



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ŞEKİL HAFIZALI NiTiHf ALAŞIM
MALZEMESİNİN TALAŞLI İŞLENMESİNDE
SOĞUTUCU VE YAĞLAYICILARIN İŞLEME
PERFORMANSI VE YÜZEY
BÜTÜNLÜĞÜNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

EMRE TAŞCIOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği

Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2020



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ŞEKİL HAFIZALI NİTİHF ALAŞIM
MALZEMESİNİN TALAŞLI İŞLENMESİNDE
SOĞUTUCU VE YAĞLAYICILARIN İŞLEME
PERFORMANSI VE YÜZEY
BÜTÜNLÜĞÜNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

EMRE TAŞCIOĞU

(523217047)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği

Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Yusuf KAYNAK

İSTANBUL, 2020

ÖNSÖZ

İleri İmalat Teknolojileri Laboratuvarında lisans ve lisansüstü eğitimim boyunca ulusal ve uluslararası projelerde çalışma fırsatı vererek, mesleki ve akademik gelişimim için tecrübelerinden yararlanma imkânı sunan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Yusuf KAYNAK’a çok teşekkür ediyorum.

İleri İmalat Teknolojileri Laboratuvarında birlikte çalıştığım, her konuda yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Kadriye Ebru Kırmacıoğlu, Yusuf Karabulut, Tolga Berkay Şirin ve Emrah Güneşsu’ya çok teşekkür ederim.

Yüksek lisansa başlamam hususunda beni teşvik eden ve eğitimim süresince her zaman desteklerini hissettiren Babam, Annem ve çok değerli Kardeşime en içten dileklerimle teşekkür ediyorum.

Bu çalışma, 116M346 numaralı TÜBİTAK ARDEB Projesi kapsamında desteklenmiştir. TÜBİTAK ARDEB’e desteğinden dolayı teşekkür ederim. Çalışma kapsamında malzeme ve analiz desteği sağlayan Amerika Birleşik Devletleri’ nin Ohio Eyaletinde bulunan NASA Glenn Araştırma Merkezi’ ne değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Ağustos, 2020

Emre TAŞCIOĞLU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
SEMBOLLER	vi
KISALTMALAR	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
1. GİRİŞ	1
2. DENEYSEL ÇALIŞMA VE DÜZENEKLER.....	7
2.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan İş Malzemesi	7
2.2 CNC Torna Tezgahı, Takım Tutucular ve Kesici Takım	8
2.3 Soğutucu ve Yağlayıcılar.....	10
2.3.1 Minimum Miktarda Yağlama (MQL) sistemi.....	11
2.3.2 Kriyojenik Soğutma Sistemleri	12
2.4 Kesme Parametreleri	12
2.5 Kesme Kuvvetleri Ölçümü	13
2.6 Kesme Sıcaklıkları Ölçümü	14
2.7 Takım Aşınması Ölçümü ve Mikroyapı Analizi.....	15
2.8 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü.....	16
2.9 Yüzey Bütünlüğü Analiz Çalışmaları Kapsamında Kullanılan Ekipmanlar	16
2.10 Sertlik Ölçümü.....	17
2.11 XRD Faz Analizi Ölçümü.....	18
2.12 Termal Çevrim Testleri.....	18
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	21
3.1 Kesme Sıcaklıkları	21
3.2 Kesici Takım Aşınmaları	23
3.3 Kesme Kuvvetleri	33
3.4 Yüzey Bütünlüğü	37
3.4.1 İş Parçası Yüzey Kalitesi	39
3.4.2 Tane Yapısı ve Deformasyonu.....	42
3.4.3 Yüzey Altı Sertliği	43

3.4.4 XRD	48
3.4.5 Faz Dönüşüm Sıcaklıkları	53
3.4.6 Aşınma Dayanımı.....	62
3.5 Talaş Formu ve Kırılabilirliği	69
3.6 Dik kesme deneyleri	71
3.6.1 Kesme sıcaklıkları	72
3.6.2 Kesme Kuvvetleri.....	73
3.6.3 Talaş Morfolojisi.....	75
3.7 Simülasyon Çalışması.....	76
3.7.1 Kesici Takım-Talaş Arayüzey Sürtünmesi ve Kırılma Kriteri	78
3.7.2 NiTiHf Alaşımı İçin Hassasiyet Analizi	79
3.7.3 Simülasyon Sonuçları.....	84
4. SONUÇLAR.....	89
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

ŞEKİL HAFIZALI NiTiHf ALAŞIM MALZEMESİNİN TALAŞLI İŞLENMESİNDE SOĞUTUCU VE YAĞLAYICILARIN İŞLEME PERFORMANSI VE YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Şekil hafızalı alaşımlar işlenmesi zor malzemeler sınıfındadır. Bu dezavantaj malzemenin talaşlı imalatı esnasında kesici takımların aşınmasına, yüksek kesme kuvvetlerine ve kötü yüzey kalitesine sebep olmaktadır. Bu çalışmada şekil hafızalı alaşımların işlenmesinde soğutucu ve yağlayıcıların etkisi işleme performansı açısından incelenmiştir. Talaşlı imalat deneyleri kuru, MQL, MQL+CO₂, kesme sıvısı ve LN₂ koşulları altında yapılmıştır. Deneyler sonucunda kesici takımların aşınma miktarları, kesme kuvvetleri ve kesme sıcaklıkları incelenmiştir. Çalışma kapsamında işlenmiş malzemelerin yüzey bütünlüğü özellikleride kapsamlı olarak incelenmiştir. İşlenen numunelerin yüzey pürüzlülüğü, yüzey altı sertliği, mikroyapısı, XRD analizi ve DSC analizleri yapılmıştır. Farklı işleme parametrelerinde işlenen numunelerin aşınma dayanımlarını incelemek için lineer aşınma testleri yapılmış.

Çalışma kapsamında NiTiHf şekil hafızalı alaşım malzemesinin talaşlı imalat simülasyonları da yapılmıştır. Simülasyon çalışmaları için malzemenin hassasiyet analizleri yapılmış ve simülasyonlar bu değerlere göre yapılmıştır. Simülasyonlar sonucunda deneysel veriler ile kıyaslama yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Şekil hafızalı alaşım, Talaşlı imalat, Yüzey bütünlüğü

ABSTRACT

INVESTIGATION THE EFFECT OF COOLANT AND LUBRICATING ONMACHINING PERFORMANCE AND SURFACE INTEGRITY OF NiTiHf SHAPE MEMORY ALLOY

Shape memory alloys are in the class of materials that are difficult to process. This disadvantage causes wear of cutting tools, high cutting forces and poor surface quality during the machining of the material. In this study, the effect of coolants and lubricants in the processing of shape memory alloys was investigated in terms of machining performance. Machining experiments were performed under dry, MQL, MQL + CO₂, coolant and LN₂ conditions. At the end of the experiments, the wear, cutting force and cutting temperatures of the cutting tools were examined. Within the scope of the study, the surface integrity properties of the machined materials were also examined extensively. Surface roughness, sub-surface hardness, microstructure, XRD analysis and DSC analysis of the machined samples were made. Linear abrasion tests were conducted to examine the abrasion resistance of the samples machined in different processing parameters.

Machining simulations of NiTiHf shape memory alloy material were also made within the scope of the study. For simulation studies, sensitivity analysis of the material was made and simulations were made according to these values. As a result of the simulations, a comparison was made with the experimental data.

Keywords: Shape memory alloy, Machining, Surface integrity

SEMBOLLER

ap	: Kesme derinliği (mm)
f	: İlerleme değeri (mm/dev)
V_c	: Kesme hızı (m/dak)
R	: Evrensel gaz sabiti
Q	: Aktivasyon enerjisi (J/mol)
Ra	: Yüzey pürüzlülüğu
F_c	:Esas kesme kuvveti (N)
F_r	:Radyal kuvvet (N)
F_f	:İlerleme kuvveti
T	:Sıcaklık (°C)
VB_{max}	:Serbest yüzey aşınması
VB_c	:Burun aşınması
r_c	:Takım burun yarıçapı
M_s	:Martenzit başlangıç sıcaklığı
M_f	:Martenzit bitiş sıcaklığı
A_s	:Östenit başlangıç sıcaklığı
A_f	:Östenit bitiş sıcaklığı
m	:Kayma faktörü
h	:Isı transfer katsayısı

KISALTMALAR

SMA	: Şekil Hafızalı Alaşım
CO₂	: Karbondioksit
LN₂	: Sıvı azot
MQL	: Minimum miktarda yağlama
XRD	: X Işınımı kırınım yöntemi
B2	: Östenit
B19	: Martenzit



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Şekil hafızalı malzemelerin kullanım alanları, havacılık endüstrisi [5] (a), kardiyovasküler stent [6](b).	1
Şekil 2.1. NiTiHf alaşım malzemesi.	7
Şekil 2.2. NiTiHf alaşım malzemesinin mikroyapı görüntüsü.	8
Şekil 2.3. Doosan Puma GT2100 CNC torna tezgahı	8
Şekil 2.4. PDJNL 2525M 11HP tip jet katerin 3-D gösterimi.	9
Şekil 2.5. DNMG 11 04 04-MF Kesici takımın geometrisi ve 1105 PVD kaplaması ...	10
Şekil 2.6. Farklı soğutucu ve yağlayıcı koşulların uygulama yöntemleri (a) Kuru kesme, (b) Kesme sıvısı, (c) MQL, (d) MQL+CO ₂ , (c) LN ₂	11
Şekil 2.7. MQL Sistemi.....	12
Şekil 2.8. CO ₂ (a) ve Sıvı azot (LN ₂ – Liquid Nitrogen) (b) tüpü ve bağlantı ekipmanları	12
Şekil 2.9. a) Dinamometre b) Amplifikatör ve veri toplayıcı, b) Dinamometrede okunan kuvvetlerin yönleri.....	14
Şekil 2.10. Termal kamera örnek sıcaklık görüntüsü.....	15
Şekil 2.11. Mikroyapı ve takım aşınması görüntülerinin alındığı dijital optik mikroskop	15
Şekil 2.12. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı	16
Şekil 2.13. (a) Hassas Numune Kesme Cihazı, (b) Zımparalama ve Parlatma Cihazı ..	17
Şekil 2.14. Sertlik Ölçüm Cihazı.....	18
Şekil 2.15. XRD ölçüm cihazına ait görüntü	18
Şekil 2.16. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) cihazı	19
Şekil 3.1. Farklı kesme hızlarında ve farklı kesme koşullarında oluşan maksimum sıcaklık değerleri.....	23
Şekil 3.2. Malzemedeki HfO ₂ partikülleri a) Ekstrüzyon yönüne paralel b) Ekstrüzyon yönüne dik.	25
Şekil 3.3. Farklı kesme hızı ve farklı kesme koşullarında kesici takımda oluşan serbest yüzey aşınma görüntüleri.....	26
Şekil 3.4. Farklı kesme hızı ve farklı kesme koşullarında kesici takımda oluşan serbest yüzey aşınma değerleri.	28
Şekil 3.5. Karbür takımın ve TiAlN kaplamanın farklı sıcaklıklardaki sertlik değişimi [50].	29
Şekil 3.6. Farklı kesme hızı ve farklı kesme koşullarında kesici takımda oluşan burun aşınması görüntüleri.	30
Şekil 3.7. Farklı kesme hızı ve farklı kesme koşullarında kesici takımda oluşan burun aşınması değerleri.....	31

Şekil 3.8. 120 m/dak kesme hızındaki aşınmaların profil çizgileri.	32
Şekil 3.9. Farklı kesme hızı ve farklı kesme koşullarında oluşan kesme kuvvetleri.....	33
Şekil 3.10. 60 m/dak kesme hızında kuru kesme ve sıvı azot yardımcı kesme koşulunda oluşan kesme süresine bağlı kesme kuvveti değerleri.	34
Şekil 3.11. Farklı kesme hızı ve farklı kesme koşullarında oluşan ilerleme kuvvetleri.	36
Şekil 3.12. Farklı kesme hızı ve farklı kesme koşullarında oluşan radyal kuvvetler.	37
Şekil 3.13. Farklı kesme hızı ve farklı kesme koşullarında oluşan yüzey pürüzlülük değerleri.	40
Şekil 3.14. Kesme hızına ve kesme koşuluna bağlı olarak işlenmiş yüzeyden alınan topografi görüntüleri.....	41
Şekil 3.15. Farklı kesme hızı ve farklı kesme koşullarında oluşan yüzey altı mikro yapı görüntüleri.	43
Şekil 3.16. 60 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarındaki yüzey altı mikrosertlik değerleri.	45
Şekil 3.17. 90 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarındaki yüzey altı mikrosertlik değerleri.	46
Şekil 3.18. 120 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarındaki yüzey altı mikrosertlik değerleri.	47
Şekil 3.19. Farklı kesme koşullarında ve kesme hızlarında işlenmiş yüzeyden 15µm derinlikte oluşan mikrosertlik değerleri.....	48
Şekil 3.20. Kuru Kesme koşulunda ve kesme hızına bağlı olarak oluşan XRD değerleri.	49
Şekil 3.21. MQL koşulunda ve kesme hızına bağlı olarak oluşan XRD değerleri.....	50
Şekil 3.22. MQL+CO ₂ koşulunda ve kesme hızına bağlı olarak oluşan XRD değerleri	51
Şekil 3.23. Kesme Sıvısı koşulunda ve kesme hızına bağlı olarak oluşan XRD değerleri	52
Şekil 3.24. LN ₂ koşulunda ve kesme hızına bağlı olarak oluşan XRD değerleri.....	53
Şekil 3.25. DSC numunesinin hazırlanması.....	54
Şekil 3.26. İşlem görmemiş NiTiHf malzemenin DSC grafiği.	55
Şekil 3.27. Kuru kesme koşulunda oluşan DSC eğrileri.	56
Şekil 3.28. MQL koşulunda oluşan DSC eğrileri.....	57
Şekil 3.29. Kesme sıvısı koşulunda oluşan DSC eğrileri.	58
Şekil 3.30. MQL+CO ₂ koşulunda oluşan DSC eğrileri.	59
Şekil 3.31. LN ₂ koşulunda oluşan DSC eğrileri.	60
Şekil 3.32. 120 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarındaki gizli ısı değerleri.	61
Şekil 3.33. 60 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarında oluşan aşınma izleri	63

Şekil 3.34. 120 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarında oluşan aşınma izleri	64
Şekil 3.35. 60 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarında oluşan aşınma topografileri (a) İşlem Görmemiş, (b) Kuru Kesme, (c) MQL, (d) MQL+CO ₂ , (e) Kesme Sıvısı, (f) LN ₂	65
Şekil 3.36. 120 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarında oluşan aşınma topografileri (a) İşlem Görmemiş, (b) Kuru Kesme, (c) MQL, (d) MQL+CO ₂ , (e) Kesme Sıvısı, (f) LN ₂	66
Şekil 3.37. 60 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarında oluşan aşınma profilleri	67
Şekil 3.38. 120 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarında oluşan aşınma profilleri	68
Şekil 3.39. Farklı kesme hızlarında ve kesme koşullarında oluşan aşınma oranları	69
Şekil 3.40. Farklı kesme koşulunda ve kesme hızlarındaki talaş formları	70
Şekil 3.41. Dik kesme deneyleri esnasında uygulanan farklı kesme koşullarının görüntüsü	71
Şekil 3.42. Dik kesme deneylerinde kullanılan kesici ucun yuvarlanma yarıçapı	72
Şekil 3.43. Farklı kesme hızlarında ve farklı kesme koşullarındaki ortalama sıcaklık değerleri.	73
Şekil 3.44. Farklı kesme hızlarında ve farklı kesme koşullarındaki kesme kuvvetleri. .	74
Şekil 3.45. Farklı kesme hızlarında ve farklı kesme koşullarındaki itme kuvvetleri.	75
Şekil 3.46. Farklı kesme hızlarında ve kesme koşullarında oluşan talaş görüntüleri.	76
Şekil 3.47. NiTiHf alaşım malzemesinden talaş kaldırma sürecinde sınır koşulları ve ağ yapısı, a) iş parçası, b) kesici takım	77
Şekil 3.48. Kesici takım açılarının simülasyonda gösterimi 0°	77
Şekil 3.49. Simülasyonda kullanılan gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.	78
Şekil 3.50. Deform yazılımından farklı kayma faktörüne bağlı olarak elde edilen kesme kuvveti grafikleri.	80
Şekil 3.51. Farklı kayma faktörüne bağlı olarak tahmin edilen kesme kuvvetleri.	81
Şekil 3.52. Farklı kayma faktörüne bağlı olarak tahmin edilen itme kuvvetleri.	81
Şekil 3.53. Deform yazılımında ortalama sıcaklık değerinin belirlenmesi.	82
Şekil 3.54. Farklı ısı transfer katsayılarında meydana gelen sıcaklık görüntüleri.	83
Şekil 3.55. Farklı ısı transfer katsayısına bağlı olarak tahmin edilen kesme sıcaklıkları.	84
Şekil 3.56. Farklı kesme hızlarında ve kuru kesme koşulundaki deneysel çalışma ve simülasyon sonucunda elde edilen kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.	85
Şekil 3.57. Farklı kesme hızlarında ve kuru kesme koşulundaki deneysel çalışma ve simülasyon sonucunda elde edilen kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.	85

Şekil 3.58. Simülasyon sonucunda farklı kesme hızlarında oluşan sıcaklık görüntüleri.	86
Şekil 3.59. Farklı kesme hızlarında ve kuru kesme koşulundaki deneysel çalışma ve simülasyon sonucunda elde edilen ortalama kesme sıcaklıklarının karşılaştırılması.	87



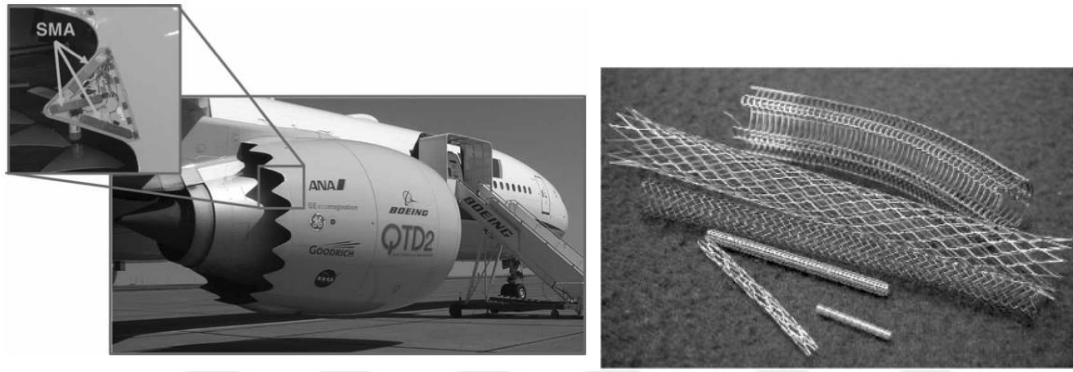
TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. NiTiHf Şekil Hafızalı Alaşımın kimyasal bileşimi.	7
Tablo 2.2. Doosan Puma marka GT 2100 model CNC tornanın özellikleri.....	9
Tablo 2.3. Kesici takımın teknik özellikleri.....	10
Tablo 2.4. Talaşlı imalat testleri için belirlenen kesme koşulu ve parametreleri.	13
Tablo 2.5. KEYENCE VHX-6000 digital mikroskobun teknik özellikleri.....	16
Tablo 2.6. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı teknik özellikleri.....	16
Tablo 3.1. 60 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarındaki faz dönüşüm sıcaklık değerleri.	60



1. GİRİŞ

Şekil hafızalı malzemeler uygulanan sıcaklık, gerilme vb. parametrelerin etkisi ile şekil değiştirebilen, etki ortadan kalktıktan sonra başlangıçtaki haline geri dönebilen özel akıllı malzemelerdir [1]. Bu malzemeler yüksek dayanıklılıkta olup aynı zamanda oldukça hafif ve korozyon direnci yüksek malzemelerdir [2, 3]. Bu gibi üstün özelliklerinden dolayı şekil hafızalı alaşımlar uzay ve havacılık, otomotiv, bağlantı elemanlarının imalatı, biyomedikal, petrol ve gaz endüstrileri gibi pek çok alanda kullanılmaktadır [1, 4]. Şekil hafızalı malzemelerin bazı kullanım alanları Şekil 1.2' de sunulmuştur.



Şekil 1.1. Şekil hafızalı malzemelerin kullanım alanları, havacılık endüstrisi [5] (a), kardiyovasküler stent [6](b).

Şekil hafızalı malzemeler içerisinde en yaygın kullanılanları NiTi alaşımlarıdır. NiTi alaşımları; yüksek süneklik, düşük ısıl iletkenlik katsayısı, düşük elastiklik modülü gibi özelliklerinden dolayı işlenmesi zor malzemeler olarak değerlendirilirler [4, 7, 8]. Sahip olduğu bu dezavantajlar malzemenin talaşlı imalatı sırasında kesici takımında yüksek aşınmaya dolayısıyla düşük takım ömrüne, yüksek kesme kuvvellerine, düşük talaş kırılabilirliğine ve kesme işlemi sonucunda malzemede çapak oluşumuna sebep olmaktadır [4, 8, 9]. NiTi alaşım malzemesinin düşük olan işleme performansını geliştirmek amacıyla yapılan çalışmalar literatürde mevcuttur. NiTi alaşımın faz durumunun farklı kesme koşulları altında işleme performansına etkisi de araştırılmıştır [10]. Yapılan çalışmalarda işlem sırasında uygulanan kriyojenik soğutmanın takım aşınmasını ve kesme kuvvetlerini azalttığı, yüksek kesme hızlarında yüzey kalitesini iyileştirdiği gözlenmiştir. Kriyojenik soğutmanın kullanıldığı bir diğer çalışmada[9], NiTi alaşımın işlenmesi sırasında takım aşınmaları ve oluşan talaş geometrileri incelenmiş ve

elde edilen değerler kuru kesme ve MQL koşulunda elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Başka bir çalışmada [11] kesme koşullarının yanı sıra kesme hızlarının da takım aşınmasına, kesme kuvvetlerine ve talaş kalınlığına etkisi incelenmiştir.

