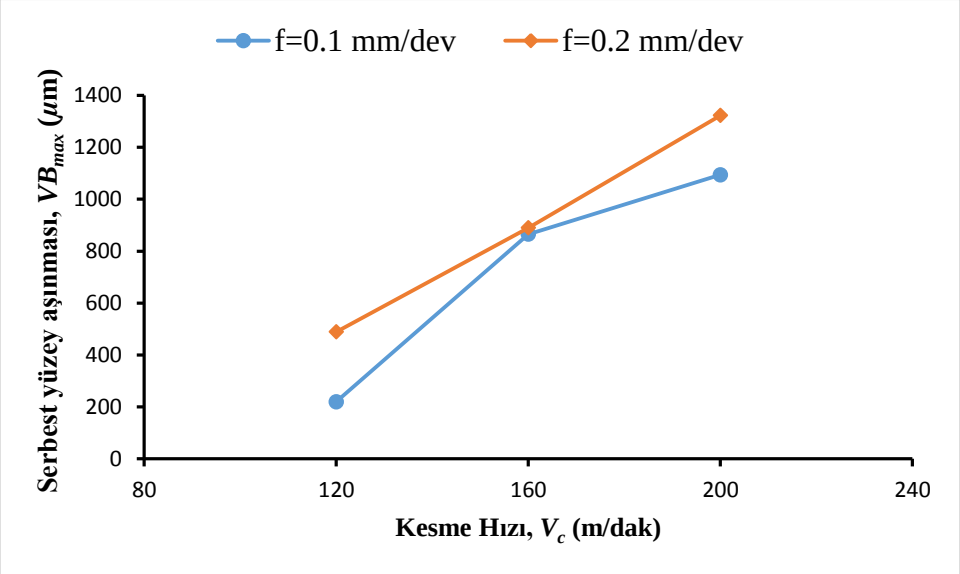


Şekil 3.27. Kesme sıvısı koşullarında farklı kesme hızı, kesme derinliği ve ilerlemede kesici takım serbest yüzey aşınmasının optik mikroskop görüntüleri

görülmektedir. Buna ek olarak kesme hızınında oldukça belirgin olarak serbest yüzey aşınmasını tetiklediği görülmektedir. Kesme derinliğinin 0.8 mm ve ilerlemenin 0.2 mm/dev olduğu talaş kaldırma operasyonunda, kesme hızı 120 m/dak'dan 200 m/dak'ya çıkınca serbest yüzey aşınması ise 90 µm'den 152 µm'ye çıkmış olup yaklaşık %70 artış olmuştur. Kesme derinliği 2 mm olduğunda ise kesme hızı 120 m/dak'dan 200 m/dak'ya ulaştığında serbest yüzey aşınması 498 µm'den 1323 µm'ye çıkmış olup artış yaklaşık olarak % 165 olmuştur (Şekil 3.29) . Bu durum Ti-5553 alaşımın işlenmesinde, serbest yüzey aşınmasında kesme derinliğinin etkisinin önemini göstermektedir.



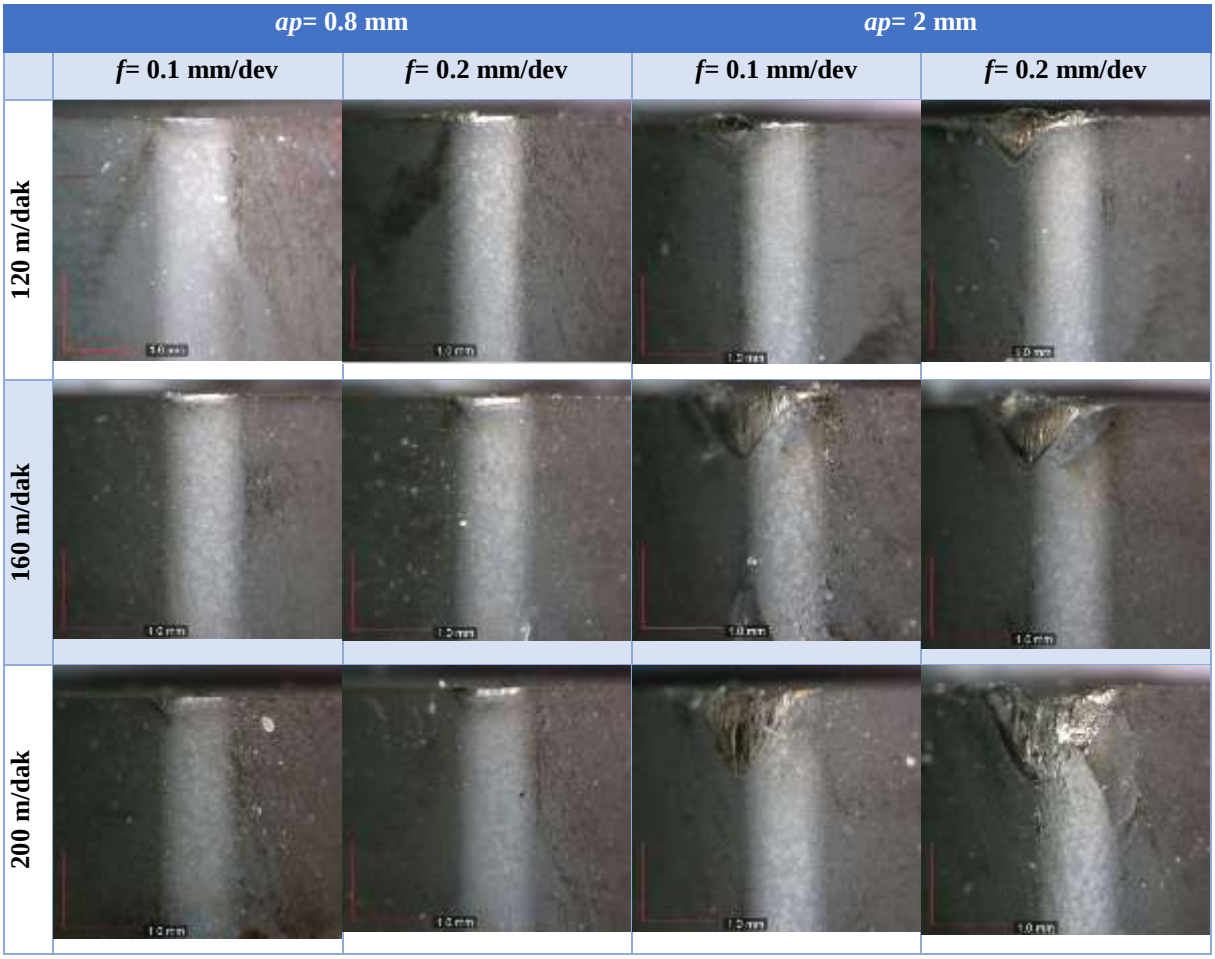
Şekil 3.28. Kesme sıvısı koşullarında kesme hızı ve ilerlemenin kesici takım serbest yüzey aşınmasına etkisi (a_p= 0.8 mm)



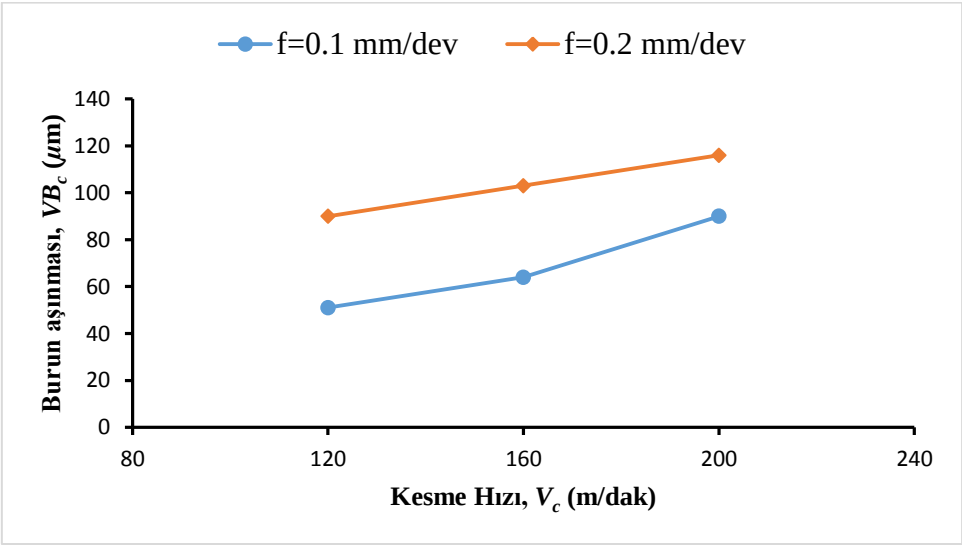
Şekil 3.29. Kesme sıvısı koşullarında kesme hızı ve ilerlemenin kesici takım serbest yüzey aşınmasına etkisi (a_p= 2 mm)

Şekil 3.30'de üç farklı kesme hızında, iki farklı ilerleme ve kesme derinliklerinde kullanılan kesici takımların burun aşınmalarının optik mikroskop görüntüleri sunulmaktadır. Özellikle yüksek kesme derinliğinde serbest yüzey aşınmasına paralel olarak burun bölgesinde de kayda değer hacimsel kayıplar olduğu görülmektedir. Ancak farklı kesme derinliklerinde ölçülen burun aşınmalarının sunulduğu Şekil 3.31 ve 3.32 incelendiğinde, burun aşınmalarının kesme parametrelerinden etkilenmesinin, serbest yüzey aşınmalarının kesme parametrelerine hassasiyeti kadar olmadığı görülmektedir. Özellikle düşük ilerlemede (

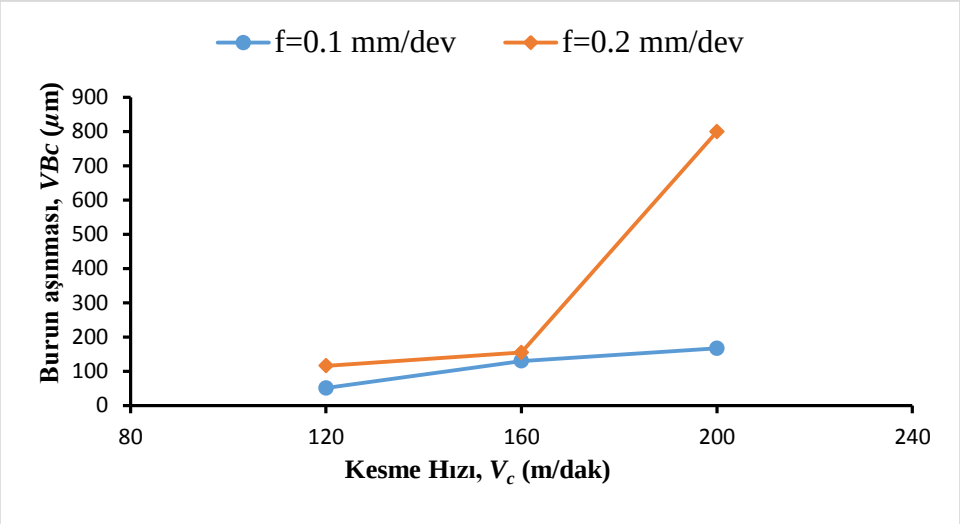
f= 0.1 mm/dev) kesme hızının artışıyla burun aşınmasının yüksek ilerlemeye (*f*= 0.2 mm/dev) nazaran daha az artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 3.30. Kesme sıvısı koşullarında kesme hızı, kesme derinliği ve ilerlemenin kesici takım serbest yüzey aşınmasına etkisi

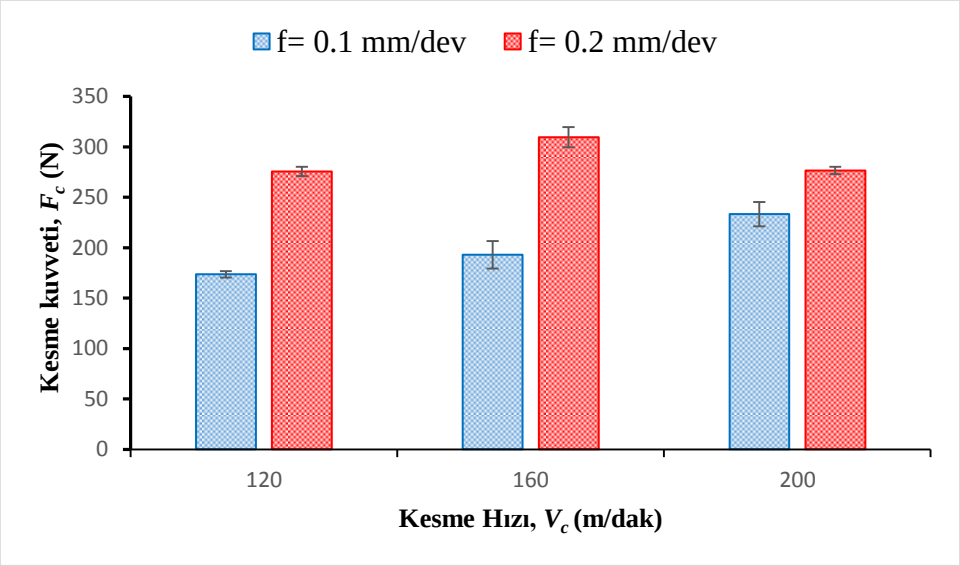


Şekil 3.31. Kesme sıvısı koşullarında kesme hızı ve ilerlemenin kesici takım burun aşınmasına etkisi (a_p= 0.8 mm)



Şekil 3.32. Kesme sıvısı koşullarında kesme hızı ve ilerlemenin kesici takım burun aşınmasına etkisi (a_p= 2 mm)

3.2.2 Kesme Kuvvetleri

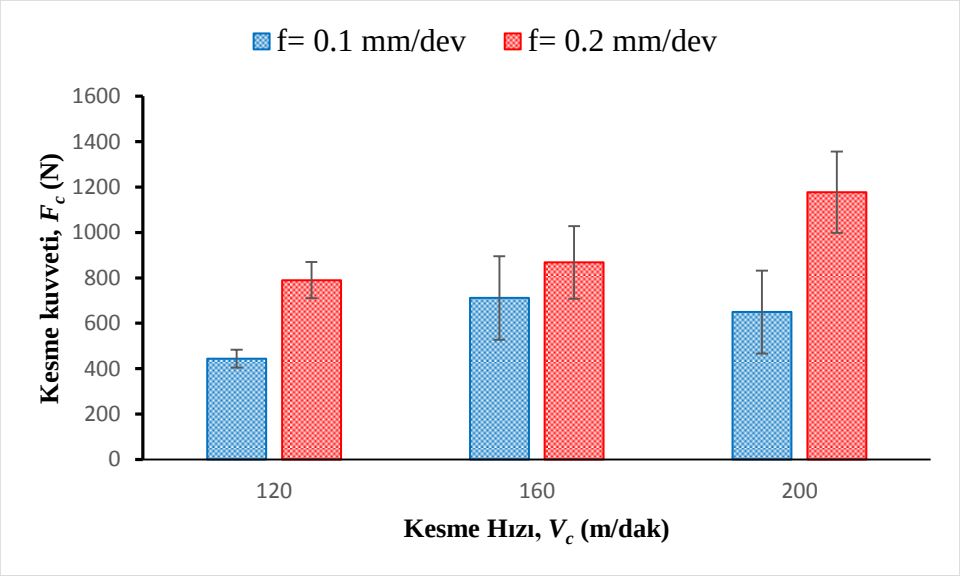


Şekil 3.33. Kesme sıvısı koşullarında farklı kesme hızı ve ilerlemenin kesme kuvvetine etkisi (a_p= 0.8 mm)

Kuru kesme şartlarında olduğu gibi kesme sıvısının kullanıldığı koşullarda da kesme kuvvetlerinin kesme parametrelerinden kayda değer oranda etkilendiği farklı kesme derinlikleri dikkate alınarak ilerleme ve kesme hızının etkilerinin kesme kuvvetlerine etkilerinin sunulduğu Şekil 3.33 ve Şekil 3.34'de görülmektedir. Artan kesme hızı sonucunda elde edilen kesme kuvvetlerinin davranışının kesme derinliğinden ve ilerlemeden önemli derecede etkilendiği görülmektedir. Şekil 3.33'da görüldüğü üzere yüksek ilerlemede kesme

kuvvetleri önce artış sonra ise azalma eğilimi gösteriyor. Ancak düşük ilerleme sürekli artış görülmektedir. Bunun temel sebebi, yüksek ilerlemede kesici takım uç bölgesindeki aşınmanın değişimi ve kesici takım iş parçası arasındaki özellikle talaş yüzeyindeki açının değişimidir.

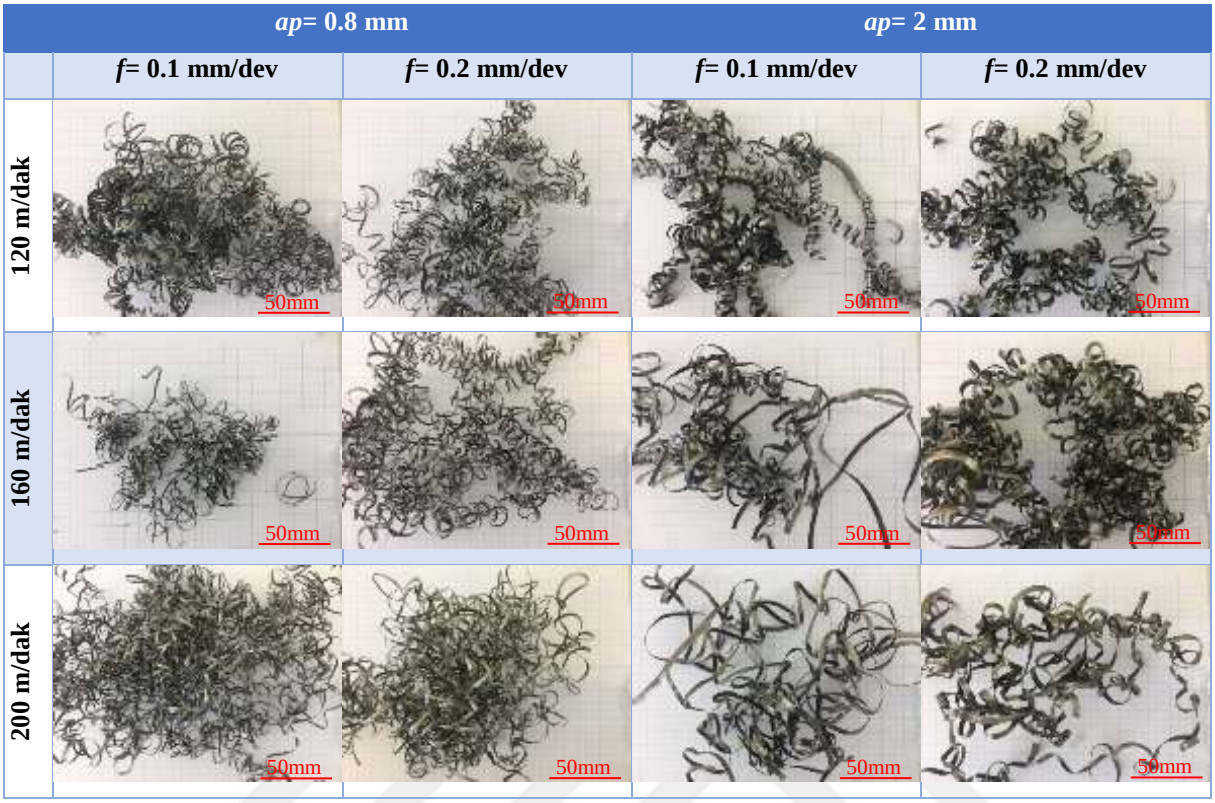
Kesme derinliği arttığında ise düşük ilerlemede kesme hızının artışıyla kuvvette artış akabinde ise azalma görülmektedir. Burada bir önceki şeklin yorumlanmasında ifade edilen kesici takım ile iş parçası arasındaki özellikle talaş yüzeyinde değişen açısal ilişkiden söz edilebilir. Diğer taraftan artan ilerlemede ise aşınmanın oldukça dominant ve belirleyici unsur olması nedeniyle kuvvetlerde sürekli artış görülmektedir.



Şekil 3.34. Kesme sıvısı koşullarında farklı kesme hızı ve ilerlemenin kesme kuvvetine etkisi (a_p= 2 mm)

3.2.3 Talaş Kırılabilirliği

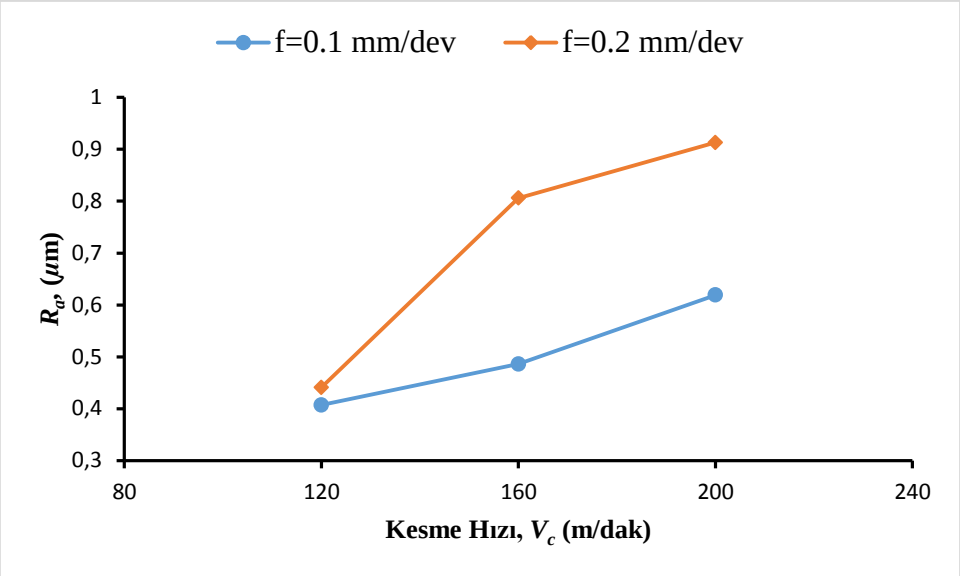
Kesme sıvısının uygulanmasıyla farklı kesme koşullarında ve farklı kesme parametreleriyle yapılan talaş kaldırma operasyonunda elde edilen talaşlar Şekil 3.35'de sunulmuştur. Görüldüğü üzere seçilen kesme parametrelerinde talaşların kırılmadığı süreli ve uzun talaşların oluştuğu görülmektedir. Talaş kırılmasında önemli bir faktör olduğu düşünülen ilerlemenin de attırılmasının seçilen kesme koşullarında talaş kırılmasına katkı sunmadığı görülmektedir.



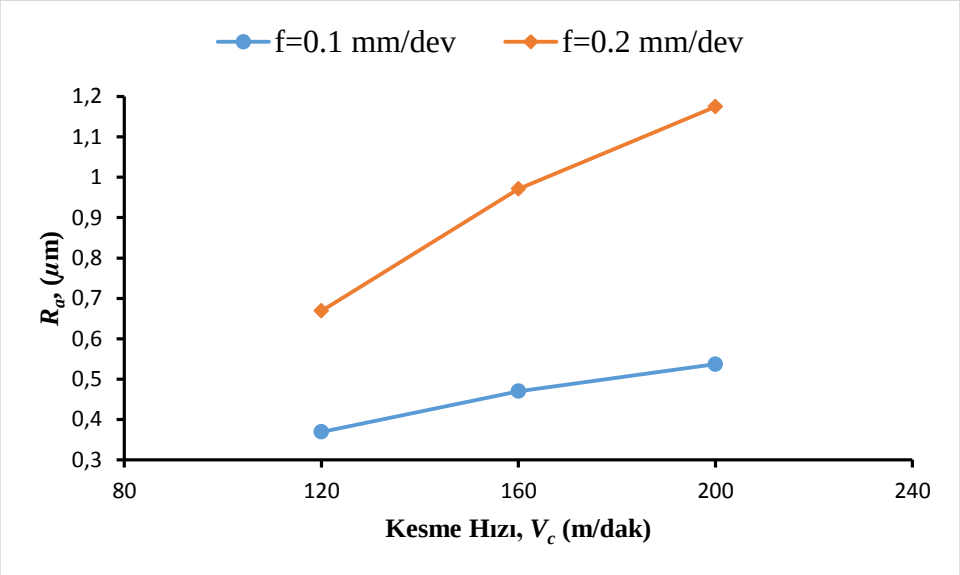
Şekil 3.35. Farklı kesme derinliğinde kesme sıvısı koşullarında farklı kesme hızı ve ilerlemenin talaş kırılabilirliğine etkisi

3.2.4 İş Parçası Yüzey Kalitesi

Kesme sıvısının uygulanmasıyla Ti-5553 alaşımların işlenmesi operasyonunda elde edilen ve ölçülen son çıktı işlenen parçaların aritmetik ortalama yüzey pürüzlülük (R_a) değerleri olmuştur. 0.8 mm kesme derinliğinde farklı ilerleme ve hızlarda işlenen parçaların yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 3.36'da sunulmuştur. Kesme hızının artmasına bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerlerinde belirgin bir artışın olduğu görülmektedir. 120 m/dak kesme hızında ölçülen R_a değerleri her iki ilerleme içinde 0.4 µm civarında iken, kesme hızı 200 m/dak olduğunda ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri özellikle yüksek ilerlemede çok ciddi artış göstermiştir. Kesme derinliğinin 2 mm olduğu talaş kaldırma operasyonu sonucu elde edilen parçaların yüzey kalitesi incelendiğinde (Şekil 3.37) benzer durum görülmektedir.



Şekil 3.36. 0.8 mm kesme derinliğinde kesme sıvısı koşullarında farklı kesme hızı ve ilerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (a_p= 0.8 mm)

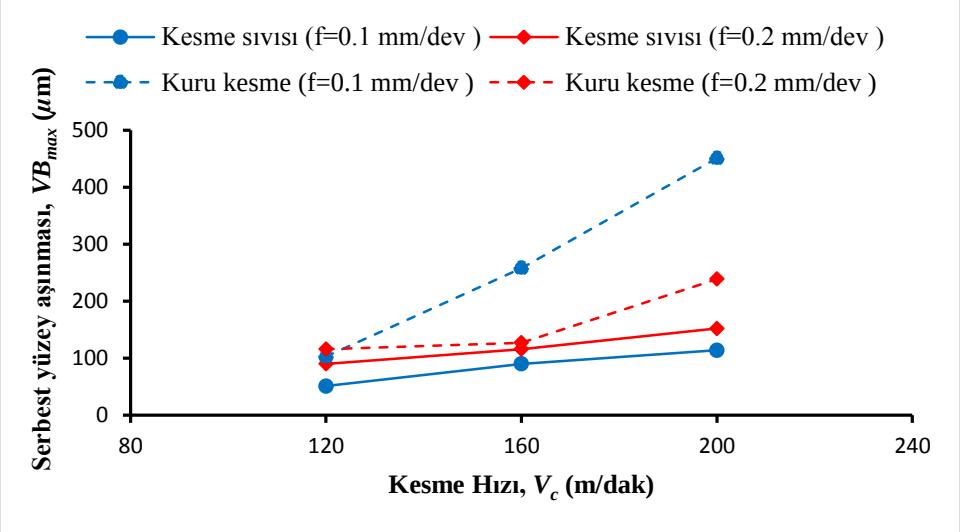


Şekil 3.37. 0.8 mm kesme derinliğinde kesme sıvısı koşullarında farklı kesme hızı ve ilerlemenin kesme pürüzlülüğüne etkisi (a_p= 2 mm)

3.2.5 Kuru Kesme ve Kesme Sıvısında Elde Edilen Bulguların Kıyaslanması ve Değerlendirme

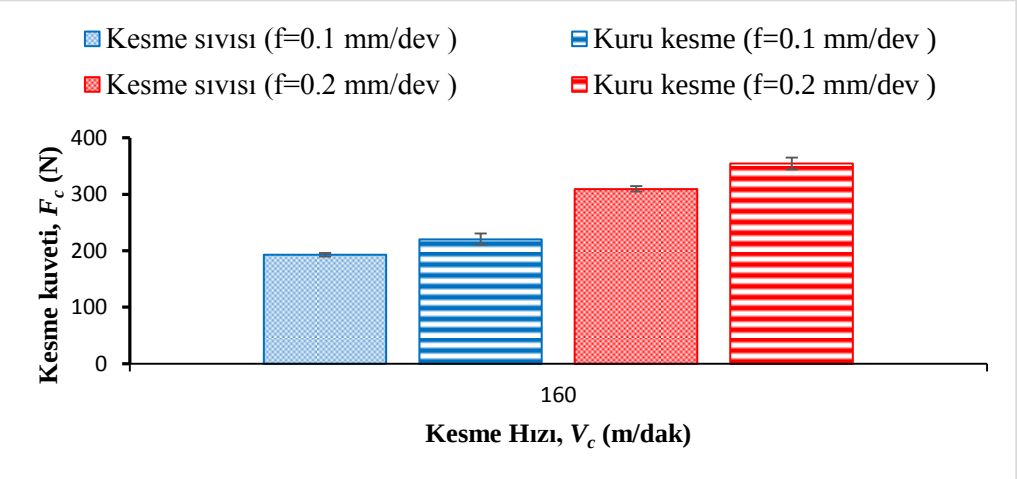
Kuru kesmede seçilen parametrelerde elde edilen çıktılar kapsamlı olarak bir önceki bölümde sunulmuştur. Kuru kesmede seçilen aralıkta elde edilen bulgularla birlikte kesme sıvısı uygulanmasıyla elde edilen bulgulardan serbest yüzey aşınması, kesme kuvveti ve aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri bu bölümde kıyaslanmıştır. Serbest yüzey

aşınması kıyaslaması Şekil 3.38'de sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere kuru kesmeye nazaran kesme sıvısının uygulanmasıyla serbest yüzey aşınmasında kayda değer bir iyileşme görülmüştür. Bu durum seçilen tüm kesme hızlarında ve her iki ilerleme içinde geçerlidir. Kesme kuvvetleri açısından incelendiğinde ise serbest yüzey aşınmasına benzer bir eğilimin olduğu görülmektedir. Kesme kuvvetleri kıyaslaması Şekil 3.39'de sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere kuru kesmeye nazaran kesme sıvısının uygulanmasıyla kesme kuvvetlerinde azalma olduğu görülmektedir. Kesme sıvısının kullanılmasıyla artan ilerleme

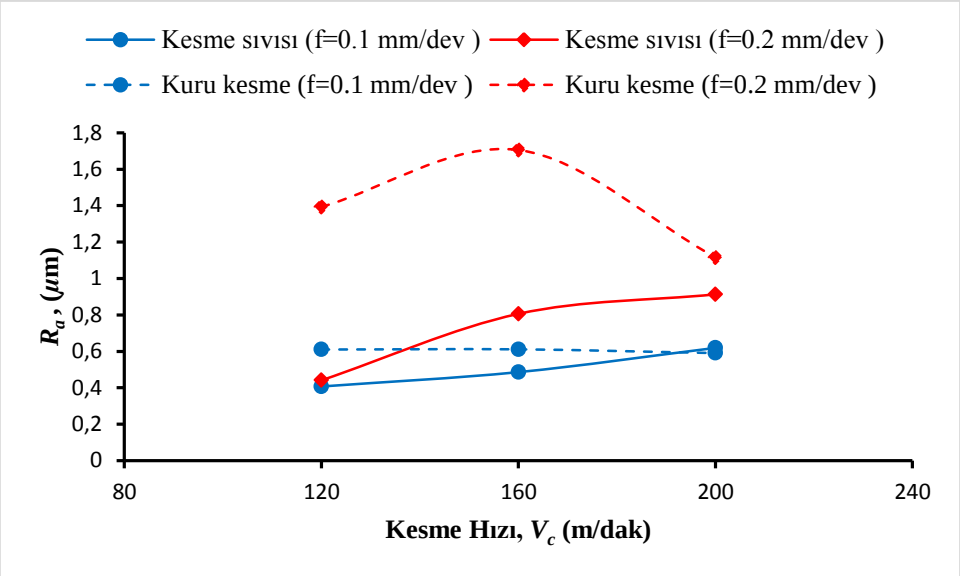


Şekil 3.38. 0.8 mm kesme derinliğinde kesme sıvısı ve kuru kesmede ölçülen serbest yüzey aşınması

Diğer taraftan benzer bir davranışın artimetik ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde de elde edildiği Şekil 3.40'de görülmektedir. Özellikle yüksek ilerleme değerinde kuru kesme ile kesme sıvısı arasındaki farklılığın oldukça belirgin ve kayda değer olduğu görülmektedir.