NiTi alaşımların işleme performanslarını geliştirmek için farklı çalışmalar yapılmış, alaşıma çeşitli elementler eklenerek daha iyi mekanik ve şekil hafıza özelliklerine sahip NiTiZr, NiTiPd, NiTiPt ve NiTiHf gibi şekil hafızalı alaşımlar geliştirilmiştir [1, 2, 12]. NiTiHf alaşımının, faz dönüşüm sıcaklığının yüksek olması, yüksek sıcaklıklarda süperelastik davranış göstermesi, büyük yükler altında bile şekil hafıza özelliklerini koruması özellikleri ile diğerlerinden daha üstün olduğu düşünölmektedir[1]. NiTiHf alaşımının plastik deformasyon davranışı [13], sıcak deformasyonu [14], soğuk deformasyon [15] gibi değişik deformasyon davranışları ve sıcak haddeleme [16], ekstrüzyon [17] gibi talaşsız imalat yöntemleriyle ilgili çalışmalar yapılmıştır ve literatürde mevcuttur. Ayrıca NiTiHf şekil hafızalı malzemelerde yaşlandırmanın ve sıcaklığın, mikroyapı ve şekil hafıza özelliğine etkileri araştırılmıştır [18].

Talaşlı imalat yöntemleri ile işlenen şekil hafızalı alaşım malzemelerinin yüzeyinde oluşan tane deformasyonları, sertlik değişimleri ve faz dönüşümleri, direkt olarak yüzey özelliklerine bağlı olan korozyon davranışının değişmesine neden olmaktadır [19]. şekil hafızalı malzemelerin korozyon davranışı literatürde özellikle biyoyumluluk açısından incelenmiş ve genel implant malzemelerinde de oluşan pasif filmin varlığına dayandığı ortaya konulmuştur [20-23]. Fakat bu durumda bile iyon salınımları gerçekleşip organizmaya problem yaratabilmekte [21], pasif filmin parçalanması ameliyat sırasında meydana gelebilmekte ve hizmet ömründe azalmaya yol açabilmektedir. Yüzey iyileştirme ve geliştirme çalışmaları sonucu korozyon direnci arttırılarak bu problemler ortadan kaldırılmakta ya da korozyon dayanımının uzun süreli stabilitesi sağlanmaktadır [23]. NiTi alaşımın talaşlı imalatıyla ilgili çalışmalar incelendiğinde; Guo ve arkadaşları şekil hafızalı NiTi alaşım malzemesinin frezelenmesinde, ilerleme değerinin kesici takım serbest yüzey aşınmasına etkisini kesme uzunluğuna bağlı olarak incelemişlerdir. Hem ilerleme değeri hem de kesme uzunluğunun artmasıyla serbest yüzey aşınmasının arttığı görölmüştür [24]. Weinert ve arkadaşları yaptıkları tornalama ve delik delme operasyonlarında işleme performansını incelemişler, elde edilen bulgular göstermiş ki, takımda meydana gelen serbest yüzey aşınması istenmeyen talaş türü kötü işleme performansı elde edilmesine neden olmuştur [7]. Yine Weinert ve arkadaşlarının yaptığı

bir başka çalışmada, tornalama operasyonu sırasında oluşan istenmeyen talaş formları ve kesici takımda meydana gelen serbest yüzey ve çentik aşınmaları, NiTi alaşımının işlenmesinin zorluklarını gözler önüne sermiştir [4]. Bir başka çalışmada da NiTi malzemeden mikro boyuttaki komponentlerin mikrofrezleme yöntemiyle işlenebilmesi incelenmiştir [25]. Gaikwad ve arkadaşlarının çalışmasında, Taguchi yöntemi kullanılarak elektroerozyon (EDM) işleminde optimum talaş kaldırma oranı $7,0806 \text{ mm}^3/\text{dak}$ olarak bulunmuştur [26]. Literatürde ayrıca ultrasonik vibrasyon yardımlı EDM ve tornalama gibi NiTi alaşımını işlemede kullanılan farklı yöntemler de mevcuttur [27, 28]. NiTi alaşımının işlenebilme performansı üzerine yapılan kapsamlı çalışmalardan birinde, Kaynak ve arkadaşları NiTi alaşımının tornalanması işleminde kuru, minimum miktarda yağlama (MQL) ve sıvı azot (LN_2) ile kriyojenik işleme koşullarında kesme süresine bağlı olarak kesici takımda oluşan serbest yüzey ve burun aşınmalarını incelemiş, kriyojenik işlemin takım aşınmasını azaltıcı etkisini göstermişlerdir[9]. Bir başka çalışmalarında, farklı ısıtma işlemlere tabi tutulmuş NiTi iş parçalarının tornalamasında soğutucu/yağlayıcıların takım aşınmasına etkisini araştırmışlardır. Takım aşınmasının incelendiği çalışmalarda; kesme kuvvetleri kuru, ön ısıtılmış ve kriyojenik koşullarda kıyaslanmış [11], farklı bir çalışmada ise kesme hızına bağlı olarak takım burun ve krater aşınması ve yüzey kalitesi incelenmiştir [29]. Diğer bir çalışmada, işlenebilme performansı üzerine faz etkisi kesme kuvvetleri, takım aşınması ve talaş formu bakımından araştırılmıştır [30].

Her ne kadar NiTi alaşımının talaşlı imalatı sırasında karşılaşılan zorluklara çözüm arama kapsamında yapılan mevcut çalışmalar bir hayli fazla olsa da bu malzemenin en önemli özelliği olan şekil hafıza etkisinin iyi anlaşılması hususunda yüzey bütünlüğü üzerine çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Şekil Hafızalı Malzemeler östenit fazda iken deformasyona uğradıklarında gösterdikleri davranış diğer birçok mühendislik malzemesiyle benzer olmakla birlikte [31], martenzit fazda iken süperelastik ve deformasyondan sonra ilk şekline dönebilme özelliği gösterdiği görülmektedir [32]. NiTiHf alaşım malzemesi yüksek sıcaklık (high temperature) şekil hafızalı malzemeler kategorisinde olup, bu malzemenin talaşlı şekillendirilmesi ve talaşlı imalat sürecinin yüzey bütünlüğüne etkisinin NiTi alaşımdan farklı olacağı değerlendirilmektedir [1].

Herhangi bir talaşlı imalat yöntemi kullanılarak işlenen bir parçanın yüzey bütünlüğü karakteristikleri, talaş kaldırma sürecinin iş parçasının yüzey ve yüzey altı özelliklerine etkisi olarak tanımlanmakla birlikte [33], bu karakteristikler özellikle şekil hafızalı malzemeler için oldukça önemlidir. Çünkü sadece mekanik özellikleri değil şekil hafıza özellikleri de yüzey ve yüzey altında değişime uğramakta ve böylece parçalar arzu edilen performansı sergileyememektedirler [30].

Literatürde şekil hafızalı alaşımların talaşlı imalat ve yüzey bütünlüğü karakteristiklerinin araştırıldığı çalışmalar mevcut olmakla birlikte [34-36], NiTi malzemesinin talaşlı imalatı sonrası yüzey bölgelerinde sertlikte değişim yaşandığı [4], tanelerde deformasyon gözlemlendiği [36], bazı durumlarda faz değişimlerinin olduğu [29] gibi bulgular sunulmuştur.

Şekil hafızalı alaşımların sıcaklık etkisi ile şekil değiştirebilmesi ve tekrar eski haline dönmesi sırasında bu sıcaklık değişiminin termal çevrim metodu ile kontrollü bir şekilde uygulanması, fiziksel özelliklerinin değişimlerinin (ağırlık, enerji, iletkenlik, manyetik özellikler vb.) sürekli bir şekilde ölçülmesi ve faz dönüşüm sıcaklıklarının analiz edilmesini sağlamaktadır [37]. Literatürde şekil hafızalı alaşımların termal çevrim analizi ile ısıtma ve soğutma sonucunda östenitik ve martenzitik faz dönüşüm sıcaklıklarının elde edildiği çalışmalar bulunmaktadır [35, 36, 38, 39].

Şekil hafızalı alaşım malzemeleri kullanılarak üretilen mühendislik elemanları bir sistemde eş zamanlı olarak çalışırken sürtünmelere maruz kalmaktadır. Geleneksel yağlar ile yağlandığında mükemmel bir aşınma dayanımı sergileyen şekil hafızalı alaşımlar, bazı ekstrem durumlarda (örneğin, helikopterdeki dişli kutusunda meydana gelen kritik derecede yağ kaybı) kısa süreli kuru sürtünmelerin etkisi altında kalmaktadır [40]. Bu gibi durumlarda, kuru aşınma testleri sistemin sürtünme ve aşınma özelliklerinin sistemin dayanıklılığı üzerindeki etkisini analiz etmek için kullanılmaktadır. Literatürde NiTiHf şekil hafızalı alaşım malzemesine uygulanan kuru aşınma testleri sonucu farklı aşınma mekanizmalarının görüldüğü, uygulanan yüke, kayma uzunluğuna ve kayma hızına bağlı olarak aşınma davranışlarının değiştiğini görülmektedir [40-42].

Literatür araştırmasında görüldüğü gibi NiTiHf şekil hafızalı malzemesiyle ilgili farklı alanlarda pek çok çalışma bulunmaktadır. Ancak yapılan araştırmalar sonucunda NiTiHf malzemesinin kriyojenik yardımcı soğutma koşulu ile ilgili talaşlı imalatına ve yüzey

bütünlüğüne yönelik herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Dolayısıyla bu çalışmanın NiTiHf alaşımının talaşlı imalat süreci ve işlenilebilirliğinin araştırılmasının literatüre katkı sunacağı düşünülmektedir.

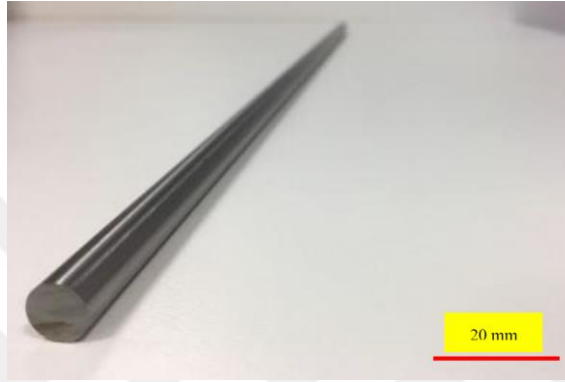




2. DENEYSEL ÇALIŞMA VE DÜZENEKLER

2.1 Deneyisel Çalışmada Kullanılan İş Malzemesi

Ø10 x 1000 mm boyutlarında 3 adet NiTiHf alaşım malzemesinin tamamı Amerikan Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) ‘nin Amerika Birleşik Devletleri Ohio Eyaletinde bulunan NASA Glenn Araştırma Merkezi tarafından üretilmiş olup malzemenin görüntüsü Şekil 2.1’de sunulmuştur.



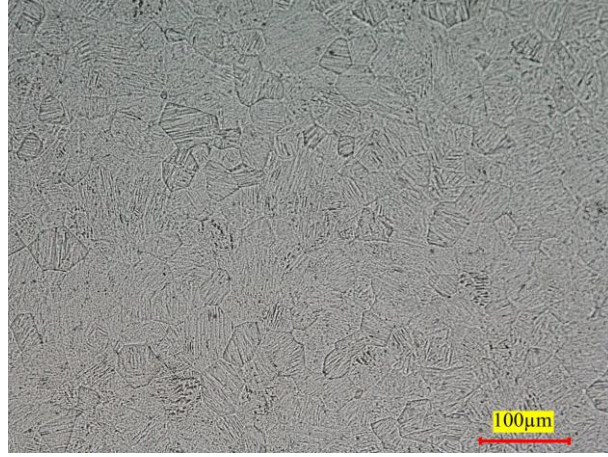
Şekil 2.1. NiTiHf alaşım malzemesi.

Çalışma kapsamında kullanılan NiTiHf alaşımın kimyasal bileşimi Tablo 2.1’de sunulmuştur.

Tablo 2.1. NiTiHf Şekil Hafızalı Alaşımın kimyasal bileşimi.

%Ni	%Ti	%Hf
50.3	29.7	20

NiTiHf malzemesinin dijital mikroskop ile alınmış olan mikroyapı görüntüsü Şekil 2.2’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. NiTiHf alaşım malzemesinin mikroyapı görüntüsü.

2.2 CNC Torna Tezgahı, Takım Tutucular ve Kesici Takım

Tez çalışmasında yapılan tüm talaşlı imalat deneyleri Doosan Puma GT2100 CNC torna tezgahı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Torna tezgahına ait teknik bilgiler Tablo 2.2’de ve cihazın resmi ise Şekil 2.3’te sunulmuştur.

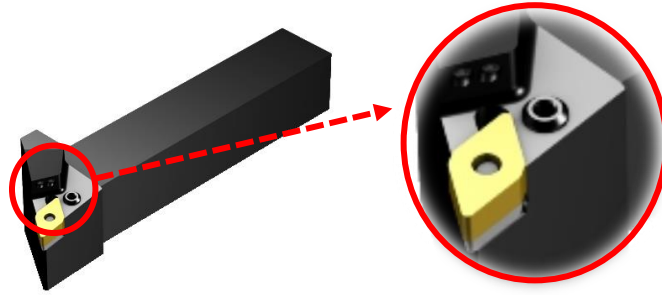


Şekil 2.3. Doosan Puma GT2100 CNC torna tezgahı

Tablo 2.2. Doosan Puma marka GT 2100 model CNC tornanın özellikleri

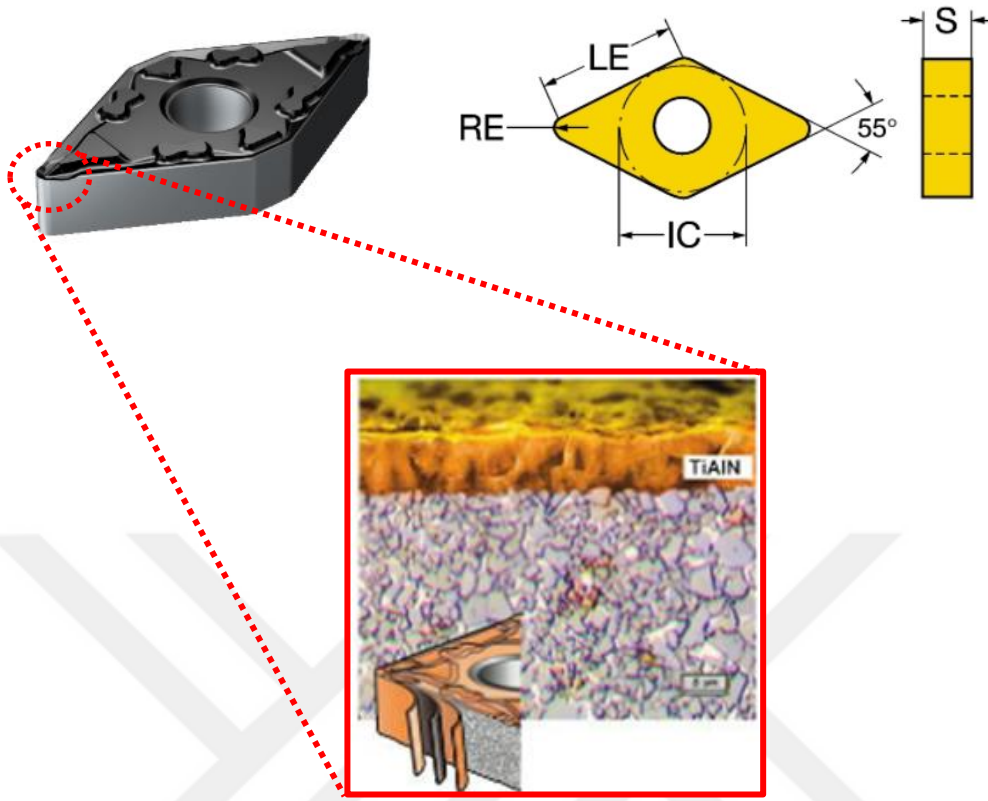
Azami Tornalama Çapı	390 mm
Azami Tornalama Boyu	562 mm
Azami Çubuk Sürme Çapı	65 mm
Ayna Ölçüsü	8 inç
İş mili Motor Gücü	18,5 kW
Azami İş mili Devri	4500 dev/dak
İş mili Torku	183.1 Nm
Güç Aktarma Metodu	Kayış Tip
Boştaki Eksen Hızları	X=24 m/dak, Z=30 m/dak
Takım Adedi	12
Dış Çap Takım Tutucusu	25×25 mm
Dış Çap Takım Tutucusu	40 mm
Boyutlar(Uzunluk-Genişlik-Yükseklik)	2.94x1.62x1.7 m

NiTiHf şekil hafızalı alaşımının talaşlı imalat deneyleri için SANDVİK marka PDJNL 2525M 11HP tip takım tutucusu kullanılmıştır. Şekil 2.4'te takım tutucunun fotoğrafı sunulmuştur.



Şekil 2.4. PDJNL 2525M 11HP tip jet katerin 3-D gösterimi.

Deneylerde kullanılacak olan kesici uç için takım firması ile görüşülmüş ve firmanın Ni ve Ti alaşımlı malzemeler için önerdiği DNMG 11 04 04-MF 1105 kaplamalı karbür uç belirlenmiştir. Şekil 2.5' de kesici ucun görüntüsü sunulmuş olup uç ile ilgili teknik bilgiler ise Tablo 2.3' de belirtilmiştir.



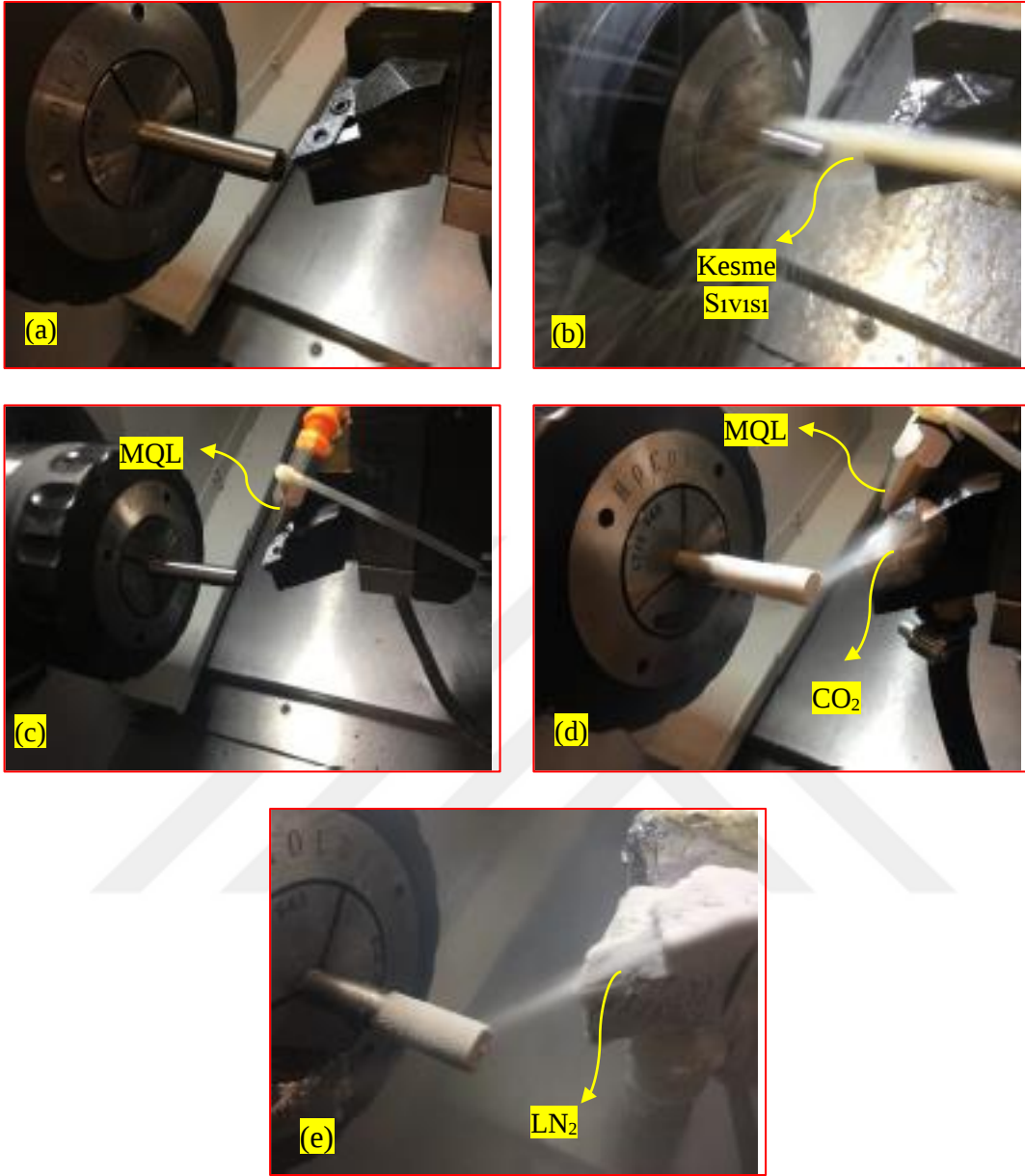
Şekil 2.5. DNMG 11 04 04-MF Kesici takımın geometrisi ve 1105 PVD kaplaması

Tablo 2.3. Kesici takımın teknik özellikleri

Ürün Tanımı	DNMG 11 04 04-MF
Kalite	1105
Kalite Tipi	PVD(Ti,Al)N ₂
Açı dâhil	55.0°
Köşe Radyüsü (RE)	0.4 mm
Etkin kesme kenar uzunluğu (LE)	11,228 mm
İç teğet daire çapı (IC)	9,525 mm
Kesici uç kalınlığı (S)	4,763 mm

2.3 Soğutucu ve Yağlayıcılar

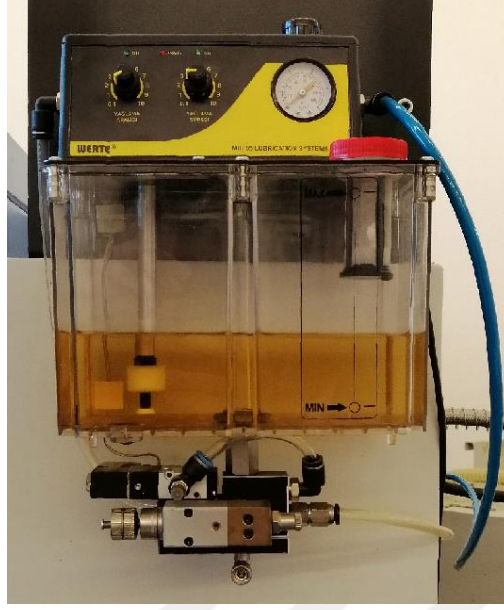
Deneyler esnasında farklı soğutucular kullanılmıştır. Soğutucu olarak kesme sıvısı, karbondioksit (CO₂) gazı ve sıvı azot (LN₂ Liquid Nitrogen) kullanılmıştır. Kesme sıvısı 400 lt/saat akış oranında, karbondioksit (CO₂) tüpü 50 bar çalışma basıncında ve sıvı azot (LN₂) tankı ise 15 bar çalışma basıncında çalışarak talaş yüzeyinden kesme bölgesine uygulanmıştır. Şekil 2.6'de farklı soğutucu ve yağlayıcı koşulların uygulama yöntemleri sunulmuştur.



Şekil 2.6. Farklı soğutucu ve yağlayıcı koşulların uygulama yöntemleri (a) Kuru kesme, (b) Kesme sıvısı, (c) MQL, (d) MQL+CO₂, (e) LN₂

2.3.1 Minimum Miktarda Yağlama (MQL) sistemi

Minimum Miktarda Yağlama (MQL) koşulunda yapılan testlerde Mikro STN-25 tip potansiyometre kontrollü yağlama sistemi CNC torna tezgâhına adapte edilerek kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan MQL sisteminin görüntüsü Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. MQL Sistemi

2.3.2 Kriyojenik Soğutma Sistemleri

Kesme testlerinde kullanılan kriyojenik soğutma ekipmanları CNC torna tezgâhına adapte edilmiştir. Şekil 2.8’ de karbondioksit (CO₂) tüpü ve sıvı azot (LN₂ – Liquid Nitrogen) tankı gösterilmiştir. Karbondioksit tüpü 50 bar çalışma basıncına sahipken, sıvı azot tankı ise 15 bar çalışma basıncına sahiptir.



Şekil 2.8. CO₂ (a) ve Sıvı azot (LN₂ – Liquid Nitrogen) (b) tüpü ve bağlantı ekipmanları

2.4 Kesme Parametleri

Tornalama testleri için 60, 90 ve 120 m/dak kesme hızları seçilmiştir. Ni_{50.3}Ti_{29.7}Hf₂₀ alaşım malzemesi için 0.7 mm kesme derinliği ve 0.07 mm/dev ilerleme değeri

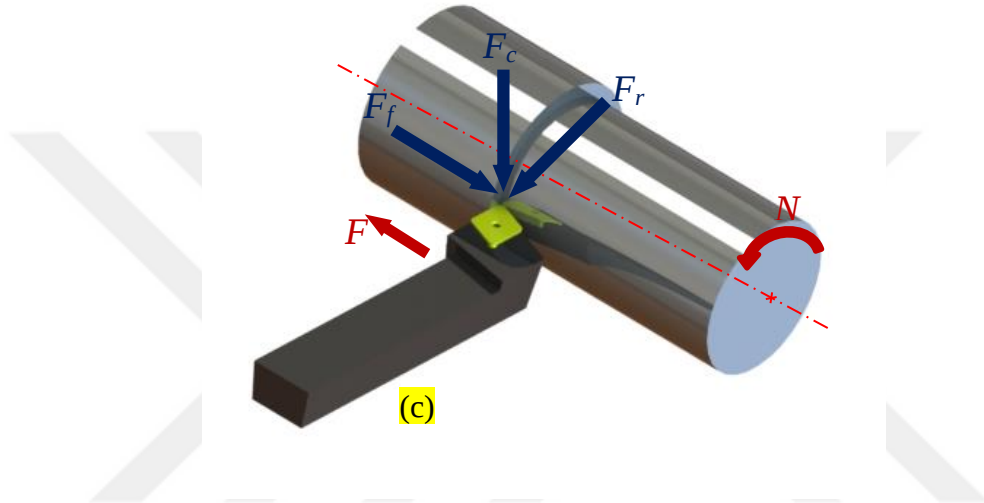
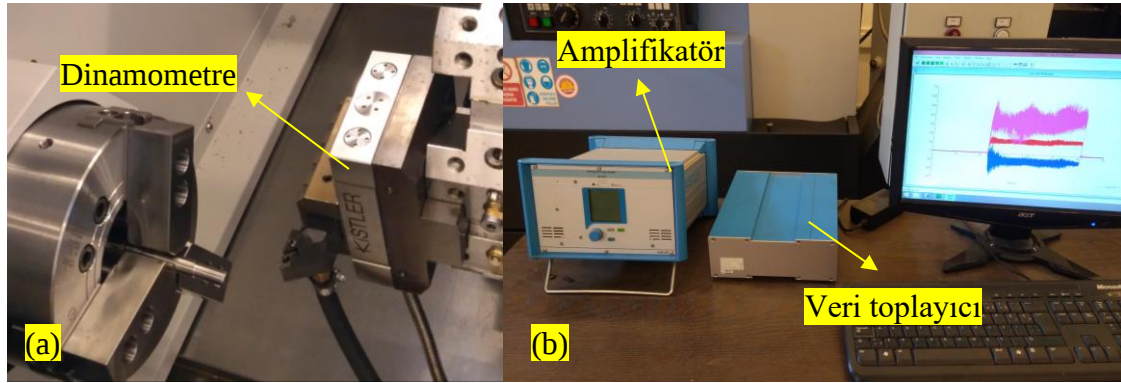
kullanılmıştır. Talaşlı imalat testleri için belirlenen kesme koşulu ve parametreleri Tablo 2.4'te sunulmuştur. Talaşlı imalat deneyleri için 40 mm kesme uzunluğu belirlenmiştir.

Tablo 2.4. Talaşlı imalat testleri için belirlenen kesme koşulu ve parametreleri.

Kesme Hızı (m/dak)	Kesme Koşulları	Kesme Derinliği (mm)	İlerleme (mm/dev)
Kuru Kesme			
60	Kesme Sıvısı		
90	MQL	0.7	0.07
120	MQL+CO ₂		
	LN ₂		

2.5 Kesme Kuvvetleri Ölçümü

Kesme işlemi sırasında kesme kuvvetleri 10 kN'a kadar ölçüm yapabilen ve 0-70 °C sıcaklık aralığında çalışabilen Kistler 9129AA tipi dinamometre kullanılarak ölçülmüştür. Elde edilen ölçümler ve veriler Dynoware yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Kistler 9129AA ve ölçüm sistemi Şekil 2.9'da sunulmuştur. Eğik kesme işlemlerinde F_c kuvveti ana kesme kuvvetini, F_r kuvveti kesici radyal kuvveti ve F_f kuvveti ise ilerleme kuvvetini ifade etmektedir.

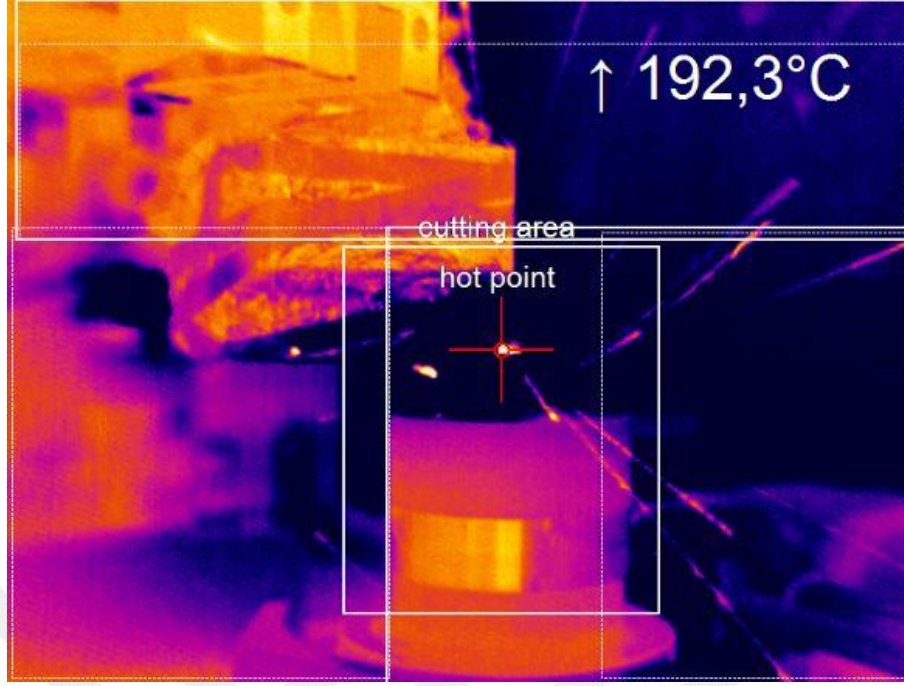


Şekil 2.9. a) Dinamometre b) Amplifikatör ve veri toplayıcı, b) Dinamometrede okunan kuvvetlerin yönleri

2.6 Kesme Sıcaklıkları Ölçümü

Talaşlı imalat deneyleri esnasında soğutucu ve yağlayıcıların performansını incelemek için termal kamera ile sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Kullanılan termal kamera $\pm 2^\circ\text{C}$ hassasiyete sahip Optris PI 400 modelidir. Ayrıca kamera 382x288 piksel çözünürlüğe sahiptir.

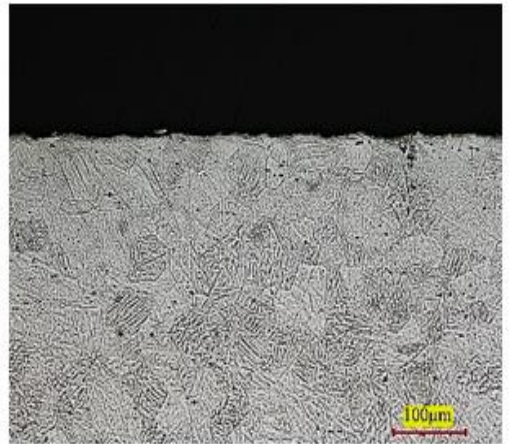
Kamera ile -20 , 1500 $^\circ\text{C}$ sıcaklıkları arasında ölçüm yapmak mümkündür. Ölçümler esnasında termal kamera yazılımına emissivite değeri 0.21 olarak tanımlanmıştır[9]. Termal kamera yazılımından elde edilen örnek sıcaklık görüntüsü Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Termal kamera örnek sıcaklık görüntüsü

2.7 Takım Aşınması Ölçümü ve Mikroyapı Analizi

Kesici takımın aşınma miktarı ölçümlerinde, görüntüleme işlemlerinde ve iş parçalarının mikroskobik analizlerinde Şekil 2.11’de gösterilen KEYENCE VHX-6000 digital mikroskop ve “KEYENCE software” yazılımı kullanılmıştır. Dijital mikroskoba ait teknik bilgiler Tablo 5’te sunulmuştur.



Şekil 2.11. Mikroyapı ve takım aşınması görüntülerinin alındığı dijital optik mikroskop

Tablo 2.5. KEYENCE VHX-6000 digital mikroskobun teknik özellikleri

Işık Kaynağı	LED
X,Y stage / Z stage	Manuel / Motorize
Yönler	(WxDxH) 550 x 200 x 470 cm
Kamera	18 MP
Büyütme	250x-2500X

2.8 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

Tüm talaşlı imalat deneylerinden sonra numunelerin işlenmiş yüzeylerinin yüzey kalitelerini kıyaslamak için yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için Şekil 2.12’ de görüntüsü sunulan Mitutoyo SJ210 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır. Cihazın teknik özellikleri Tablo x’ de sunulmuştur. Ölçümlerde numune yüzeylerinde “Aritmetik Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü”, R_a , dikkate alınmıştır.



Şekil 2.12. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

Tablo 2.6. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı teknik özellikleri.

Standartlar	JIS/ISO/ANSI/VDA seçilebilir şartlar
Ölçüm Metodu	İğne Uç ile Ölçme
Boyutlar	52.1 mm x 65.8 mm x 160 mm

2.9 Yüzey Bütünlüğü Analiz Çalışmaları Kapsamında Kullanılan Ekipmanlar

İşlenmiş numunelerin metalografik analizleri için Mikrotest hassas numune kesme cihazı kullanılarak gerekli ölçümlere hazır hale getirilmiştir.

Numuneler kesildikten sonra bakalite alma işlemi gerçekleştirildi. Daha sonra bakalite alınan numunelerin zımparalama ve parlatma işlemleri Multipol Advanced Plus

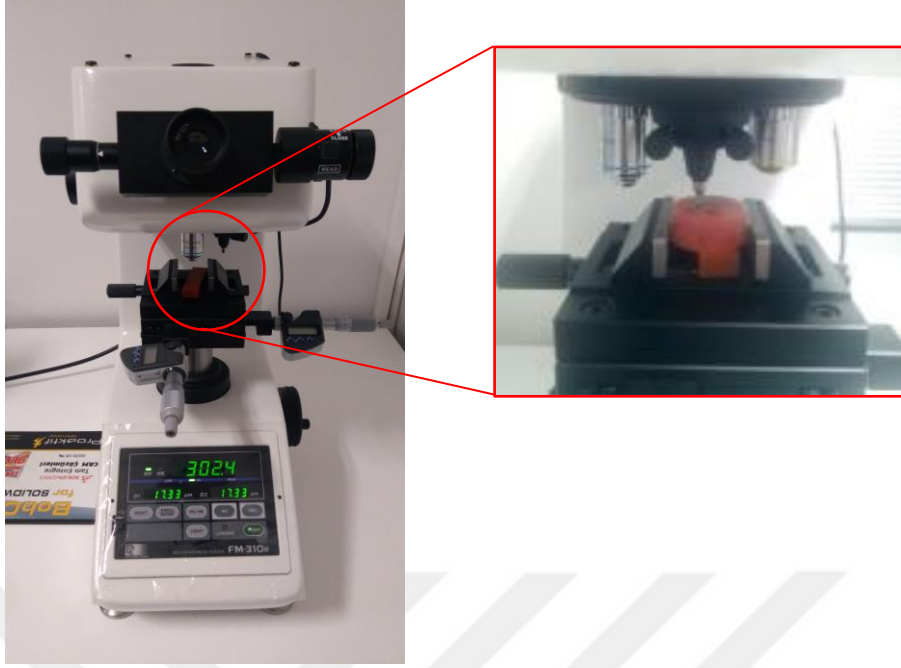
Zımparalama ve Parlatma Cihazında yapılmıştır. Hassas kesme cihazı ve parlatma cihazının fotoğrafları Şekil 2.13'te gösterilmiştir.



Şekil 2.13. (a) Hassas Numune Kesme Cihazı, (b) Zımparalama ve Parlatma Cihazı

2.10 Sertlik Ölçümü

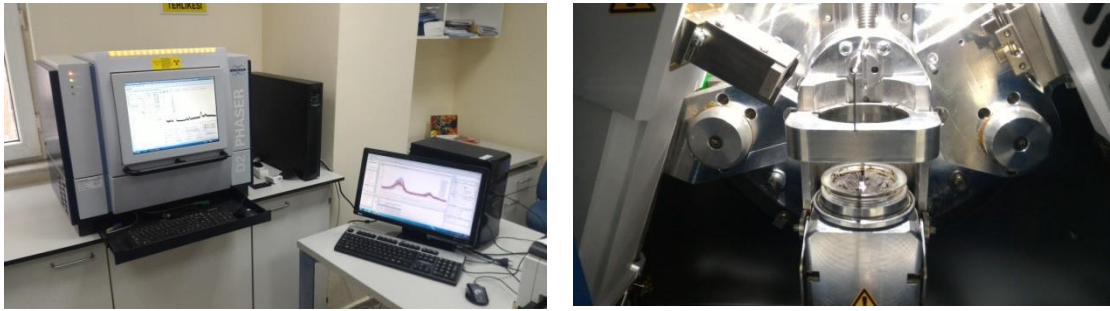
Hazırlanan metalografik numunelerin yüzey ve yüzeyaltı sertlikleri Future-Tech FM-310e model mikrosertlik cihazı (Şekil 2.14) kullanılarak yapılmıştır. Mikrosertlik testleri ISO 6507-1 standartlarına uygun şekilde uygulanmış ve analiz edilmiştir. Vickers yöntemiyle yapılan ölçümlerde 100g yük 15 saniye uygulama süresi tercih edilmiştir. Bir numune üzerinde 4 kere sertlik ölçümü yapılmış ve ortalaması alınarak sertlik değerleri belirlenmiştir.



Şekil 2.14. Sertlik Ölçüm Cihazı

2.11 XRD Faz Analizi Ölçümü

X-ışını difraksiyonu (XRD) ölçümleri için Bruker AXS Marka D2 Phaser cihazı kullanılmıştır (Şekil 2.15). Faz analizi kapsamında gerçekleştirilen XRD ölçümlerinde 1,54060 Å dalga boyuna sahip $\text{CuK}\alpha$ katot kullanılmış, akım ve voltaj değeri sırasıyla 10mA ve 30kv olarak seçilmiştir. 2 Theta ölçüm aralığı literatür dikkate alınarak [43] 30-90° seçilmiştir. Ölçümler işlenmiş parçaların işlenen yüzeylerinden yapılmıştır.



Şekil 2.15. XRD ölçüm cihazına ait görüntü

2.12 Termal Çevrim Testleri

Termal çevrim analizi için Şekil 2.16’ da gösterilen Perkin Elmer Pyris Diamond Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) cihazı kullanılmıştır. Sonuçlar analiz edilerek

faz dönüşüm sıcaklıkları saptanmıştır. Testler, ağırlıkları 10mg ile 40mg arasında değişen ve kalınlığı yaklaşık 500 µm olan numunelerin alüminyum bir tabla üzerine yerleştirilmesi sonucunda yapılmıştır. Isıtma ve soğutma hızları 10°C/dak'da sabit tutulmuştur. Faz dönüşüm sıcaklıkları, eğim çizgisi uzatma yöntemi kullanılarak DSC piklerinden belirlendi.



Şekil 2.16. Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) cihazı



3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Kesme Sıcaklıkları

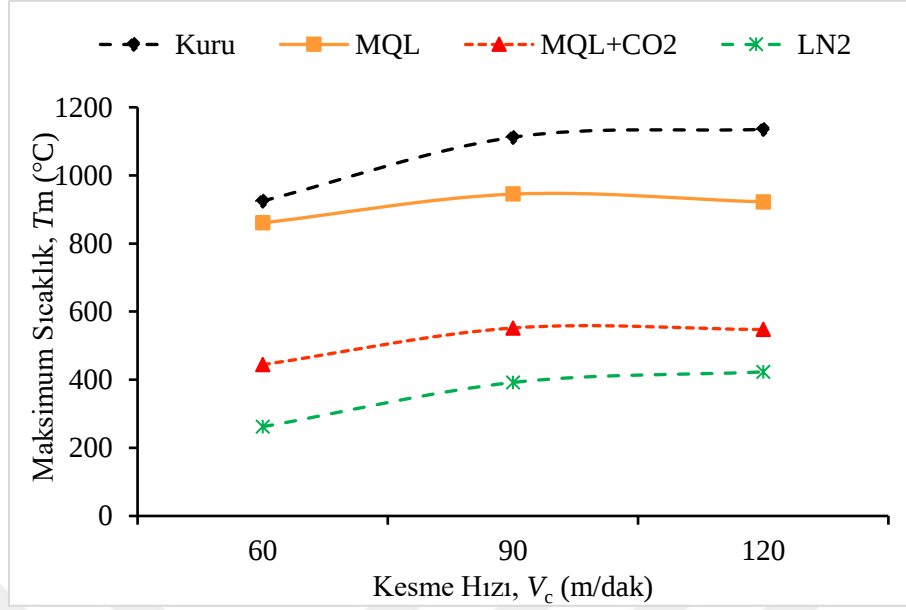
Talaşlı imalat operasyonlarında karşılaşılan en önemli sorunlardan biri sıcaklıktır. Sıcaklık oluşumu kesme parametrelerinin seçimini daha önemli kılmaktadır. Oluşan sıcaklığın bir bölümünü kesme parametrelerinin seçimi esnasında azaltmak mümkün olmaktadır. Fakat sıcaklığın oluşmasını tamamen engellemek mümkün değildir. Sıcaklık oluşumunun büyük bir bölümü birincil ve ikincil deformasyon bölgesinde oluşmaktadır. Birincil deformasyon bölgesi olan kayma düzleminde plastik deformasyon meydana geldiğinden dolayı sıcaklığın bir kısmı bu bölümde oluşur iken, sıcaklığın diğer kısmı ikincil deformasyon bölgesi olan kesici takım ile talaş ara yüzeyindeki sürtünmeden dolayı oluşmaktadır [44].

Testler esnasında termal kamera yardımı ile alınan maksimum kesme sıcaklıkları Şekil 3.1’de sunulmuştur. Şekilde farklı kesme hızları ve farklı kesme koşullarında oluşan maksimum kesme sıcaklıkları çizgisel grafik olarak sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere hem kesme hızının hem de kesme koşulunun maksimum sıcaklık değerlerine etkisi olmuştur. Kesme hızı açısından grafiğe bakacak olursak tüm kesme koşullarında kesme hızının artması ile oluşan maksimum kesme sıcaklık değerlerinde bir artış gözlemlenmiştir. Kesme hızındaki artışın, daha yüksek kesme sıcaklığına yol açtığı açıktır. Bu davranış, kesme hızı arttıkça, sürtünme kuvveti arttığından ve birincil ve ikincil deformasyon bölgelerindeki gerilme oranının da artmasından dolayı kesme bölgesindeki sıcaklıkta bir artışa neden olur [45].

Şekilde sunulan maksimum sıcaklık değerlerinde 60 m/dak kesme hızından 120 m/dak kesme hızına doğru olan artış yüzdesi kuru kesme koşulunda yaklaşık olarak %23 oranında iken minimum miktarda yağlama koşulunda bu artış oranı yaklaşık olarak %7 olmuştur. Kriyojenik kesme koşulları olan minimum miktarda yağlama ve karbondioksit yardımcı soğutmanın aynı anda uygulanması koşulunda bu artış %23 iken sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda bu artış miktarı %61 oranında olmuştur. Rakamlarında gösterdiği üzere kesme hızının artması ile maksimum sıcaklık değerlerindeki artış yüzdesi en fazla sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda olmuştur. Bunun sebebi sıvı azotun düşük kesme hızında çok daha etkili olup kesme sıcaklıklarını ciddi oranda düşürmesiyle açıklanabilir. Maksimum sıcaklık değerlerini kesme koşulları açısından kıyaslayacak olursak, tüm

kesme hızlarında en yüksek sıcaklık değerleri kuru kesme koşulunda oluşurken sırasıyla MQL, MQL+CO₂ ve LN₂ kesme koşulları kuru kesmeyi takip etmiştir. 60 m/dak kesme hızında kuru kesme koşulunda meydana gelen maksimum sıcaklık değeri 925 °C olmuştur. Kuru kesme koşulu referans alındığında en düşük kesme hızında minimum miktarda yağlama koşulu kuru kesme koşulundan %7 daha az sıcaklık oluşturmuştur. Minimum miktarda yağlama koşulu ile karbondioksit aynı anda uygulandığında ise sıcaklıktaki düşüş %52 oranında, sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda ise bu oran %72 dir. Görüldüğü üzere en düşük kesme hızı olan 60 m/dak kesme hızında kuru kesme referans alındığında en fazla sıcaklığa etki eden kesme koşulu %72 gibi büyük bir oranla sıvı azot yardımcı kesme koşulu olmuştur.