Şekil 3.39. 0.8 mm kesme derinliğinde kesme sıvısı ve kuru kesmede ölçülen kesme kuvvetleri



Şekil 3.40. 0.8 mm kesme derinliğinde kesme sıvısı ve kuru kesmede işlenen parçaların aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü

Sonuç itibariyle referans noktası olarak kuru kesme ve kesme sıvısı alındığında elde edilen sonuç göstermektedir ki kesme sıvısı ile Ti-5553 alaşım malzemesinin işlenebilme performansı daha da iyileşmiştir. Bu durum dikkate alındığında, özellikle farklı soğutucu ve yağlayıcıların temel değişken olarak dikkate alınacağı deneysel çalışmalarda farklı soğutucu ve yağlayıcıların uygulanmasıyla Ti-5553 alaşımın işlenebilme performansının daha iyi olabileceği öngörülmekte olup, buna bağlı olarak kesme parametreleri tayin edilmiştir. Ancak burada not edilmesi gereken oldukça önemli bulgu, kesme derinliğinin belli değeri aşması durumunda Ti-5553 alaşımın işlenebilme performansının bundan hayli önemli derecede etkilendiğidir. Bu perspektiften bakıldığında kesme derinliğinde artış yerine kesme hızının aralığının geniş tutulması yine birim zamanda kaldırılacak malzemenin hacminde ve dolayısı ile üretkenlikte kayba neden olmayacaktır.

3.3 Minimum Miktarda Yağlamada Debinin Etkisi

Minimum miktarda yağlama (MQL) için deneylerde amaçlanan debinin Ti-5553 alaşımın işlenmesine etkisini araştırmaktır. MQL uygulamalarında literatür dikkate alındığında özellikle Ti-6Al4V alaşımın işlenmesinde çok farklı debi değerleri (36 ml/saat, 50 ml/saat, 250 ml/saat, gibi) literatür tarafından kullanılmıştır [46]. Debi mevcut ekipmanların kapasitesi ve literatür taraması göz önünde bulundurularak 21 ml/saat , 43 ml/saat, 65 ml/saat olarak belirlenmiştir. Kesme hızı 160 m/dk, kesme derinliği ise 1.4 mm olarak ve ilerleme

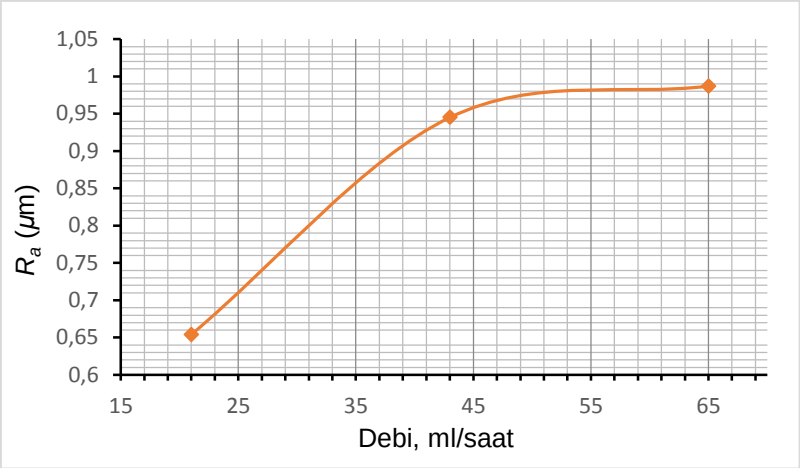
0.15 mm/dev sabit tutularak deneyler yapılmıştır. Elde edilen bulgular aşağıda sistematik olarak sunulmuştur.

Minimum miktarda yağlama (MQL) yöntemi ile yapılan deneylerde elde edilen kesme sıcaklığının debiden etkilendiği söylenilebilir. Örneğin 43 ml/saat debide ölçülebilen maksimum sıcaklık 738 °C iken, 65 ml/saat debide bu sıcaklık 644 °C olarak ölçülmüştür. Dolayısı ile debinin artması ile kesme sıcaklığının azalma eğilimi gösterdiği görülmektedir. Minimum miktarda yağlama aynı zamanda soğutma görevini de görmektedir, dolayısı ile kesme bölgesindeki sıcaklığın azalmasına katkı sağlamıştır. Ancak diğer taraftan debinin artmasıyla kesici takım serbest yüzeyindeki aşınma miktarının arttığı Şekil 3.41'de görülmektedir. Kesme sıvıları Ti esaslı malzemeleri işlerken bazı durumlarda oksidasyon aşınma mekanizması ile artan aşınma eğilimi gösterebilmektedirler [47] Bu gibi durumlarda akış oranının azaltılması söz konusu olabilmektedir. Yapılan bu çalışmada bunu destekler nitelikte sonuçlar çıkmıştır. Görüldüğü üzere en fazla serbest yüzey aşınması (487 μm) olarak 65 ml/saat debi ölçülmüştür. 43 ml/h debide ise kayda değer miktarda yığma ağız sorunu ile karşılaşılmıştır. En düşük debi ile ise oluşan serbest yüzey aşınması yaklaşık olarak 372 μm civarındadır.



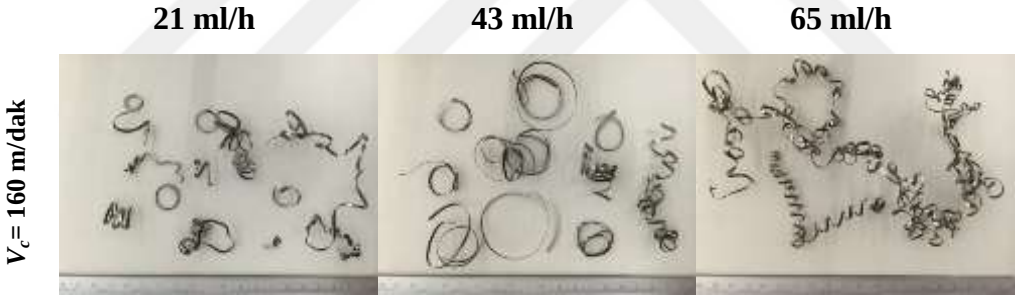
Şekil 3.41. Farklı debilerde kesici takım serbest yüzey aşınmasına etkisi (V_c = 160 m/dak, a_p=1.4 mm, f=0.15 mm/dev)

İş parçası yüzey pürüzlülüğü ile minimum miktarda yağlamanın debisi arasındaki ilişki Şekil 3.42'de sunulmuştur. Düşük debide elde edilen yüzey pürüzlülüğü daha az olmuştur. Artan debi ile beraber yüzey kalitesinde kötüleşme meydana gelmiştir. Bunun temel nedeninin kesici takımda meydana gelen aşınma miktarı olduğu kanaatine varılmıştır. Yüksek debide aşınma miktarının yüksek olduğu bir önceki Şekil 3.41'de sunulmuştur.



Şekil 3.42. Minimum miktarda yağlama ön deneyleri akış oranı-yüzey pürüzlülüğü grafiği

Talaş kırılabilirliği açısından debinin etkisine bakıldığında ise, Şekil 3.43'de görüldüğü gibi düşük debide nispeten kısa talaşlar oluşmuş ancak yüksek debide ise daha uzun ve sürekli talaşların oluştuğu görülmektedir. Bu durumda yine takım aşınması ve bunun neticesinde kesici takım talaş yüzeyi geometrisinin değişimi ile ilişkili bir durumdur.



Şekil 3.43. 21, 43,65 ml/h akış oranlarında elde edilen talaş görüntüleri

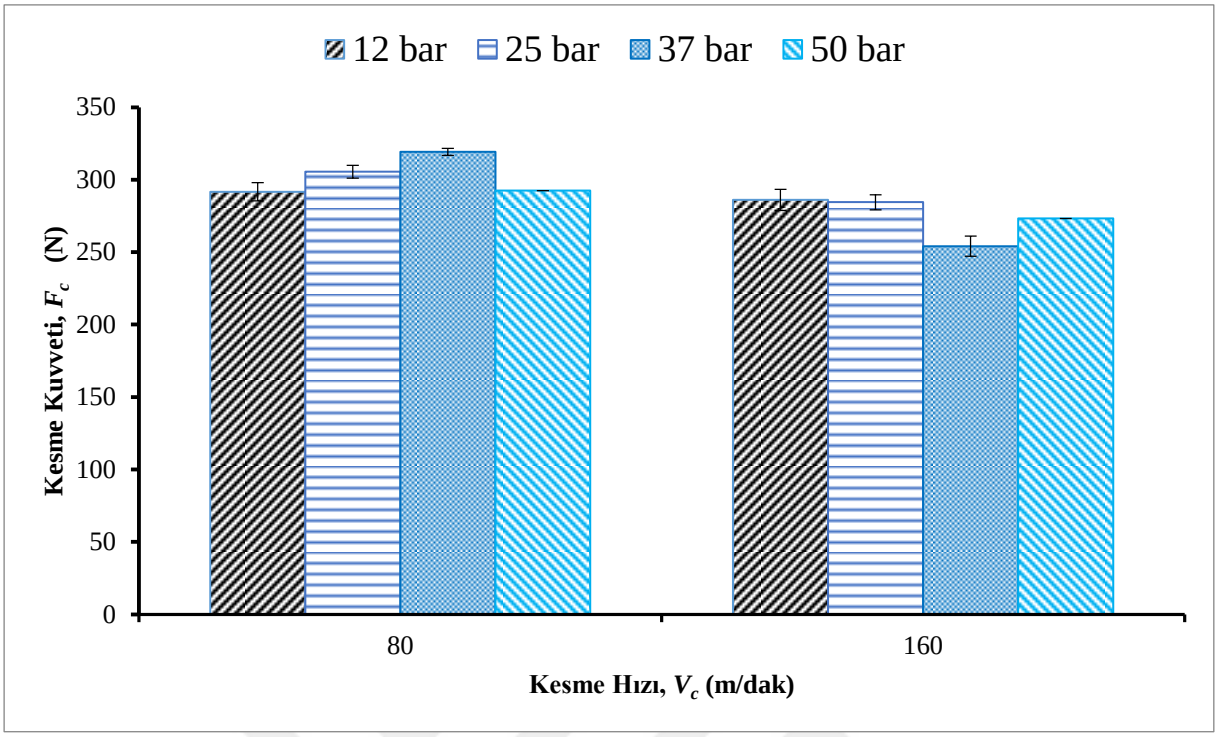
Ti-5553 alaşımın işlenmesinde MQL ile ön çalışma niteliğinde yapılan bu çalışmada debinin kesici takım aşınma miktarını etkilediği ve dolayısı ile hem iş parçası yüzey kalitesi hem de talaş kırılabilirliğinin bundan etkilendiği ortaya çıkmıştır. Raporun bundan sonraki kısımlarında burada bulunan en iyi değer kullanılmakla birlikte, not edilmesi gereken husus; MQL debisinin Ti-5553 alaşımın işlenebilmesi performansına etkisinin kapsamlı araştırılması gerekmektedir. Sabit kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme referanslı yaklaşım, debi-performans ilişkisini tam anlamıyla ortaya koyabilmekte yeterli olmayabilir. Bu anlamda bu konuda daha geniş kapsamlı kesme parametrelerinin seçilmesiyle genellenebilir bir sonuca varmak mümkün olur diye düşünülmektedir.

3.4 Yüksek Basınçlı Soğutmada Basıncın Etkisi

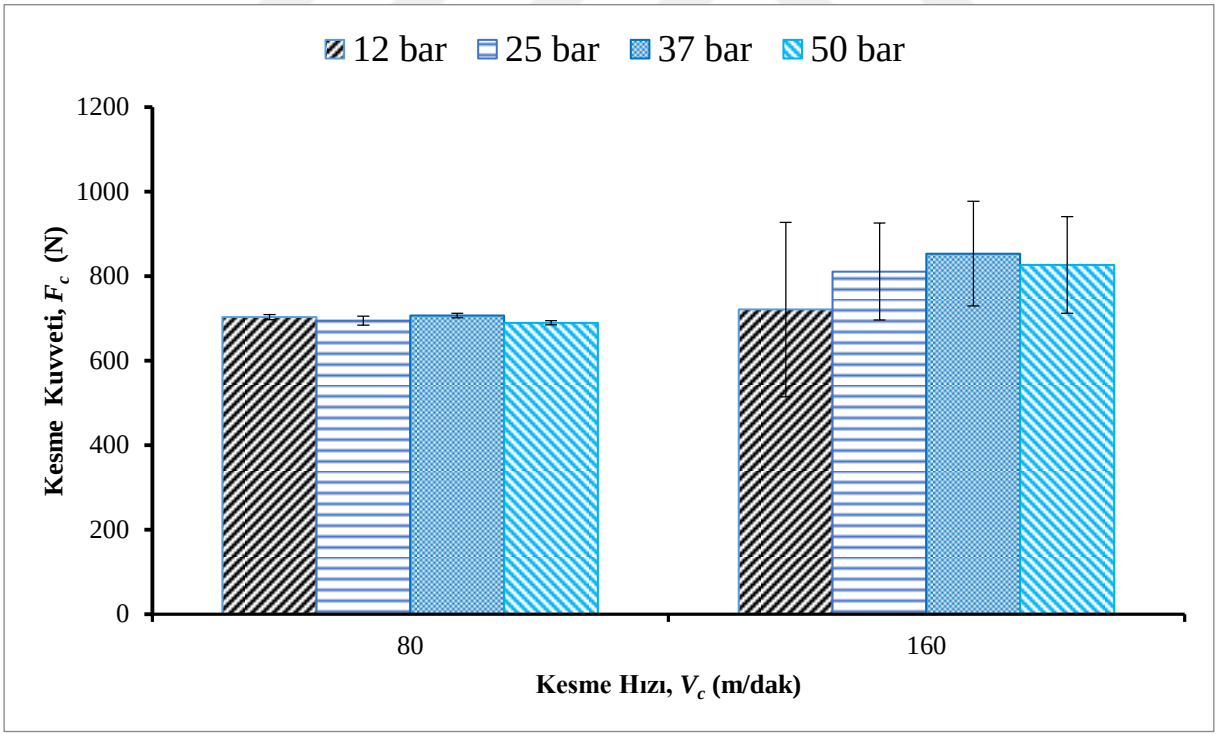
Yüksek basınçlı soğutma sisteminde farklı basınç oranlarının etkisinin tayin edilebilmesi için deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde parçalar 80 m/dak ve160 m/dak kesme hızı, 0.8 mm ve 2 mm kesme derinliği, 0.15 mm/dev ilerleme ile tornalama operasyonuna tabii tutulmuştur. Bu çalışmasında 12 ,25, 37 ve 50 Bar olmak üzere dört farklı basınç uygulanmıştır. Yüksek basınçlı soğutma (HPC) destekli kesme deneylerinde yarı sentetik QualıChem Xtreme Cut290 kesme sıvısı %5 emülsiyon edilerek kullanılmıştır. Sistemimizin maksimum kapasitesi 60 Bar'a kadar çıkabilmektedir, ancak farklı malzemelerle yapmış olduğumuz deneylerde 50 Bar ile 60 Bar arasında işleme performansı dikkate alındığında ciddi farklılığın olmadığı gözlemlenmiştir. Dolayısı ile CNC'den boru ve bağlantılarında oluşabilecek sorunları da önlemek adına maksimum kapasitenin altında bir basınç denenmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda sistematik olarak sunulmuştur.

3.4.1 Kesme Kuvvetleri

Kesme kuvvetleri kesme hızına ve yüksek basınçlı soğutma sisteminin uyguladığı basınca bağlı olarak, sırasıyla 0.8 ve 2 mm kesme derinliklerindeki sonuçlar Şekil 3.44 ve 3.45'de sunulmuştur. 0.8 mm kesme derinliğindeki kesme kuvvetlerinin sunulduğu Şekil 3.44 incelendiğinde artan kesme hızının kesme kuvvetlerde azalmaya neden olduğu görülmektedir. Bununla beraber yüksek basınçlı soğutma sisteminden gelen kesme sıvısının basıncının belli bir noktaya kadar artışıyla kuvvetlerde artış gözlemlenmiş ancak en yüksek basınçta kuvvette bir azalma görülmektedir. Yüksek kesme hızında yapılan sonuçlarda da yüksek basınçlarda kesme kuvvetlerinin azaldığı görülmektedir. 80 m/dak kesme hızında tek pasoda yüksek basınçlı soğutmanın belli bir basınca kadar daha çok soğutma yönünün etkin olduğu yüksek kesme hızında (160 m/dak) ise soğutma ve basınçla kesici takımın aşınmaya direncini arttıran bir rol oynadığı ve bunun sonucunda da kuvvetlerde bir azalma olduğu değerlendirilmektedir. Kesme derinliği arttırılarak yapılan talaş kaldırma deneylerinden elde edilen kesme kuvveti sonuçları Şekil 3.45'de sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere düşük kesme hızında kayda değer bir farklılık görülmez iken, yüksek kesme hızlarında kesme kuvvetlerinde artış görülmüştür. Her ne kadar ortalama kesme kuvvetleri basıncın artışıyla artmış olsada genel anlamda, ortalama kesme kuvvetlerinden sapmalar dikkate alındığında yaklaşık sonuçlar çıkmıştır.



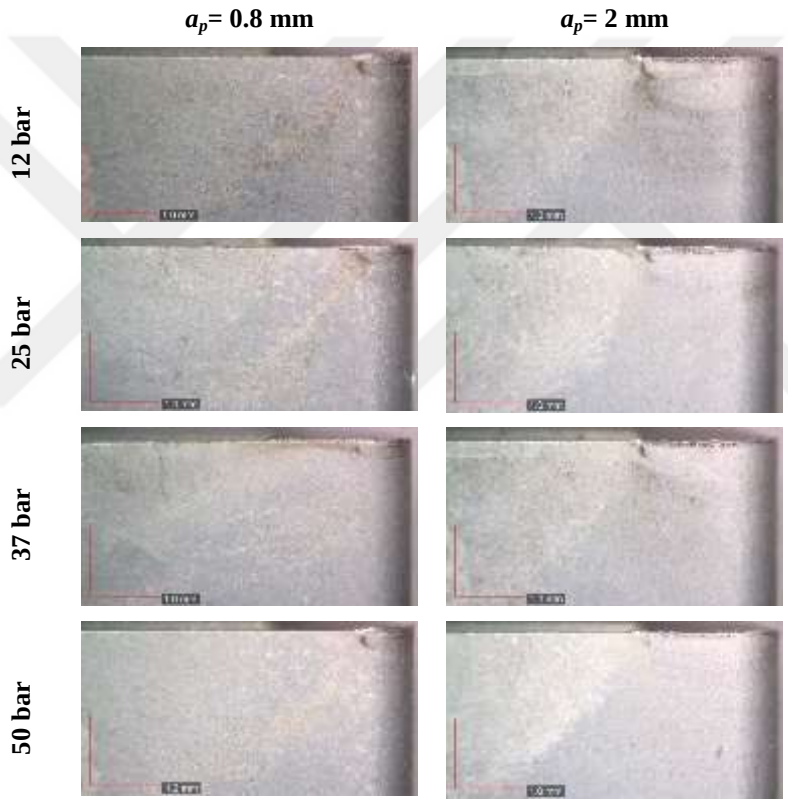
Şekil 3.44. 0.8 mm kesme derinliği ve farklı HPC basınçları ve kesme hızı değerlerinde ölçülen kesme kuvvetleri



Şekil 3.45. 2 mm kesme derinliği ve farklı HPC basınçları ve kesme hızı değerlerinde ölçülen kesme kuvvetleri

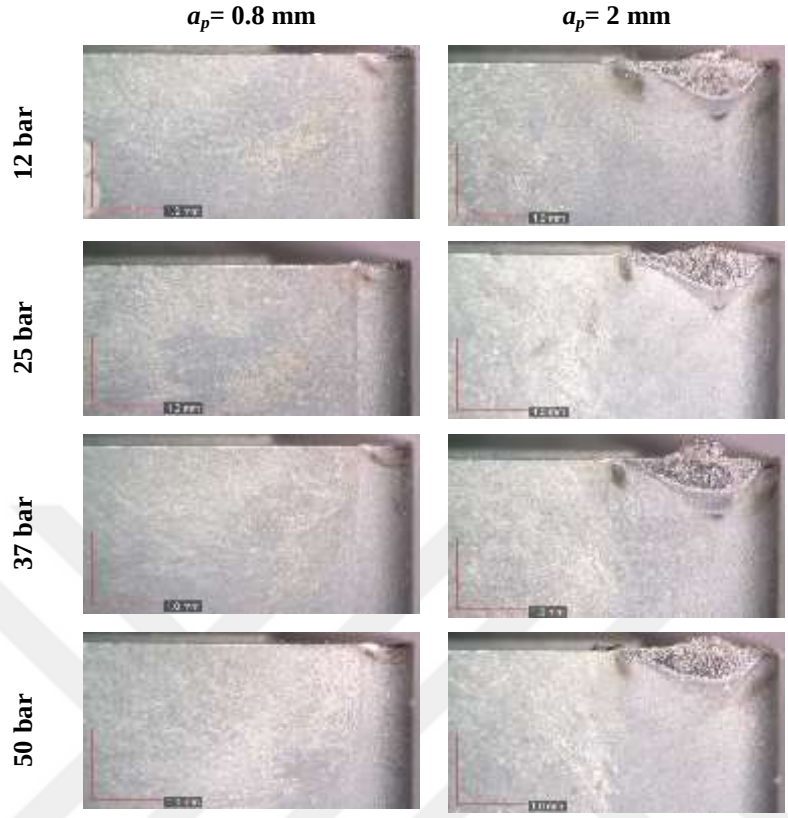
3.4.2 Kesici Takım Aşınması

Yüksek basınçlı soğutma kullanılarak yapılan talaş kaldırma deneylerinde, farklı kesme derinliklerinde 80 m/dak ve 160 m/dak'da kesici takımların serbest yüzeylerinde meydana gelen aşınmaların optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.46 ve 3.47'de sırasıyla sunulmuştur. 0.8 mm kesme derinliğinde kullanılan kesici takım optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde en belirgin sorunun yığma ağız olduğu görülmektedir. Yüksek kesme hızında kesme derinliğinin artması ile aşınmanın kayda değer artış gösterdiği Şekil 3.47'de görülmektedir. Büyük kesme derinliklerinde de yığma ağız sorunu net olarak görülmektedir.

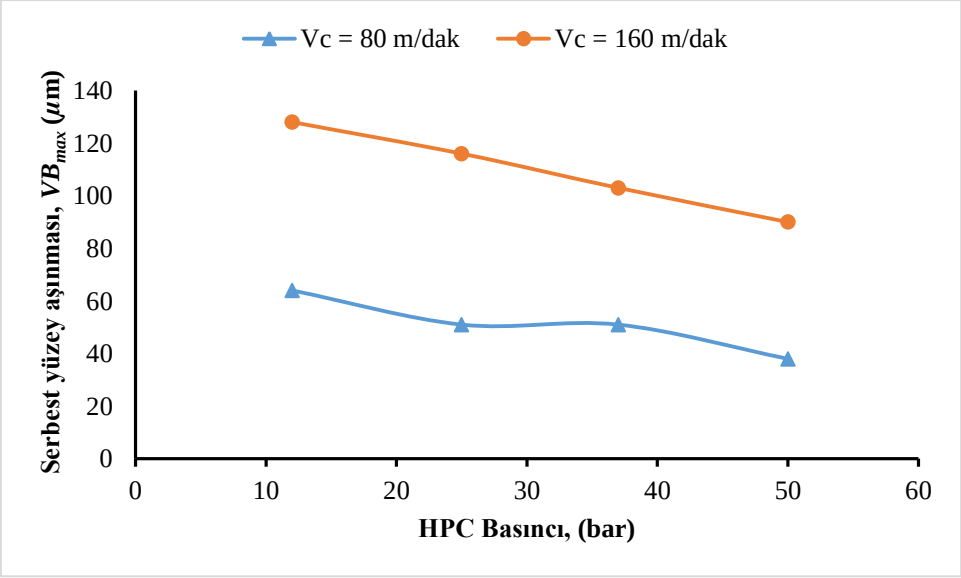


Şekil 3.46. 80 m/dak kesme hızı değerinde ve farklı talaş derinliğinde kesici takımda oluşan serbest yüzey aşınmasının optik mikroskop görüntüleri

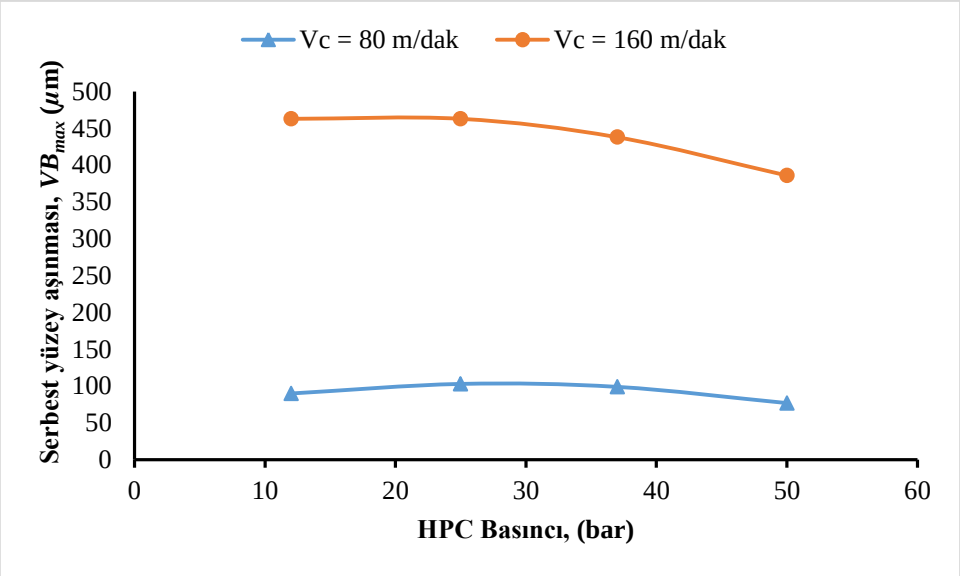
Şekil 3.48'de 80 ve 160 m/dak kesme hızında yapılan talaş kaldırma operasyonunda kesici takım serbest yüzeyindeki aşınma değerleri yüksek basınçlı soğutma sistemi basıncının değişimine bağlı olarak sunulmuştur. Artan basıncın serbest yüzey aşınmasını önemli oranda azalttığı görülmektedir. Yüksek kesme derinliğinde ise, artan basıncın serbest yüzey aşınmasını yine belli oranda azalttığı görülmektedir (Şekil 3.49).