En yüksek kesme hızı olan 120 m/dak kesme hızında maksimum sıcaklık değerleri incelendiğinde, kuru kesme koşulunda yapılan testlerde maksimum sıcaklık değeri 1135 °C olmuştur. Minimum miktarda yağlama koşulunda bu değer 922 °C ile kuru kesmeden %19 daha az sıcaklık oluşturmuştur. Düşük kesme hızında olduğu gibi yüksek kesme hızında da kriyojenik yardımcı soğutma koşulları etkisini ciddi anlamda göstermektedir. MQL+CO₂ kesme koşulu kuru kesmeye oranla maksimum sıcaklık değerini %52 oranında azaltmıştır. Sıvı azot yardımcı soğutma koşulu ise kuru kesmeye oranla %63 daha az sıcaklık oluşturmuştur. Tüm bu bilgiler ışığında görülüyor ki kriyojenik soğutma koşulları olan MQL+CO₂ ve LN₂ kesme sıcaklıklarına ciddi oranda etki etmekte ve talaşlı imalat için büyük önem arz eden kesme sıcaklıklarını göz ardı edilmeyecek derecede düşürmektedir. Şekil hafızalı malzemeler sıcaklık ve uygulanan gerilme ile birlikte faz dönüşümüne uğrayabilen malzemelerdir, bu sebeple kesme işlemi esnasında oluşan kesme sıcaklık değerleri ayrı bir önem arz etmektedir. Oda sıcaklığında martenzitik yapıda olan NiTiHf şekil hafızalı malzeme sıcaklığın artması ile östenit yapıya dönüşür. Bu fazlar arası dönüşüm sıcaklıkları DSC analizi ile bulunmaktadır. Deneyler esnasında kullanmış olduğumuz NiTiHf şekil hafızalı malzemesinin östenit başlangıç sıcaklığı (As) 107°C olarak bulunmuştur. Talaşlı imalat için oldukça düşük bir değer olan östenit başlangıç sıcaklığı yapılan tüm testlerde aşılmıştır.



Şekil 3.1. Farklı kesme hızlarında ve farklı kesme koşullarında oluşan maksimum sıcaklık değerleri

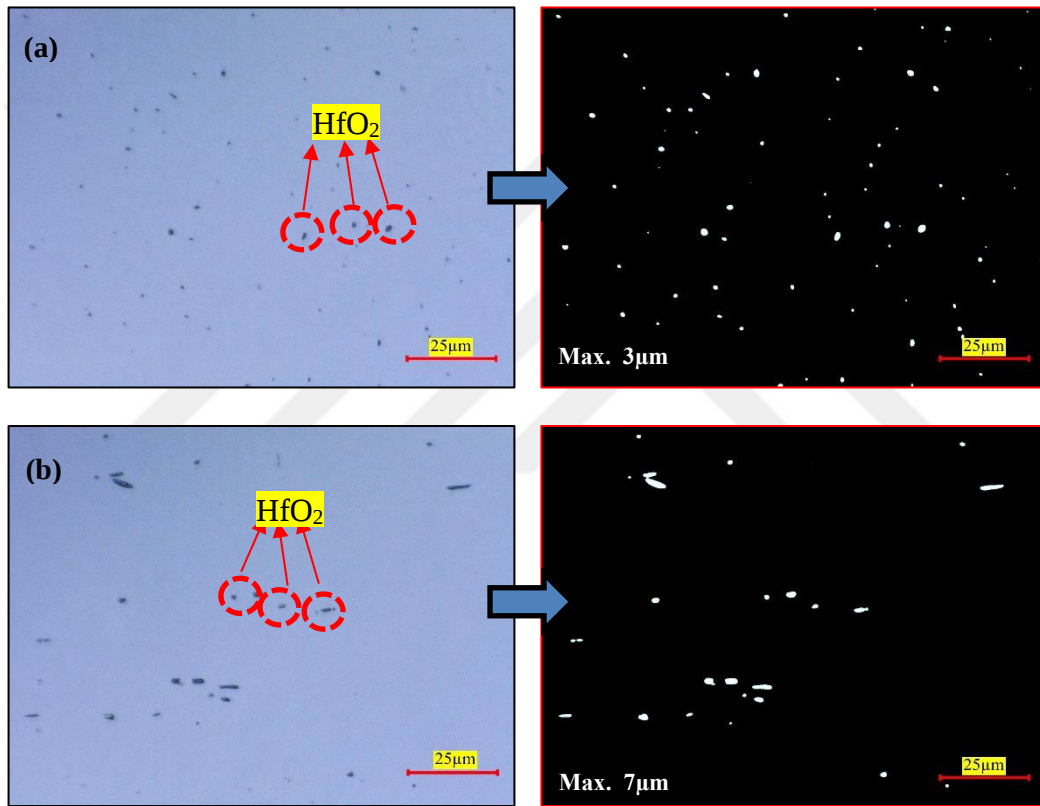
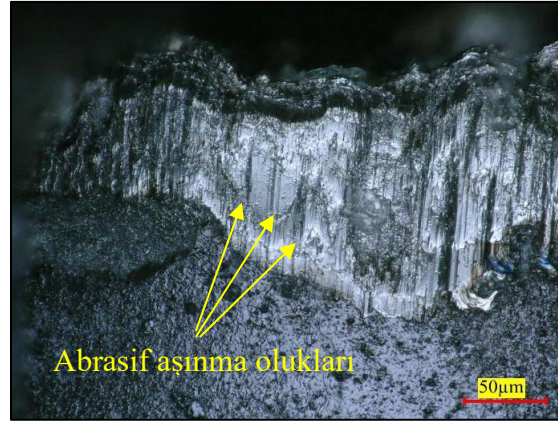
Ancak vurgulanması gereken husus şudur; şekil hafızalı alaşımlar gerilmelere maruz kaldığında faz dönüşüm sıcaklıkları artış göstermektedir. Ayrıca ölçülen maksimum sıcaklık kesme bölgesinde sıcaklık olup, malzemenin deformasyon esnasındaki sıcaklığı tam olarak yansıtmayabilir. Dolayısı ile kesilmemiş talaş durumunda olan malzemenin deformasyon esnasındaki faz yapısını bu verilere göre tahmin edebilmek güçtür.

3.2 Kesici Takım Aşınmaları

Tez çalışması kapsamında yapılan testlerde ölçülmesi planlanan çıktılardan biri de kesici takım aşınmasıdır. Kesme operasyonu son paso (finish) kesmedir. Dolayısı ile aşınmanın analiz ve değerlendirilmesinde ISO 3685 normunda son paso için takım ömrünü belirleyici kıstas olarak 0,4 mm lik maksimum serbest yüzey aşınma değeri belirlenmiştir [46, 47]. Takım aşınması, kesici takımın sertliğine, işlenen malzemenin sertliğine, kesme parametrelerinin(kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği, soğutucu ve yağlayıcı) durumuna bağlı olarak ve kesici takımın çalışma sıcaklığı gibi birçok sebepten kaynaklanabilir. Takım aşınmasını genel olarak abrasiv aşınması, adhezyon aşınması, kimyasal aşınma ve plastik deformasyon gibi aşınma mekanizmaları meydana getirmektedir[48]. Şekil 3.2’ de kesici takımda meydana gelen abrasiv aşınma mekanizması gösterilmiştir. Kesici takım ve iş parçası arasında oluşan gerilmeler buna sebep olurken, malzeme mikro yapısında

gözlemlenen mikro HfO_2 aşındırıcı partiküllerin de abrasif aşınmaya neden olduğu düşünülmektedir [49]. İş parçasındaki HfO_2 partikülleri Şekil 3.2’de ekstrüzyon yönüne bağlı olarak sunulmuştur. Görüldüğü üzere ekstrüzyon yönüne paralel olarak bakıldığında HfO_2 partikülleri dairesel formda olup maksimum boyut 3 μm olarak ölçülmüştür. Ekstrüzyon yönüne dik olarak bakıldığında ise HfO_2 partiküllerinin ekstrüzyon yönüne doğru uzadığı ve ekstrüzyonun etkisi ile elips yapıda bir geometri oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu yönden bakıldığında maksimum partikül boyutu 7 μm olarak ölçülmüştür.

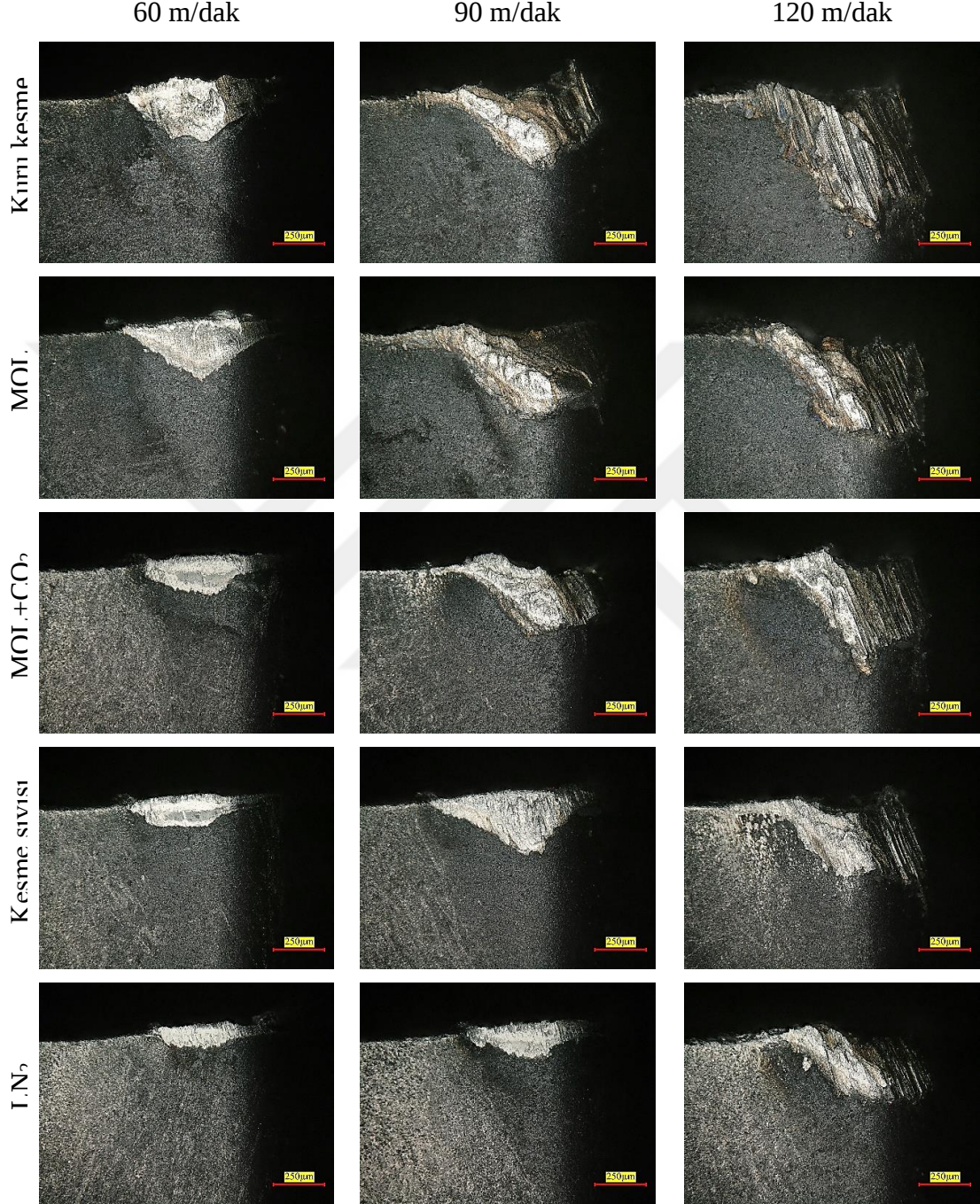




Şekil 3.2. Malzemedeki HfO_2 partikülleri a) Ekstrüzyon yönüne paralel b) Ekstrüzyon yönüne dik.

Yapılan deneyler sonrasında kesici takım serbest yüzey aşınma görüntüleri dijital optik mikroskop yardımı ile görüntüleri alınmış olup kesme hızına ve kesme koşuluna bağlı olarak Şekil 3.3’de sunulmuştur. Takım aşınma görüntülerinin sunulduğu şekle baktığımızda kesme hızının artması ile tüm kesme koşullarında takım aşınma miktarlarının arttığı net bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Kesme hızının artması ile kesici takım aşınma miktarlarının artması artan gerilme ve artan sürtünme kuvvetleri ile açıklanabilir

[34]. Kesme hızının artması ile artan aşınma miktarlarının yanı sıra kesme operasyonlarında uygulanan farklı kesme koşulları arasında da aşınma miktarları açısından fark olduğu açıkça görülmektedir.

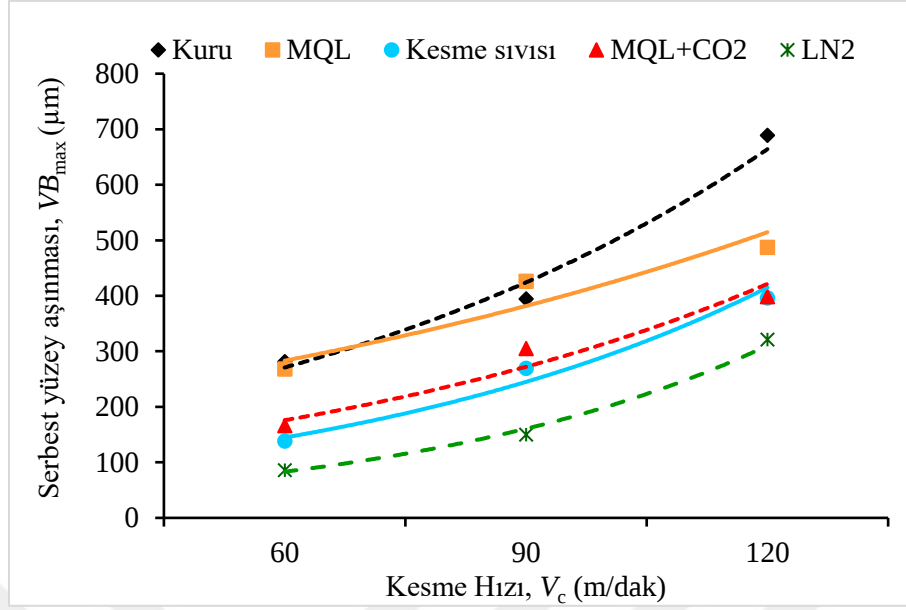


Şekil 3.3. Farklı kesme hızı ve farklı kesme koşullarında kesici takımda oluşan serbest yüzey aşınma görüntüleri.

Şekil 3.4’de kesici takım serbest yüzey aşınma değerleri kesme hızına ve kesme koşuluna bağlı olarak sunulmuştur. Aşınma görüntülerinden ölçülen değerler, kesme hızının takım

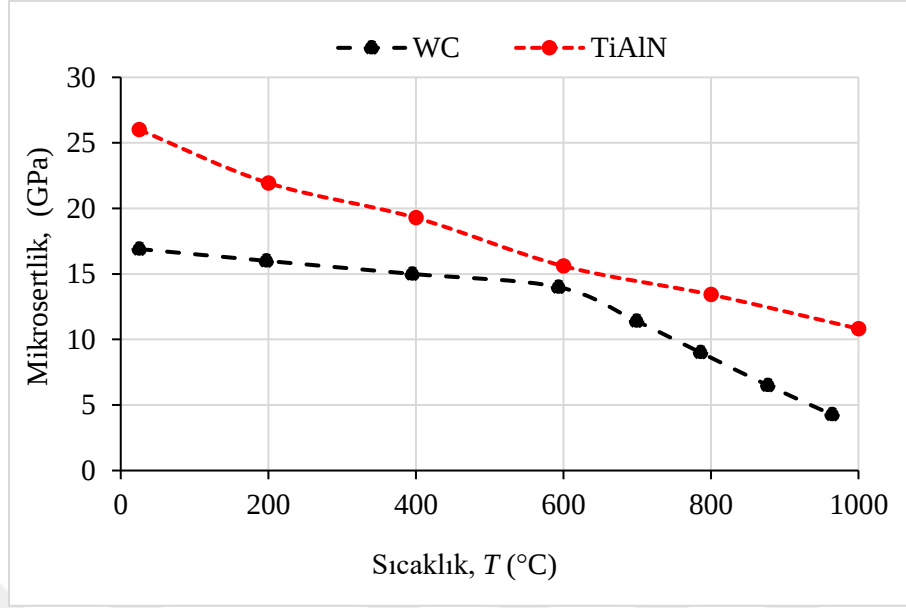
aşınmasına olan etkisini net olarak göstermektedir. 60 m/dak kesme hızından 120 m/dak kesme hızına doğru aşınma miktarlarındaki yüzdesel artış, kuru kesme koşulunda %145, minimum miktarda yağlama koşulunda %81, kesme sıvısı koşulunda %187, minimum miktarda yağlama ve karbondioksitin aynı anda uygulandığı kesme koşulunda %140 ve sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda ise bu artış %273 oranında oluşmuştur. En düşük kesme hızı olan 60 m/dak kesme hızında en yüksek serbest yüzey aşınması 281 µm aşınma miktarı ile kuru kesme koşulunda olmuştur. Kuru kesme koşuluna en yakın minimum miktarda yağlama koşulu olmuştur ve yaklaşık olarak kuru kesmeden %5 oranında daha az çıkmıştır. MQL+CO₂ kesme koşulu kuru kesmeden %41 oranında daha az aşınma miktarı oluşurken, kesme sıvısı koşulu %51 daha az aşınma oluşturmuş ve sıvı azot yardımcı kesme koşulu ise 86 µm aşınma miktarı ile %69 gibi ciddi bir oranda daha az aşınma oluşturmuştur. Yüzde azalma oranlarında da anlaşılabileceği üzere kesme operasyonunda soğutma koşullarının serbest yüzey aşınma miktarına etkisi açıkça görülmektedir.

En yüksek kesme hızı olan 120 m/dak kesme hızında ise yine en yüksek aşınma miktarı kuru kesme koşulunda olmuştur. Kuru kesme koşulundan sonra en yüksek serbest yüzey aşınma miktarı 487 µm ile minimum miktarda yağlama koşulunda oluşmuştur. Minimum miktarda yağlama koşulu kuru kesme koşulundan yaklaşık olarak %29 daha az serbest yüzey aşınması oluşturmuştur. Kesme sıvısı 396 µm ve MQL+CO₂ kesme koşulu 398 µm ile birbirine yakın değerler oluşturmuş ve yaklaşık olarak serbest yüzey aşınmaları kuru kesme koşulundan %42 daha azdır. En yüksek kesme hızında da sıvı azot yardımcı soğutma koşulu en düşük aşınma miktarını oluşturmuştur. Kuru kesme koşulundan %53 oranında daha az bir serbest yüzey aşınma miktarı oluşturup takım aşınmasını ciddi oranda azaltmıştır.



Şekil 3.4. Farklı kesme hızı ve farklı kesme koşullarında kesici takımında oluşan serbest yüzey aşınma değerleri.

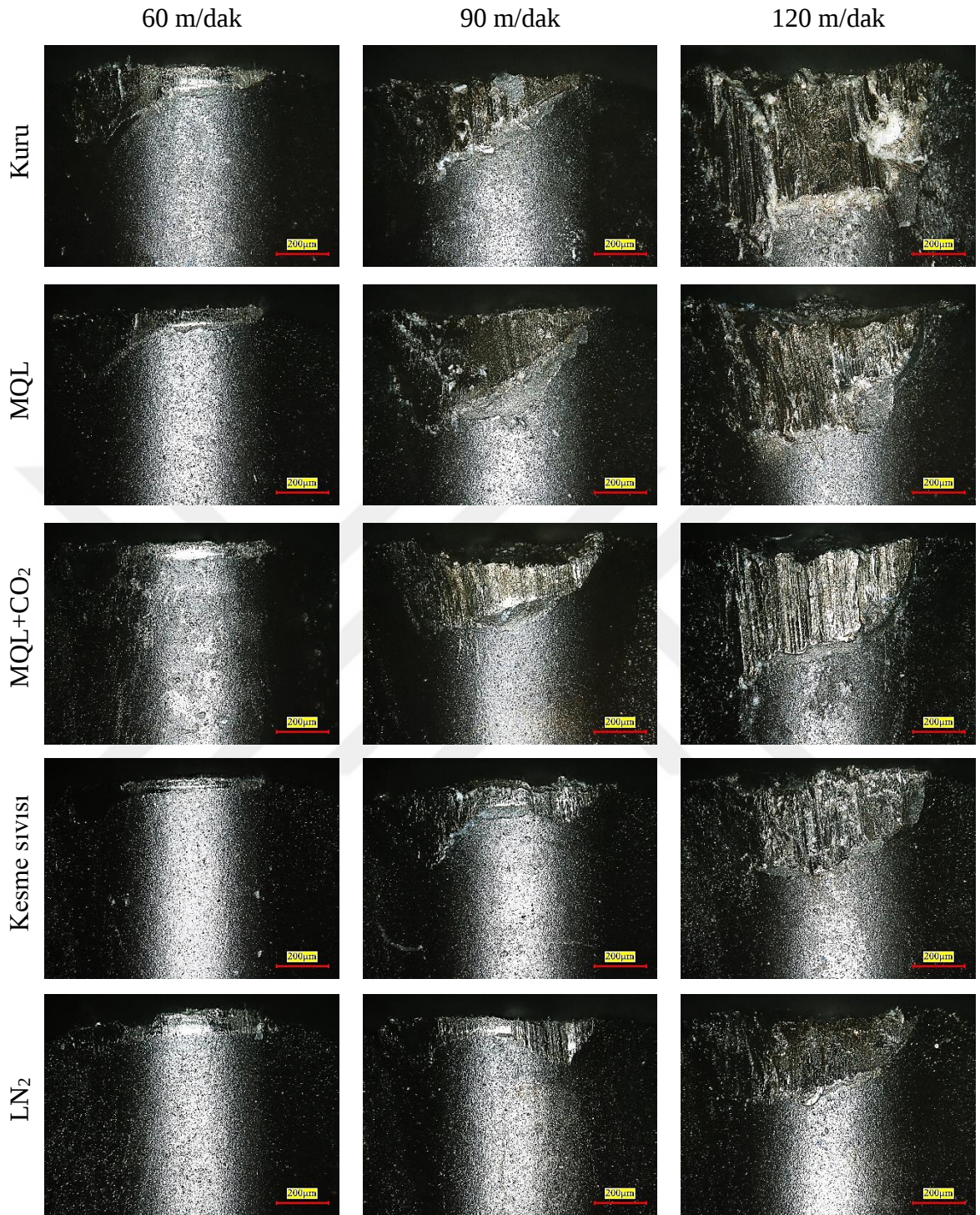
Kuru kesme koşulunda 120 m/dak kesme hızında $689 \mu m$ ' lik bir serbest yüzey aşınma miktarı oluşmuştur. Kesici takıma bakılacak olursa serbest yüzey aşınma miktarının yüksek olmasının yanı sıra kesici takımın geometrisindeki bozulmada dikkat çekmektedir. Kesici takımında hacimsel bir aşınmanın da meydana geldiği açıkça görülmektedir. Kuru kesme koşulundaki bu aşınma farkı kesme sıcaklığının karbür takımının yumuşama sıcaklık noktası olan $1100^\circ C$ [50] yi geçmiş olmasıdır. Diğer kriyojenik kesme koşullarında bu denli bir aşınma söz konusu olmamıştır. Bu durum kullanılan kesici takımın ve kesici takım üzerindeki kaplamamın sıcaklıkla sertliğindeki değişimi ile açıklanabilir. Kesme bölgesindeki sıcaklığın artması ile kesici takım yumuşama eğilimi göstermektedir. Şekil 3.5'de kullanmış olduğumuz karbür kesici takımın kaplaması ve karbürün sıcaklıkla sertliğindeki değişim grafiği sunulmuştur. Grafiğe bakıldığında sıcaklığın artması ile hem kaplamada hem de karbür takımında yumuşama eğilimi görülmektedir. TiAlN kaplamanın sıcaklığın artması ile sertliğinde kararlı bir azalma görülürken, karbürün $600^\circ C$ sıcaklıktan sonra sertliğinde ani düşüş gözlemlenmektedir. 120 m/dak kesme hızında kuru kesme ve minimum miktarda yağlama koşulunda oluşan takım aşınması hem kaplamanın hem de karbür takımının yumuşaması ile açıklanırken, kriyojenik kesme koşulu olan MQL+CO₂ ve LN₂ koşullarına $600^\circ C$ nin altında bir kesme sıcaklığı oluşturduğu için kesici takımlarda hacimsel kayıp ve geometrisindeki bozulma daha az olmuştur.