Şekil 3.47. 160 m/dak kesme hızı değerinde ve farklı kesme derinliğinde kesici takımda oluşan serbest yüzey aşınmasının optik mikroskop görüntüleri

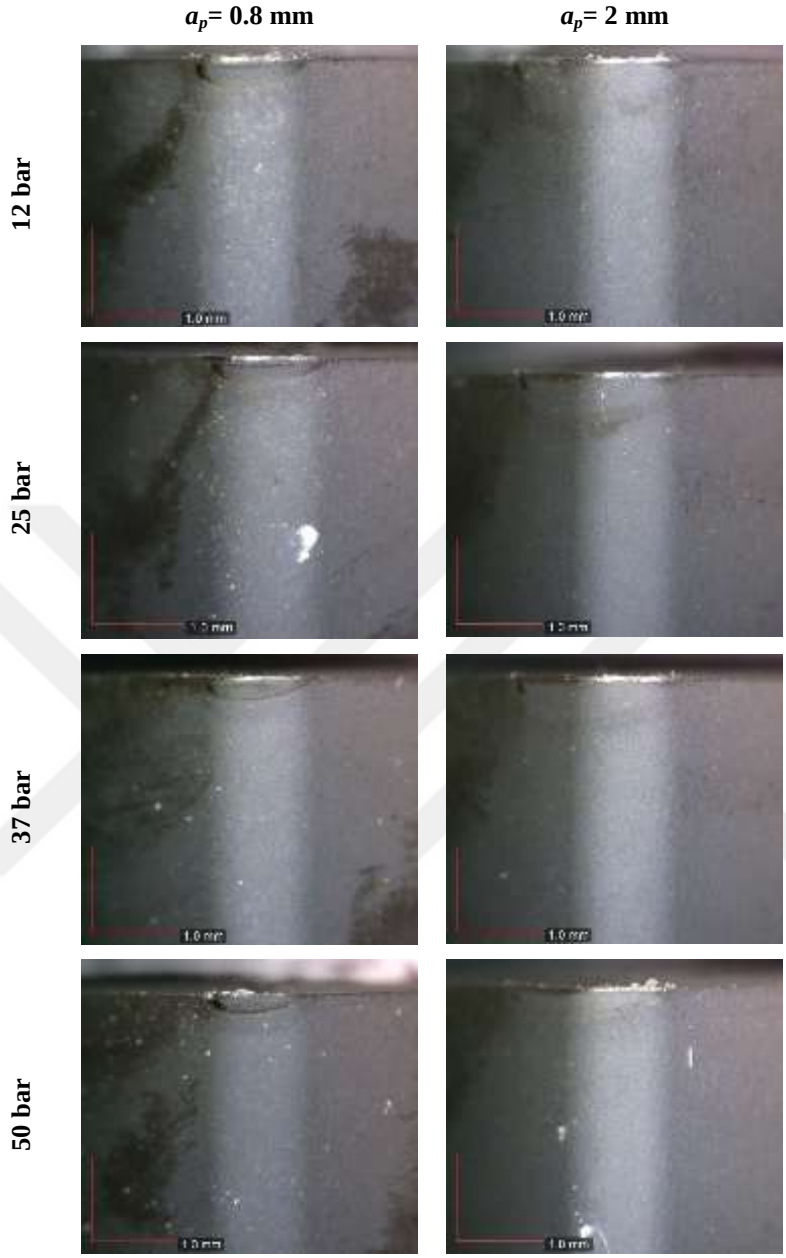


Şekil 3.48. 0.8 mm kesme derinliğinde kesme hızı ve HPC basıncına bağlı olarak oluşan serbest yüzey aşınması

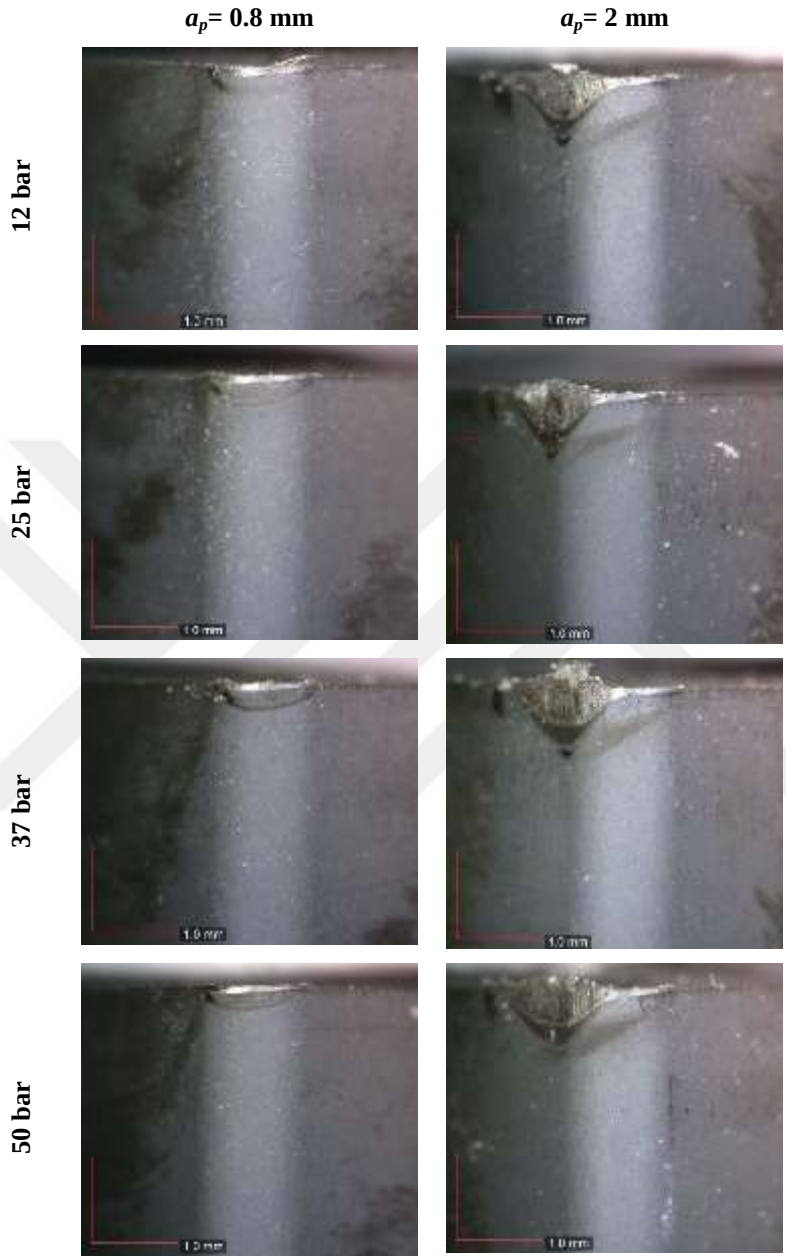


Şekil 3.49. 2 mm kesme derinliğinde kesme hızı ve HPC basıncına bağlı olarak oluşan serbest yüzey aşınması

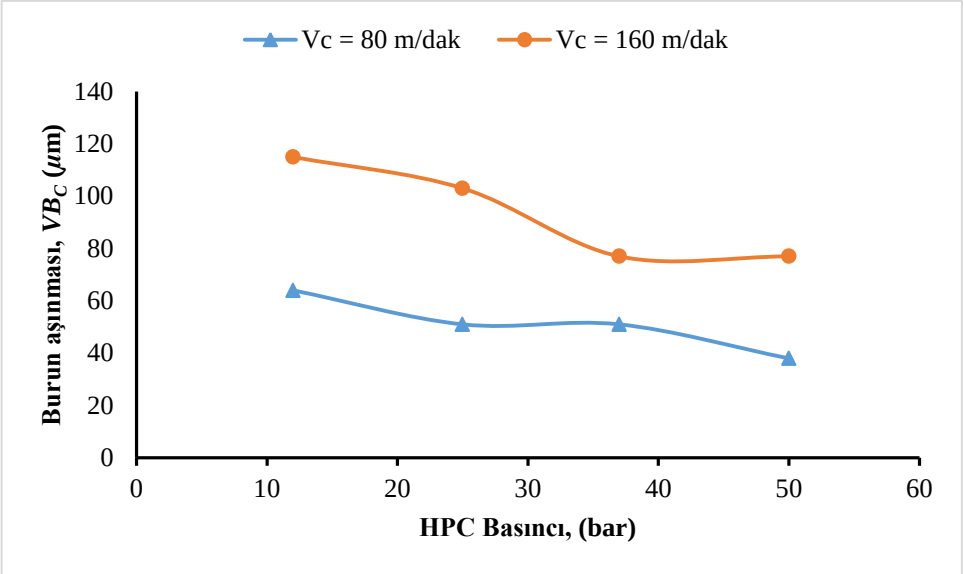
Farklı kesme derinlikleri ve hızlarda yüksek basınçlı sistem ile gönderilen kesme sıvısının basıncının kesici takım burun aşınmasına etkisinin gösterildiği Şekil 3.50 ve 3.51 incelendiğinde, burun aşınmasının serbest yüzey aşınması ile paralel bir eğilim gösterdiği görülmektedir. 0.8 mm kesme derinliğinde ölçülen burun aşınma değerleri Şekil 3.52'de sunulmuştur. Şekilde görüldüğü gibi 160 m/dak kesme hızında en düşük HPC basıncında burun aşınma değeri 115 µm iken, 50 Bar basınçta bu değerin 77 µm'ye kadar düştüğü görülmektedir. Bu HPC sisteminin kullanımının sağladığı önemli bir avantaj olmuştur. Diğer taraftan benzer eğilim 80 m/dak kesme hızında da görülmektedir. En düşük basınçta 64 µm olarak ölçülen ortalama burun aşınması, en yüksek basınçta 38 µm'ye kadar düşmüştür. Kesme derinliğinin 0.8 mm'den 2 mm'ye çıkarılması genel anlamda yüksek basınçlı soğutmada artan basıncın aşınmayı azaltması yönündeki eğilimi devam ettirmekle birlikte oransal anlamda etkinliği düşük kesme derinliği kadar olmamıştır (Şekil 3.53). Bu durum artan kesme derinliği ile talaş kalınlığının artması ve bu durumda kesici takım-talaş temasının artmasına neden olmakta ki böylece yüksek basınçlı soğutma sistemi ile kesme bölgesine gönderilen yüksek basınçlı kesme sıvısının kesici takım-talaş temas yüzeyine nufüz etme kabiliyeti düşmekte olup bunun sonucunda ise aşınmayı azaltma kabiliyeti azalmıştır.



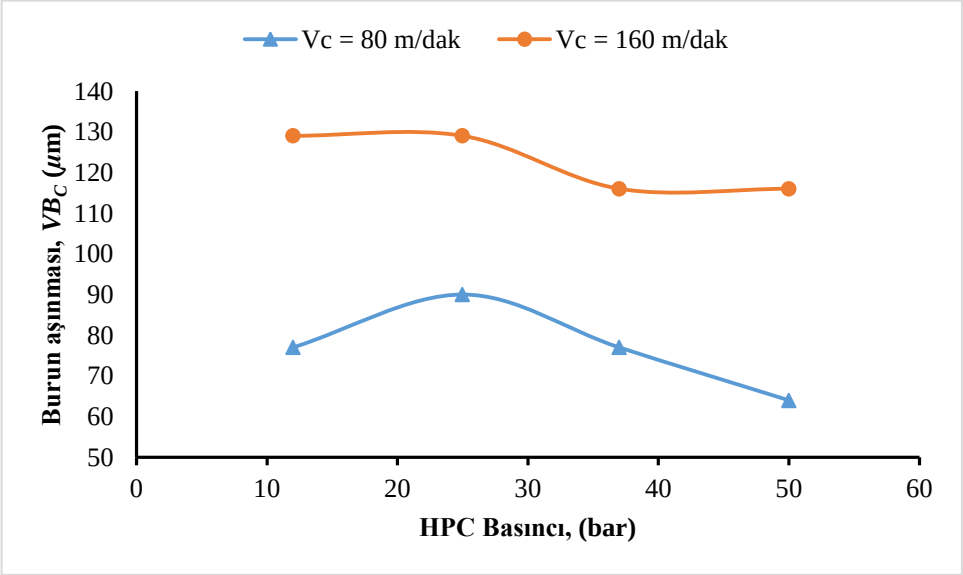
Şekil 3.50. 80 m/dak kesme hızı değerinde ve farklı kesme derinliğinde kesici takımda oluşan burun aşınması



Şekil 3.51. 160 m/dak kesme hızı değerinde ve farklı kesme derinliğinde kesici takımda oluşan burun aşınması



Şekil 3.52. 0.8 mm kesme derinliğinde kesme hızı ve HPC basıncına bağlı olarak oluşan burun aşınması

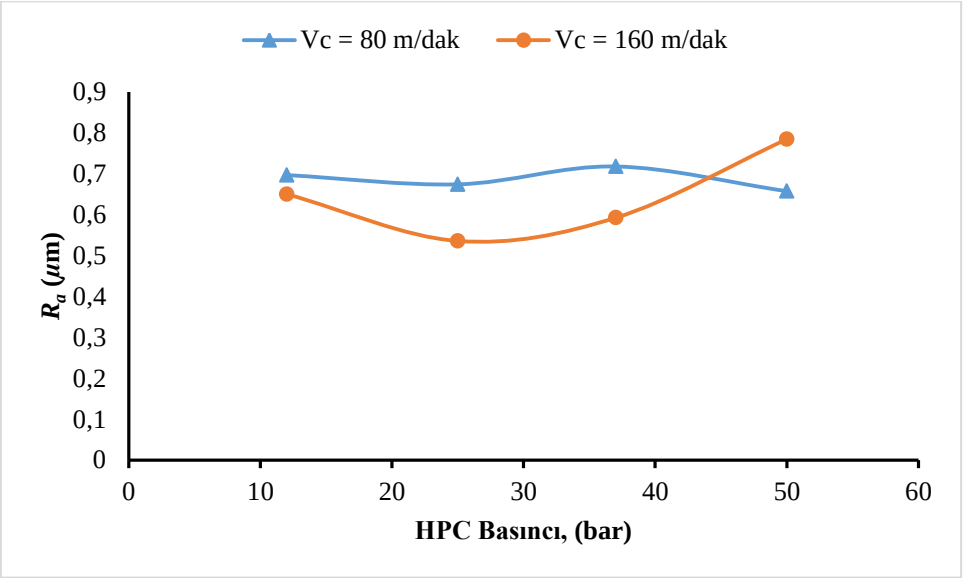


Şekil 3.53. 2 mm kesme derinliğinde kesme hızı ve HPC basıncına bağlı olarak oluşan burun aşınması

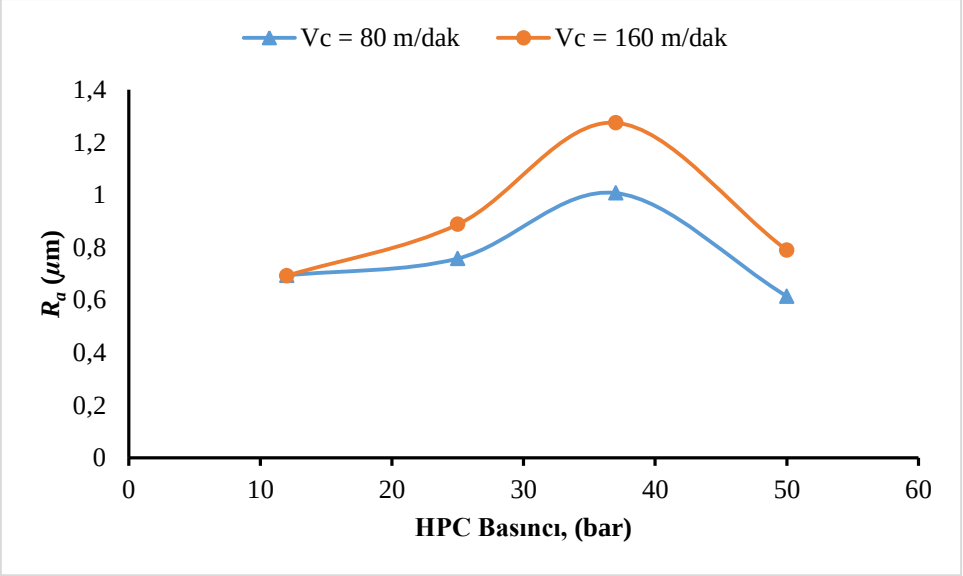
3.4.3 Yüzey Pürüzlülüğü

İşlenen parçaların aritmetik ortalama yüzey pürüzlülükleri incelendiğinde sadece HPC sistemindeki kesme sıvısı basıncı değil aynı zamanda kesme parametrelerinin de belirleyici rol oynadığı elde edilen bulgularda (Şekil 3.54, Şekil 3.55) ortaya çıkmaktadır. Basıncın etkisi perspektifinden değerlendirildiğinde ise, genel olarak artan basıncın yüzey pürüzlülüğünde artışa sebep olduğu görülmekle birlikte en yüksek basınç değeri olarak seçilen 50 Bar da

genel eğilimin yüzey kalitesinin arttığı yönünde olduğu da not edilmesi gereken bir husustur. Bu sonuç talaş kırılmasıyla da beraber değerlendirilmesi gereken bir durumdur.



Şekil 3.54. 0.8 mm kesme derinliğinde kesme hızı ve HPC basıncına bağlı olarak ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri

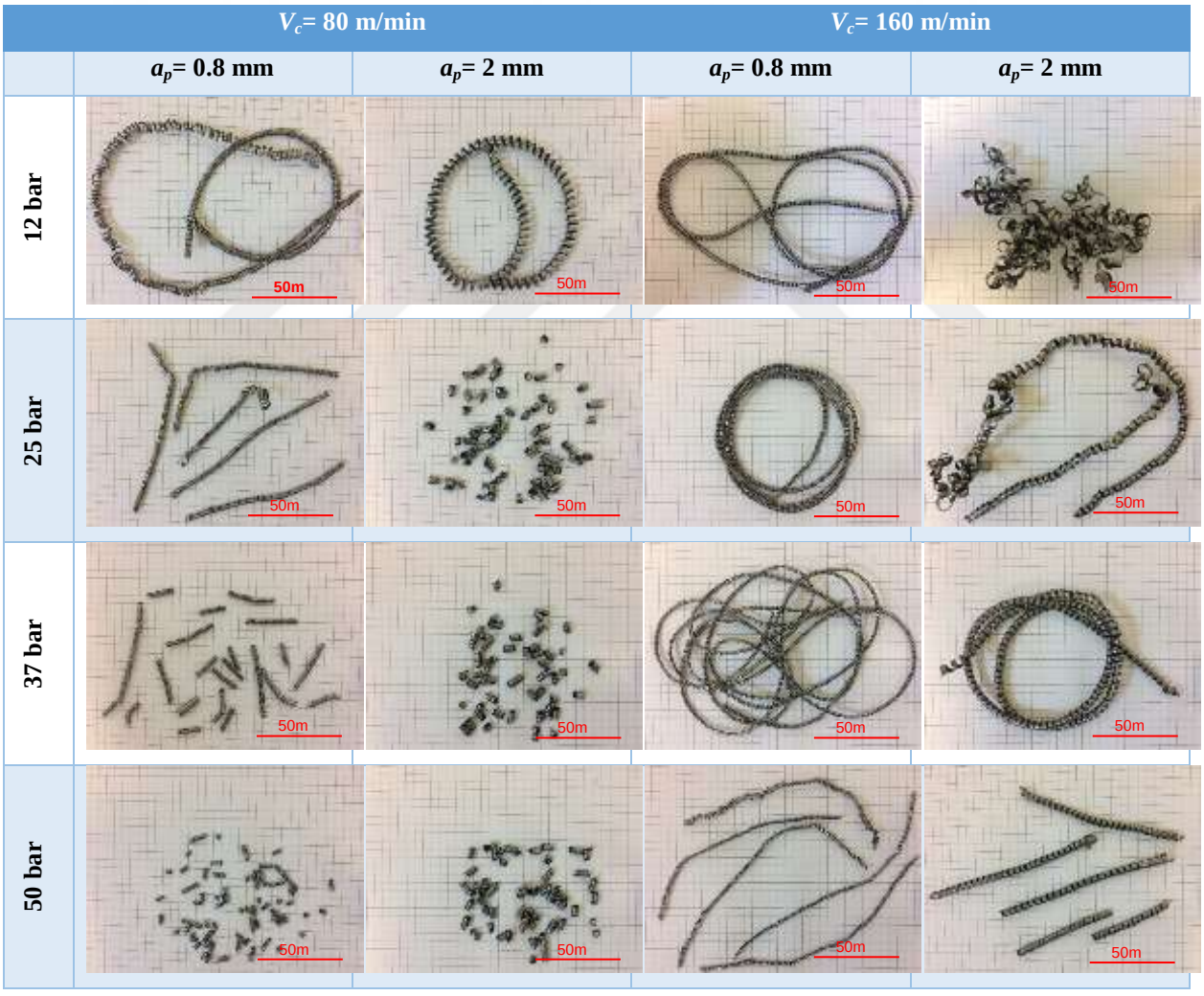


Şekil 3.55. 2 mm kesme derinliğinde kesme hızı ve HPC basıncına bağlı olarak ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri

3.4.4 Talaş Kırılabilirliği

Literatürde, Ti-5553 alaşım malzemesi de talaş kırılabilirliği açısından sürekli ve uzun talaş oluşumuna neden olan bir malzeme olarak değerlendirilmektedir[28]. Yüksek basınçlı

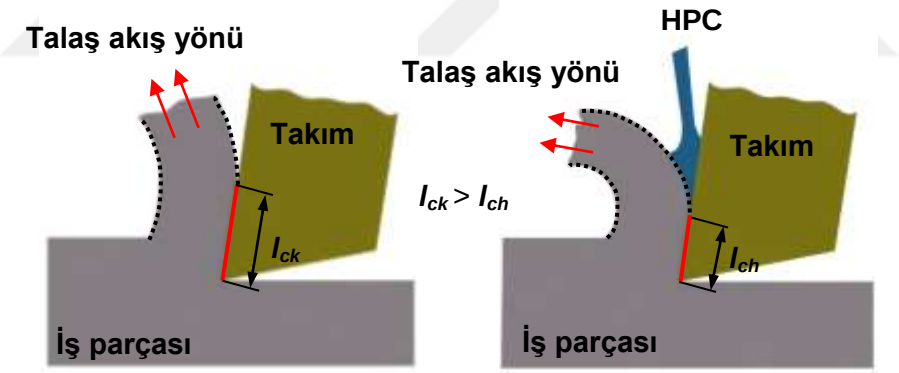
soğutma sistemlerinin talaşlı imalat uygulamalarında en önemli katkılarından biri şüphesiz talaşın kırılmasına sağladığı katkıdır [48]. Bu çalışmada elde edilen bulgularda yüksek basınçlı soğutmanın Ti-5553 alaşım malzemesinin talaş kırılabilirliğine önemli katkı sağlama potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Şekil 3.56 farklı basınçlarda, kesme derinliklerinde ve kesme hızlarında elde edilen talaşları göstermektedir. Özellikle büyük talaş derinliklerinde ve yüksek basınçlarda talaşın oldukça etkin olarak kırılabildiği görülmektedir. Özellikle düşük kesme hızlarında ve yüksek basınçlarda (25 Bar ve üzeri) talaş kırılabilirken, yüksek kesme hızlarında yüksek basınç aynı sonucu vermemektedir. Artan kesme hızı ile malzemenin sünekliği artmakta olup bunun talaş kırılabilirliği açısından negatif etkisi burada da görülmektedir.



Şekil 3.56. Farklı kesme hızı ve kesme derinliğinde HPC basıncına bağlı olarak elde edilen talaş fotoğrafları

3.4.5 Değerlendirme ve Tartışma

Ti-5553 alaşım malzemesinin işlenmesinde kuru ve kesme sıvısı ile yapılan talaş kaldırma operasyonlarında belirgin olarak ortaya çıkan durum özellikle yüksek talaş derinliklerinde ve yüksek kesme hızlarında aşınmanın kontrol edilebilir bir noktadan çok uzak olmasıydı. Literatürde Ti-5553 alaşımın işlenmesinde aşınmayı azaltmakta en önemli yöntemlerden biri olarak yüksek basınçlı soğutma yöntemi olarak sunulmaktadır [28]. Esasında bu yaklaşım sadece Ti-5553 alaşımların işlenmesi için değil diğer Ti-64 ve Inconel 718 gibi birçok kesilmesi zor malzemelerin işlenmesi içinde literatür tarafından önerilen bir yöntemdir[49,50]. Bu anlamda yüksek basınçlı soğutma sisteminin kullanılarak kesme sıvısının yüksek basınçla kesme bölgesine gönderilmesinin Ti-5553 alaşımın işlenmesine katkı sunması beklenilen bir durumdur. Bunun temel sebebi ise özellikle kesici takım talaş temas bölgesine gönderilen yüksek basınçlı soğutucunun basıncın etkisiyle kesici takım talaş ara yüzeyine nüfuz edebilme kabiliyeti ve bu bölgedeki ısının uzaklaştırılması, temasın azaltılması ve talaşın kırılmasına yardımcı olması gibi katkıları görülebilmektedir. Bu durum şematik olarak Şekil 3.57'da sunulmuştur.



Şekil 3.57. Farklı kesme hızı ve kesme derinliğinde HPC basıncına bağlı olarak elde edilen talaş fotoğrafları

Ancak burada seçilen kesme parametrelerinin yüksek basınçlı soğutmanın Ti-5553 alaşımın işlenmesinde etkinliğine önemli oranda etkilediği de görülmektedir. Buna ek olarak basıncın değişiminin etkinliğide yine aynı şekilde kesme parametrelerine bağlıdır. Ancak yapılan deneysel bulgular göstermiştir ki basıncın arttırılması (bu deneyde 50 bar) ile işleme performansı için ölçülen çıktılarda arzu edilen değerlere doğru bir eğilim görülmektedir ki bu durumda mümkün olan en yüksek basıncın seçilmesinin Ti-5553 alaşımın işlenmesine katkı sağladığını göstermektedir.

4. KESME PERFORMANSI VE TAKIM ÖMRÜ ÇALIŞMASI

4.1 Eğik Kesmede Soğutucu ve Yağlayıcıların Ti-5553 Alaşımın İşlenebilme Performansına Etkisi

İşleme performansı deneylerinde kullanılacak kesme derinliği ve ilerleme kuru kesme ve kesme sıvısı ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar dikkate alınarak, 1.2 mm ve 0.15 mm/dev olarak belirlenmiş ve deneylerde sabit değerler olarak kullanılmıştır. Talaş derinliğinin 1.2 mm olarak özellikle seçilmiştir. Çünkü bu değer hem son işlemi hemde yarı kaba işlemi temsil etmektedir. Dolayısı ile bulgular daha geniş uygulamalara fayda sağlayacaktır ve farklı uygulamalar için öngörü sahibi olunmasını sağlayacaktır. Kesme hızı için ise seçilen aralık 30-210 m/dak aralığı olmuştur. Yüksek basınçlı soğutma sisteminde kullanılan basınç (50 Bar) ve minimum miktarda yağlama (MQL) akış oranı içinde tercih edilen değer (21 ml/h) yapılan deneylerin bulgularda dikkate alınarak belirlenmiştir. Eğik kesme deneylerinde kullanılan deneysel parametreler Tablo 2.8'de sunulmuştur.

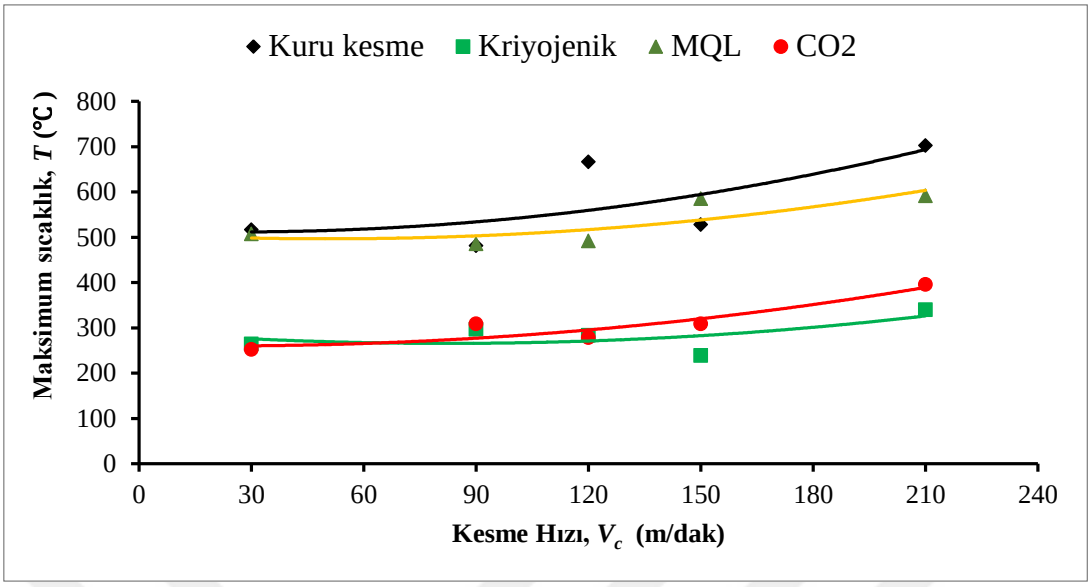
Bu bölümde sunulacak olan bulgular sırasıyla, talaş kaldırma sıcaklığı, kesici takım aşınması, kesme kuvvetleri, talaş kırılabilirliği ve morfolojisi, iş parçası boyutsal doğruluğu şeklinde sıralanmıştır.

4.1.1 Talaş Kaldırma Sıcaklığı

Yapılan talaş kaldırma deneylerinde, farklı kesme hızlarında ve koşullarında kesme bölgesindeki talaştan ölçülebilen maksimum sıcaklık değerleri Şekil 4.1'de sunulmuştur. Kesme sıcaklıklarında görülen eğilim, kesme hızının artmasıyla birlikte sıcaklıkların tüm koşullarda atmasıdır. Talaş kaldırma operasyonunda soğutucuların kesme sıcaklıklarını önemli ölçüde etkilediği de bu çalışmadan elde edilen sonuçlardandır. Ti temelli malzemeler düşük ısı iletim katsayısına sahip olmaktadırlar, Ti-5553 alaşım malzemeside Ti-64 ile benzer termal özelliklere sahip olması nedeniyle, kesme esnasında oluşan ısı kesme bölgesinde birikmekte ve bu durumda sıcaklıklar artış göstermektedir[26]. Ti-5553 alaşımın oda sıcaklığındaki ısı iletim katsayısı 6.2 W/mK değerinde olup bu Ti-64 malzemesinin oda sıcaklığındaki ısı iletim katsayısına oldukça yakındır [51]. Dolayısı ile bu malzeme ısı iletim katsayısı oldukça düşük kategorisinde yer almaktadır.

Ti-5553 alaşımın işlenmesinde kriyojenik ve Karbondioksit gibi soğutucuların kullanılması kesme bölgesindeki ısının hızlı ve etkin şekilde uzaklaştırılmasına katkı sağlayarak, sıcaklığın önemli ölçüde düşmesine katkı sağlamaktadırlar, bu durum Şekil 4.1'de net olarak görülmektedir. İşlenmesi zor malzemeler kategorisine giren Inconel 718 ve Ti-64 gibi malzemelerin talaşlı imalat sürecinde kesme sıcaklığının düşmesine ve işleme performansının iyileşmesine önemli katkı sağlayan [13,52] soğutucuların yeni jenerasyon Ti-5553 alaşım malzemesinin işlenmesinde de benzer iyileştirmeye katkı sağladıkları görülmektedir. Kriyojenik soğutucular (sıvı azot ve karbondioksit) kullanılarak yapılan talaş kaldırma operasyonlarında ölçülebilen maksimum sıcaklık değerleri 400 °C'yi geçmediği görülmektedir. Özellikle seçilen yüksek hızda (210 m/dak) dahi bu değer 400 °C'nin altında kalmaktadır. Bu durum önemlidir çünkü özellikle karbür takımların kullanılacağı durumlarda karbür kesici takımın sertliğini %50 civarında kaybettiği sıcaklık yaklaşık olarak 800 °C [13], dolayısı ile kriyojenik soğutucunun kullanıldığı şartlarda bu risk minimize edilmiş olmaktadır. Diğer taraftan kuru kesme ve minimum miktarda yağlama (MQL) şartlarında özellikle 120 m/dak ve üzeri kesme hızlarında bu riskin oluştuğu söylenebilir. Şekil 4.1'de sunulan sıcaklıklar eğik kesmede talaş üzerinden ölçülen sıcaklıklar olup kesici takım ile iş parçası arasında oluşan gerçek sıcaklığı yansıtmamakta olup, ancak eğilimi gösterebilmektedir. Dolayısı ile kesici takım iş parçası arasında kesici takım talaş yüzeyinde oluşan sıcaklığın şekilde sunulan değerlerden daha yüksek olacağı öngörülmektedir.

Sonuç olarak özellikle kuru ve MQL ile işlemede yüksek kesme hızlarında kesici takımın artan sıcaklıktan dolayı sertliğini kaybetmesi ve bunun sonucunda aşırı aşınmanın oluşması mümkün olabilmektedir. Bu anlamda soğutucular, kesici takımın sıcaklığın artışından dolayı performans kaybını önleme konusunda avantaj sağladıkları görülmektedir.



Şekil 4.1. Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında talaştan ölçülen maksimum sıcaklıklar (a_p= 1.2mm, f= 0.15 mm/dev)

4.1.2 Kesici Takım Aşınması

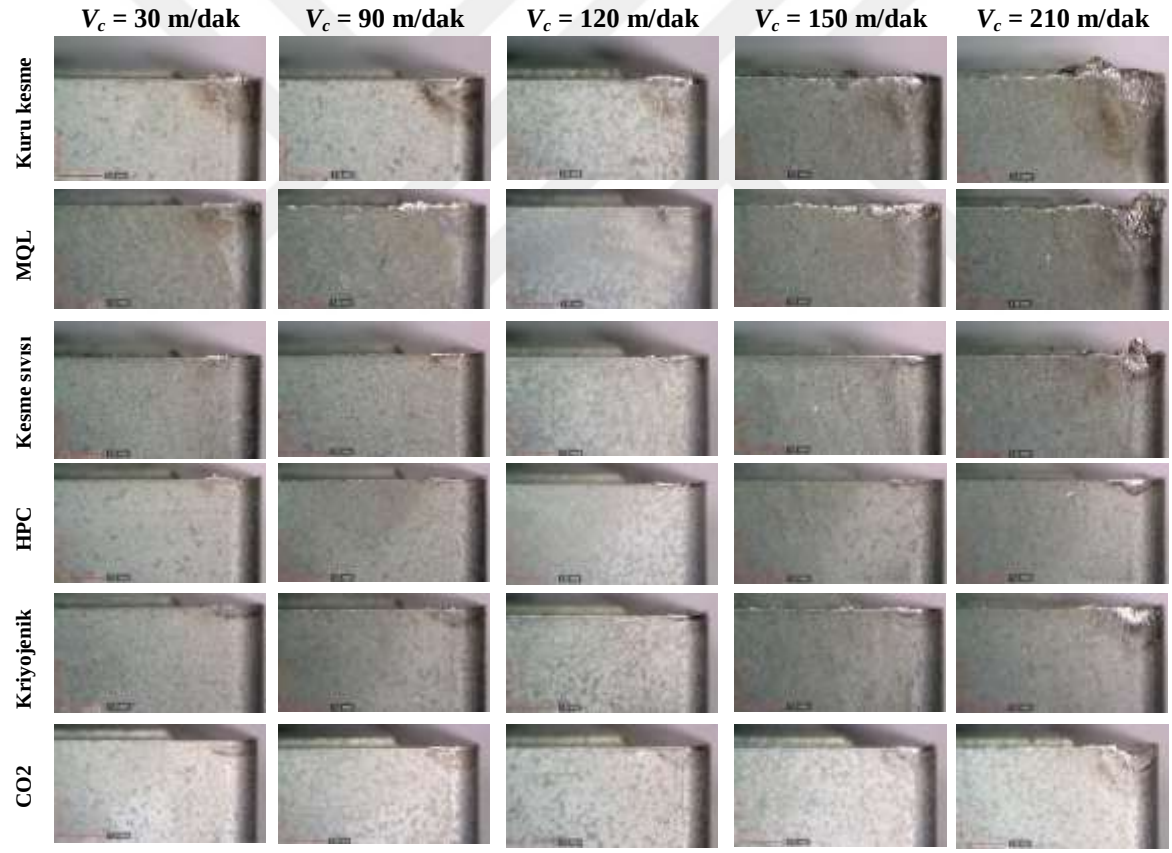
4.1.2.1 Kesici Takım Serbest Yüzey Aşınması Sonuçları

Takım aşınması ve ömrünün tayini özellikle yakın zamanda geliştirilmiş malzemelerin işlenmesinde ve kesme performanslarının tayin edilmesinde oldukça önemli bir noktadır. Takım aşınmasını etkileyen birçok faktör vardır [53].Talaşlı imalat sürecinde kesme esnasında oluşan ısının kesme bölgesinden talaş vasıtasıyla uzaklaştırılması takım aşınmasının eğilimini tayin eden önemli faktörlerden biridir. Ti esaslı malzemelerde kesme esnasında oluşan ısının yaklaşık %25'lik bir kısmı talaş vasıtasıyla uzaklaştırılırken, çelik türü ısı iletim katsayısı yüksek malzemelerde ısının yaklaşık %75'lik kısmı talaş ile uzaklaştırılmaktadır [54]. Dolayısı ile Ti esaslı malzemelerde kesme bölgesindeki ısı kesici takımın kesici ağızında yoğunlaşmakta ve en nihayetinde de aşınma sürecini hızlandırmaktadır. Deneysel çalışmada elde edilen bulgular bu genel kabulu destekler nitelikte olmuştur. Şekil 4.2'de görüldüğü üzere, yüksek kesme hızlarında aşınma oldukça agrasiv bir şekilde artmış ve çok kısa sürede ISO tarafından belirlenen takım ömrü değerine ulaşmıştır. Kesme hızının artışı sonucunda tüm koşullarda takımın serbest yüzeyinde aşınmadaki artış şekilde net olarak görülmektedir.

Diğer taraftan kullanılan soğutucuların özellikle yüksek basınçlı soğutma, sıvı azot ve karbondioksit'in aşınma oranlarını kuru ve MQL'e nazaran azalttıkları da net olarak görülmektedir. Özellikle yüksek basınçlı soğutma ve sıvı azot kesici takım aşınmasının

azaltılması konusunda kayda değer katkı sağlamışlardır. Elde edilen bulgulara yönelik sayısal değerler Şekil 4.3'de görülmektedir.

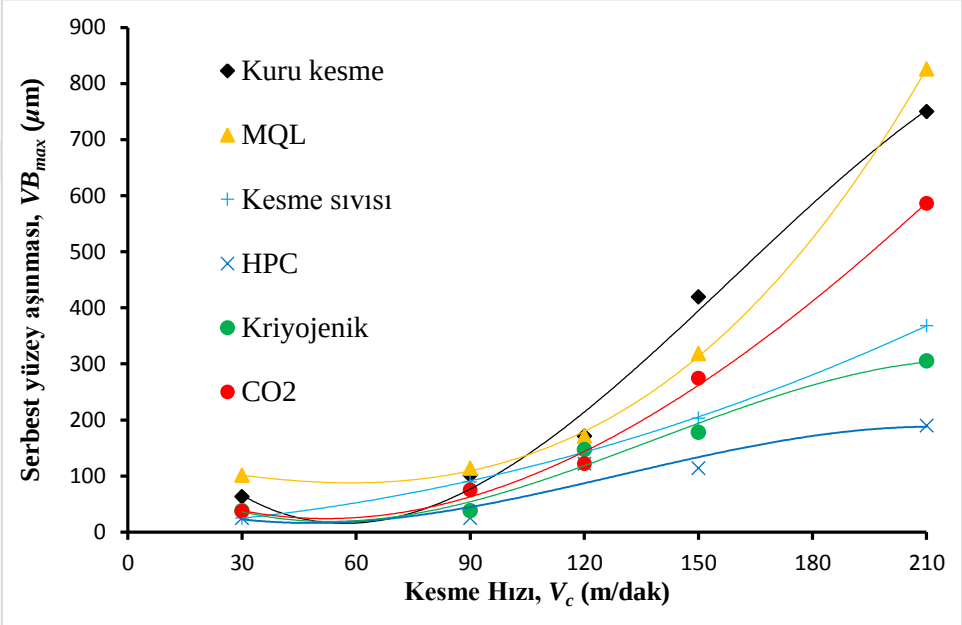
Sayısal değerler incelendiğinde seçilen en yüksek kesme hızı olan, 210 m/dak'da kuru kesme, MQL ve Karbondioksit'in kullanıldığı koşullarda, takım ömrünü 0.6 mm olarak alındığı düşünüldüğünde, tek pasoda takım ömrüne ulaşıldığı görülmektedir. Diğer taraftan tüm kesme koşullarında 90 m/dak kesme hızının üzerine çıkıldığında takım aşınmasının ani bir artış gösterdiği de gözlemlenmiştir. Kesme koşulları açısından bakıldığında yüksek basınçlı soğutma ve kriyojenik soğutmanın etkin sonuç verdiği ve aşınma oranında kayda değer azaltmayı sağladığı bu grafikten net olarak görülmektedir. Ayrıca not edilmesi gereken bir husus ise, MQL ve kuru kesmeye nazaran kesme sıvısı da daha iyi bir performans göstermiş ve takımın aşınmasının önemli oranda azalmasını sağlamıştır.



Şekil 4.2. Farklı kesme hızlarına ve koşullarına bağlı olarak oluşan serbest yüzey aşınmasının optik mikroskop görüntüleri (a_p= 1.2mm, f= 0.15 mm/dev)

Tüm kesme koşullarında en iyi performansı gösteren yüksek basınçlı soğutma ve kriyojenik soğutma olmuştur. Özellikle yüksek kesme hızlarında bu koşulların diğer koşullara nazaran performansları çok net olarak görülmektedir. MQL uygulamasının kesici takım aşınmasını azaltmamış aksine ciddi oranda arttırmıştır. Her ne kadar Ti-5553 malzemenin işlenmesinde

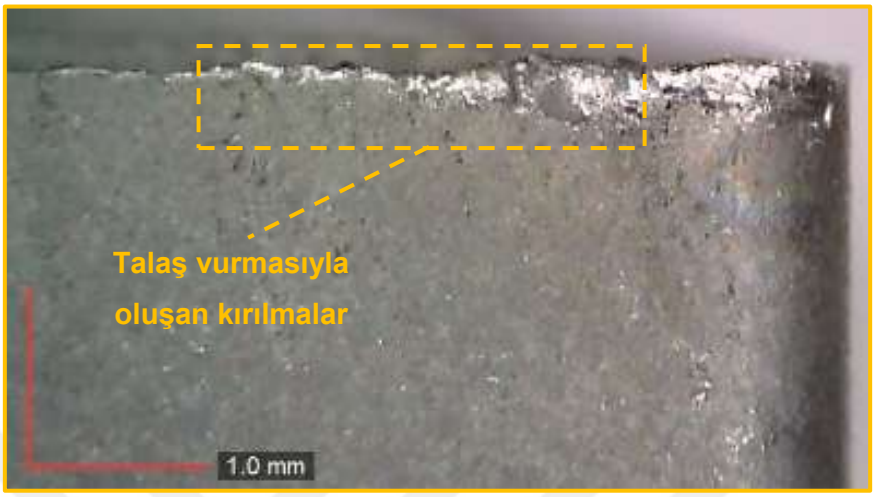
bu bulgular ilk defa elde ediliyor olsada dünya literatüründe özellikle Ti esaslı malzemelerin işlenmesinde MQL'in diğer yöntemlere kıyasla iyi performans gösteremediği örnekler mevcuttur[43,55]. Bunun temel nedeni MQL in titanyum malzemeler ile reaksiyona girmesi ve özellikle Ti temelli malzemelerin işlenmelerinde MQL'in kesici takım iş parçası arasındaki temas uzunluğunun kısa olması ve dolayısıyla nüfuz etmekte yetersiz kalması şeklinde ifade edilmektedir[1,56].



Şekil 4.3. Farklı kesme koşullarında ve hızlarında kesici takım serbest yüzeyinde meydana gelen aşınma (a_p= 1.2mm, f= 0.15 mm/dev)

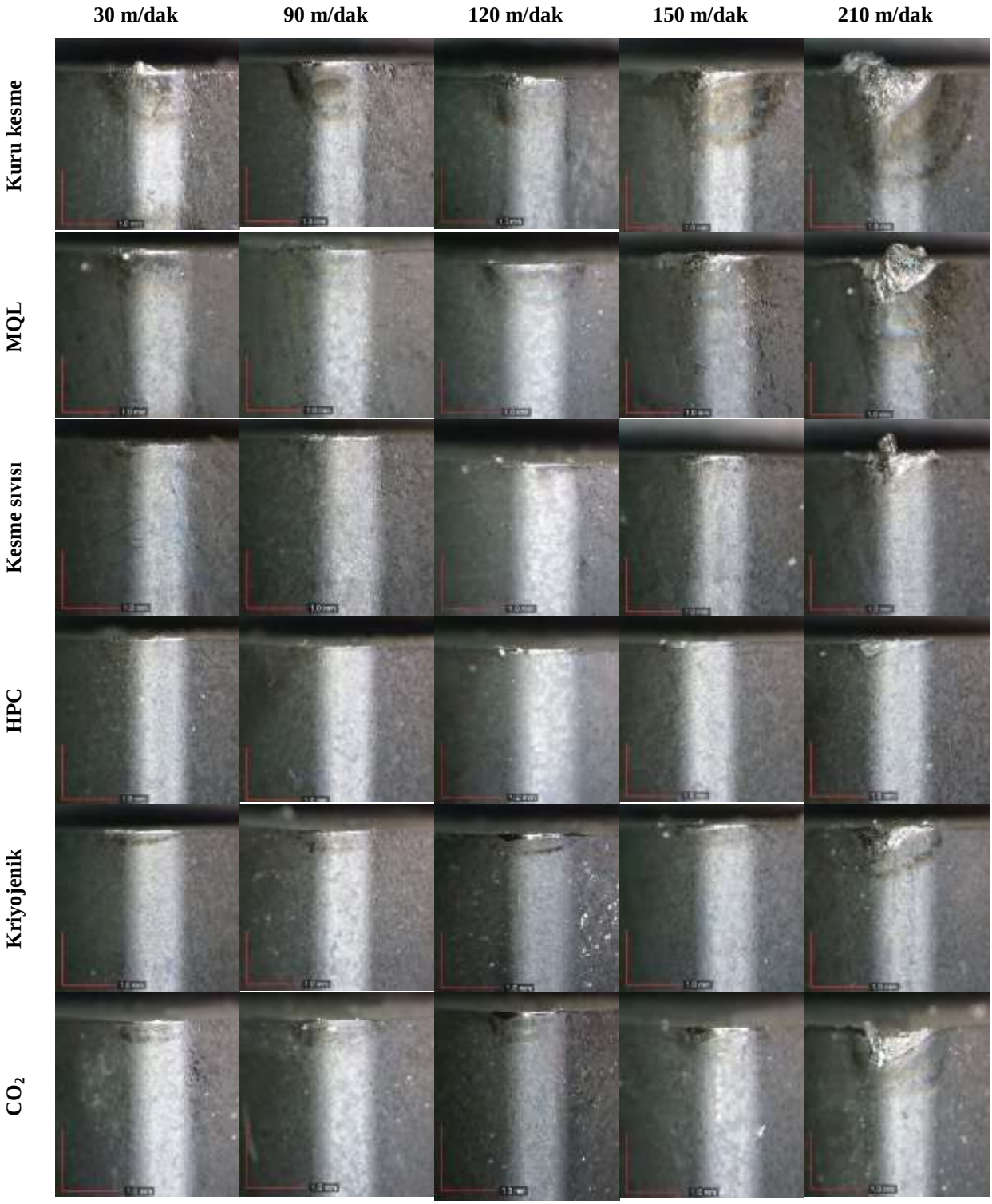
MQL ve kuru kesmede karşılaşılan diğer bir sorun ise bu şartlardaki işlemelerde talaşın kırılmaması sonucunda ana kesici ağızda meydana gelen talaş vurması (chip hammering) ve bunun sonucunda kırılmaların oluşmasıdır. Bu durum özellikle kuru kesme ve MQL uygulamasında karşılaşılan ciddi bir problemdir. Şekil 4.4'de MQL ile kesmede kullanılan kesici takım fotoğrafı görülmektedir. Kesikli kırmızı çizgiden oluşan kare içinde talaş vurması sonucu ana kesici ağızda oluşan kırılmalar görülmektedir. Her ne kadar bu kırılmalar doğrudan takım aşınmasını etkilemiyor gibi gözüksede kesici takımı zayıflatmakta ve özellikle talaş kaldırma süresinin uzaması durumunda serbest yüzey aşınması ile birleşerek kesici takımın serbest yüzey bölgesinde aniden ve büyük kırılmalara neden olabilmektedir. Bu duruma örnek ise sürekli talaş kaldırmanın gerçekleştiği takım ömrü deneyleri verilebilir. Dolayısı ile bu yeni jenerasyon malzemenin işlenmesinde kesici takım performansının kontrolü için talaşın kırılmasının kontrolünün de önemli rol oynadığı bu çalışma ile ortaya

konulmuş olmaktadır. Talaş vurmasıyla kırılmalar sadece MQL şartlarında değil tek pasolu deneylerde kuru kesmede de gözlemlenmiştir. Talaşın kesici ağızı kırması özellikle belli kesme hızlarının ve kesme derinliklerinin üzerinde gözlemlenen bir durum olmuştur.



Şekil 4.4. MQL ile talaş kaldırmada kullanılan kesici takım (V_c = 150 m/dak, f = 0.15 mm/dev, a_p =1,2 mm)

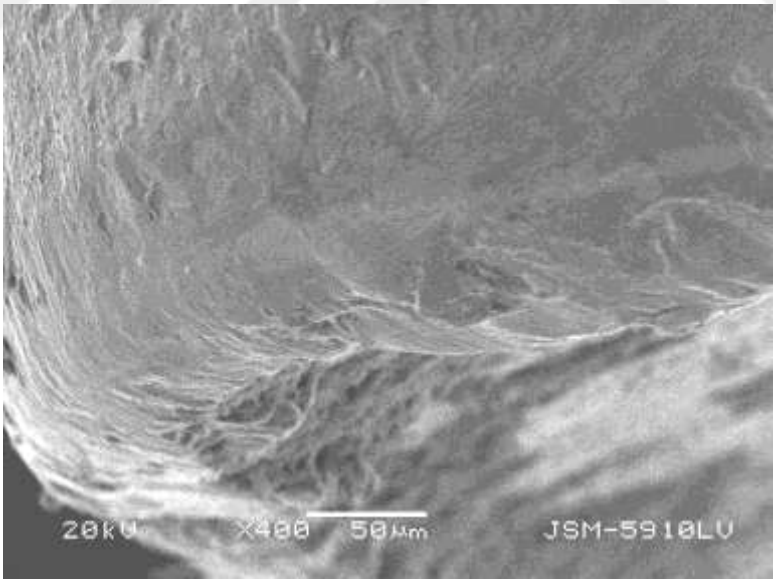
Kesici takımların burun bölgelerinde meydana gelen aşınmalar ise Şekil 4.5'de sunulmuştur. Şekil 4.5'de görüldüğü üzere serbest yüzey aşınmasına paralel bir artış kesici takım burun bölgesinde de meydana gelmiştir. Özellikle 210 m/dak kesme hızında yüksek basınçlı soğutma haricindeki koşullarda kullanılan kesici takımlarda burun aşınmaları önemli derecede artmıştır. İlave olarak belli kesme şartlarında yığma ağızın net olarak oluştuğu da görülmektedir. Özellikle kuru kesme koşulunda seçilen tüm kesme hızlarında ağız birikintisinin oluştuğu görülmektedir. Bu malzemenin işlenmesinde takım aşınması perspektifinden bakıldığında özellikle ikincil kesici ağızda çentik aşınmasının oluşmadığı da Şekil 4.5'deki fotoğraflardan net olarak görülmektedir.



Şekil 4.5. Farklı kesme koşullarında ve hızlarında kesici takım burun bölgesinde oluşan aşınmanın optik mikroskop görüntüleri (a_p= 1.2mm, f= 0.15 mm/dev)

Kesici takımların aşınmasında belirleyici mekanizmaların tayin edilmesi için Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) görüntüleri alınmıştır. SEM görüntüleri 150 m/dak kesme hızlarında kullanılan kesici takımlardan alınmıştır. Daha düşük kesme hızlarında aşınmalar limitli olmuştur dolayısı ile aşınma mekanizmasının belirgin olup olmayacağı konusunda şüphe oluşmuştur. Ayrıca en fazla aşınmanın meydana geldiği en yüksek kesme hızında (V_c = 210 m/dak) ise oldukça belirgin yığma ağız (Built-Up-Edge) gözlemlenmiştir dolayısı ile o koşullarda alınacak SEM görüntüsünün aşınma mekanizmasının net olarak ortaya konmasında limitli katkısı olacağı düşünülmüştür.

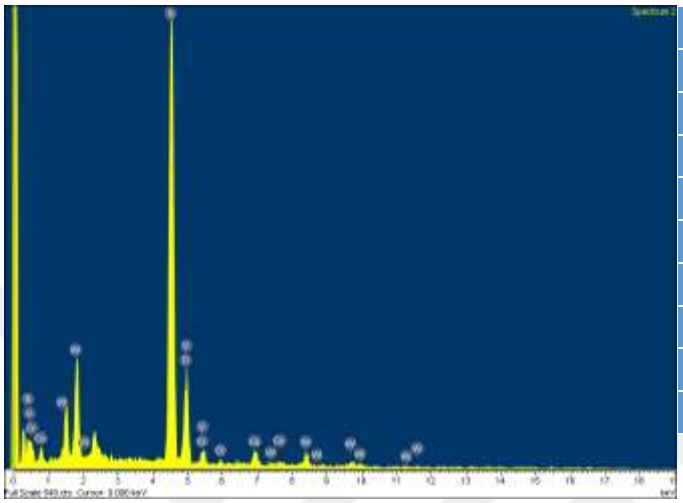
Şekil 4.6'da kuru kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinde serbest yüzey ile talaş yüzeyinin eş zamanlı görülebildiği SEM görüntüsü sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere kuru kesmede net bir aşınma mekanizması görülmemekle birlikte, aynı alanda alınan Elektron Dağılım Spektroskopisi (EDS) (Şekil 4.7), aşınma mekanizmasıyla ilgili bazı detayları sunmaktadır. Örneğin %14,54 oranında oksijen olması oksitlenmeyle kimyasal aşınma gerçekleştiği göstermektedir. Buna ek olarak EDS analizi ile Ti-5553 alaşımının tüm elementleri bu yüzeylerde yer aldığı dolayısı ile adezyon aşınma mekanizmasının da kesici takımın aşınmasında rol oynadığı görülmektedir.



Şekil 4.6. Kuru kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinden alınan SEM görüntüsü (V_c= 150 m/dak)

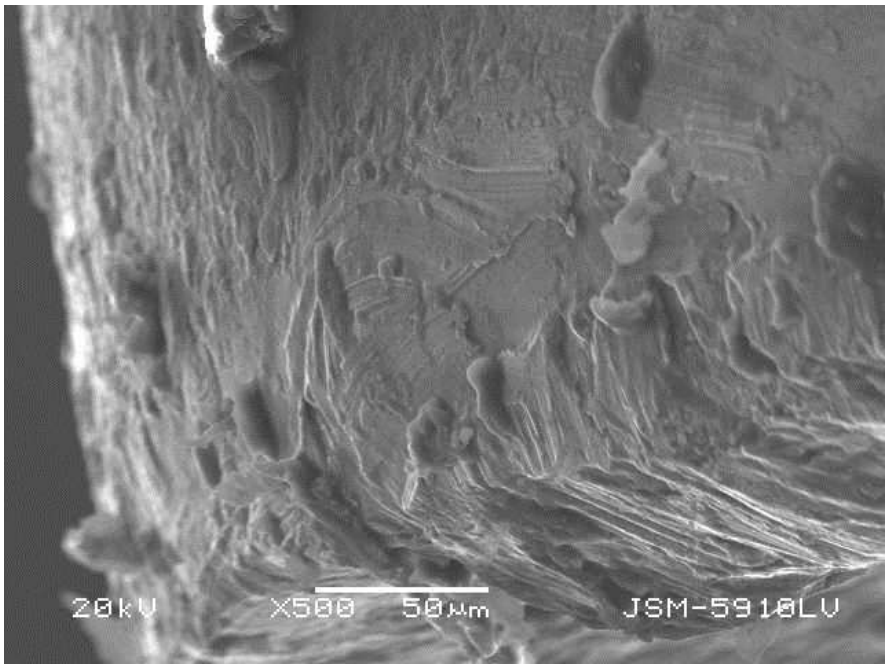
MQL uygulanarak yapılan talaş kaldırma operasyonunda kullanılan kesici takımın SEM görüntüsü Şekil 4.8'de sunulmuştur. Kuru kesmede kullanılan kesici takımın serbest yüzeyi ile kıyaslandığında MQL ile talaş kaldırmada kullanılan kesici takımın yüzeyinde belirgin olarak adhezyon oluşumu görülmektedir. Kesici takım yüzeyine yapışmış iş parçası

partikülleri net olarak görülmektedir. Aynı görüntüdeki alandan alınan EDS analizi de (Şekil 4.9) adezyon aşınmasını destekler değerler göstermektedir. Ti-5553 alaşım malzemesindeki tüm elementler bu gölgede yoğun olarak görülmekte ve ayrıcada oksijen de kuru kesmedeki kadar olmasa da belli oranda mevcuttur.