Şekil 3.5. Karbür takımın ve TiAlN kaplamanın farklı sıcaklıklardaki sertlik değişimi [50].

Sonuç olarak yapılan çalışmada ISO standardı dikkate alındığında (Şekil 109’da kırmızı kesikli çizgi ile gösterildiği üzere) MQL ve Kuru Kesme koşullarında 90 ve üzerindeki kesme hızlarında kesici takımlar ömürlerini tamamlamışlardır. Ancak sıvı azot ve karbondioksit kesici takım performanslarında önemli iyileştirmelere sebep olduğunu gösteren önemli bulgulara ulaşılmıştır.

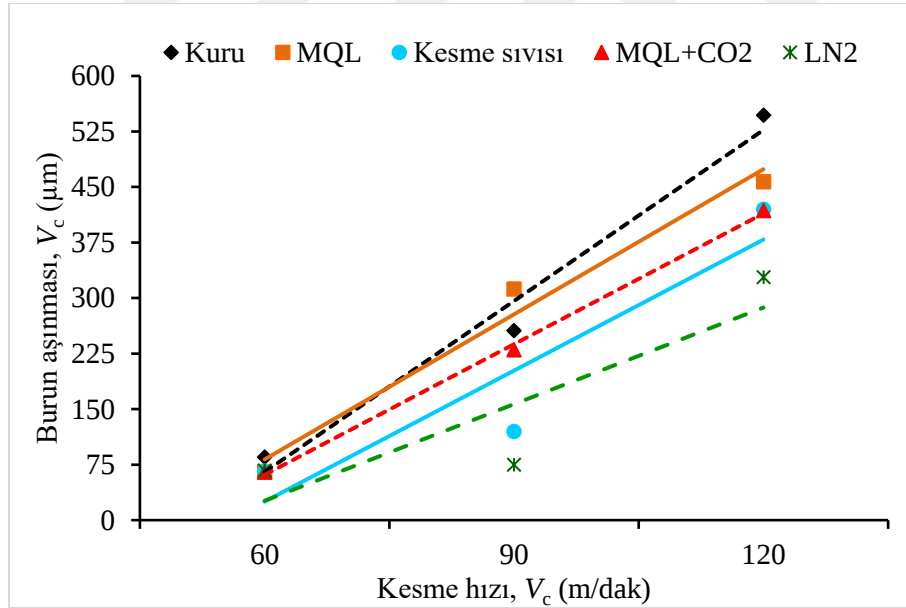
Kesici takım üzerinde meydana gelen diğer aşınma çeşidi ise burun aşınmasıdır. Burun aşınması sonucunda en fazla malzeme yüzeyinin kalitesi etkilenir. Burun aşınma miktarının artması işlenmiş yüzeyin kalitesini bozarak daha pürüzlü bir yüzey oluşturur. Ayrıca burun aşınması radyal kuvvetleri de doğrudan etkilemektedir[9]. Şekil 3.6’da yapılan testler sonucunda oluşan kesici takım burun aşınması görüntüleri sunulmuştur. Görüntüler kesme hızına ve kesme koşuluna bağlı olarak düzenlenmiştir. Şekle baktığımızda kesici takım burun aşınmasının kesme hızı ve kesme koşuluna bağlı olarak ciddi değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Kesme hızının artması ile tüm kesme koşullarında burun aşınma miktarları artış göstermiştir. En yüksek kesme hızında en fazla aşınma kuru kesme koşulunda oluşurken en az aşınma miktarı ise sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda olmuştur.



Şekil 3.6. Farklı kesme hızı ve farklı kesme koşullarında kesici takımında oluşan burun aşınması görüntüleri.

Burun aşınması değerleri Şekil 3.7’de çizgisel grafik olarak sunulmuştur. Kesme hızına ve kesme koşuluna bağlı olarak oluşturulan grafik incelendiğinde, kesme hızının ve kesme koşulunun aşınmaya etkisi daha net olarak görülmektedir. En düşük kesme hızı olan 60

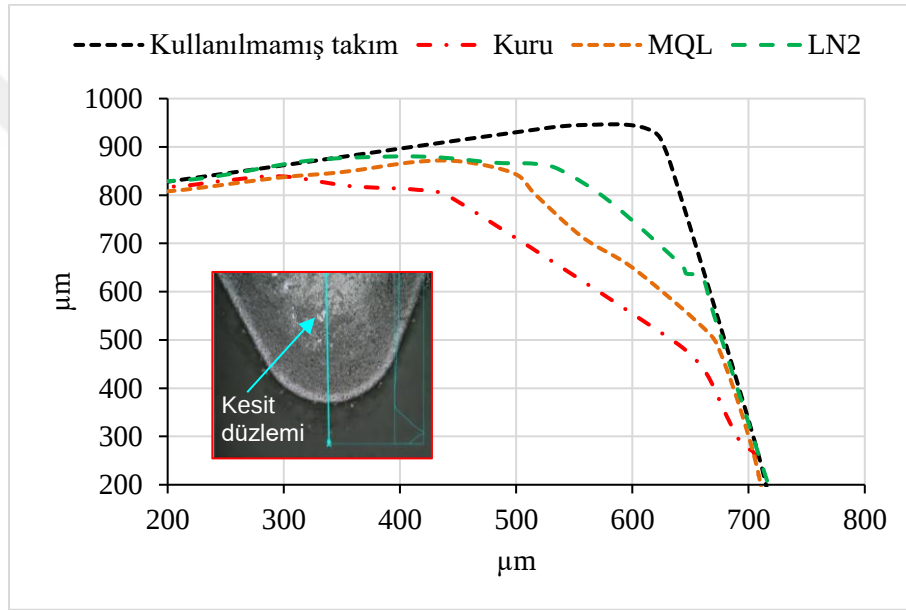
m/dak kesme hızında en fazla aşınma miktarı kuru kesme koşulunda oluşmuştur. Kuru kesme dışındaki diğer kesme koşulları ortalama 65 μm aşınma oluşurken kuru kesme koşulunda 85 μm aşınma oluşmuştur. Diğer kesme koşulları birbirine yakın sonuçlar vermiştir ve kuru kesme koşulu ile yapılan testler sonucunda oluşan burun aşınma miktarı diğer kesme koşullarından yaklaşık olarak %30 daha fazladır. En yüksek kesme hızında ise kesme koşulları arasındaki aşınma miktarı farklı çok net olarak görülmektedir. 120 m/dak kesme hızında en fazla burun aşınması kuru kesme koşulunda olmuştur. Kuru kesme koşulunda oluşan burun aşınma miktarı 547 μm olarak ölçülmüştür. Minimum miktarda yağlama koşulunda 457 μm olarak ölçülen burun aşınma miktarı kuru kesme koşulundan yaklaşık olarak %16 daha az olmuştur. Kesme sıvısı koşulunda 420 μm ve MQL+CO² kesme koşulunda 418 μm aşınma miktarı ile bir birine yakın değerler çıkmıştır ve kuru kesme koşulundan yaklaşık olarak %23 oranında daha az burun aşınma miktarı oluşturmuşlardır. En az burun aşınma miktarı ise sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda 328 μm olarak ölçülmüştür. Bu değer kuru kesme koşulunda oluşan burun aşınma miktarından yaklaşık olarak %40 daha azdır.



Şekil 3.7. Farklı kesme hızı ve farklı kesme koşullarında kesici takımda oluşan burun aşınması değerleri.

Kesici takım burun aşınmaları incelendiğinde kesici takımlarda en yüksek (120 m/dak) kesme hızında hacimsel kayıp ve kesici takım geometrisinde bozulma gözlemlenmiştir. Kesici takımlardaki bu hacimsel kaybı daha iyi inceleyebilmek için dijital optik mikroskop

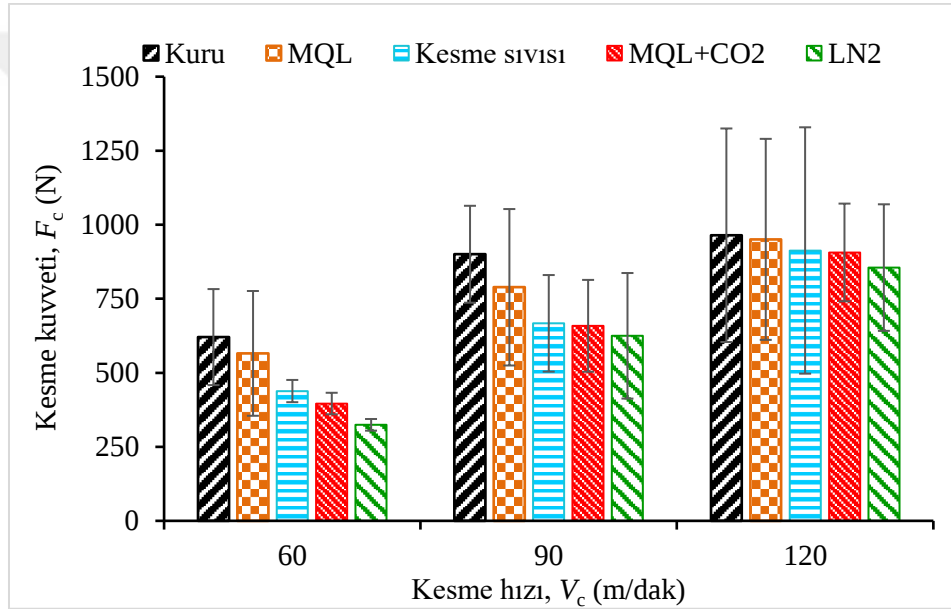
yardımıyla kesici takımlar üç boyutlu olarak taranmıştır ve profil kesitleri alınmıştır. Kesit profilleri alınan kesici takımların profil çizgileri grafik olarak oluşturulmuş ve Şekil 3.8’de kesme koşuluna bağlı olarak sunulmuştur. Dışta kalan siyah kesikli çizgiler kullanılmamış kesici takımı temsil etmektedir. Farklı kesme koşullarında kesici takımlarda meydana gelen hacimsel kayıp grafikte açıkça gösterilmiştir. Kullanılan kesici takımlarda test sonrasında en fazla aşınma kuru kesme koşulunda meydana gelmiştir. Alınan profil kesiti de bu durumu desteklemektedir ve hacimsel kayıp kayda değer şekilde diğer kesme koşullarından daha fazla olmuştur. Hacimsel kaybın ve geometrideki değişimin en az seviyede olduğu kesme koşulu ise sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda gözlemlenmiştir.



Şekil 3.8. 120 m/dak kesme hızındaki aşınmaların profil çizgileri.

3.3 Kesme Kuvvetleri

Tornalama operasyonu sırasında kesici takıma etki eden esas kesme kuvvetleri Şekil 3.9’da görülmektedir. Testler esnasında oluşan kesme kuvvetleri farklı kesme koşulları ve farklı kesme hızlarına göre grafikte sunulmuştur. Grafiğe bakıldığında kesme hızının ve kesme koşulunun değişmesi ile oluşan kesme kuvvetlerinin de değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Grafiği kesme hızı açısından incelersek, tüm kesme koşullarında kesme hızı arttıkça kesme kuvvetleri de artış göstermiştir. Kesme hızının artması ile kesme kuvvetlerinde meydana gelen bu artış, kesme hızının artması ile artan sıcaklık ve bu sebeple artan kesici takım aşınması ile açıklanabilir.

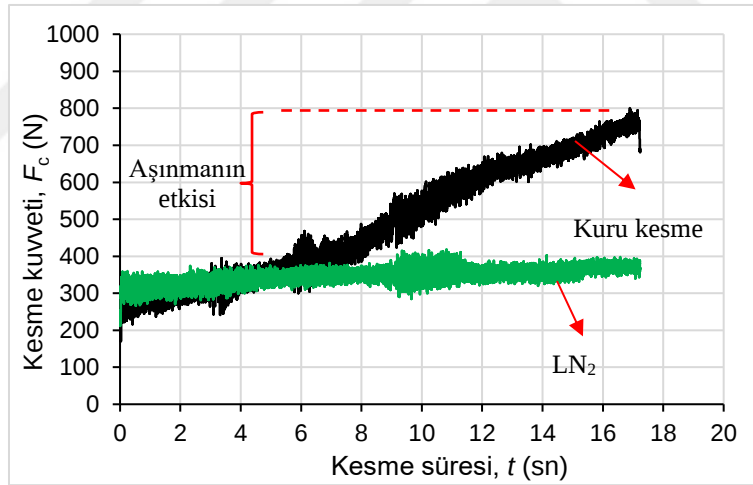


Şekil 3.9. Farklı kesme hızı ve farklı kesme koşullarında oluşan kesme kuvvetleri.

En düşük kesme hızı olan 60 m/dak kesme hızında yapılan testlerde en yüksek kesme kuvvetini kuru kesme koşulu oluşturmuştur. Kuru kesme koşulunda yüksek kesme sıcaklıkları olduğundan kesici takımın dayanımının azaldığını aşınma başlığı altında incelemiştik. Artan sıcaklıkla kesici takım aşınması artmış ve kuvvetlerde buna bağlı olarak artış göstermiştir. Karbür kesici takımın yumuşama noktası olan 600 °C’ yi aşan kesme koşullarında aşınmanın etkisiyle kuvvetlerde daha fazla çıkmıştır. Kriyojenik kesme koşulları ve kesme sıvısı ile yapılan testlerde kesme sıcaklıkları daha düşük çıktığı için aşınma miktarları da daha az oluşmuştur, bu sebeple kesme kuvvetleri daha azdır. Kuru kesme koşulu referans alındığında minimum miktarda yağlama koşulu kuru kesme

koşulundan yaklaşık olarak %9 daha az kesme kuvveti oluşturmuştur. Bu durum minimum miktarda yağlama koşulunun sürtünme kuvvetlerini azaltması ve kesme işleminin daha kolay gerçekleşmesi ile açıklanabilir. Kesme sıvısı ile yapılan deneyler ise kuru kesme koşulundan %29 oranında daha az kesme kuvveti oluşturmuştur. Kriyojenik kesme koşulları olan MQL+CO₂ ve LN₂ ile soğutma koşullarında

sırasıyla %36 ve %48 oranında daha az kesme kuvveti oluşmuştur. Bu durum kesme bölgesindeki sıcaklığın kuru kesmeye oranla çok daha düşük olması ve kesici takımın yumuşama sıcaklığına ulaşmamış olması ile açıklanabilir. Şekil 10'da bu durumu destekleyici olarak kuru kesme ve sıvı azot yardımcı soğutma koşulunun dinamometreden alınmış kesme kuvveti değerleri sunulmuştur. Grafikte de görüldüğü üzere kuru kesme koşulu ve sıvı azot yardımcı soğutma koşulu kesme operasyonunun ilk saniyelerinde aynı kesme kuvvetini oluştursa da ilerleyen saniyelerde kuru kesme koşulu aşınmanın etkisiyle kuvvet değerlerini artırmıştır. Sıvı azot yardımcı soğutma koşulu ise istikrarlı bir kesme kuvveti oluşturmuştur.



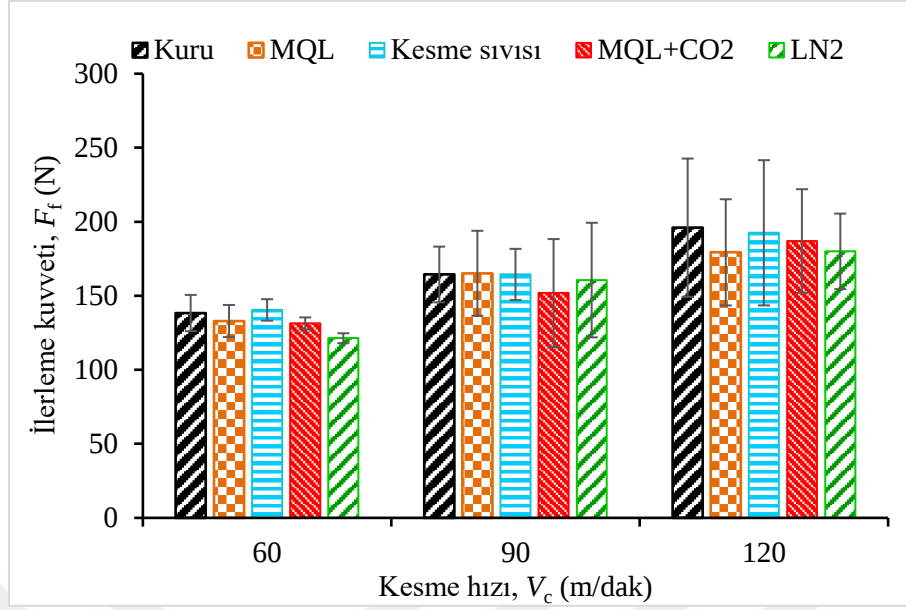
Şekil 3.10. 60 m/dak kesme hızında kuru kesme ve sıvı azot yardımcı kesme koşulunda oluşan kesme süresine bağlı kesme kuvveti değerleri.

90 m/dak kesme hızında en yüksek kesme kuvveti kuru kesme olmuştur ve minimum miktarda yağlama koşulu kuru kesme koşulundan %12 daha az kesme kuvveti oluşturmuştur. Kesme sıvısı koşulu ile MQL+CO₂ soğutma koşulu birbirine yakın kesme kuvveti oluşturarak yaklaşık olarak kuru koşulundan %27 oranında daha az kesme kuvveti değeri oluşturmuşlardır. Sıvı azot yardımcı soğutma koşulu ise %30' luk bir oranla en düşük kesme kuvveti değerini oluşturduğu görülmektedir.

Kesme hızı ve kesme koşuluna göre oluşturulan kesme kuvveti grafiğinde en yüksek kesme hızı olan 120 m/dak kesme hızında da diğer hızlarda olduğu gibi kuru kesme koşulu en yüksek kesme kuvvetini oluşturmuştur. Görülüyor ki kesme hızının artması ile kesici takım aşınması daha baskın rol oynamış ve kesme kuvvetlerindeki artışla beraber kesme koşulları arasındaki fark azalmıştır. Minimum miktarda yağlama koşulu kuru kesme koşulundan yaklaşık olarak %1,5 oranında daha az kesme kuvveti oluşturmuştur. Kesme sıvısında %5, MQL+CO₂ kesme koşulunda %6 ve sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda kuru kesmeden %11 oranında daha az kesme kuvveti oluşmuştur.

Kesme kuvveti grafiğine göre kesme hızı kuvvetlerin artışında önemli bir etken olmuştur. Kesici takım aşınmasının etkisiyle artan kesme kuvvetleri arasında kesme bölgesindeki sıcaklığa etki eden soğutma koşullarında aşınma miktarlarının az olması sebebiyle kesme kuvvetleri de daha az olmuştur.

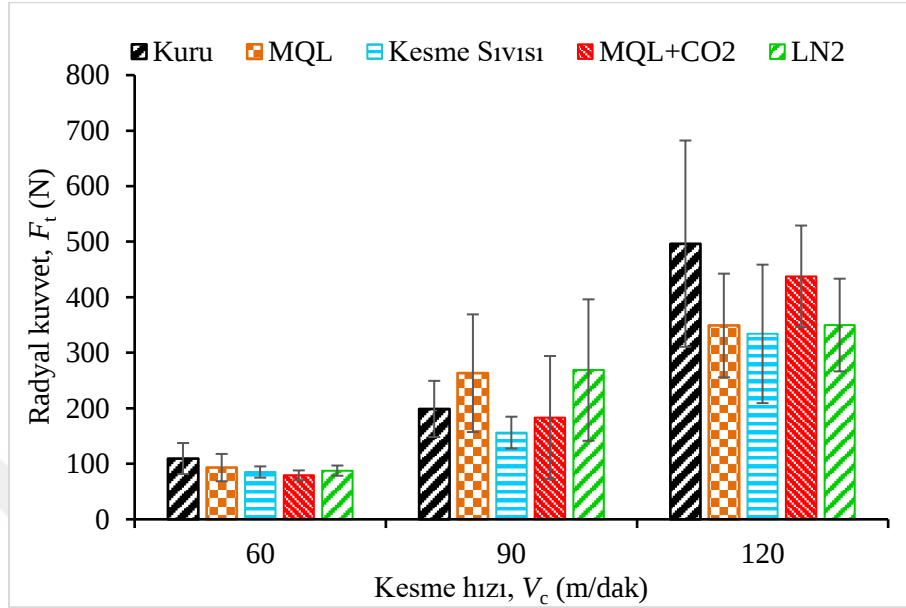
Şekil 3.11’de kesme hızına ve kesme koşuluna bağlı olarak kesme esnasında oluşan ilerleme kuvveti değerleri grafiksel olarak sunulmuştur. Grafiğe bakıldığında kesme koşulları arasındaki ilerleme kuvveti farkı kesme kuvvetindeki kadar olmayıp genellikle birbirine yakın değerler çıkmıştır. 60 m/dak kesme hızında en yüksek ilerleme kuvveti 138 µm ile kuru kesme koşulunda oluşurken en düşük ilerleme kuvveti 121 µm ile sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda oluşmuştur. 120 m/dak kesme hızında ise en yüksek ilerleme kuvveti 196 µm ile kuru kesme koşulunda ve en düşük ilerleme kuvveti 180 µm ile sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda olmuştur. Kesme hızının artması ile aşınmanın da artmasından dolayı ilerleme kuvvetlerinde artış gözlemlenmiştir. Bu artış en düşük kesme hızı olan 60 m/dak kesme hızından en yüksek kesme hızı olan 120 m/dak kesme hızına doğru kuru kesme koşulunda 42% oranında olmuştur. Minimum miktarda yağlama koşulunda kesme hızının artması ile ilerleme kuvvetinde yaklaşık olarak %35 artış gözlemlenmiştir. Kesme sıvısı ile soğutma koşulunda bu artış %37 iken, MQL+CO₂ uygulamalı soğutma koşulunda %42 ve sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda ise %48 oranında olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.11. Farklı kesme hızı ve farklı kesme koşullarında oluşan ilerleme kuvvetleri.

Radyal kuvvetlerin oluşmasında en büyük etken burun bölgesindeki aşınmadır. Burun bölgesindeki aşınma miktarından en fazla radyal kuvvetler etkilenmektedir[51]. Radyal kuvvetler kesme hızına ve kesme koşuluna bağlı olarak oluşturulmuş ve Şekil 3.12’de sunulmuştur. Radyal kuvvet değerleri incelendiğinde kesme hızının artması kuvvet değerlerinde ciddi bir artışa sebep olmuştur. Bu durum kesme hızının artması ile burun aşınmasının artması ile açıklanabilir. En düşük kesme hızı olan 60 m/dak kesme hızında en yüksek radyal kuvvet kuru kesme koşulunda 109 N olarak ölçülmüştür. En düşük radyal kuvvet ise 79 N ile MQL+CO₂ yardımcı soğutma koşulunda oluşmuştur ve kuru kesme koşulundan yaklaşık olarak %27 daha az olmuştur. 120 m/dak kesme hızında oluşan en yüksek radyal kuvvet kuru kesme koşulunda ve 496 N değerinde çıkmıştır. En düşük radyal kuvvet ise kesme sıvısı koşulunda 333 N olmuştur ve kuru kesme koşulundan %32 daha az radyal kuvvet oluşmuştur. Kesme hızının 60 m/dak dan 120 m/dak kesme hızına artması ile kuru kesme koşulunda %335 oranında artış gözlemlenmiştir. Artışın bu kadar yüksek olması burun aşınmalarının kesme hızıyla birlikte artması ile açıklanmaktadır. Kuru kesme koşulunda oluşan burun aşınması görüntüsü grafik üzerinde sunulmuştur. Minimum miktarda yağla koşulu kesme hızının artması ile %275 oranında artış gözlemlenirken kesme sıvısı ile soğutma koşulunda yaklaşık olarak %291 oranında bir artış gözlemlenmiştir. MQL+CO₂ yardımcı soğutma koşulunda kesme hızının artması ile

%453 oranında bir radyal kuvvet artışı gözlemlenmiştir. Sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda ise bu artış miktarı yaklaşık olarak %301 olmuştur.



Şekil 3.12. Farklı kesme hızı ve farklı kesme koşullarında oluşan radyal kuvvetler.

3.4 Yüzey Bütünlüğü

Geleneksel ya da geleneksel olmayan herhangi bir talaşlı imalat yöntemi kullanılarak işlenen bir parçanın yüzey bütünlüğü karakteristikleri, talaş kaldırma operasyonunun işlenen parçanın yüzey ve yüzeyaltı özelliklerine etkisi olarak tanımlanmaktadır [52, 53]. Talaşlı imalat sonrası malzemenin en önemli yüzey bütünlüğü karakteristiklerini olarak yüzey pürüzlülüğü [54], sertlik [55], etkilenmiş katman [56], kalıntı gerilmeler [57], yorulma ömrü [58], faz dönüşümü ve tane küçülmesi analizi [36] gösterilebilir. Yüzey bütünlüğü karakteristiklerini kendi aralarında kategorize etmek mümkündür. Bu şekilde talaşlı imalat sonrası yüzey ve yüzeyaltı bölgelerde meydana gelen değişimlerin daha iyi anlaşılması mümkün olabilecektir. Metalurjik yüzey bütünlüğü başlığı adı altında tane boyutu, tane şekli, faz dönüşümü ve mikroyapı analizi; mekanik yüzey bütünlüğü başlığı adı altında mikrosertlik, talaşlı imalattan etkilenen katmanın kalınlığı ve kalıntı gerilmeler; topografi bütünlüğü başlığı adı altında yüzey pürüzlülüğü ve dalgalanma konuları sınıflandırılabilir [59-61].

Şekil Hafızalı Alaşımlar(Shape Memory Alloys, SMA), sıcaklık ve gerilmenin etkisiyle şekil değiştirebilen ve bu etkiler ortadan kalktığında eski şekillerine geri dönebilen özel

malzemeler olmakla birlikte sahip oldukları bu özellik dolayısıyla diğer mühendislik malzemelerinden ayrı değerlendirilmesi gerekir. Bu malzemeler yüksek sıcaklık fazı olan östenit durumdayken diğer mühendislik malzemelerine benzemekle beraber [62], düşük sıcaklık fazı olan martenzit duruma geçtiğinde süperelastik ve deformasyondan sonra ilk şekline geri dönme özelliği göstermektedir [32]. Aslında bu özelliklerinden dolayı özellikle uzay, havacılık ve biyomedikal sektörlerinde tercih edilen SMA ların en yaygın olarak kullanılanı yapısında yaklaşık olarak %50Ni ve %50Ti elementi bulunan NiTi alaşımıdır. Yalnız NiTi alaşımların faz dönüşüm sıcaklıklarının yeni geliştirilen SMA ların faz dönüşüm sıcaklıklarına kıyasla daha düşük olması, bu malzemenin cazibesini kaybetmesine neden olarak gösterilebilir. Çünkü NiTi alaşıma Pt, Hf, Zr gibi elementler eklenerek yeni geliştirilen alaşımlar, NiTi alaşıma göre daha yüksek faz dönüşüm sıcaklıklarına sahip olabilmektedir. SMA ların martenzit fazda iken diğer mühendislik malzemelerinin sahip olmadığı ilk halini hatırlama ve süperelastik özelliğini yüksek sıcaklıklarda da muhafaza edebilmesi, yüksek faz dönüşüm sıcaklıklarında mümkün olacaktır.

NiTiHf alaşımı NiTi ye kıyasla daha yüksek faz dönüşüm sıcaklığına sahip olmakla birlikte, literatürde bu alaşım üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde uygulanan ısıtma işleminin, alaşımın faz dönüşüm sıcaklığını artırıcı etki yaptığı görülmektedir [63]. Her ne kadar NiTiHf SMA üzerine yüzey bütünlüğü karakteristikleri açısından yapılan çalışmalar mevcut ve yok denemeyecek kadar fazla olsa da, bu çalışmalar alaşımın üretimi sonrası yapılan çalışmalar olup, alaşım malzemesinin talaşlı imalatı ve talaşlı imalat sonrası işleme prosesinin malzemenin yüzey ve yüzeyaltı bölgelerinde neden olduğu değişimleri inceleyen herhangi bir çalışma dünya literatüründe şu an mevcut değildir.

Alaşımların üretilmesinde farklı yöntemler kullanılabileceği gibi, üretilen alaşımın kullanıma uygun hale getirilmesi için bir üretim yöntemi tekniğine ihtiyaç vardır. Geleneksel talaşlı imalat yöntemi burada alaşımı kullanıma uygun profile getirmede en uygun yöntemlerden biridir. Öyle ki, geleneksel olmayan ve kullanım alanı henüz yaygınlaşma aşamasında olan imalat yöntemleri ele alındığında ki bu yöntemlerden biri de eklemeli imalattır, geleneksel talaşlı imalat yöntemlerine kıyasla birçok avantaj sağlamakla birlikte, nihai ürünün yüzey kalitesinin iyileştirilmesinde yine talaşlı imalat yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır [64, 65].

Görüleceği üzere talaşlı imalatın yüzey bütünlüğü karakteristikleri üzerine etkilerinin araştırıldığı bu çalışmada elde edilen sonuçlar ilk olma özelliğinin yanı sıra, başta ülkemiz olmak üzere dünyadaki uzay, havacılık ve biyomedikal endüstrisindeki firmalara yol gösterici bir kılavuzluk görevi üstleneceği ve dünya literatürüne büyük katkı sağlayacağı aşîkâr bir durumdur.

Bahsi geçen yüzey bütünlüğü karakteristikleri özellikle şekil hafızalı malzemeler için diğer mühendislik malzemelerine oranla daha önemlidir çünkü sadece mekanik özellikleri değil şekil hafıza özellikleride yüzey ve yüzeyaltı bölgelerde değişime uğramakta ve bu nedenle işlenen parçalar arzu edilen performansı sergileyememektedirler [66]. Bu bakımdan yüzey bütünlüğü konusu tüm şekil hafızalı malzemeler için oldukça önemlidir.

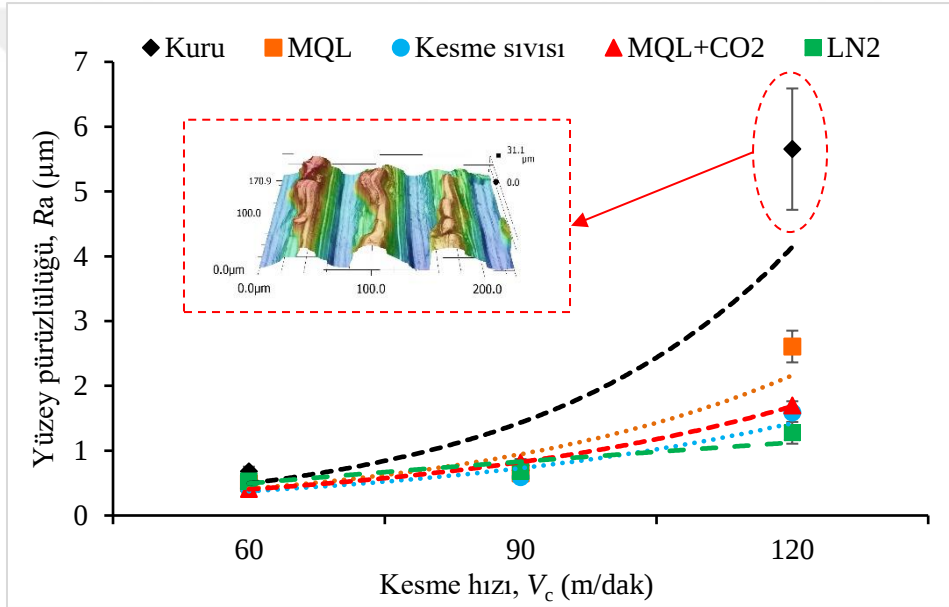
3.4.1 İş Parçası Yüzey Kalitesi

Yüzey kalitesi talaşlı imalatın genelinde aranan bir özellik olup, talaşlı imalat sonrası yüzey kalitelerinin iyi olması hedeflenmektedir. Özellikle havacılık ve uzay sanayisinde yüzey kalitesinin iyi olmasına önem verilmektedir. Yüzey kalitesi teorik olarak ilerleme ve kesici takımın burun yarıçapı gibi parametrelerden etkilenmektedir[67]. Fakat iş parçası malzemesinin yüzey kalitesi kesici takım aşınması, kesme hızı, talaş kırıcı formu ve kullanılan soğutucu cinsine göre de değişiklik gösterebilmektedir.

Yapılan testler sonrasında iş parçalarının yüzeylerinden beş farklı yüzey pürüzlülük değeri ölçülmüş ve ortalamaları alınarak kesme hızına ve kesme koşuluna bağlı olarak Şekil 3.13’de sunulmuştur. Yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde, yüksek kesme hızı olan 120 m/dak kesme hızında yüzey pürüzlülük değerlerinde büyük bir artış gözlemlenmiştir. Bu durum yüksek kesme hızında takım aşınmasının fazla olması ile açıklanabilir.

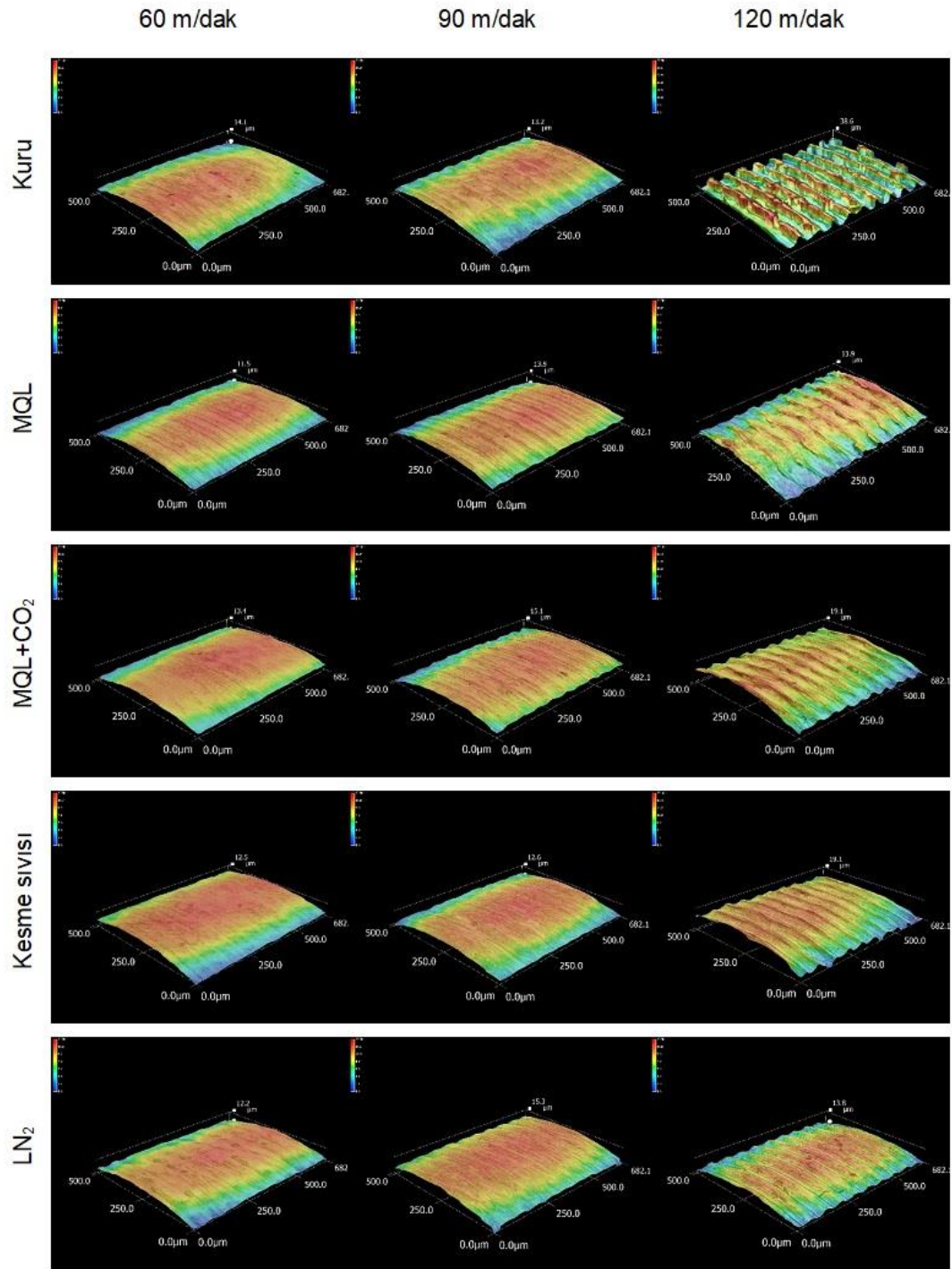
60 m/dak kesme hızında oluşan yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde en yüksek pürüzlülük değerini oluşturan kuru kesme koşulu olmuştur. Kuru kesme sonrası oluşan yüzeyin pürüzlülük değeri ise 0,67 μm olarak ölçülmüştür. Minimum miktarda yağlama koşulu ise 0,49 pürüzlülük değeri ile kuru kesme koşulundan yaklaşık olarak %26 daha az pürüzlülük değeri oluşturmuştur. Kesme sıvısı koşulunda %38, MQL+CO₂ yardımcı kesme koşulunda %40 ve sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda ise %20 oranında daha az pürüzlülük değeri ölçülmüştür. En yüksek kesme hızı olan 120 m/dak kesme hızı ile yapılan testler sonrasında ölçülen pürüzlülük değerleri incelendiğinde en yüksek değer 5,6 μm ile

kuru kesme koşulunda olmuştur. Pürüzlülük değerinin bu kadar yüksek olmasının sebebi 120 m/dak kesme hızında kuru kesme koşulunda kesici takımın aşınma miktarının fazla olması ve takım geometrisinin bozulması ile açıklanabilir. Minimum miktarda yağlama koşulundaki pürüzlülük değeri ise kuru kesme koşulundan yaklaşık olarak %53 oranında daha azdır. Kesme sıvısı koşulunda ve MQL+CO₂ koşulunda sırasıyla 1,6 ve 1,7 µm pürüzlülük değeri ölçülmüştür ve kuru kesme koşulundan %71 ve %69 oranında daha az çıkmıştır. En düşük yüzey pürüzlülük değeri ise sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda oluşmuştur. 1,3 µm olarak ölçülen değer kuru kesme koşulundan yaklaşık olarak %77 daha azdır. Görüldüğü üzere kesme operasyonları esnasında uygulanan soğutma koşullarının yüzey kalitesine etkisi oldukça fazla olmuştur.



Şekil 3.13. Farklı kesme hızı ve farklı kesme koşullarında oluşan yüzey pürüzlülük değerleri.

Şekil 3.14’de dijital optik mikroskop yardımı ile alınan yüzey topografi görüntüleri kesme hızına ve kesme koşuluna bağlı olarak sunulmuştur. Topografi görüntülerine bakıldığında kesme hızının artması ile yüzey kalitesinde azalma olduğu görülmektedir. Kesme hızının artması ile yüzey kalitesindeki azalma kesici takımın aşınması ile açıklanmaktadır. Kesme hızının artması ile aşınma miktarlarındaki artışı önceki bölümde incelemiştir. Görüldüğü üzere kesme hızındaki artış aşınma miktarını etkilemiş ve takım geometrisindeki değişime sebep olmuştur. Böylelikle iş parçasının yüzeyinde bozulmalar olmuş ve yüzey pürüzlülük değerlerinde artışa sebep olmuştur.



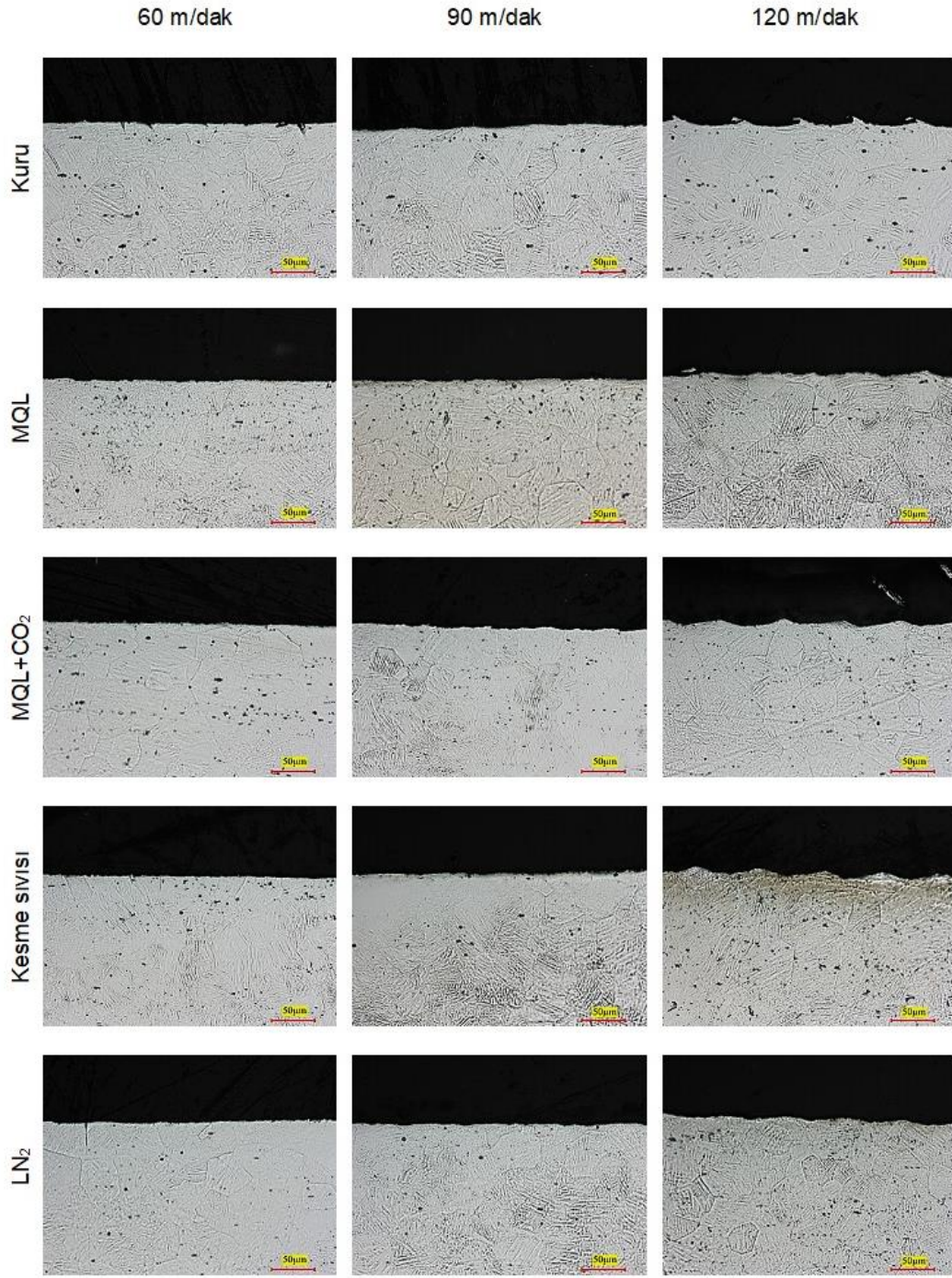
Şekil 3.14. Kesme hızına ve kesme koşuluna bağlı olarak işlenmiş yüzeyden alınan topografi görüntüleri

Aşınma miktarının en fazla olduğu kuru kesme koşulunun en yüksek hızı en kötü yüzeyi oluşturmuştur. Bu durum kesici takımın burun bölgesinin ciddi oranda aşınmaya maruz

kalması ile ilişkilendirilebilir. Takımın aşınması ve takım geometrisinin bozulması yüzey kalitesini olumsuz yönde etkilemiştir. Yüzey topografi görüntüleri pürüzlülük değerlerini destekler nitelikte olup en yüksek kesme hızında en iyi yüzey sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda oluşmuştur.