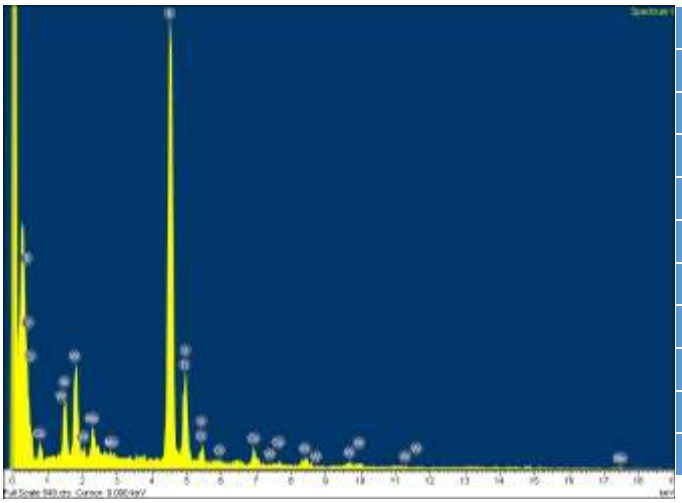


Element	Weight%
O	14.54
Al	2.69
Ti	38.83
V	2.59
Cr	1.37
Co	15.73
Mo	4.22
W	20.02
Totals	100.00

Şekil 4.7. Kuru kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinin EDS analizi



Şekil 4.8. MQL yardımıyla yapılan kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinden alınan SEM görüntüsü (V_c= 150 m/dak)

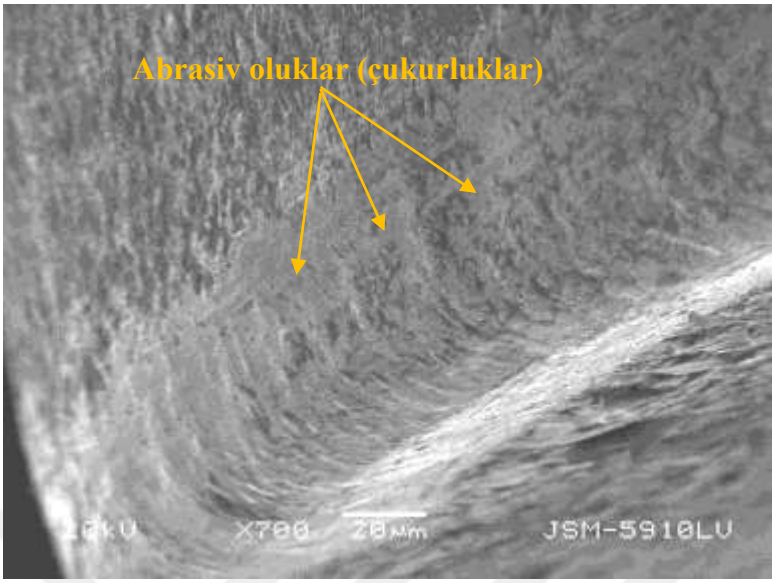


Element	Weight%
O	9.94
Al	2.76
Ti	38.02
V	2.04
Cr	1.25
Fe	1.76
Co	7.38
Mo	3.94
W	32.91
Totals	100.00

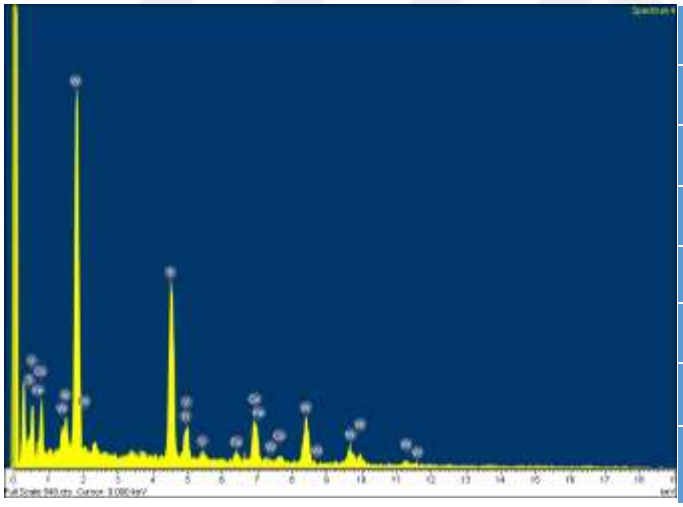
Şekil 4.9. MQL ile kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinin EDS analizi

Kriyojenik koşullarda yapılan talaş kaldırmada kullanılan kesici takımdan alınan SEM görüntüsü Şekil 4.10'de sunulmuştur. Kriyojenik soğutma kullanılarak yapılan talaş kaldırmada kullanılan takımdaki aşınma, kuru kesme ve MQL kullanılarak yapılan talaş kaldırmadaki kesici takımdan farklılık göstermektedir. Kriyojenik soğutma ile yapılan talaş kaldırmada kullanılan kesici takımda adezyon dan ziyade abrasiv eğilimleri daha fazla görülmektedir. Serbest yüzeyde yoğun bir iş parçası kütlesine rastlanmamıştır. Ayrıca geniş çukurcuklar (groove) gözlemlenmiştir. SEM görüntüsündeki alandan alınan EDS ölçümlerinde (Şekil 4.11), kesici takımı oluşturan W and Co elementlerinin yüzdesel oranının kuru ve MQL'dekine nazaran çok yüksek çıkması da bu değerlendirmeye delil niteliğinde olup, değerlendirmeyi desteklemektedir.

Şekil 4.12'de yüksek basınçlı soğutma yardımıyla yapılan talaş kaldırmada kullanılan kesici takım burun bölgesi serbest yüzeyinin SEM görüntüsü görülmektedir. Adhezyon aşınma mekanizmasının dominant rol oynadığı alınan SEM görüntüsünde görülmektedir. Serbest yüzeye tabaka tabaka yapışmış (sıvanmış) malzeme görülmektedir. Faklı kesme koşullarındaki EDS analizleri (Şekil 4.13) içinde Ti oranı (%47.80) en yüksek oran burada elde edilmiştir. Bu durum adezyon aşınma mekanizmasının oldukça etkin olarak yüksek basınçlı soğutma ile yapılan talaş kaldırma operasonunda ki takım aşınmasında rol oynadığını göstermektedir. Buna ek olarak oksijen yüzdesi de belli bir oranda olup, kimyasal reaksiyonunda oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.10. Kriyojenik kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinden alınan SEM görüntüsü (V_c= 150 m/dak)

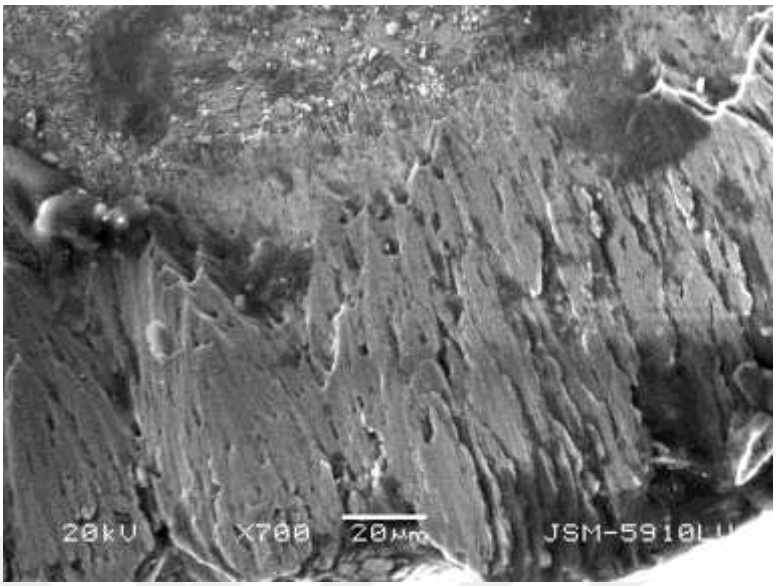


Element	Weight%
Al	1.65
Ti	23.15
V	1.75
Fe	1.89
Co	10.38
W	61.18
Totals	100.00

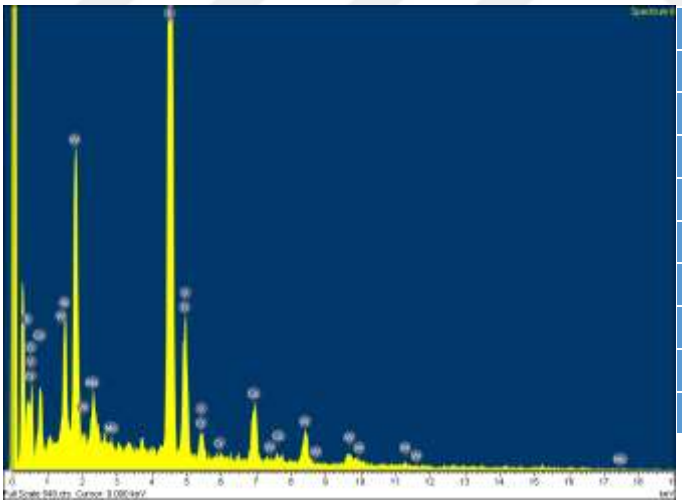
Şekil 4.11. Kriyojenik ile kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinin EDS analizi

Kesme sıvısı kullanılarak yapılan talaş kaldırma operasyonundaki kesici takımın serbest yüzeyi ve talaş yüzeyini kapsayan SEM görüntüsü aşağıda Şekil 4.14'de sunulmuştur. Aşınma mekanizması olarak abrasiv aşınma delili niteliğindeki olukları ve aynı zamanda iş parçası malzemesi sıvanmasını da içeren bu görüntüde her iki aşınma mekanizmasının eş zamanlı olarak kesme sıvı ile yapılan deneylerde kullanılan kesici takımda gözlemlendiğini söylemek mümkündür. EDS analizinde (Şekil 4.15) ise bazı Cr ve Mo gibi bazı elementlere

hiç rastlanmaz iken, Ti yine yoğun olarak EDS alınan bölgede bulunduğunu söylemek mümkün.



Şekil 4.12. Yüksek basınçlı Soğutma yardımıyla yapılan kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinden alınan SEM görüntüsü (V_c= 150 m/dak)

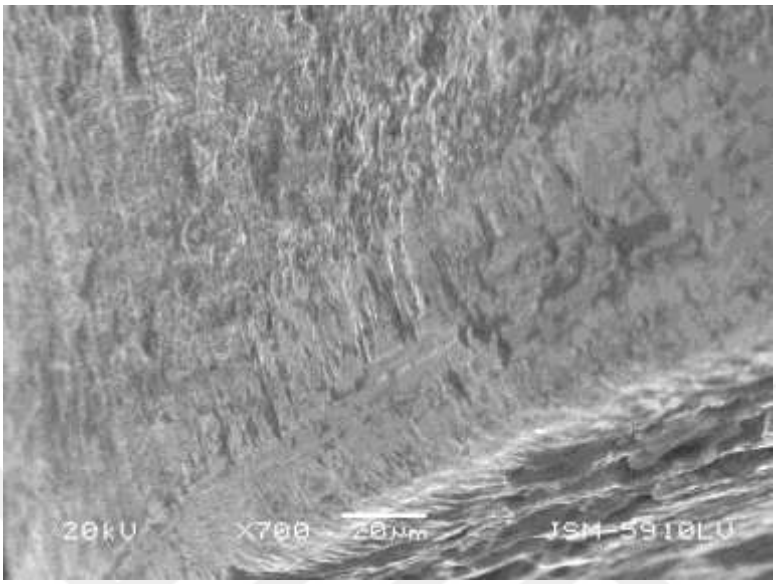


Element	Weight%
O	7.40
Al	3.80
Ti	47.80
V	1.90
Cr	1.91
Co	7.25
Mo	4.70
W	25.23
Totals	100.00

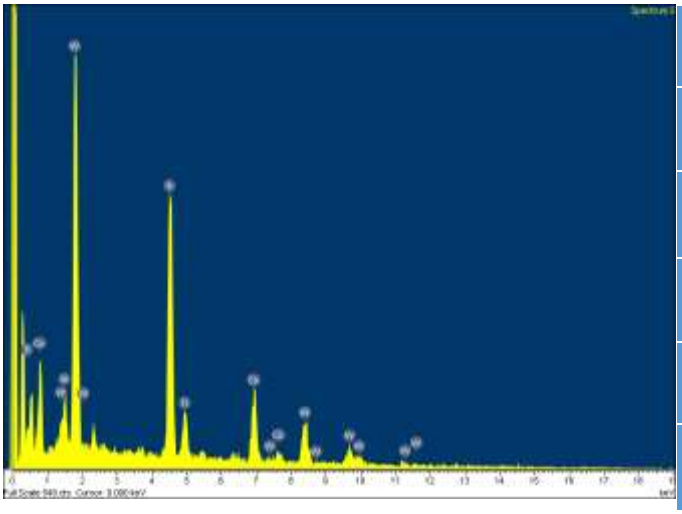
Şekil 4.13. Yüksek basınçlı Soğutma yardımıyla yapılan kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinin EDS analizi

Son olarak karbondioksit kullanılarak yapılan soğutma yardımıyla gerçekleştirilen talaşlı imalat deneysindeki kesici takım aşınma davranışını analiz edebilmek için SEM görüntüsü alınmış olup, Şekil 4.16'da görülmektedir. Bu kesici takım üzerinde de abrasiv işaretler görülmekle birlikte yoğun olarak serbest yüzeye sıvanmalar gözlemlenmiştir. Şekil

4.17'deki EDS analizi bu yorumu destekler nitelikte olup, Ti-5553 alaşımda bulunan elementlerde kayda değer oranda kesici takım serbest yüzeyinde bulunduğu görülmektedir.

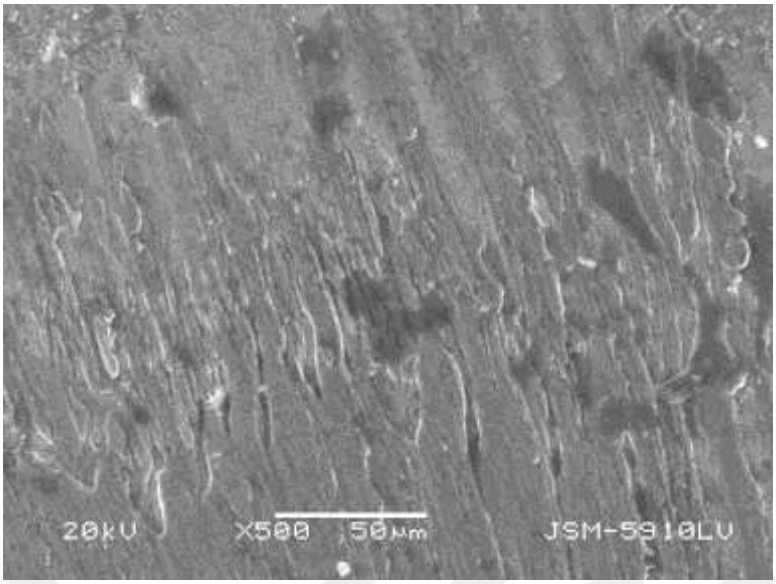


Şekil 4.14. Kesme Sıvısı yardımıyla yapılan kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinden alınan SEM görüntüsü (V_c= 150 m/dak)

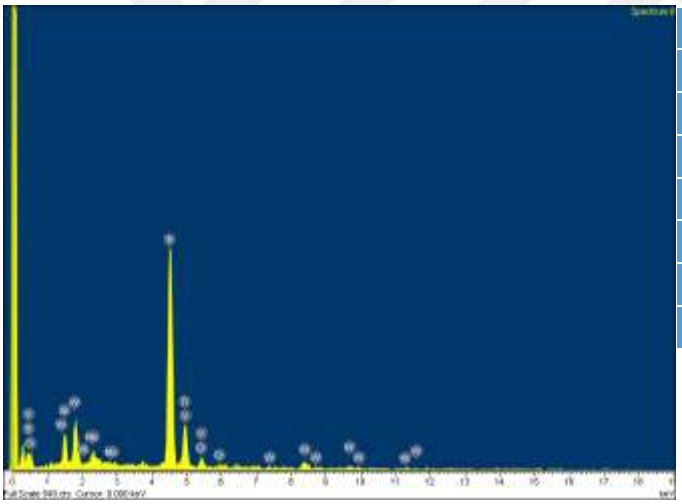


Element	Weight%
Al	2.42
Ti	28.72
Co	14.49
W	54.37
Totals	100.00

Şekil 4.15. Kesme Sıvısı yardımıyla yapılan kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinin EDS analizi



Şekil 4.16. Karbondioksit yardımıyla yapılan kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinden alınan SEM görüntüsü (V_c= 150 m/dak)



Element	Weight%
Al	5.32
Ti	64.93
V	3.33
Cr	3.76
Mo	5.20
W	17.47
Totals	100.00

Şekil 4.17. Karbondioksit yardımıyla yapılan kesmede kullanılan kesici takımın burun bölgesinin EDS analizi

Ti-5553 alaşım malzemeden tek pasoda talaş kaldırmak suretiyle gerçekleştirilen deneylerde kullanılan kesici takımların SEM görüntüleri ve EDS analizleri, özellikle bu malzemenin işlenmesinde dominant aşınma mekanizmasının adezyon ve sıvanma şeklinde olduğunu göstermiştir. Kriyojenik koşulda ise abrasive aşınma mekanizmanın etkin olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, Ti-5553 alaşım malzemesinin işlenmesinde karşılaşılan en önemli aşınma mekanizması adezyon olmuştur. Elde edilen EDS bulguları adezyon oluşumunu

delillendirmiştir. Kesici takım yüzeyine yapışan iş parçası malzemesi kesici takımda birikerek belli hacme ulaşmakta ve yığma ağız oluşumunu tetiklemektedir. Literatür aşınma perspektifinden incelendiğinde yığma ağız sorunu Ti-5553 alaşımın işlenmesinde karşılaşılan önemli biri olduğu görülmektedir [40]. Adezyon aşınma mekanizması sonucu ve düşük kesme hızlarında yumuşak malzemelerin işlenmesinde karşılaşılması muhtemel olan yığma ağız sorunu [57], literatürde nispeten düşük uzama kabiliyeti olduğu ifade edilen bu malzemenin [23] işlenmesinde sadece düşük değil yüksek kesme hızlarındada meydana gelmiştir.

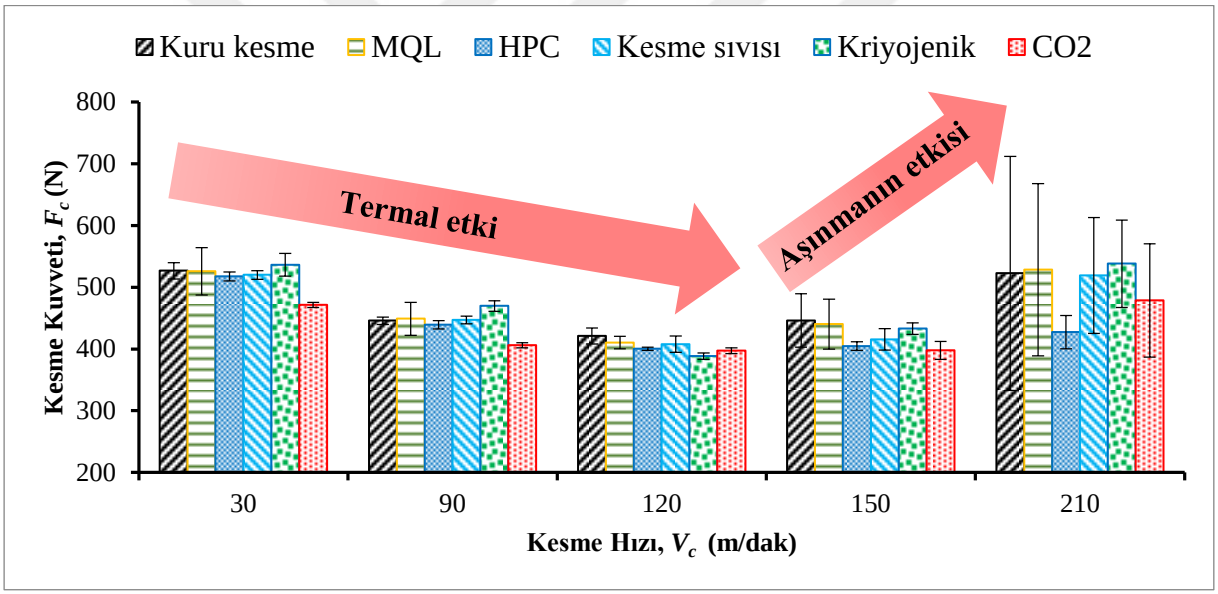
Buna ek olarak birçok kesme koşulunda ve hızında talaş vurması sonucu kesici takımdan kopmalar olmakta ve kesici takımı hasara uğratmaktadır. Talaş vurması sorunu Yüksek Basınçlı Soğutma yöntemi uygulandığında görülmemiştir.

4.1.3 Kesme Kuvvetleri

Kesme kuvvetleri talaşlı imalat süreçleri ile ilgili yapılan akademik çalışmalarında en temel unsurlardan biridir. Kesme kuvvetlerinin anlaşılması ve analizi talaşlı imalat sürecinin anlaşılması ve performansının arttırılması için önemlidir. Bu proje kapsamında kesme hızına bağlı olarak farklı kesme koşullarında yapılan deneylerde elde edilen kesme kuvvetleri aşağıda sunulmuştur. Kesme kuvveti komponentlerinden ana kesme kuvveti, radyal kuvvet ve ilerleme yönündeki kuvvetler sırasıyla Şekil 4.18,4.19 ve 4.20'da görülmektedir.

Ti-5553 alaşım malzemesinin işlenmesinde ana kesme kuvvetleri iki eğilim göstermektedir. Öncelikli olarak kesme hızının artmasıyla azalma eğilimi göstermiş ve 30 m/dak kesme hızında en yüksek olan kesme kuvvetleri kesme hızı 120 m/dak olunca en düşük seviyelere gelmiştir. 150 m/dak kesme hızında tekrar artış gösteren kuvvetler, 210 m/dak kesme hızında kayda değer bir artış göstererek yükselmiştir. Kesme koşullarından hemen hemen bağımsız olarak (neredeyse tüm kesme koşullarında) gerçekleşen bu durum iki şekilde ifade edilebilir. Kesme hızının yükseltilmesi sonucunda kesme kuvvetlerinin düşüş eğilimi göstermesi termal etki ile ifade edilebilir. Kesme hızındaki artış kesme bölgesinde sıcaklığın artışına neden olmakta ve bu durumda iş parçasında termal yumuşama ve neticesinde kesme kuvvetlerinde düşüşe sebep olmaktadır. Yüksek kesme hızlarında ise aşınmanın oluşması ve kesici takım iş parçası temas alanının değişmesine neden olmaktadır. Buna ek olarak kesici takım talaş yüzeyinde oluşan aşınmada talaş açısını etkilemekte ve kuvvetlerin artışı gözlemlenmektedir. 210 m/dak kesme hızında kuvvetlerde görülen sapma payının fazla olması doğrudan aşınmaya bağlı kuvvet artışı olarak yorumlanmıştır.

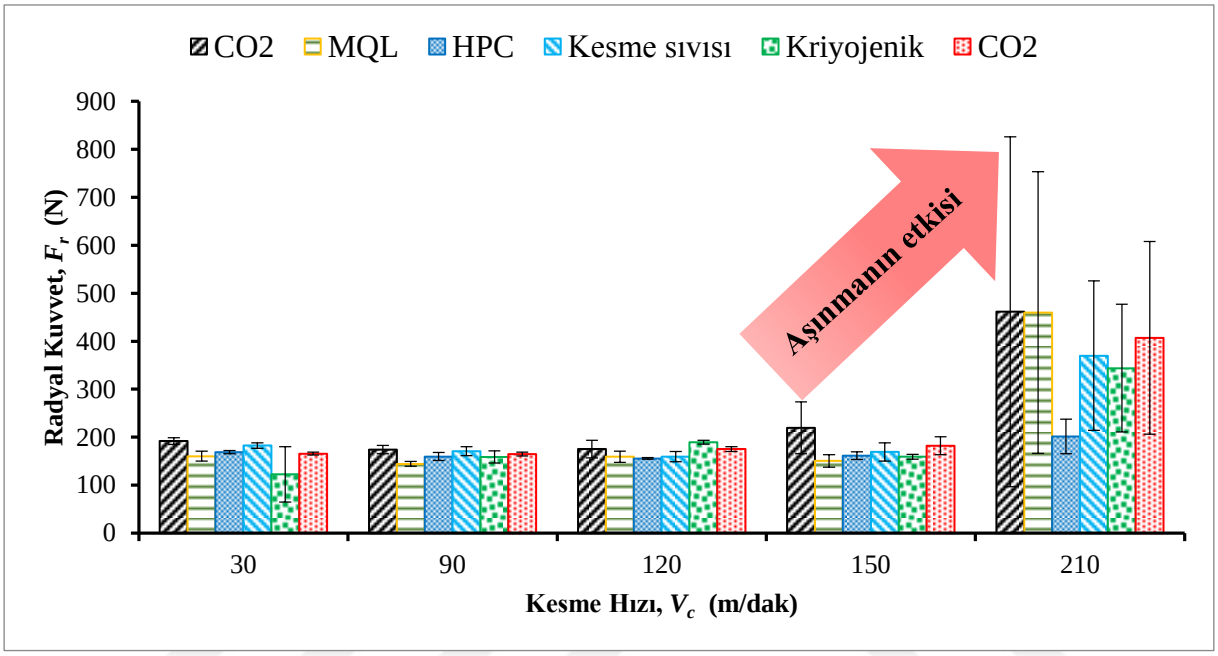
Farklı kesme hızlarında ve farklı koşullarda elde edilen radyal kuvvetler Şekil 4.19'da görülmektedir. Ana kesme kuvvetine nazaran, termal etkinin radyal kuvvetlerdeki değişime etkisi daha sınırlı olmuştur. Bu durum kesme mekaniği açısından düşünüldüğünde genel olarak diğer birçok malzemede görülen davranışlar ile örtüşmektedir. Ancak 150 m/dak kesme hızı ve üzerinde artan aşınma miktarı kesme kuvvetlerini etkileyerek artışına neden olmuştur. Özellikle kesici takım burun bölgesinde artan aşınma doğrudan radyal kuvvetlere etki ettiği görülmektedir. Ana kesme kuvvetlerine benzer şekilde 210 m/dak kesme hızlarında da bir pasoda oluşan kesme kuvvetlerinin önemli değişim gösterdiği sapma paylarından ortaya çıkmaktadır. Bu durumda aşınmanın etkisi olarak ifade edilebilir. Radyal kuvvetler ile oldukça benzer sonuçlar ilerleme kuvvetlerinde de görülmektedir. Sınırlı termal etki ve aşınmanın artışıyla kuvvetlerdeki ani artış oluşumu radyal kuvvetlerde gözlemlenen davranış ile uyumludur.