3.4.2 Tane Yapısı ve Deformasyonu

İşlenmiş numunelerin bakalite alma ve dağalama işlemlerinden sonra dijital optik mikroskop altında alınan mikroyapı görüntüleri bu başlık altında incelenmiştir. Talaşlı imalat operasyonunda meydana gelen mekanik ve termal etkilerden dolayı iş parçasının yüzeyinden itibaren oluşturduğu mikroyapısal değişimleri gözlemlemek için optik mikroskop altında incelenmiştir. Şekil 3.15’de dijital optik mikroskop yardımıyla 600x büyütmede alınan mikroyapı görüntüleri kesme hızına ve kesme koşuluna göre sunulmuştur. Şekil incelendiğinde NiTiHf şekil hafızalı malzemenin talaşlı imalatı sonrasında yüzey altındaki mikroyapısında herhangi bir deformasyon mekanizmasına rastlanmamıştır. Yüzey altı mikroyapısal değişimleri inceleyebilmek için daha kapsamlı analiz yapabilme kabiliyeti olan elektron mikroskobu veya atomik kuvvet mikroskobu gibi yöntemler kullanılabilir.



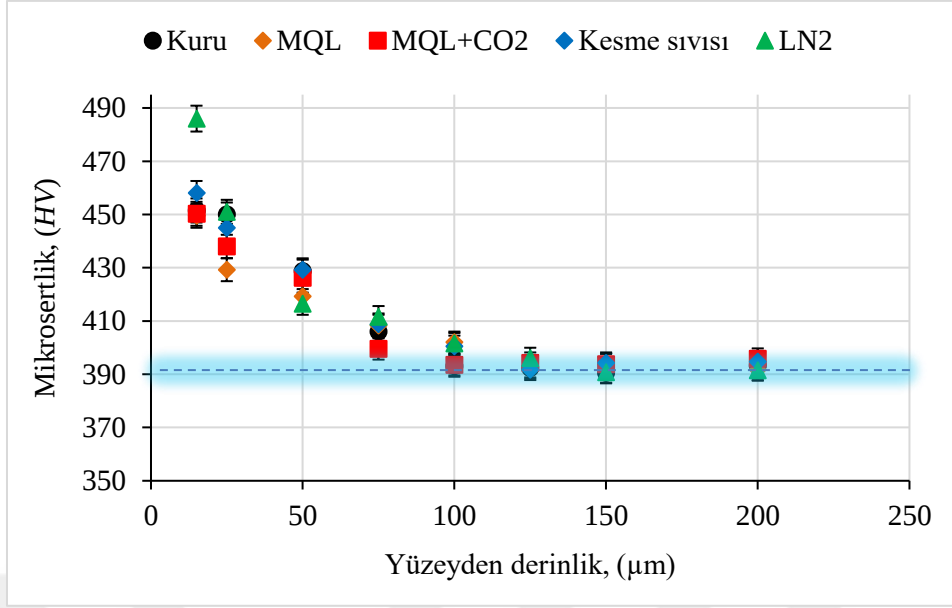
Şekil 3.15. Farklı kesme hızı ve farklı kesme koşullarında oluşan yüzey altı mikro yapı görüntüleri.

3.4.3 Yüzey Altı Sertliği

Talaşlı imalat sürecinde işlenen parçaların sertliklerindeki değişim pekleşme oranı ile ilgili olup, pekleşme oranı ise kesme sıcaklığından doğrudan etkilenmektedir[68]. Talaşlı

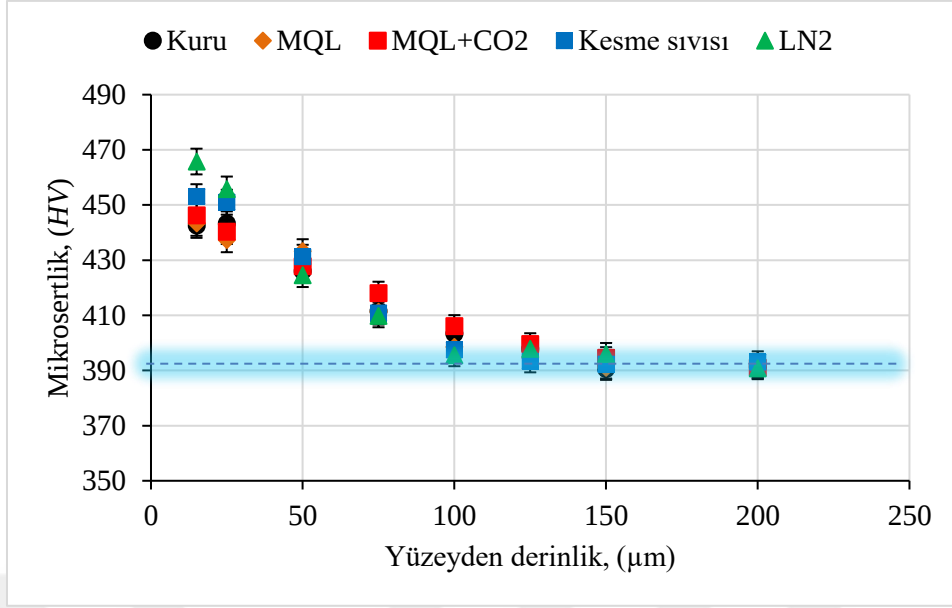
imalat sırasında meydana gelen kesme sıcaklıkları yüksek olduğunda termal etkiler mekanik etkilerden daha dominanttır ve plastik deformasyonu azaltıcı veya yok edici etkiye sahip olur[30]. Kesme operasyonları esnasında uygulanan soğutucu ve yağlayıcılar kesme bölgesinde oluşan sıcaklıkları azaltmakla birlikte plastik deformasyonun daha etkin olmasını ve dislokasyonlar sebebiyle malzemenin mikrosertlik değerlerin artmasına sebep olur[69].

Çalışma kapsamında yapılan deneyler sonrasında NiTiHf şekil hafızalı malzemenin işlenmiş yüzeyinin altındaki mikro sertlik değerleri ölçülmüştür. Yüzeyin hemen altından(15µm) itibaren ölçülmeye başlanılan sertlik değerleri 200µm derinliğe kadar ölçülmüştür. Her bir kesme koşulu için sertlik ölçümleri 4 er kez yapılmış olup ölçülen değerlerin ortalaması alınmıştır. Şekil 3.16'da 60 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarında oluşan yüzey altı mikrosertlik değerleri sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere işlenmiş yüzeyin hemen altından itibaren sertlik artışı meydana gelmiştir. NiTiHf şekil hafızalı malzemenin işlem görmemiş sertlik değeri 395 ± 5 HV olarak ölçülmüştür. Bu durumda tüm kesme koşulları için malzemenin işlem görmüş yüzeyinden itibaren etkilenmiş derinlik yaklaşık olarak 100µm olmuştur. Yüzeyin hemen altından alınan ölçümlerde en yüksek mikrosertlik değeri sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda meydana gelmiştir. Bu değer 486 HV olup malzemenin işlem görmemiş mikrosertliğinden yaklaşık olarak %23 oranında daha fazla olmuştur. Diğer kesme koşullarına bakıldığında birbiri ile çok yakın mikrosertlik değerlerine sahip oldukları görülmüştür. Şöyle ki, kuru kesme koşulunda 452 HV, MQL koşulunda 450 HV, MQL+CO₂ koşulunda 450 HV ve kesme sıvısı koşulunda ise 458 HV mikrosertlik oluşmuştur. Bu mikrosertlik değerleri birbirine çok yakın olup malzemenin işlem görmemiş sertliğinden ortalama %14 daha fazla olmuştur.



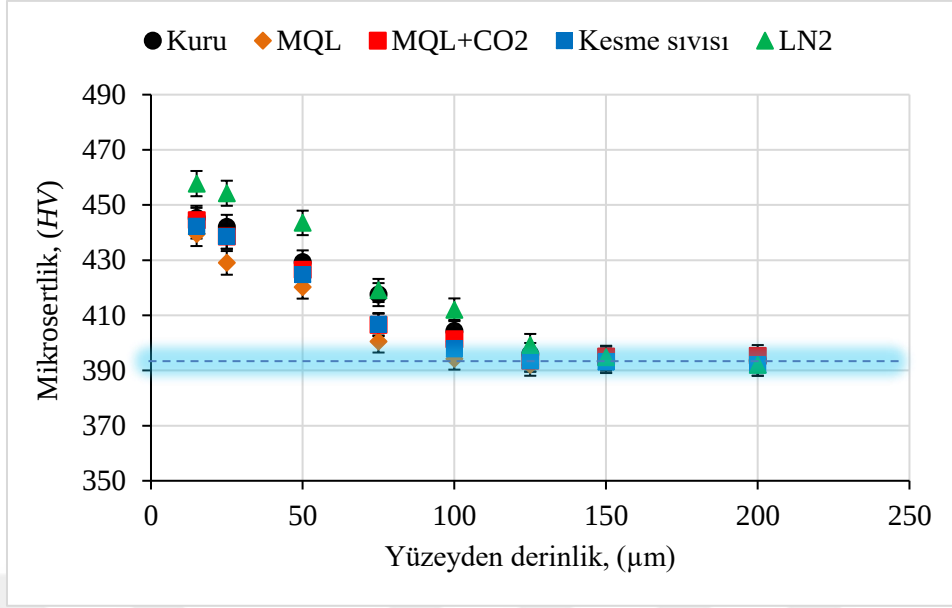
Şekil 3.16. 60 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarındaki yüzey altı mikrosertlik değerleri.

90 m/dak kesme hızında yapılan testlerin sonrasında işlenmiş yüzeyden alınan numuneler alınmış ve yüzey altı mikrosertlik değerleri ölçülmüştür. Bu değerler kesme koşuluna bağlı olarak grafiğe dönüştürülmüş ve Şekil 3.17’de sunulmuştur. 60 m/dak kesme hızında yapılan deneylerde olduğu gibi işlenmiş yüzeyin altında pekleşme meydana gelmiştir. Bu pekleşme tüm kesme koşulları için malzemenin işlenmiş yüzeyinden yaklaşık olarak 100 μm derinliğe kadar devam etmiştir. 100 μm derinlikten sonra malzemenin işlem görmemiş sertlik değerine ulaşmış ve sonrasında 200 μm derinliğe kadar kararlı bir mikrosertlik değerleri oluşmuştur. İşlenmiş yüzeyin hemen altından alınan sertlik değerleri incelendiğinde en yüksek sertlik değeri 466 *HV* ile sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda olmuştur. Bu değer malzemenin işlem görmemiş sertliği ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak %18 daha fazladır. En düşük mikrosertlik değeri kuru kesme koşulunda 442 *HV* olmuştur. Kuru kesme koşulunda oluşan bu değer ise malzemenin işlem görmemiş sertlik değerinden %12 daha fazla olmuştur.



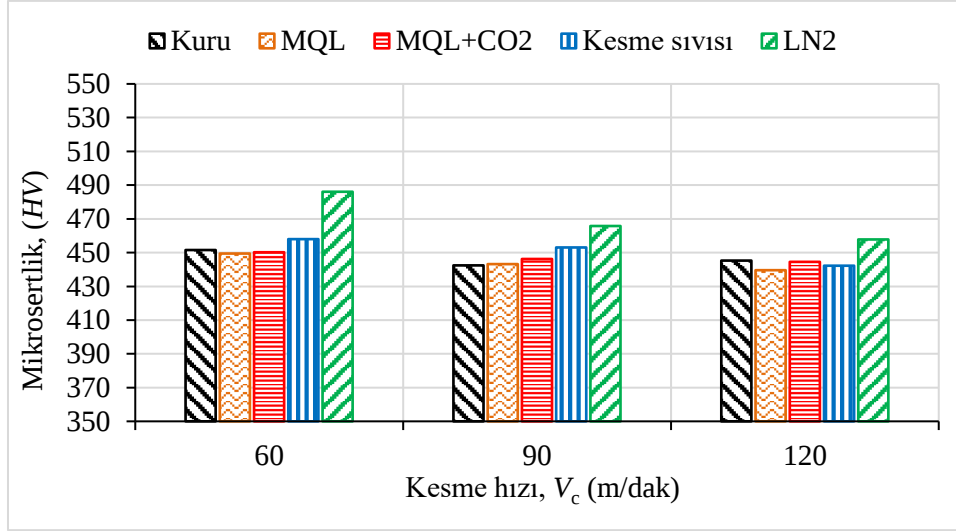
Şekil 3.17. 90 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarındaki yüzey altı mikrosertlik değerleri.

Çalışma kapsamında yapılan deneylerde en yüksek kesme hızı olan 120 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarında oluşan yüzey altı mikrosertlik değerleri Şekil 3.18’de sunulmuştur. Kesme koşuluna bağlı olarak oluşturulan şekil incelendiğinde diğer kesme hızlarında olduğu gibi işlenmiş yüzeyin altında pekleşme meydana gelmiştir. Yüzeyin hemen altından alınan sertlik değerlerindeki en yüksek mikrosertlik değeri diğer kesme hızlarında olduğu gibi sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda meydana gelmiştir. Böylece en yüksek sertlik değeri 458 HV olmuştur. Sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda meydana gelen bu sertlik değeri malzemenin işlem görmemiş sertlik değerinden yaklaşık olarak %16 daha fazla olmuştur. En düşük sertlik değeri ise 440 HV değerinde MQL koşulunda olmuştur. Yüzeyin hemen altında meydana gelen en düşük sertlik değeri ise malzemenin işlem görmemiş sertlik değerinden yaklaşık olarak %11 daha fazla olmuştur.



Şekil 3.18. 120 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarındaki yüzey altı mikrosertlik değerleri.

Farklı kesme hızlarında ve kesme koşullarında yüzeyin hemen altında (15 μm) meydana gelen sertlik değişimleri Şekil 3.19’da sunulmuştur. Şekilde 60, 90 ve 120 m/dak kesme hızlarında oluşan sertlik değerleri ayrı ayrı ve kesme koşuluna bağlı olarak oluşturulmuştur. Şekil kesme hızı açısından incelendiğinde, kesme hızının artması ile tüm kesme koşullarındaki mikrosertlik değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu durum kesme hızının artması ile artan kesme sıcaklığı ile açıklanabilir. Şöyle ki, kesme sıcaklığı arttıkça termal etki mekanik etkiyi ve plastik deformasyonu azaltma eğilimi gösterir[30].



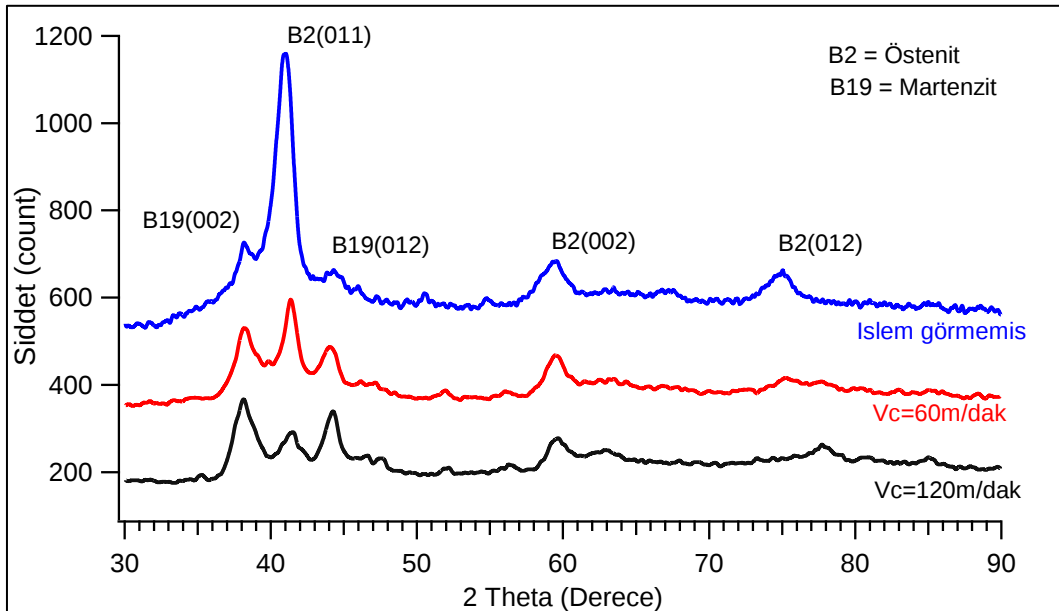
Şekil 3.19. Farklı kesme koşullarında ve kesme hızlarında işlenmiş yüzeyden 15 μ m derinlikte oluşan mikrosertlik değerleri.

3.4.4 XRD

Eğik kesme metodu ile talaşlı imalat operasyonları tamamlanan NiTiHf şekil hafızalı malzemelerin XRD analizleri bu bölüm altında incelenmiştir. XRD analizleri sonrasında elde edilen datalardan yola çıkarak, işlenmiş yüzeylerdeki mikro sertlik değerlerindeki değişimlerin, işlenmiş yüzey altında meydana gelen tane küçülmeleri ve talaşlı imalat operasyonundan kaynaklanan olası faz dönüşümü analizlerinin yorumlanmasına olanak sağlayan bir yöntemdir. XRD analizlerinden elde edilen değerler grafiklere dönüştürülür ve oluşan şekillerde piklerin şiddetine ve genişliğine bağlı olarak meydana gelen değişim yorumlanır. Literatürde yapılan çalışmalarda farklı malzemeler ve şekil hafızalı malzemeler için, XRD grafiklerindeki pik genişliklerinin artış göstermesi malzemenin yapısındaki tanelerin küçülmesi olarak yorumlanmaktadır [70]. Şekil hafızalı malzemede talaşlı imalat sırasında ortaya çıkan yüksek ısı sonucu malzeme fazının sıcaklık oranına bağlı olacak şekilde östenit faza doğru dönüşümü söz konusudur. Ancak talaşlı imalat operasyonundan sonra soğuyarak oda sıcaklığına ulaşan şekil hafızalı malzeme martenzit faza dönüşür. Ek olarak malzemenin faz dönüşümüne mekanik etkilerde sebep olabilmektedir. NiTiHf malzemesinin şekil hafıza özelliği olduğu için faz analizlerinin iyi incelenmesi gerekmektedir.

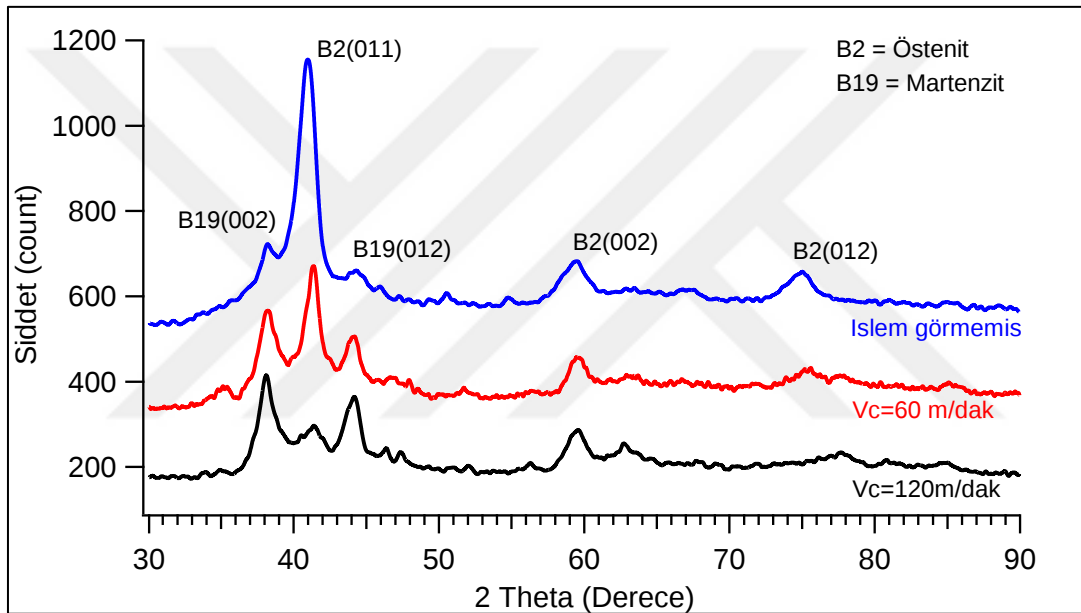
Şekil 3.20’de kesme hızına bağlı olarak kuru kesme koşulunda işlenmiş numunelerin XRD profillerinde meydana gelen değişimler işlenmemiş malzemenin XRD profili ile

kıyaslanmıştır. İşlem görmemiş malzemenin XRD grafiğindeki ana pik 40-43 derece arasında oluşmuştur ve bu pik östenit fazı göstermektedir. Bu durumda işlem görmemiş malzemenin yüzeyinin östenit yapıda olduğu anlaşılmaktadır. Fakat NiTiHf şekil hafızalı malzemenin oda sıcaklığındaki fazı martenzit fazıdır. XRD sonucunda östenit fazın çıkması durumu malzemenin üretim esnasından kaynaklanan bir durum olduğu düşünülmektedir. Görüleceği üzere işlenmemiş malzemesinin 011 düzlemindeki B2 ana pik şiddeti talaşlı imalat sonrası azalma eğilimi göstermiştir. İşlenmiş numunelerin XRD profilleri incelendiğinde kesme hızının artması ile pik şiddetlerinde azalma görülmüştür. 60 m/dak kesme hızındaki B2(011) piki işlem görmemiş malzemeye göre %62 azalış gösterirken 120 m/dak kesme hızında bu azalma %83 olmuştur. Bu durum kesme hızının artması ile artan sıcaklık ile ilgilidir. Artan sıcaklıkla beraber daha fazla oranda östenit fazı sıcaklığa maruz kalır ve soğuyarak martenzit yapıya dönüşür. Malzemenin faz analizi hususunda incelenmesi gereken bir diğer oluşumlar B2(011) östenit pikinin yanlarında oluşan B19(002) ve B19(012) martenzit pikleridir. Görüleceği üzere talaşlı imalatın etkisi ile işlenmemiş malzemeye ait B19 pik şiddetleri artış göstermiştir. Bu artış kesme hızının artışı ile doğru orantılı olarak gerçekleşmiştir. 60 m/dak kesme hızındaki martenzit piklerinin (002-012) ortalama artış oranı %3 olmuştur. Kesme hızının 120 m/dak olduğu durumda ise bu artış oranı %15 olmuştur.