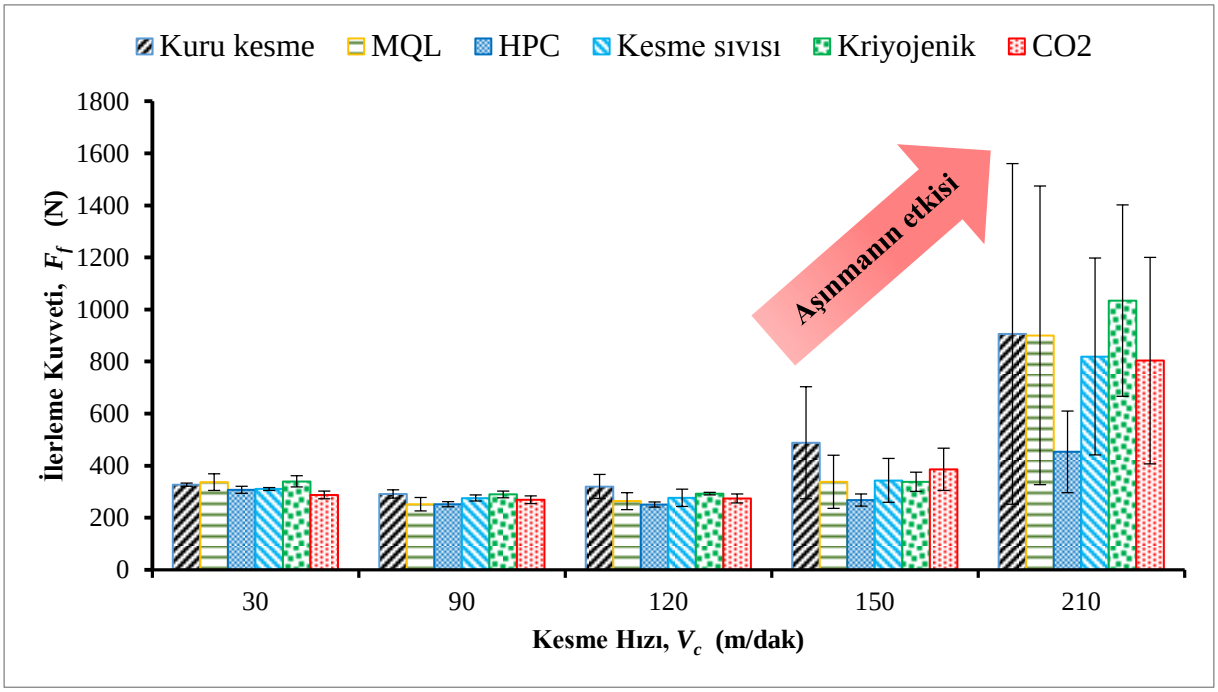
Şekil 4.18. Kesme hızı ve kesme koşullarına bağlı olarak elde edilen ana kesme kuvvetleri (a_p= 1.2mm, f= 0.15 mm/dev)

Kesme kuvvetleri kendi içinde farklı kesme koşullarının etkisi açısından değerlendirildiğinde ise en düşük kesme kuvvetlerinin karbondioksit (CO_2) kullanılmasıyla yapılan deneylerde ölçüldüğü görülmektedir. Örneğin kuru kesme referans alındığında 30 m/dak kesme hızında yaklaşık %10'luk, 90 m/dak kesme hızında yaklaşık %9'luk bir azalmaya neden olmaktadır (Şekil 4.18). Karbondioksit koşulundan sonra ise en düşük kesme kuvvetlerinin yüksek basınçlı soğutma koşulunda meydana geldiği görülmektedir. Yüksek basınçlı soğutmanın etkinliğini özellikle yüksek kesme hızlarında (150 ve 210 m/dak) görebilmek mümkündür. Örneğin 150 m/dak kesme hızında yaklaşık % 9'luk azalama

oluştururken 210 m/dak kesme hızında ise ortalama kesme kuvvetleri dikkate alındığında kuru kesmeden yaklaşık %18'lik daha az kuvvet oluşmuştur. Kesme kuvvetleri ve diğer iki kuvvet komponentleri dikkate alındığında kriyojenik soğutmanın diğer kesme koşullarına nazaran önemli bir üstünlük sağlamadığı hatta soğutmanın etkisiyle bazı kesme hızlarında diğer kesme koşullarında da daha yüksek kuvvet oluşumuna neden olduğu görülmektedir.



Şekil 4.19. Kesme hızı ve kesme koşullarına bağlı olarak elde edilen radyal kuvvetleri(a_p= 1.2mm, f= 0.15 mm/dev)



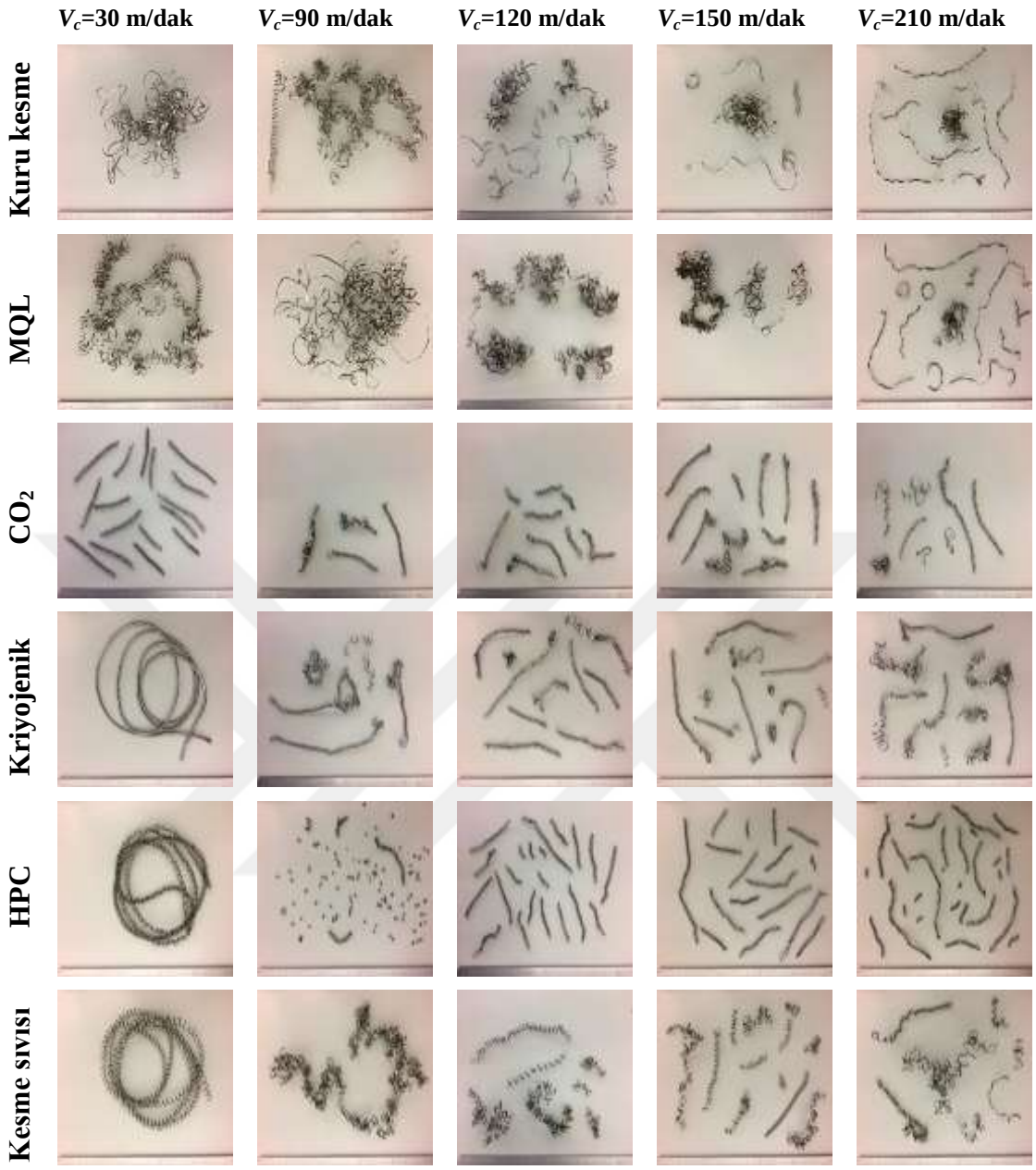
Şekil 4.20. Kesme hızı ve kesme koşullarına bağlı olarak elde edilen ilerleme kuvvetleri (a_p= 1.2mm, f= 0.15 mm/dev)

4.1.3.1 Talaş Kırılabilirliği

Talaş kaldırma operasyonlarında talaşın kırılabilirliğinin doğrudan ürüne etkisi yoktur, dolayısı ile doğrudan işleme performansı olarak değerlendirilmeyebilir. Ancak bu durum talaş kırılmasında sorun yaşanmayan malzemeler için geçerlidir. İşlenmesi zor malzemeler ve özellikle pekleşme eğilimi gösteren ve sünek malzemelerde ise talaş kırılabilirliği bir sorun olarak karşımıza çıkabilmektedir ki buna en iyi örnek Ti-5553 olmuştur. Özellikle Inconel 718, Ti-6Al-4V, NiTi gibi malzemelerde talaş kırılabilirliği önemli sorun olarak ele alınabilir[48,49,56]. Literatürde kısıtlı çalışmanın bulunduğu Ti-5553 alaşım malzemesi konusunda da literatürde talaş kırılabilirliği henüz kapsamlı tartışılmamıştır ve bu konuda kapsamlı araştırmalar mevcut olmayıp oldukça sınırlı sayıda araştırma vardır [26,28,51]. Dolayısı ile bu projede yapılan çalışmalar bu konudaki öncü çalışmalar niteliğindedir. Farklı kesme hızlarında ve koşullarda yapılan deneyler sonucunda elde edilen talaş boyutları Şekil 4.21'de gösterilmektedir. Her bir koşulda çekilen fotoğrafın altında skala mevcuttur (26 mm uzunluk olarak). Bulgular referans alınarak, bu malzemenin talaş kırılabilirliğinin arzu edilen noktada olmadığı ifade edilebilir. Özellikle endüstriyel uygulamalarda tercih edilen kesme hızları (V_c = 120 m/dak) ve altında kuru ve kesme sıvısının kullanıldığı şartlarda uzun ve sürekli talaş elde edilmektedir. Ancak çalışmada önemli olarak görülen bulgu ise kriyojenik, karbondioksit ve yüksek basınçlı soğutmada belli hızın (V_c= 90 m/dak) üzerinde talaş kırılabilirliği makul sayılacak noktaya ulaşmıştır. MQL ve kuru kesme şartlarında kırılmayan ve sürekli talaşlar özellikle kesici takım ana kesici ağızında kırılmalara sebebiyet vermekte, iş parçasına ve kesici takım tutucuya sarmaktadır. Bu açıdan değerlendirildiğinde işleme performansları ve talaş kaldırma sürecinin kontrolü bu iki koşulda oldukça zor olmaktadır.

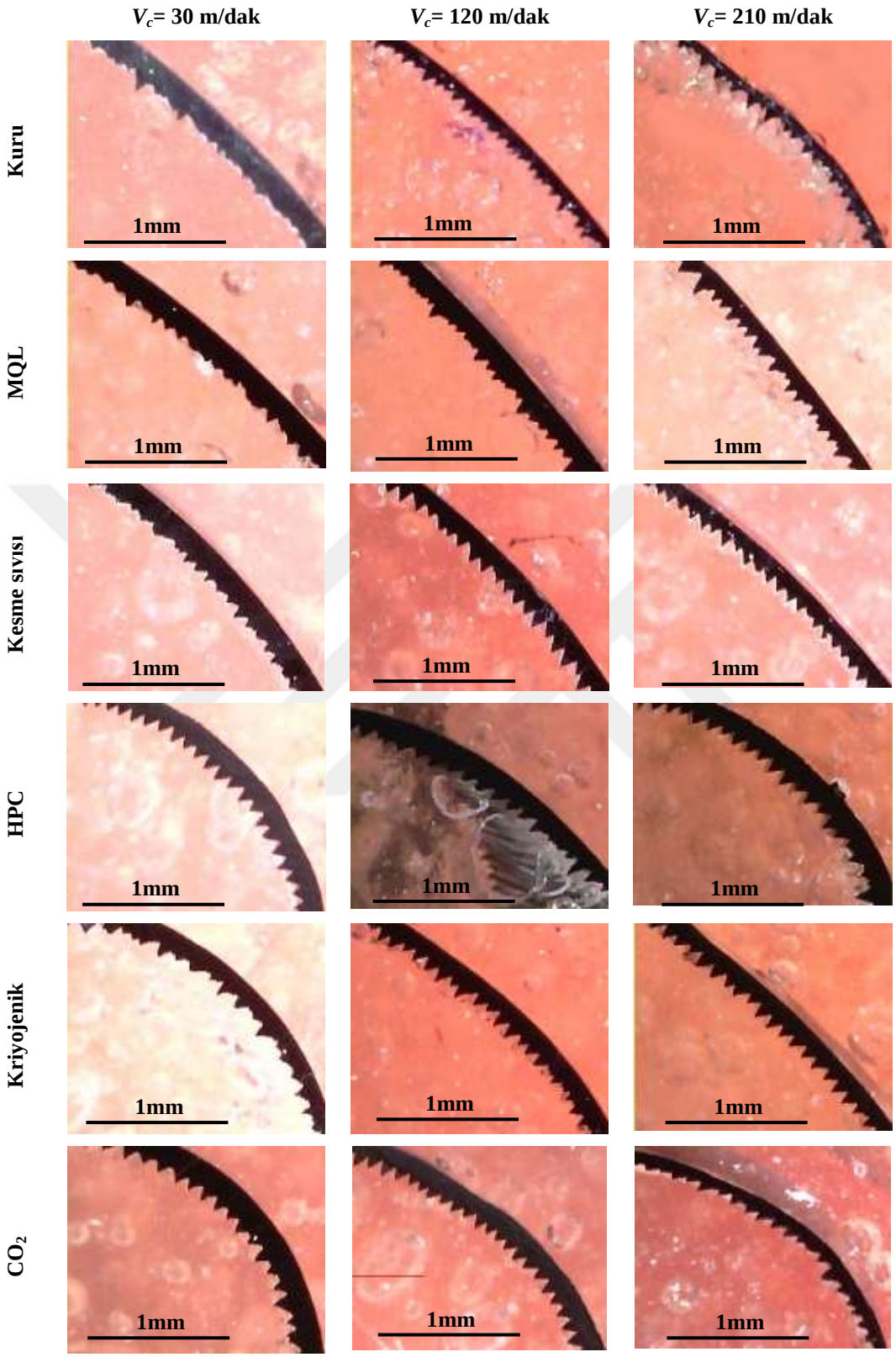
Bu çalışmadan Ti-5553 alaşımın talaş kırılabilirliği açısından elde edilen sonuç şu şekilde özetlenebilir:

- Talaş kırılabilirliği kesme hızından etkilenmektedir ve genellikle yüksek kesme hızlarında farklı koşullarda talaş kırılabilirliği artmakta ve daha kısa talaşlar oluşturulabilmektedir.
- Kesme sıvısının kullanıldığı veya herhangi bir kesme sıvısı ve soğutucunun kullanılmadığı (kuru kesme) koşullarında 90 m/dak kesme hızı ve altında sürekli ve hiç kırılmayan talaş oluşmuştur. Buna ek olarak MQL uygulamasındada sürekli ve kırılmayan talaş problem oluşturmaktadır.
- Yüksek basınçlı soğutma ve kriyojenik şartlarda 90 m/dak ve üzeri hızlarda elde edilen talaşlar tezgah ve işleme performansına negatif etki etmeyen (iş parçasına ve takım tutucuya sarmayan) talaşlardır.



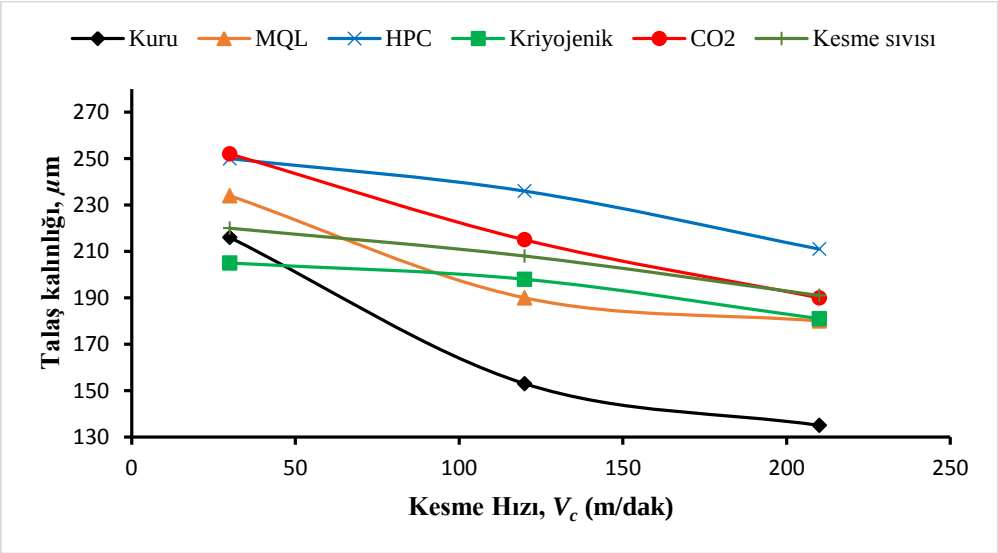
Şekil 4.21. Farklı kesme hızları ve kesme koşullarında talaş oluşumu
(a_p= 1.2mm, f= 0.15 mm/dev)

Diğer taraftan elde edilen talaşların morfolojileri incelendiğinde hemen hemen tüm kesme koşullarında elde edilen talaşların testere ağızlı segmentli talaş oldukları görülmektedir (Şekil 4.22). Elde edilen talaşların kalınlıkları kesme koşulları ve kesme hızları dikkate alınarak incelendiğinde ise elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 4.23'de sunulmuştur. Kesme hızının artmasıyla farklı koşullarda elde edilen talaşların kalınlıklarında azalma eğilimi görülmektedir. Ancak bazı kesme koşullarında kesme hızından etkilenme sınırlı şekilde iken bazı kesme koşullarında ise kesme hızının artmasıyla talaş kalınlığında önemli derecede azalma görülmektedir.



Şekil 4.22. Farklı kesme hızları ve kesme koşullarında elde edilen talaşların morfolojisi (a_p= 1.2mm, f= 0.15 mm/dev)

Kesme hızındaki artış ile talaş kalınlığındaki azalış arasındaki ilişkinin en zayıf olduğu koşullar kriyojenik ve kesme sıvısı koşullarıyken, kesme hızındaki değişimden en çok etkilenen talaş kalınlıkları ise kuru kesmedir. Kesme hızındaki artışla beraber artan kesme sıcaklığı kayma düzlemindeki kayma düzlem açısını etkilemiştir ve bunun sonucunda talaş kalınlıkları artan kesme hızıyla azalma eğilimi göstermiştir. Bu durumda esasında kesme kuvvetlerinin kesme hızının artmasıyla gösterdiği azalma eğilimini açıklamada kullanılabilecek bir bulgu olarak değerlendirilebilir.



Şekil 4.23. Farklı kesme hızları ve kesme koşullarında elde edilen talaşların kalınlıkları (a_p= 1.2mm, f= 0.15 mm/dev)

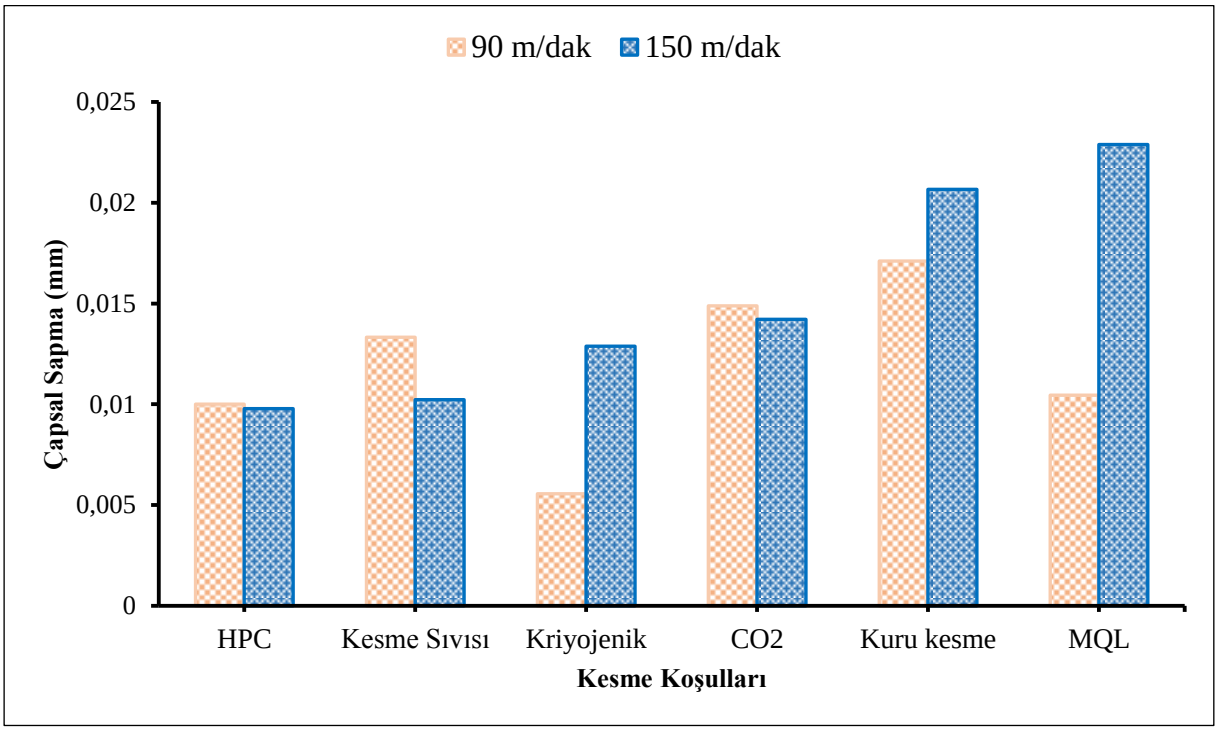
4.1.3.2 İş Parçası Çapsal Sapmalar

Proje önerisinde doğrudan yer almayan, işlenmiş parçaların işleme koşullarının etkisiyle çapsal sapmalarının ölçümü için iki farklı kesme hızı belirlenmiştir. Bu ölçümün proje çıktılarına eklenmesinin temel nedeni ise, özellikle kriyojenik gibi soğutucuların kullanılması ve işleme esnasında iş parçasının kriyojenik soğutma gibi oldukça düşük bir sıcaklığa maruz kalmasının işlenen parçada boyutsal değişime sebep olup olmadığının araştırılmasıdır. Proje önerimizde ön plana çıkan husus talaşlı imalat sürecinin test edileceği malzemenin diğer bilinen Ti esaslı malzemelere nazaran oldukça yeni ve henüz araştırılmaya başlanan bir malzeme olmasıydı. Dolayısı ile bu proje çıktılarının endüstriyel uygulamalara katkısının arttırılması için işlenen parçanın boyutsal doğruluğunun elde edilmesi de önem arz etmektedir. Endüstriyel perspektiften bakıldığında en önemli hususlardan biride şüphesiz boyutsal doğruluk olacaktır. Bu bağlamda tamamlayıcı olacağı düşünülerek CMM yardımıyla bu ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Her bir numunenin çapsal sapmasının ortalama değerleri Şekil 2.24'de sunulmuştur. 90 m/dak kesme hızında elde edilen numuneler incelendiğinde, nominal çaptan en fazla sapma kuru kesmede olmaktadır. En az sapma ise Kriyojenik koşulda yapılan deneylerde elde edilmiştir. Kesme hızı 150 m/dak kullanılarak yapılan deneylerde elde edilen numuneler üzerinde yapılan ölçümlerde en fazla sapmanın MQL kullanılarak elde edilen numunede olduğu görülmektedir. En az sapmanın görüldüğü koşul ise yüksek basınçlı soğutma olmuştur.

Özellikle yüksek kesme hızında elde edilen değerler net bir eğilim göstermekte olup, aşınma değerleri (Şekil 4.3) ile benzer eğilim göstermiştir. Kesme süresince aşınmanın yüksek olduğu durumlarda çapsal sapmada artış görülmekte, aşınmanın nispeten düşük olduğu durumlarda ise çapsal sapma değeri daha az olmaktadır. Düşük kesme hızında belli bir eğilim olmasına rağmen yüksek kesme hızı kadar net bir yorum yapmak zordur.

Diğer bir önemli bulgu ise Kriyojenik, kuru ve MQL koşullarında kesme hızının artmasıyla iş parçası çapsal sapmaların önemli oranda arttığı görülmektedir. Yüksek basınçlı soğutmada ise kesme hızının artışı çapsal sapmayı kayda değer oranda değiştirmemiştir. Bu durumda yine aşınma oranı ile ilişkilidir denebilir çünkü yüksek basınçlı soğutmada verilen iki hızda aşınma oranı en az değişim gösteren koşullardan biridir.



Şekil 4.24. Farklı kesme hızı ve kesme koşullarında yapılan deneylerden elde edilen numunelerin ortalama çapsal sapmaları (a_p= 1.2mm, f= 0.15 mm/dev)

4.2 Takım Ömrü deneyleri ve Analizleri

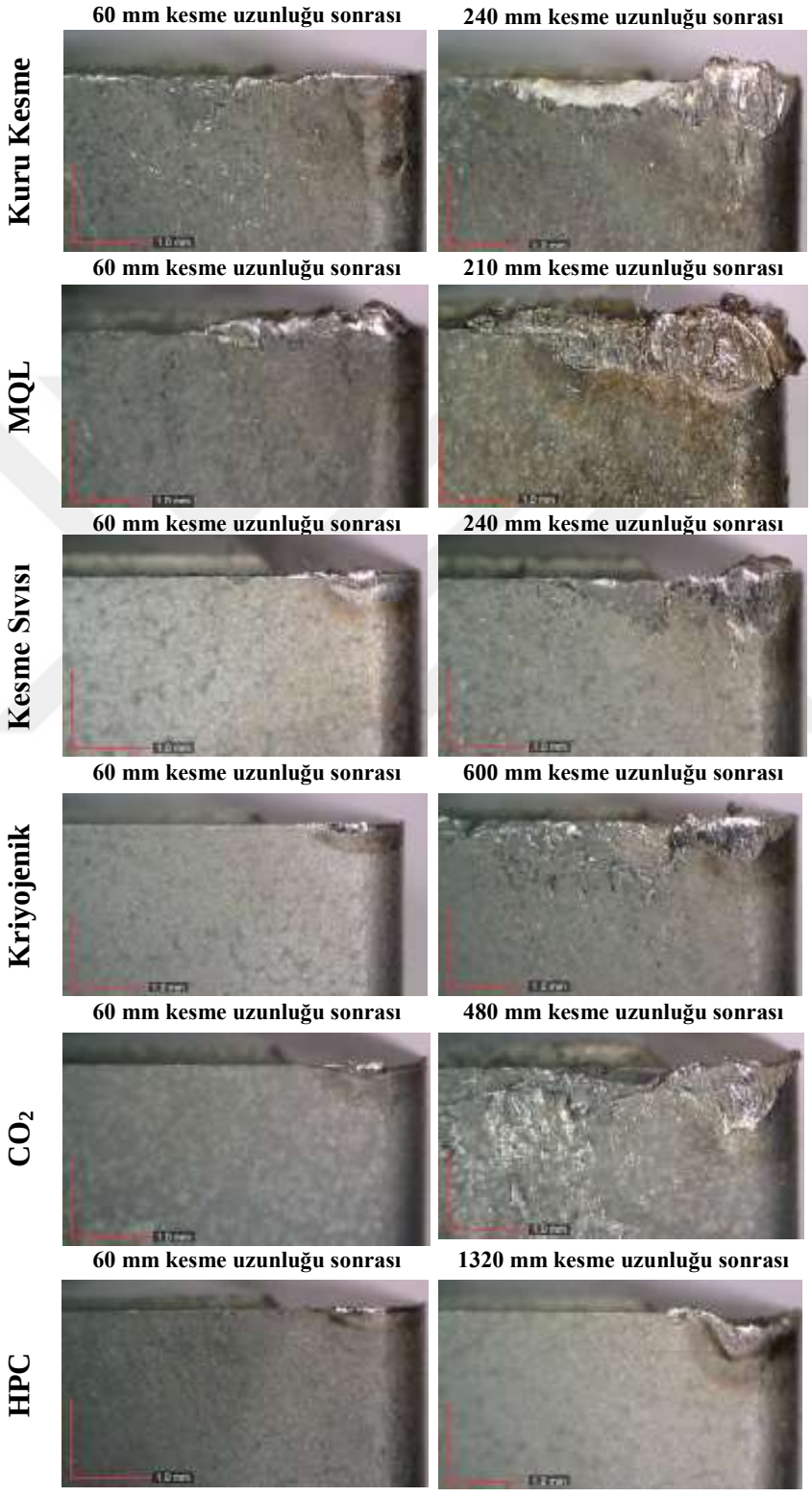
Herhangi bir malzemenin, özelliklede işlenmesi zor malzemelerin talaşlı imalat performansının tayininde dikkate alınan en önemli kriterlerden biri takım ömrüdür. Proje önerimizde çalışmanın en önemli amaçlarından biri olarak bu nispeten yeni alaşımın talaşlı imalat sürecinde takım ömrünün tayin edilmesi ve kriyojenik, MQL, ve yüksek basınçlı soğutma koşullarındaki takım ömrünün tayini vardı. Takım ömrü deneyleri bir önceki bölümde sunulan deneysel düzenek ve ekipmanlarla gerçekleştirilmiştir. 20 mm çapındaki Ti-5553 alaşım malzemeleri kullanılmıştır. Takım ömrü deneysinde belli işleme uzunluğundan sonra deney durdurulmuş ve optik mikroskop ile aşınma miktarı ölçülerek, tekrardan deneye devam edilmiştir. Bu şekilde takım ömrü deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca takım ömrü deneyleri esnasında kesme kuvveti komponentleri ve talaş kaldırma sıcaklıkları da ölçülerek kayıt edilmiştir.

Takım ömrü deneyleri için seçilen kesme parametreleri ve koşulları proje raporundaki deneysel çalışmalar bölümünde Tablo 2.9'da sunulmuştur. Kesme hızları özellikle mevcut literatürden daha yüksek seçilmiştir. Bunun sebebi ise proje önerimizde de amaçladığımızı vurguladığımız yüksek kesme hızlarında farklı işleme koşullarının (Kriyojenik, MQL ve Yüksek Basınçlı Soğutma) bu malzemenin işleme performansına etkisini tayin etmek şeklinde ifade edilmiş olmasıdır.

4.2.1 Takım Aşınması

Ti-5553 alaşım malzemesi literatürde diğer Ti alaşım malzemelerine nazaran oldukça yeni bir malzemedir. Dolayısı ile Ti6Al4V kadar literatürde üzerinde kapsamlı çalışma yapılmamış bir malzemedir. Dolayısı ile bu nispeten yeni malzemenin işlenmesinde takım ömrü çalışması, projenin literatüre önemli katkılarından biri olma potansiyeline sahiptir. Esasında Ti-5553 alaşım malzemesinin talaşlı imalatı konusundaki birkaç çalışmada bu malzemenin takım ömrü konusu irdelenmiştir. Özellikle kuru kesme ve kesme sıvısının kullanıldığı durumlarda takım aşınmasına dönük çalışmalar yapılmıştır[26,28,51]. Ancak tam anlamıyla takım ömrü deneylerin yapıldığı çalışma Braham-Bouchnak ve ark. [28] tarafından yapılmıştır. O çalışmada farklı kesme hızlarında kuru, kesme sıvısı ve yüksek basınçlı soğutmanın kullanıldığı rapor edilmiş ve o şartlarda elde edilen takım ömürleri dakika cinsinden sunulmuştur.

Şekil 4.25’de farklı kesme koşullarında 120 m/dak kesme hızı, *f*= 0.15 mm/dev ilerleme ve 1.2 mm kesme derinliğinde takım ömrü deneylerinde kullanılan kesici takımların serbest yüzey aşınmalarının optik mikroskop görüntüleri sunulmuştur.



Şekil 4.25. Takım ömrü deneylerinde farklı kesme koşullarında kesici takım serbest yüzeyindeki aşınma fotoğrafları (V_c = 120 m/dak, f = 0.15 mm/dev, a_p= 1.2 mm)

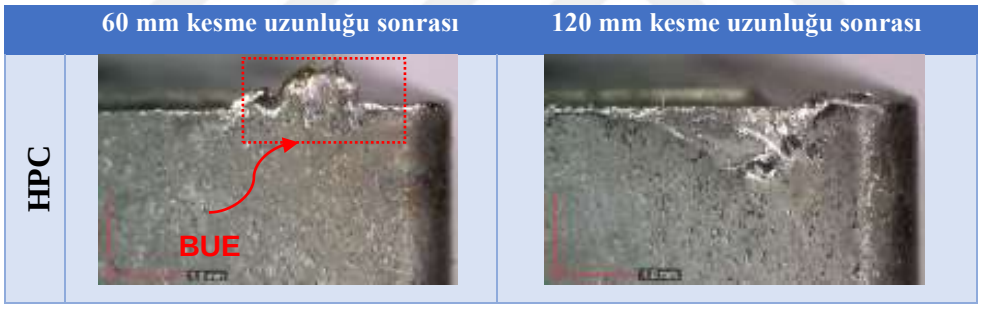
Kesici takımların ilk 60 mm talaş kaldırdıktan sonraki fotoğrafları şeklin solunda verilmiş, ve şeklin sağında ise takım ömrünü tamamladıklarında serbest yüzeyi gösteren fotoğraflar sunulmuştur. Her bir koşulda takım ömrü farklı kesme uzunluklarında tamamlandığı için sağ taraftaki fotoğraflardaki kesme uzunlukları farklılık göstermektedir. Optik mikroskop görüntülerinden net olarak görülen durum bu Ti-5553 alaşımın işlenmesinde yığma ağız ve talaş vurmasının net şekilde görülebilen iki temel problem olduğudur. Bazı kesme koşullarında bu aşınma durumunun kesici takımın uç geometrisini kayda değer şekilde değiştirmiş olduğu da görülmektedir. Ağız birikintisi aşınmasının oldukça agrasiv şekilde oluştuğu koşullar kuru kesme, MQL ve kesme sıvısının kullanıldığı koşullardır denilebilir. Bu durum özellikle artan kesme sıcaklığı ve buna bağlı olarak kesme bölgesinde malzemenin yumuşayarak daha rahat şekilde kesici uçun üzerinde aşınan bölgelere sıvanması o bölgelerde yoğunlaşması şeklinde ifade edilebilir. Soğutucuların (Kriyojenik ve CO_2) kullanıldığı koşullarda ise talaş vurmasına bağlı olarak ana kesici ağız üzerinde bölgesel kopmaların olduğu görülmektedir. Kriyojenik soğutucu yardımıyla yapılan talaş kaldırma operasyonlarında tek paso talaş kaldırmada bu durum oluşmamıştır. Ancak uzun süreli talaş kaldırmada daha sık rastlanmıştır. Bunun sebebi ise kesici takım uzun süreli olarak sıvı azota maruz kalıyor ve kesici takımın talaş vurmasıyla kırılan kısımlarının sıcaklığı oldukça düşük noktalara ulaşıyor böylece gevrekliği artan ağıza talaşın çarpması ile daha rahat şekilde kırılma gerçekleşiyor.

Talaş vurması sorununun pek yaşanmadığı ve aşınmanın etkin şekilde azaltılarak takım ömrünün diğer koşullara göre çok daha iyi olduğu koşul ile yüksek basınçlı soğutma ile yapılan deneyler olmuştur. Şekil 4.25'de görüldüğü gibi yüksek basınçlı soğutma ile kesici takım ana kesici ağız bölgesinde talaş vurması görülmemektedir. Yüksek basınçlı soğutma yöntemi kullanılarak yapılan diğer takım aşınma deneysindede (V_c = 90 m/dak) aynı şekilde Şekil 4.26'da görüldüğü üzere talaş vurması sorunu ile karşılaşılmamıştır.



Şekil 4.26. Takım ömrü deneylerinde yüksek Basınçlı Soğutma koşullarında kesici takım serbest yüzeyindeki aşınma fotoğrafları (V_c = 90 m/dak, f = 0.15 mm/dev, a_p= 1.2 mm)

Esasında talaş vurması sonucunda ana kesici ağızdaki kırılmalar ve kopmalar doğrudan kesici takım serbest yüzey aşınmasını etkilememekte dolaylı yoldan etkilemektedir. Talaş vurması kesici takım ana kesici ağızının geometrisini bozmakta ve buda özellikle bu malzemenin işlenmesinde adezyon aşınma mekanizmasının tetiklediği yığma ağız sorununu ciddi anlamda arttırmaktadır. Yığma ağız ise talaş kaldırma süreci devam ederken, kesici ağızdan uzaklaşmakta ve uzaklaşırken kesici takımda da kopmalara sebep olmaktadır. Buna iyi bir örnek 90 m/dak kesme hızında 1.2 mm kesme derinliği ile yapılan takım ömrü denesinde kuru kesme koşulları örnek verilebilir. Şekil 4.27'de görüldüğü üzere takım ömrü deneysinde 60 mm işlemeden sonra talaş kaldırma operasyonu durdurulmuş ve kesici takım serbest yüzeyindeki aşınmanın ölçümü yapılmıştır. Bu aşamada oldukça büyük bir kütlenin birikinti şeklinde ana kesici ağızda biriktiği görülmektedir. Takım ömrü deneysinin devamında 120 mm kesme uzunluğuna ulaşıldığında görüldüğü üzere ağız birikintisi beraberinde kesici takım ana kesici ağız bölgesinden önemli miktarda parçayı da koparark kesici takıma oldukça önemli zarar vermiştir. Bu aşamadan sonra kesici takım burun geometrisi değişmekte ve buda aşınma ile birlikte birçok problemi beraberinde getirmektedir.



Şekil 4.27. Takım ömrü deneylerinde kuru kesme koşullarında kesici takım serbest yüzeyindeki aşınma fotoğrafları (V_c = 90 m/dak, f = 0.15 mm/dev, a_p= 1.2 mm)

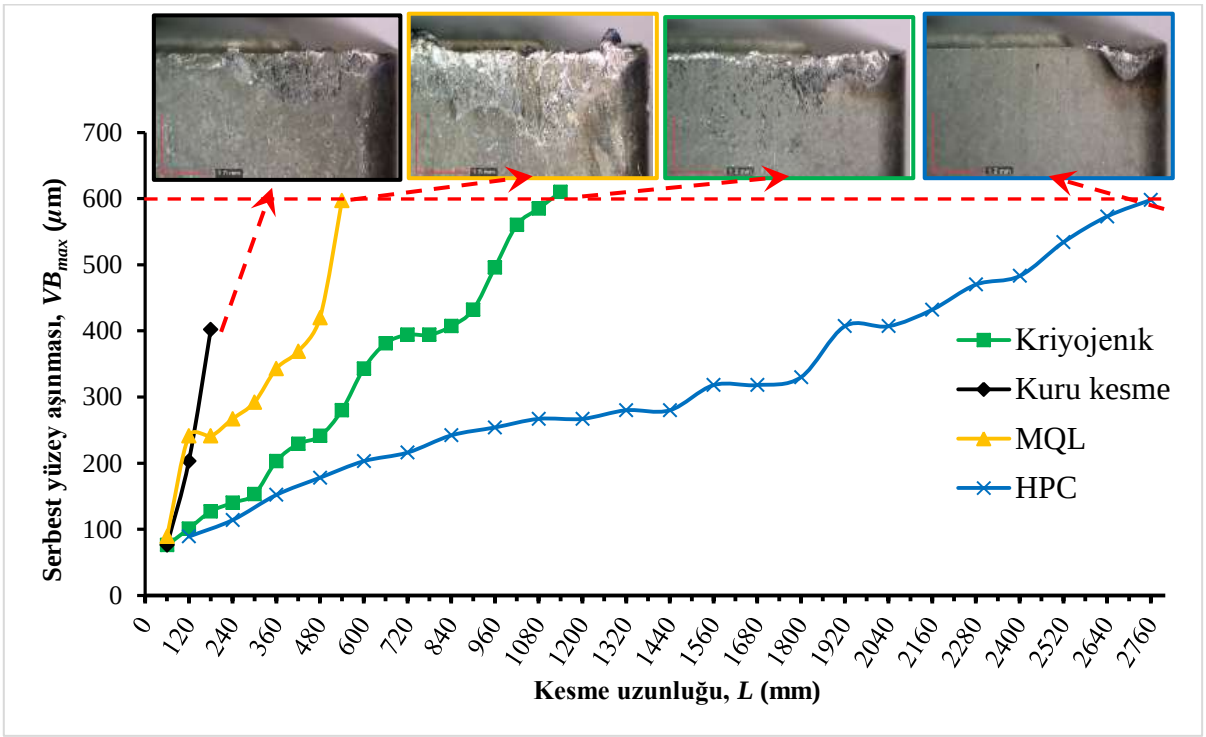
Takım ömrü deneyleri yapılırken özellikle Yüksek basınçlı soğutma, Kriyojenik soğutma ve MQL'e odaklanılmıştır. Bununla beraber kesme sıvısı ve karbondioksit de test edilmiştir. Referans olarak ise kuru kesme kullanılmıştır. 0.6 mm serbest yüzey aşınması ölçüldüğünde takım ömrünü tamamlamış olarak kabul edilmiştir. ISO (Uluslararası Standart Organizasyonu) 3685 takım ömrü standardına göre kaba operasyonlarda 0.7 mm maksimum serbest yüzey aşınması takım ömrünü tamamlaması olarak ifade edilmekte ancak, bizim seçmiş olduğumuz parametreler, özellikle kesme derinliği (1.2 mm) kesici takım burun yarıçapına (0.8 mm) yakın bir değerdir dolayısı ile semifinish kategorisinde değerlendirilmektedir. Buna ek olarak 0.7 mm ye ulaşan takımlarla işlenen parçalarda ciddi çapak sorunu oluşmakta bu da yine ISO 3685 takım ömrü standardında takımda meydana gelen hasarın arzu edilen iş parçasını üretememeye ulaşması zaten doğal olarak takımın

ömrünü tamamlandığının göstergesi şeklinde sunulmuştur. Bu durumda takım ömrü için 0.6 mm beklenmeksizin deney durdurulmuştur. Kuru kesmede bu sorunla karşılaşılmıştır. Kuru kesmede deneynin durdurulduğunda oluşan çapak fotoğrafı Şekil 4.28'de görülmektedir.



Şekil 4.28. Kuru kesmede yapılan takım ömrü deneysinde çapak oluşumu (V_c = 90 m/dak, f = 0.15 mm/dev, a_p= 1.2 mm)

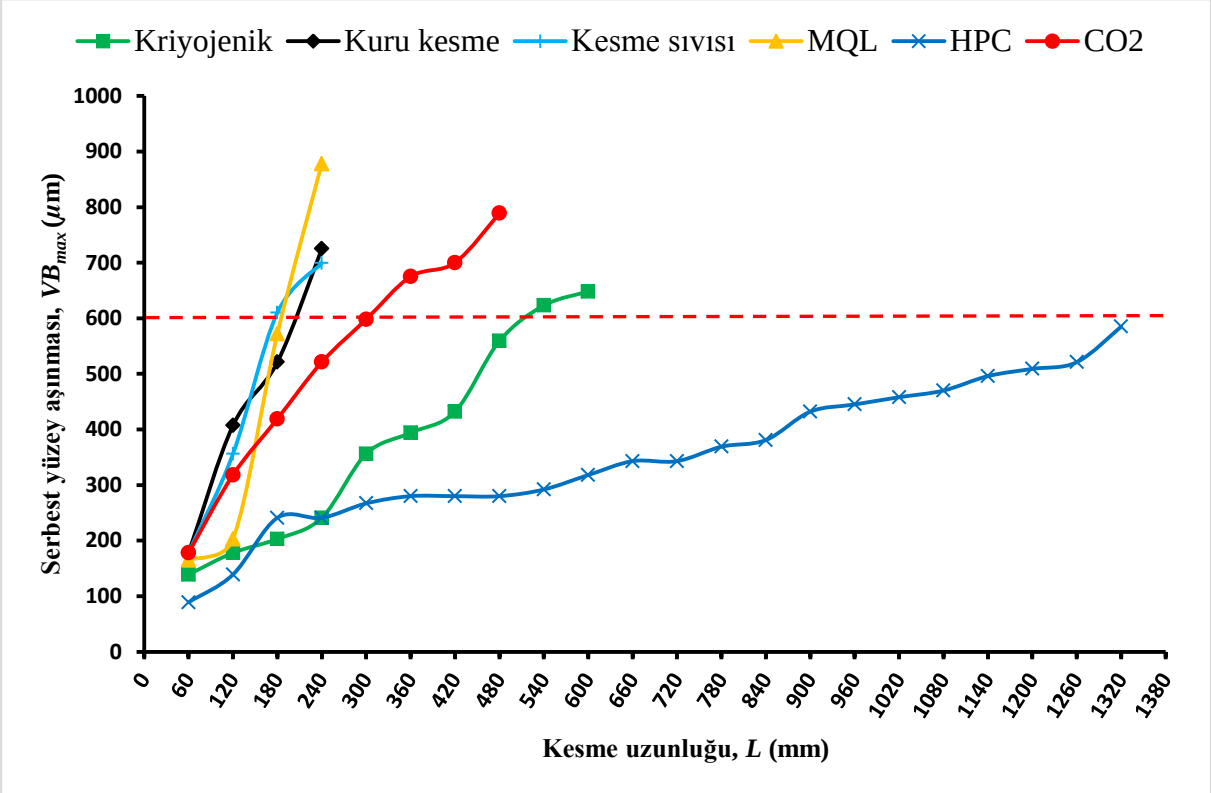
Takım ömrü deneylerinde kullanılan düşük kesme hızı (V_c = 90 m/dak) için elde edilen bulgular Şekil 4.29'da sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere, 600 μm (0.6 mm) değerine en geç ulaşan kesici takım yüksek basınçlı soğutma yardımıyla yapılan takım ömrü deneysinde kullanılan kesici takımdır. Bunu takip eden ise Kriyojenik koşullarda kullanılan kesici takım olmuştur. MQL kesme koşullarında kullanılan kesici takım ise hem Kriyojenik'ten hem de Yüksek Basınçlı Soğutma yardımıyla yapılan testten daha kısa sürede ömrünü tamamlamıştır.



Şekil 4.29. Farklı kesme koşullarında yapılan takım ömrü deney sonuçları (V_c = 90 m/dak, f = 0.15 mm/dev, a_p= 1.2 mm)

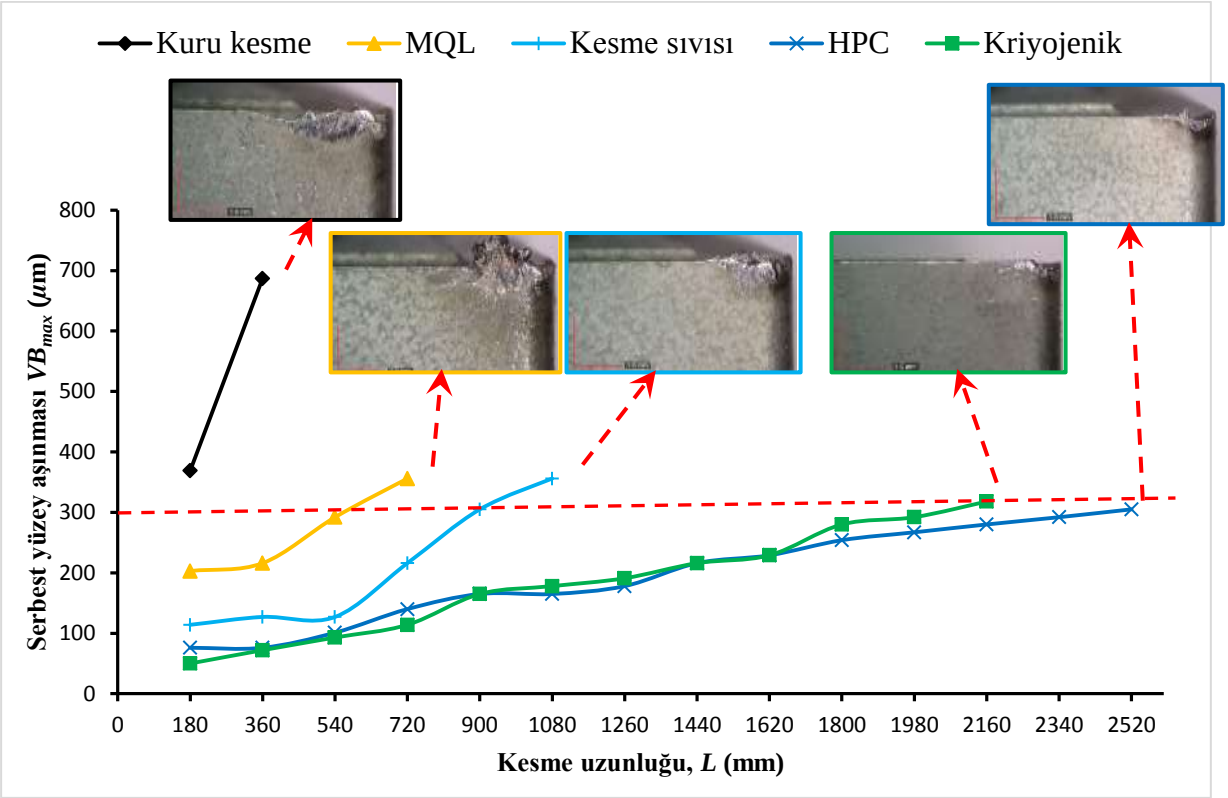
Aynı ilerleme ve kesme derinliğinde yapılan ve tüm kesme koşullarını (Karbondioksit ve Kesme Sıvısı dahil) kapsayan 120 m/dak kesme hızındaki takım ömrü deneysinde elde edilen bulgular aşağıda Şekil 4.30'de sunulmuştur. Şekilden görüldüğü üzere en uzun süre kullanılabilen takım Yüksek basınçlı Soğutma deneysinde kullanılan takımdır. Bunu takip eden Kriyojenik, Karbondioksit, kuru kesme, kesme sıvısı ve MQL şeklindedir. Kesme hızının artışı özellikle MQL in takım ömrünü ciddi şekilde azaltmıştır. MQL ile işleme de Ti alaşımının reaksiyona girdiği iyi bilinen bir durumdur, bu çalışmada da Ti temelli bu malzemenin işlenmesinde MQL kesici takım ömrünü arttırmamış bilakis azaltmıştır. Kriyojenik soğutma etkin şekilde kullanılmasına rağmen Yüksek Basınçlı Soğutma'nın sağlamış olduğu katkıyı takım ömrü perspektifinden sağlayamamıştır.

Kriyojenik temelli soğutucuların nozul pozisyonları ve kesici takım talaş yüzeyi ile talaş arasına penatrasyonlarını engelleyen en önemli faktörlerden biri verilen talaş derinliği olmaktadır [52]. Ayrıca talaşlı imalatta bilinen bir temel durum ise kesme derinliğinin takım ömrüne etkisi kayda değer olabilmektedir. Son işlem (Finish) operasyonu dikkate alınarak (0.6 mm) 120 m/dak kesme hızında ve 0.15 mm/dev ilerlemede yapılan takım ömrü deneysinde elde edilen bulgular Şekil 4.31'de sunulmuştur.



Şekil 4.30. Farklı kesme koşullarında yapılan takım ömrü deney sonuçları (Vc = 120 m/dak, f = 0.15 mm/dev, a_p= 1.2 mm)

Son paso (Finiş) operasyonu olması sebebiyle ISO referans alınarak takım ömrünü 0.3 mm aşınmaya ulaşınca tamamladığı kabul edilmiştir. Bu deneylerde yine yüksek basınçlı soğutma yönteminin kullanıldığı durumda kesici takım performansı diğer koşullara nazaran oldukça iyi sonuç vermiştir. Ancak yüksek talaş derinliğinde yapılan deneyde kıyasla takım ömründe önemli iyileşmenin olduğu koşul ise Kriyojenik kesme olmuştur. Kriyojenik kesme de kullanılan kesici takımın takım ömrü, kesme sıvısı ve MQL koşullarında yapılan deneylerde kullanılan kesici takımların ömürlerinden çok daha uzun olmuştur. Her 180 mm işlemeden sonra takım aşınmasındaki değişimin ölçüldüğü bu deneyde, kuru kesmede ilk ölçüm sonucu dahi takım ömrü için belirlenen 0.3 mm aşınma değerinin üzerinde çıkmıştır.

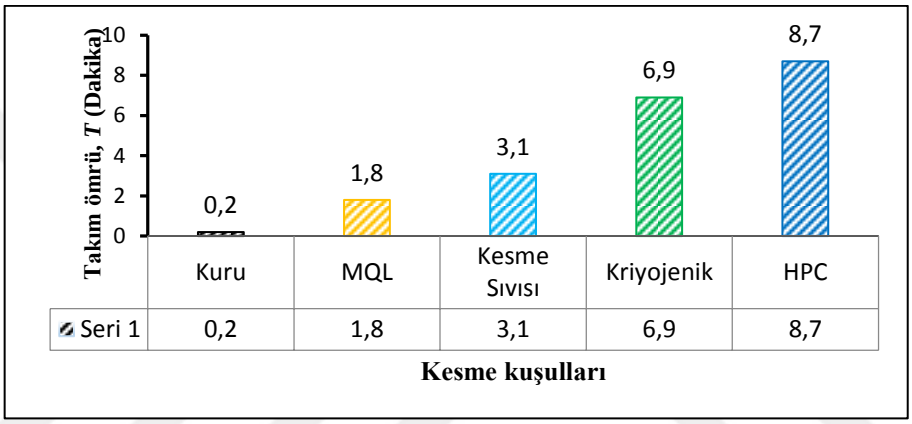


Şekil 4.31. Farklı kesme koşullarında yapılan takım ömrü d sonuçları (V_c = 120 m/dak, f = 0.15 mm/dev, a_p= 0.6 mm)

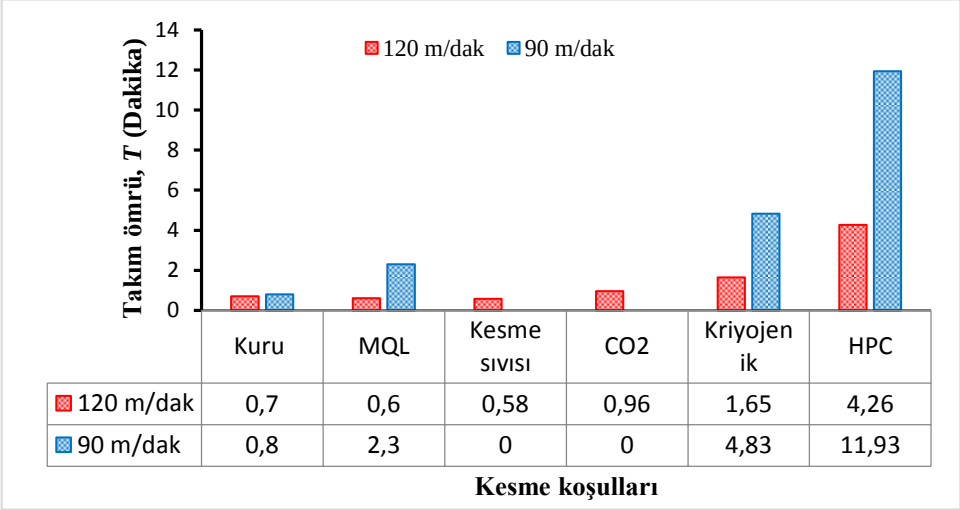
4.2.2 Takım Ömrü

Son paso (Finiş) operasyonuyla (a_p= 0.6 mm) yapılan talaş kaldırma sürecinde elde edilen takım ömrü deney sonuçları bir bütün olarak Şekil 4.32'da sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere Yüksek Basınçlı Soğutma yöntemiyle yapılan deneylerde takım ömrü yaklaşık olarak 12 dakika olarak ölçülmüştür. Aynı deneylerde Kriyojenik soğutma

kullanılarak yapılan takım ömrü deneysinde takım ömrü yaklaşık 5 dakika olarak belirlenmiş, MQL yöntemiyle yapılanda ise yaklaşık 2.3 dakika olarak ölçülmüştür. Kuru kesme koşullarında takım ömrü en düşük değerde olup 1 dakika'nın altındadır. Diğer koşullarla kıyaslandığında Yüksek Basınçlı Soğutma sistemi oldukça iyi bir performans sergilemekte ve takım ömrünü kuru kesme nazaran yaklaşık 15 kat arttırmaktadır. Kriyojenik soğutma ise kuru kesmeye nazaran yaklaşık 7 kat artış sağlamıştır. Bu bulgular özellikle bu Ti-5553 alaşım malzemesinin finiş operasyonu için önemlidir. Elde edilen bulgulara göre finiş operasyonunda yüksek basınçlı soğutma sisteminin kullanılması oldukça önemli avantajlar sağlayacaktır.



Şekil 4.32. Farklı kesme koşullarında yapılan takım ömrü deney sonuçları (V_c = 120 m/dak, f = 0.15 mm/dev, a_p= 0.6 mm)



Şekil 4.33. Farklı kesme koşullarında yapılan takım ömrü deney sonuçları (f = 0.15 mm/dev, a_p= 1.2 mm)

İki farklı kesme hızında yapılan takım ömrü deneylerinde elde edilen bulgular ise Şekil 4.33'de sunulmuştur. Burada da bir önceki son operasyonunda elde edilen bulgularla benzer eğilimi gösteren bulgular elde edilmiştir. Her iki kesme hızında Yüksek Basınçlı Soğutma

sistemiyle takım ömrünün önemli derecede arttırılabildiği görülmektedir. İster kuru kesme isterse de kesme sıvısı referans alınsın, elde edilen bulgular, düşük kesme hızında kuru kesmeye göre Yüksek Basınçlı Soğutma'nın 15 kat takım ömrünü arttırdığı, yüksek kesme hızında kesme sıvısı referans alındığında Yüksek Basınçlı Soğutma'nın takım ömrünü yaklaşık 7 kat arttırdığı görülmektedir.

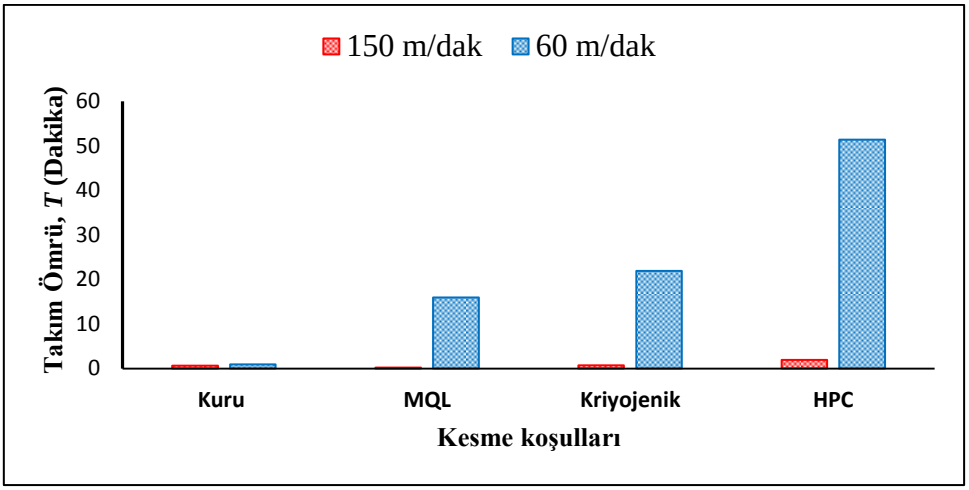
Kriyojenik soğutmada da takım ömründe kayda değer iyileştirmeler görülmektedir. Karbondioksit ile soğutmada yapılan deneylerde takım ömrü, kuru kesme, MQL ve kesme sıvısına nazaran artmış olmakla beraber önemli bir farklılık görülmemektedir. Düşük kesme hızında (90 m/dak) MQL ile yapılan deneyde takım ömrü yaklaşık olarak 2.3 dakika olarak ölçülmüş ancak yüksek kesme hızında elde edilen takım ömrü kuru kesmeye oldukça yakın çıkmıştır.

Taylor takım ömrü denklemi dikkate alındığında [47],

$$VT^n = C \tag{4.1}$$

Şeklinde yazılabilir. Burada *V* kesme hızı, *T* takım ömrü, *n* üssel sabit ve C bir dakikalık ömre karşılık gelen kesme hızı şeklindedir.

Kesme hızı (*V*) referans alınarak yapılan çalışmada, farklı kesme hızları için özellikle Yüksek Basınçlı Soğutma, Kriyojenik, MQL, ve Kuru kesme için öngörülen takım ömrü değerleri aşağıda Şekil 4.34'de sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere 150 m/dak kesme hızında tüm koşullarda oldukça düşük takım ömrünün olması tahmin edilmektedir. Oysa 60 m/dak kesme hızında takım ömürlerinin özellikle Yüksek Basınçlı Soğutma, Kriyojenik ve hatta MQL ile işlenmesinde makul (15 dakika) seviyelerin üzerinde olduğu öngörülmektedir. Tabi not edilmesi gereken husus, Taylor takım ömrü denklemi yaklaşık değeri verecektir, deneysel olarak test edilse muhtemelen birebir takım ömrünü vermeyecek olmakla birlikte çok yakın değerlerde çıkması muhtemeldir.



Şekil 4.34. Farklı kesme hızlarında ve koşullarda Ti-5553 alaşım malzemesinin işlenmesinde Taylor Takım Ömrü denklemi kullanılarak tahmin edilen takım ömürleri (f = 0.15 mm/dev, a_p= 1.2 mm)

4.3 Değerlendirme ve Tartışma

Ti-5553 alaşım Ti-64 ile kıyaslandığında akma ve çekme mukavemetinin yüksek olması literatürde ön plana çıkarılan noktadır [2]. Bu farklılığı malzemenin işlenebilme performansı açısından ele aldıklarında ise aşınmanın ve kesme kuvvetlerinin Ti-64 alaşımına nazaran daha yüksek olduğu farklı çalışmalarda vurgulanmıştır [2,51]. Ancak Ti-5553 malzemesinin işlenmesinde karşılaşılan sorunların çözümüne yönelik veya problemlerin sistematik araştırılması konusunda halen yeterli akademik çalışma bulunmamaktadır. Bu açıdan değerlendirildiğinde, bu araştırma bu konudaki önemli bir açığı kapatmaya aday bir çalışma olarak değerlendirilebilir. Çalışmanın bu bölümünde ön plana çıkan iki önemli değişken söz konusudur. Bunlar kesme hızının etkisi ve farklı soğutucu ve yağlayıcıların etkisidir. Neredeyse literatürde halen kullanılmakta olan tüm soğutma ve yağlama yaklaşımları bu çalışmada kullanılmıştır denilebilir. Buna ek olarak çok geniş kesme hızı aralığı alınarak da literatürde bilindiği kadarı ile henüz denenmemiş kesme hızlarına da çıkılmış ve Ti-5553 alaşımının yüksek kesme hızlarında işlenebilme kabiliyeti araştırılmıştır. Bilindiği kadarı ile dünya literatüründe farklı soğutucu ve yağlayıcıların (kriyojenik, MQL ve HPC) Ti-5553 alaşımın işlenebilme kabiliyetine etkisinin eş zamanlı olarak ve kıyaslamalı araştırıldığı ilk çalışma niteliğindedir. Elde edilen bulgular kriyojenik soğutmanın MQL ve kuru kesmeye nazaran farklı kesme hızlarında yaklaşık olarak % 50 kesme sıcaklığını düşürdüğünü göstermektedir. Sıvı azotun düşük sıcaklığı (-196 °C) [58] sayesinde kesme bölgesindeki ısı etkin şekilde uzaklaştırılabilmiş ve böylece kesici takımın sıcaklıktan etkilenmesi kayda değer

şekilde azaltılmıştır. Farklı soğutucu ve yağlayıcıların özellikle malzemenin işlenmesinde kesici takım performansına katkıları farklılık göstermiştir. Özellikle yüksek kesme hızlarında HPC ve kriyojenik kesme bölgesindeki ısının uzaklaştırılmasıyla diğer yöntemlere göre önemli bir üstünlük sağlamıştır. Kesme hızı açısından değerlendirildiğinde seçilen en düşük hızın (30 m/dak) bu malzemenin işlenmesinde özellikle yığma ağız sorununa sebep olduğu için uygun olmadığı görülmüştür. Her ne kadar düşük kesme hızlarında dahi kesme sıcaklığı belli bir noktaya ulaşmış olsada yüksek kesme hızlarına göre yinede çok daha düşük olup, talaşın kesici takım talaş yüzeyinden akmasını zorlaştırmaktadır [59], Buna ek olarak, Ti-5553 alaşım malzemesinin pekleşme kabiliyeti düşük kesme hızlarında daha yüksek olması beklenmektedir ve bu da yine yığma ağız sorununa sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Farklı soğutma ve yağlamanın düşük kesme hızında yığma ağız ve onu oluşturan adezyon aşınma mekanizmasına kayda değer bir etki yapmadığı da görüşmüştür. Adezyon aşınmayı özellikle Titanyum esaslı malzemelerde tetikleyen unsurlardan biri olarak kesici takım ve iş parçasının kimyasal reaksiyonu olarak ifade edilmektedir [60]. Titanyum alaşımların kesici takımlarla reaksiyona girmelerinde kritik sıcaklık değeri olarak yaklaşık 500 °C verilmektedir [3]. Dolayısı ile Ti-5553 alaşımın işlenmesinde yüksek kesme hızlarında kimyasal reaksiyon söz konusudur, diğer taraftan belirli sıcaktan sonra kesici takım uç bölgesinde plastik deformasyonda söz konusu olabilmekte bu durum kesici takımın uç geometrisini ve ucun yüzeyini bozmakta böylece yığma ağız sorunu yüksek hızlarda daha da belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. Buna ek olarak farklı soğutucu ve yağlayıcılar da yüksek hızlarda (210 m/dak) ortaya çıkan sorunu minimize edebilme kabiliyeti göstermemişlerdir. Ancak tüm kesme koşulları içinde tüm kesme hızları dikkate alındığında yüksek basınçlı soğutma ve kriyojenik soğutma kesici takım performansını arttırma ve yukarıda bahsi geçen aşınma mekanizmalarının etkisini azaltma anlamında kayda değer iyileştirme ortaya koyabilmişlerdir. Yüksek basınçlı soğutma sadece kesici takım performansını arttırma konusunda belirgin farklılık ortaya koymamış aynı zamanda kesme kuvvetleri incelendiğinde de diğer soğutucu ve yağlayıcılara nazaran belirgin azalmaya sebep olmuştur. Özellikle 210 m/dak kesme hızı incelendiğinde, kesme kuvvetlerindeki azalmanın temel sebebinin de aşınmanın yüksek basınçlı soğutma sonucu az olmasından kaynaklandığı görülmektedir. Talaşların nispeten kısa olarak kırılması ki bu durum arzu edilmektedir soğutucuların kullanıldığı koşullarda meydana gelmiştir. Bunun temel sebebi soğutucuların belli bir basınçla kesme bölgesine uygulanması sonucu talaşta eğilme momentini arttırması ve bunun sonucunda daha küçük boyutlarda kırılmanın gerçekleşmesi şeklinde yorumlanabilir. Bununla birlikte talaşın oluşma esnasında

yüksek sıcaklığa maruz kalması ve hemen akabinde ise aniden soğuması talaşta doğal olarak iç gerilmelerin oluşmasına sebep olacaktır ve buda yine talaşın kırılganlığını arttıracak faktördür. İşlenen parçalardaki boyutsal hata incelendiğinde de soğutucuların (kriyojenik ve HPC) önemli üstünlük sağladığı görülmektedir. Takım ömrü deneyleri de göstermiştir ki yüksek basınçlı soğutma ve kriyojenik soğutma ile Ti-5553 alaşımın işlenebilme performansı önemli ölçüde iyileştirilmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada havacılık sektöründe yakın zamanda kullanılmaya başlanan yeni nesil β esaslı Ti-5553 alaşım malzemesinin talaşlı imalat sürecinde kesme parametrelerinin ve kesme koşullarının bu malzemenin özellikle yüksek kesme hızlarında işlenmesinde işleme performansı etkisi araştırılmıştır. Kesme parametreleri olarak geniş aralıkta kesme hızları, ilerleme ve kesme derinliği dikkate alınmıştır. Kesme koşulları olarak ise kriyojenik, yüksek basınçlı soğutma, mimimum miktarda yağlama, kesme sıvısı ve kuru kesme gibi koşullar kullanılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalarda işleme performansı için çıktı olarak kesme kuvvetleri, kesme sıcaklıkları, takım aşınması, takım ömrü, talaş kırılabilirliği, talaş morfolojisi vb sonuçları kapsamaktadır.

Bu çalışmadan ulaşılan sonuçları ve önerileri içeren maddeler aşağıda sunulmuştur.

- Ti-5553 alaşımı yüksek kesme hızlarında işlemek mümkündür ancak yüksek kesme hızlarında kesme derinliği işleme sürecinin performansı açısından belirleyici rol oynamaktadır.
- 1 mm'nin üzerindeki kesme derinliklerinde kesici takımdaki aşınma aniden artış göstermektedir. Dolayısı ile işleme performansının kontrolü için bu husus dikkate alınmalıdır.
- Kuru kesme koşullarında yüksek kesme hızında ve kesme derinliğinde takım aşınması oldukça artmakta ve takım ömrü oldukça kısalmaktadır.
- Ti-5553 alaşımın yüksek basınçlı soğutma ile işlenmesinde basıncın arttırılmasının işleme performansını olumlu etkilediği görülmüştür.
- MQL koşullarda debinin etkisi ise kesme derinliğine ve kesme hızına bağlı olarak farklılık göstermiştir.
- Kriyojenik koşullar (Sıvı azot ve karbondioksit), kuru kesmeye ve MQL'e göre kesme sıcaklıklarını %50'den daha fazla düşürmektedirler. Bu durum eğik kesmedeki tüm kesme hızları için geçerlidir.

- Düşük kesme hızlarında farklı kesme koşulları takım aşınması açısından değerlendirildiğinde çok önemli farklılıklar ortaya çıkmazken, artan kesme hızlarında soğutucu ve yağlayıcıların aşınmayı önemli oranda azalttığı görülmüştür.
- Ti-5553 alaşımın işlenmesi esnasında karşılaşılan en önemli aşınma mekanizması adezyon ve bunun sonucunda yığma ağız sorunu olduğu görülmüştür.
- Kesme kuvvetleri değerlendirildiğinde, artan kesme hızlarında tüm koşullarda kesme kuvvetleri ısıl yumuşamanın da etkisiyle azalmıştır, ancak 210 m/dak'da ani artış görülmektedir ki bunun sebebi kesici takım aşınmasının aniden artmasıdır. Kesme koşulları kıyaslandığında yüksek basınçlı soğutma sistemi tüm kesme hızlarında diğerlerine nazaran daha düşük kuvvet oluşturmuştur.
- Yüksek basınçlı soğutma ile özellikle 50 bar basınçta ve kriyojenik koşullarda talaşların kısa boylarda kırıldığı ve talaş kırılabilirliğinin diğer kesme koşullarına nazaran çok daha iyi olduğu görülmüştür.
- Diğer kesme koşullarıyla kıyaslandığında, yüksek basınçlı soğutma yöntemi Ti-5553 alaşımın işlenmesinde yüksek işleme performansının elde edilmesine birinci dereceden katkı sunmuştur. Yapılan tüm deneyler dikkate alındığında kesme koşulları içinde işleme performansı açısından en iyi sonuçlar yüksek basınçlı soğutma yönteminin kullanılmasıyla elde edilmiştir.
- Takım ömrü yüksek basınçlı soğutma yöntemiyle ve kriyojenik soğutma yöntemiyle kesme sıvısında elde edilen sonuçlara nazaran önemli ölçüde arttırılmıştır. Örneğin, 120 m/dak kesme hızında kesme sıvısına göre kriyojenik koşulda takım ömrü %122 artış gösterirken, yüksek basınçlı soğutma %180 artış göstermiştir. Bu kriyojenik ve yüksek basınçlı soğutmanın işleme performansına katkısını gösteren önemli bir kanıttır.
- 90 m/dak kesme hızında kaba işlemede MQL ile elde edilen takım ömrü referans alındığında, kriyojenik koşulda takım ömrü MQL'e oranla %110 civarında bir artış gösterirken, yüksek basınçlı soğutma %418 civarında artış göstermiştir.
- Genel anlamda Ti-5553 alaşımın eğik kesmede işleme performansı dikkate alındığında yüksek basınçlı soğutma ve kriyojenik soğutmanın diğer koşullara nazaran önemli katkı sundukları görülmüştür.

- İşlenmiş parçaların yüzey bütünlüğü incelendiğinde ise, aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüklerinin 1 μm civarında ve kabul edilebilir olduğu görülmüştür. Yüksek basınçlı soğutmanın hem yüzey pürüzlülüğünün azaltılması hem de yüzey topografisi açısından diğer koşullara göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.
- Kesici takım aşınmasının artması yüzey kalitesini olumsuz etkilemiştir.

KAYNAKLAR

1. Ezugwu, E.; Wang, Z. Titanium alloys and their machinability—a review. *Journal of materials processing technology* **1997**, *68*, 262-274.
2. Arrazola, P.J.; Garay, A.; Iriarte, L.M.; Armendia, M.; Marya, S.; Le Maitre, F. Machinability of titanium alloys (ti6al4v and ti555.3). *J Mater Process Tech* **2009**, *209*, 2223-2230.
3. Ezugwu, E.; Bonney, J.; Yamane, Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of materials processing technology* **2003**, *134*, 233-253.
4. Boyer, R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry. *Materials Science and Engineering: A* **1996**, *213*, 103-114.
5. Ginting, A.; Nouari, M. Surface integrity of dry machined titanium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **2009**, *49*, 325-332.
6. Lenain, A. Relationships between thermomechanical processing, microstructure and mechanical properties of the beta metastable ti-lcb alloy. UCL., 2007.
7. Gerday, A.-F. Mechanical behavior of ti-5553 alloy. Modeling of representative cells. **2009**.
8. Nouari, M.; Makich, H. Experimental investigation on the effect of the material microstructure on tool wear when machining hard titanium alloys: Ti–6al–4v and ti-555. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* **2013**, *41*, 259-269.
9. Wagner, V.; Baili, M.; Dessein, G. The relationship between the cutting speed, tool wear, and chip formation during ti-5553 dry cutting. *Int J Adv Manuf Tech* **2015**, *76*, 893-912.
10. Greenfield, M.A.; Margolin, H. The interrelationship of fracture toughness and microstructure in a ti-5.25 al-5.5 v-0.9 fe-0.5 cu alloy. *Metallurgical Transactions* **1971**, *2*, 841-847.
11. Peters, M.; Kumpfert, J.; Ward, C.H.; Leyens, C. Titanium alloys for aerospace applications. *Advanced Engineering Materials* **2003**, *5*, 419-427.
12. Bruhis, Y.; Sebring, W.; Noland, D. In *High performance milling in aerospace materials*, Meeting the Continuous Challenges of Machining New Innovative Material. Amherst, 2008.
13. Ezugwu, E. Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **2005**, *45*, 1353-1367.
14. Ulutan, D.; Ozel, T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **2011**, *51*, 250-280.
15. Boyer, R. Attributes, characteristics, and applications of titanium and its alloys. *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society* **2010**, *62*, 21-24.
16. Braham-Bouchnak, T.; Germain, G.; Morel, A.; Lebrun, J.-L. The influence of laser assistance on the machinability of the titanium alloy ti555-3. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2013**, *68*, 2471-2481.
17. Tomchik, G.; Dunder, T.G. In *Overview of titanium applications on advanced commercial transports*, AeroMat Conference, unpublished research, 2006.

18. Nag, S.; Banerjee, R.; Srinivasan, R.; Hwang, J.; Harper, M.; Fraser, H. Ω-assisted nucleation and growth of α precipitates in the ti–5al–5mo–5v–3cr–0.5 fe β titanium alloy. *Acta Materialia* **2009**, *57*, 2136-2147.
19. Nicolaou, P.; Miller, J.; Semiatin, S. Cavitation during hot-torsion testing of ti-6al-4v. *Metallurgical and Materials Transactions A* **2005**, *36*, 3461.
20. Armendia, M.; Garay, A.; Iriarte, L.-M.; Arrazola, P.-J. Comparison of the machinabilities of ti6al4v and timetal® 54m using uncoated wc–co tools. *Journal of Materials Processing Technology* **2010**, *210*, 197-203.
21. Khanna, N.; Sangwan, K.S. Interrupted machining analysis for Ti6al4v and Ti5553 titanium alloys using physical vapor deposition (pvd)-coated carbide inserts. *P I Mech Eng B-J Eng* **2013**, *227*, 465-470.
22. Özel, T.; Zeren, E. A methodology to determine work material flow stress and tool-chip interfacial friction properties by using analysis of machining. *Journal of manufacturing science and Engineering* **2006**, *128*, 119-129.
23. Wagner, V.; Baili, M.; Dessein, G.; Lallement, D. In *Behaviour laws comparison for titanium alloys machining: Application to ti5553*, International conference on structural analysis of advanced materials, 2009; pp pp. 1-10.
24. Nag, S. Influence of beta instabilities on the early stages of nucleation and growth of alpha in beta titanium alloys. The Ohio State University, 2008.
25. Ugarte, A.; M'Saoubi, R.; Garay, A.; Arrazola, P. Machining behaviour of ti-6al-4v and ti-5553 all0oys in interrupted cutting with pvd coated cemented carbide. *Procedia CIRP* **2012**, *1*, 202-207.
26. Arrazola, P.-J.; Garay, A.; Iriarte, L.-M.; Armendia, M.; Marya, S.; Le Maitre, F. Machinability of titanium alloys (ti6al4v and ti555. 3). *Journal of Materials Processing Technology* **2009**, *209*, 2223-2230.
27. Sun, Y.; Huang, B.; Puleo, D.; Jawahir, I. Enhanced machinability of ti-5553 alloy from cryogenic machining: Comparison with mql and flood-cooled machining and modeling. *Procedia CIRP* **2015**, *31*, 477-482.
28. Braham-Bouchnak, T.; Germain, G.; Morel, A.; Furet, B. Influence of high-pressure coolant assistance on the machinability of the titanium alloy ti555–3. *Machining Science and Technology* **2015**, *19*, 134-151.
29. Srinivasu, G.; Natraj, Y.; Bhattacharjee, A.; Nandy, T.; Rao, G.N. Tensile and fracture toughness of high strength β titanium alloy, ti–10v–2fe–3al, as a function of rolling and solution treatment temperatures. *Materials & Design* **2013**, *47*, 323-330.
30. Li, C.; Chen, J.; Li, W.; He, J.; Qiu, W.; Ren, Y.; Chen, J.; Chen, J. Study on the relationship between microstructure and mechanical property in a metastable β titanium alloy. *Journal of Alloys and Compounds* **2015**, *627*, 222-230.
31. Huang, J.; Wang, Z.; Xue, K. Cyclic deformation response and micromechanisms of ti alloy ti–5al–5v–5mo–3cr–0.5 fe. *Materials Science and Engineering: A* **2011**, *528*, 8723-8732.
32. Grosdidier, T.; Roubaud, C.; Philippe, M.-J.; Combres, Y. The deformation mechanisms in the β-metastable β-cez titanium alloy. *Scripta materialia* **1997**, *36*, 21-28.
33. Lütjering, G.; Williams, J.C. *Titanium*. Springer: 2003; Vol. 2.
34. Wu, G.; Shi, C.; Sha, W.; Sha, A.; Jiang, H. Microstructure and high cycle fatigue fracture surface of a ti–5al–5mo–5v–1cr–1fe titanium alloy. *Materials Science and Engineering: A* **2013**, *575*, 111-118.
35. Jones, N.; Dashwood, R.; Jackson, M.; Dye, D. Development of chevron-shaped α precipitates in ti–5al–5mo–5v–3cr. *Scripta Materialia* **2009**, *60*, 571-573.

36. Osovski, S.; Srivastava, A.; Williams, J.; Needleman, A. Grain boundary crack growth in metastable titanium β alloys. *Acta Materialia* **2015**, *82*, 167-178.
37. Baili, M.; Wagner, V.; Dessein, G.; Sallaberry, J.; Lallement, D. In *An experimental investigation of hot machining with induction to improve ti-5553 machinability*, Applied mechanics and Materials, 2011; Trans Tech Publ: pp 67-76.
38. Yan, D.P.; Littlefair, G.; Pasang, T. Study of phase transformation and work hardening phenomenon during drilling of ti-5553 and ti-64. *International journal of machining and machinability of materials* **2011**, *10*, 264-279.
39. Che-Haron, C.; Jawaid, A. The effect of machining on surface integrity of titanium alloy ti–6% al–4% v. *Journal of Materials Processing Technology* **2005**, *166*, 188-192.
40. Wagner, V.; Baili, M.; Dessein, G. The relationship between the cutting speed, tool wear, and chip formation during ti-5553 dry cutting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2015**, *76*, 893-912.
41. Wang, S.; Nates, R.; Pasang, T.; Ramezani, M. Modelling of gas tungsten arc welding pool under marangoni convection. **2015**.
42. Grzesik, W. *Advanced machining processes of metallic materials: Theory, modelling and applications*. Elsevier: 2008.
43. Kaynak, Y.; Karaca, H.; Noebe, R.; Jawahir, I. Tool-wear analysis in cryogenic machining of niti shape memory alloys: A comparison of tool-wear performance with dry and mql machining. *Wear* **2013**, *306*, 51-63.
44. Venugopal, K.; Paul, S.; Chattopadhyay, A. Growth of tool wear in turning of ti-6al-4v alloy under cryogenic cooling. *Wear* **2007**, *262*, 1071-1078.
45. Rahman, M.; Wang, Z.-G.; Wong, Y.-S. A review on high-speed machining of titanium alloys. *JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing* **2006**, *49*, 11-20.
46. Revuru, R.S.; Posinasetti, N.R.; VSN, V.R.; Amrita, M. Application of cutting fluids in machining of titanium alloys—a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-22.
47. Shaw, M.C. *Metal cutting principles*. Oxford university press New York: 2005; Vol. 2.
48. Ezugwu, E.; Bonney, J. Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel-base, inconel 718, alloy with coated carbide tools. *Journal of Materials Processing Technology* **2004**, *153*, 1045-1050.
49. Courbon, C.; Kramar, D.; Krajnik, P.; Pusavec, F.; Rech, J.; Kopac, J. Investigation of machining performance in high-pressure jet assisted turning of inconel 718: An experimental study. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **2009**, *49*, 1114-1125.
50. Bermingham, M.; Palanisamy, S.; Kent, D.; Dargusch, M. A comparison of cryogenic and high pressure emulsion cooling technologies on tool life and chip morphology in ti–6al–4v cutting. *Journal of Materials Processing Technology* **2012**, *212*, 752-765.
51. Nouari, M.; Makich, H. On the physics of machining titanium alloys: Interactions between cutting parameters, microstructure and tool wear. *Metals* **2014**, *4*, 335-358.
52. Kaynak, Y. Evaluation of machining performance in cryogenic machining of inconel 718 and comparison with dry and mql machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2014**, *72*, 919-933.
53. Hartung, P.D.; Kramer, B.; Von Turkovich, B. Tool wear in titanium machining. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* **1982**, *31*, 75-80.

54. Yair Bruhis, W.S., Dennis Noland. High performance milling in aerospace materials. *Niagara Cutter* **2010**, 2-9.
55. Klocke, F.; Settineri, L.; Lung, D.; Priarone, P.C.; Arft, M. High performance cutting of gamma titanium aluminides: Influence of lubricoolant strategy on tool wear and surface integrity. *Wear* **2013**, *302*, 1136-1144.
56. Kaynak, Y.; Karaca, H.; Noebe, R.; Jawahir, I. Analysis of tool-wear and cutting force components in dry, preheated, and cryogenic machining of niti shape memory alloys. *Procedia CIRP* **2013**, *8*, 498-503.
57. Stephenson, D.A.; Agapiou, J.S. *Metal cutting theory and practice*. CRC press: 2016.
58. Jawahir, I.; Attia, H.; Biermann, D.; Duflou, J.; Klocke, F.; Meyer, D.; Newman, S.; Pusavec, F.; Putz, M.; Rech, J. Cryogenic manufacturing processes. *CIRP Annals-Manufacturing Technology* **2016**, *65*, 713-736.
59. Altintas, Y. *Manufacturing automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and cnc design*. Cambridge university press: 2000.
60. Nouari, M.; Ginting, A. Wear characteristics and performance of multi-layer cvd-coated alloyed carbide tool in dry end milling of titanium alloy. *Surface and Coatings Technology* **2006**, *200*, 5663-5676.

ÖZGEÇMİŞ



İsim soyisim: Armin Gharibi

E-posta: Gharibi.armin@gmail.com

Web Adresi: http://yusufkaynak.com/index.php/en/students

Doğum yeri ve tarihi: Tabrız, IRAN/ 04.07.1989

Dil: Türkçe, İngilizce, Farsça, Azerice

Eğitim:

Derece	Bölüm	Üniversite/ Lise	Mezuni Yılı
Lise	Matematik-Fizik	Abuzar	2007
Lisans	Makina Mühendisliği-Ürün ve imalat	IAUT	2012

Projeler ve Çalışmalar:

Ünvan	Kurum	Başlangıç	Bitiş
CAD-CAM Sorumlusu	Sanalp Sanat	2007	2012
Üretim Mühendisi	Sanalp Sanat	2012	2014
Proje Bursiyeri	Tübitak 1001 Projesi- Marmara Üniversitesi	2015	2017

Bilimsel Yayınlar:

SCI_Expanded Makaleleri:

Gharibi, A., Kaynak, Y. (2018) The influence of liquid nitrogen and carbon dioxide cryogenic coolants on machining performance of hardened steel, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, Basımda

Yusuf Kaynak, **Armin Gharibi**, Melih ozkutuk (2018) Experiamental and numerical study of chip formation in orthogonal cutting of Ti-5553: The influence of cooling/lubrication, Journal of advanced manufacturing technology, 94(1-4):1411-1428.

Konferans/Sempozyum Bildirileri:

Gharibi, A., Kaynak Y. (2016) The Influence Of Liquid Nitrogen And Carbon Dioxide Cryogenic Coolants On Machining Performance Of Hardened Steel, 7th International Symposium on Machining, November 3-5, 2016, İstanbul, Turkey

Kaynak Y., **Gharibi, A.(**2016) Progressive Tool Wear in Cryogenic Machining, HSM2016, XIII th International Conference on High Speed Machining, Metz, France.

Gharibi, A., Kaynak Y. (2016) Tool Wear and Surface Quality in Machining Process of Stainless Steel: The Effects of Various Coolant Supply Pressures, HSM2016, XIII th International Conference on High Speed Machining, Metz, France.

Gharibi, A. Duman, E., Ozkutuk, M., Kaynak, Y. (2016) The effects of liquid nitrogen and carbon dioxide cryogenic coolants on progressive tool wear, 17th UMTIK Conference, Turkey, 2016.

Gharibi, A., Kaynak, Y. (2016) The effects of High-Pressure coolant on progressive tool wear in machining stainless steel, 17th UMTIK Conference, Turkey, 2016.

Gharibi, A., Kaynak Y. (2017) Experiamental Investigation of machinin of Ti-5553: The Effect of Various Machining Parameters, 8th International Symposium on Machining, November 3-5, Antaliya, Turkey

Armin Gharibi, Emre Tascioglu, Yusuf Kaynak, Mustafa Kurt, Mustafa Ay (2017) 316l Paslanmaz Çeliklerin Kriyojenik Talaşlı İmalatında Nozul Konumlarının Etkisi , 8th International Symposium on Machining, November 3-5, 2016, İstanbul, Turkey

Kaynak Y., **Gharibi, A**. (2017) Experimental Investigation of Machining of Titanium Alloy Ti-5553: The Effect of Cutting Parameters, Advances in Materials & Processing Technologies Conference, chennai, India.