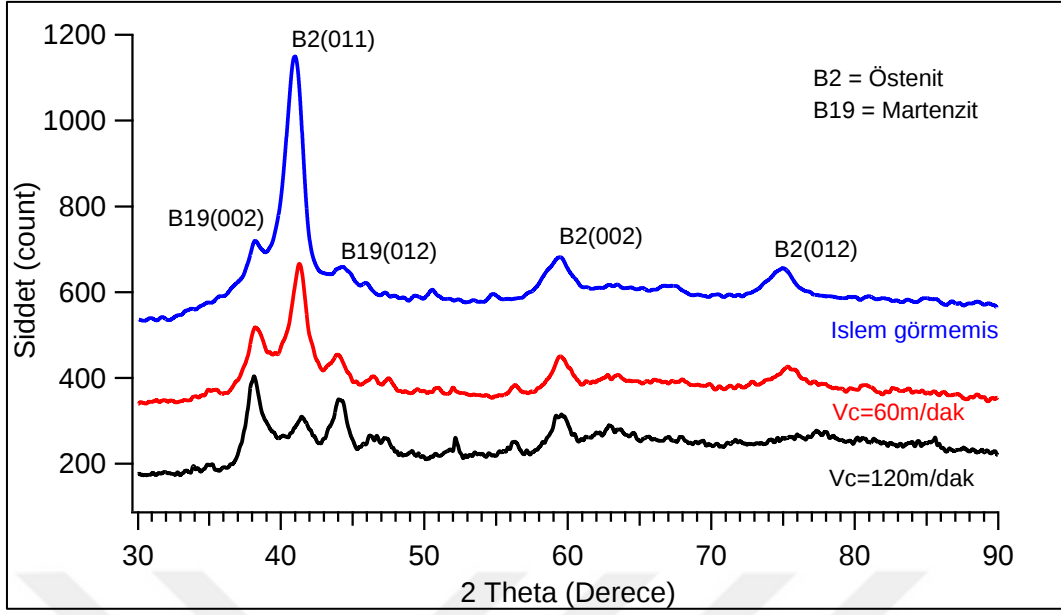
Şekil 3.20. Kuru Kesme koşulunda ve kesme hızına bağlı olarak oluşan XRD değerleri.

Şekil 3.21’de minimum miktarda yağlama koşulunda oluşan XRD profilleri kesme hızına bağlı olarak sunulmuştur. Malzemenin ana piki olan B2(011) dikkate alındığında 60 m/dak kesme hızında işlem görmemiş malzemeye göre pik şiddetinde %47 azalış gösterirken, 120 m/dak kesme hızında ise %80 oranında bir azalma görülmüştür. Anlaşılabacağı üzere minimum miktarda yağlama koşulunda da kesme hızının artması ile ana pik olan östenit pikinde azalma meydana gelmiştir. Ana pikin yanlarında oluşan martenzit pikleri ise kesme hızının artması ile artış göstermiştir. İşlem görmemiş malzemeye göre 60 m/dak kesme hızındaki martenzit pikleri ortalama %35 artış gösterirken, 120 m/dak kesme hızında bu artış %50 olmuştur.



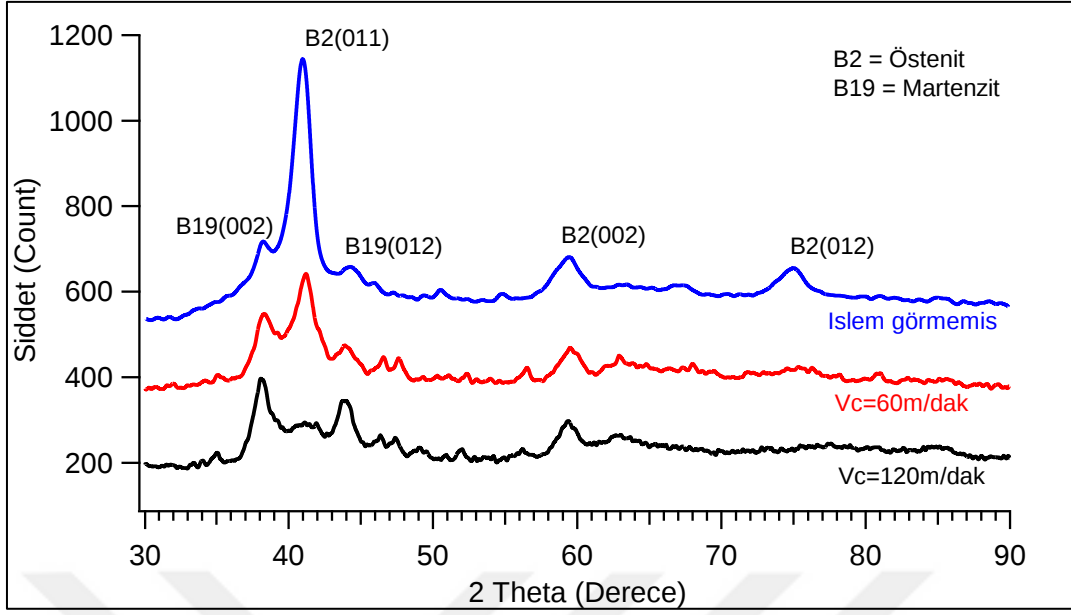
Şekil 3.21. MQL koşulunda ve kesme hızına bağlı olarak oluşan XRD değerleri.

MQL+CO₂ kesme koşulunda oluşan XRD profilleri Şekil 3.22’de kesme hızına bağlı olarak sunulmuştur. Grafik genel olarak incelendiğinde işlem görmemiş malzemenin ana piki olan B2(011) östenit pikinin şiddeti kesme hızının artması ile azalma eğilimi göstermiştir. Kesme hızının 60 m/dak olduğu durumda %47 azalma görülürken, kesme hızının 120 m/dak ya çıkması ile pik şiddetinde %80 azalma olmuştur. B19(002) ve B19(012) martenzit piklerinde ise işlem görmemiş malzemeye göre kesme hızının artması ile bir artış söz konusu olmuştur. Bu artış oranı 60 m/dak kesme hızında ortalama %2 iken, 120 m/dak kesme hızında ise %38 olmuştur.



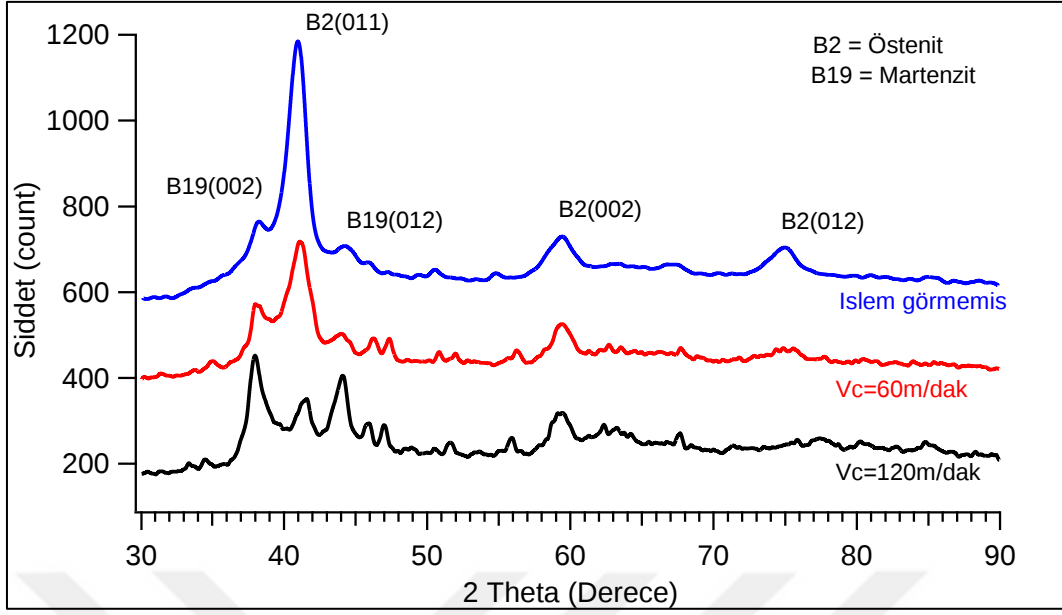
Şekil 3.22. MQL+CO₂ koşulunda ve kesme hızına bağlı olarak oluşan XRD değerleri

Kesme sıvısı ile soğutma koşulunda oluşan XRD profiller Şekil 3.23’de sunulmuştur. Grafikte de görüldüğü üzere işlem görmemiş malzemenin XRD profili ile işlem görmüş numunelerin XRD profilleri arasında ciddi farklılıklar oluşmuştur. Ana pik olan B2(011) de pik şiddeti en yüksek olup kesme hızının artması ile östenit fazı ifade eden bu pik azalmıştır. Şöyle ki 60 m/dak kesme hızındaki pik şiddeti işlem görmemiş malzemeye göre %57 daha az olurken, 120 m/dak kesme hızında bu oran %84 olmuştur. Ana pikin yanlarındaki martenzit pikleri ise işlem görmemiş malzemeye göre kesme hızına bağlı olarak değişim göstermiştir. Bu değişim 60 m/dak kesme hızında %7 oranında azalma eğiliminde olurken, 120 m/dak kesme hızında ise %22 oranında artış eğiliminde olmuştur.



Şekil 3.23. Kesme Sıvısı koşulunda ve kesme hızına bağlı olarak oluşan XRD değerleri

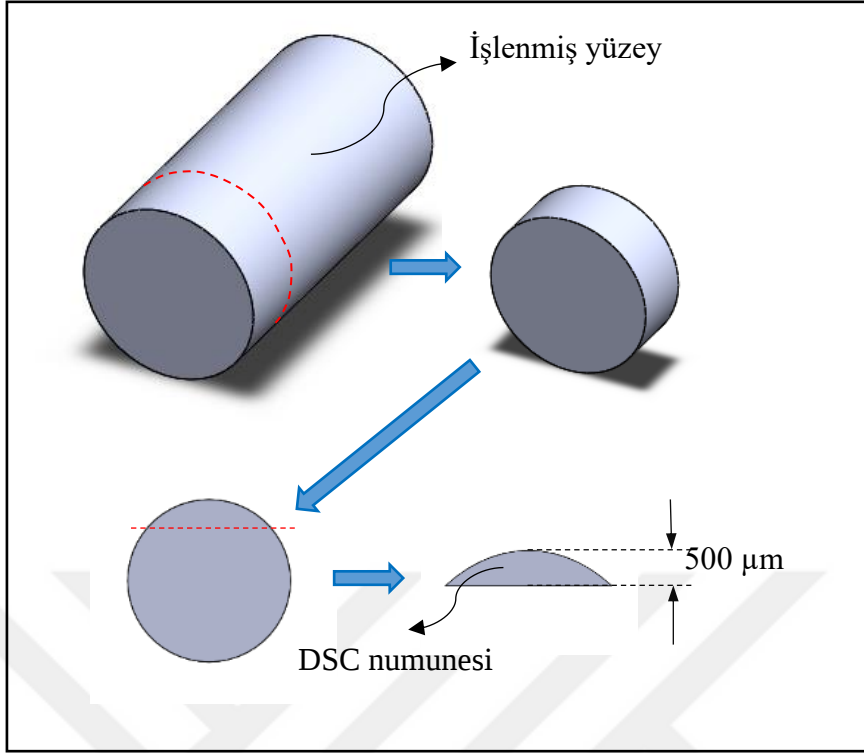
Şekil 3.24'te sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda oluşan XRD profilleri sunulmuştur. Diğer kesme koşullarında olduğu gibi farklı kesme hızları ile işlenen malzemelerin işlem görmemiş malzemeye göre pik şiddetlerinde büyük farklılıklar görülmüştür. (011) düzleminde işlem görmemiş malzemenin pik şiddeti referans alındığında, kesme hızının 60 m/dak olduğu durumda %48 oranında pik şiddetinde azalma olmuştur. Kesme hızının 120 m/dak olduğu durumda ise bu oran %72 olmuştur. Ana pik yanlarındaki martenzit piklerinde(B19) ise kesme hızının 60 m/dak olması durumunda ortalama %7 azalma görülürken, 120 m/dak kesme hızında %77 oranında artış gözlemlenmiştir.



Şekil 3.24. LN₂ koşulunda ve kesme hızına bağlı olarak oluşan XRD değerleri

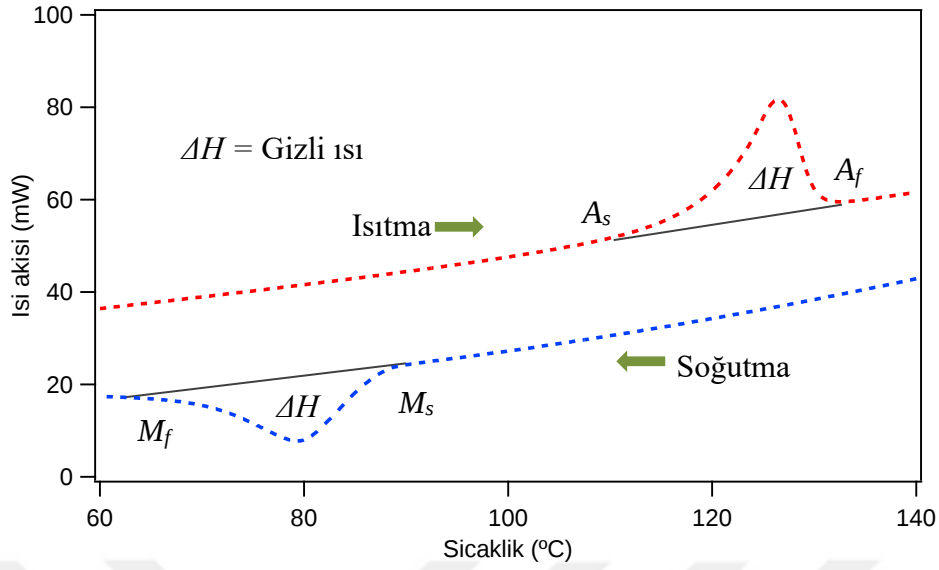
3.4.5 Faz Dönüşüm Sıcaklıkları

Diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) yöntemi, bir numunenin sıcaklığını arttırmak için gerekli olan ısı miktarını, referans bir numune ile karşılaştırmalı olarak ölçen termoanalitik bir yöntem olup, bu yöntemde referans ile numuneden gelen veya uzaklaşan ısı farkı sıcaklığa veya zamana bağlı olarak gösterilir[71]. DSC cihazlarında numune sıcaklığı ile referans sıcaklığı aynı tutulur. Eğer numune ile referans arasında bir sıcaklık farkı saptanırsa, sıcaklığı aynı tutmak için numuneye verilen enerji miktarı değiştirilir. Bu teknikle numunedeki faz değişimi esnasındaki ısı transferi miktarı saptanabilir [71]. Şekil 3.25’de bir DSC numunesinin hazırlanması aşamaları şematik olarak sunulmuştur.



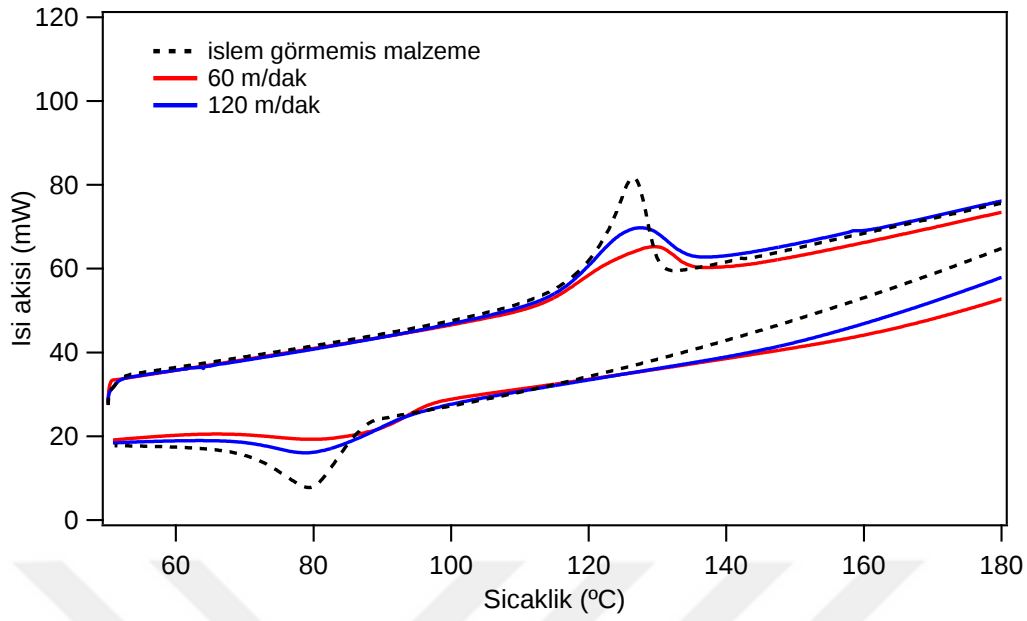
Şekil 3.25. DSC numunesinin hazırlanması.

Şekil 2.26’da görülen DSC eğrisinde ısıtma esnasında oluşan dönüşüm tepesi malzemenin martenzit fazından östenit fazına gerçekleşen endotermik dönüşümü gösterir. Soğutma işlemi sırasında oluşan dönüşüm tepesi ise malzemenin östenit fazından martenzit fazına gerçekleşen ekzotermik dönüşümü göstermektedir. Isıtma sırasında oluşan dönüşüm tepesinin başlangıç noktası östenit başlangıcı (A_s), bitiş noktası ise östenit bitişi (A_f) dir. Isıtma sırasında martenzit fazı östenit fazına östenit başlangıç (A_s) sıcaklığında dönüşmeye başlar ve östenit bitişi (A_f) sıcaklığında sona erer. Soğutma sırasında oluşan dönüşüm tepesinin başlangıç noktası ise martenzit fazına geçişin başlangıcı (M_s), bitiş noktası martenzit fazına geçişin bitişi (M_f) dir. Soğutma sırasında dönüşmüş olan östenit fazı tekrar martenzit fazına martenzit başlangıç (M_s) sıcaklığında dönüşmeye başlar ve martenzit bitişi (M_f) sıcaklığında sona erer. Dönüşüm tepelerinin altında kalan alan (ΔH) gizli ısı (latent heat) olarak tanımlanır.



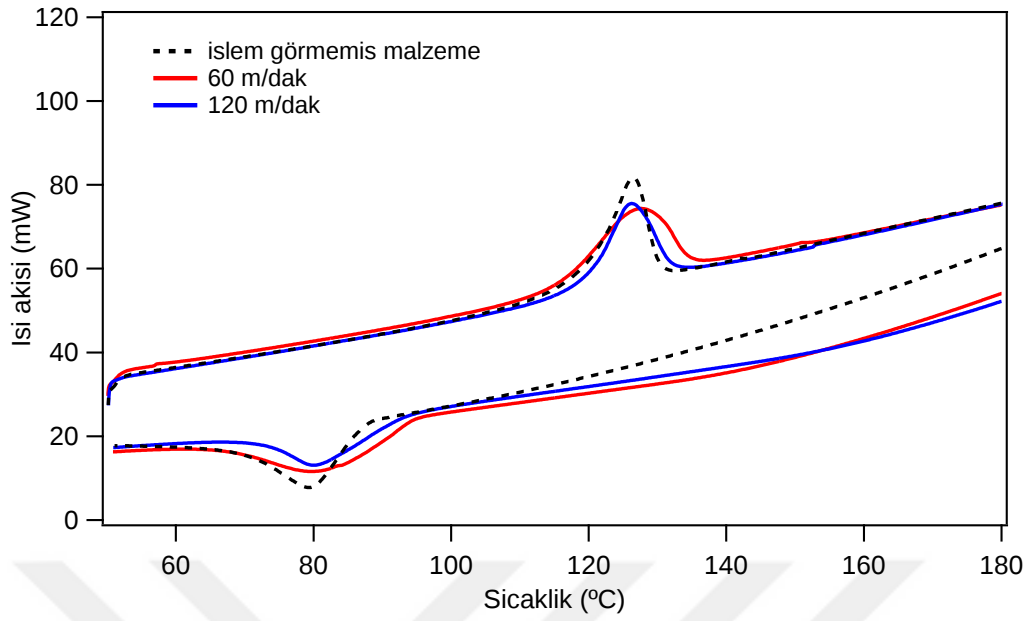
Şekil 3.26. İşlem görmemiş NiTiHf malzemenin DSC grafiği.

Şekil 3.27’te kuru kesme koşulunda 60 m/dak ve 120 m/dak kesme hızında elde edilen DSC eğrileri sunulmuştur ve işlem görmemiş malzemenin DSC eğrisi ile kıyaslanmıştır. DSC ölçümlerinde ısıtma soğutma hızı 10 °C/dak olarak alınmıştır [30]. Şekilde görüldüğü üzere işlem görmemiş malzemenin DSC eğrisi ile işlenmiş malzemelerin DSC eğrileri arasında farklılıklar olmuştur. Bu farklılıklar hem faz başlangıç bitiş sıcaklıklarında hem de gizli ısı değerlerinde görülmüştür. Isıtma esnasında işlem görmemiş, 60 m/dak kesme hızında ve 120 m/dak kesme hızında işlenmiş malzemelerin martenzit fazından östenit fazına geçiş başlangıç sıcaklıkları sırasıyla 107, 105 ve 103 °C’ dir. Östenit fazı bitiş sıcaklıkları ise yine sırasıyla 134, 141 ve 140 °C olmuştur. Gizli ısı değerleri kıyaslandığında işlem görmemiş malzemenin gizli ısı değeri 13.29 J/g iken 60 m/dak kesme hızında işlem görmüş malzemenin gizli ısı değeri 11.29 J/g, 120 m/dak kesme hızında ise bu değer 11.06 J/g olmuştur. Soğutma sırasındaki DSC eğrileri incelendiğinde östenit fazından martenzit fazına geçiş başlangıç sıcaklıkları sırasıyla 94, 102 ve 100 °C olurken, martenzit fazı bitiş sıcaklıkları ise sırasıyla 59, 61 ve 56 °C olarak ölçülmüştür. Soğutma sırasında oluşan gizli ısı değerleri işlem görmemiş malzemede 12.85 J/g, 60 m/dak kesme hızında işlenmiş malzemede 10.38 J/g ve 120 m/dak kesme hızında işlenmiş malzemede 10.74 J/g olarak ölçülmüştür.



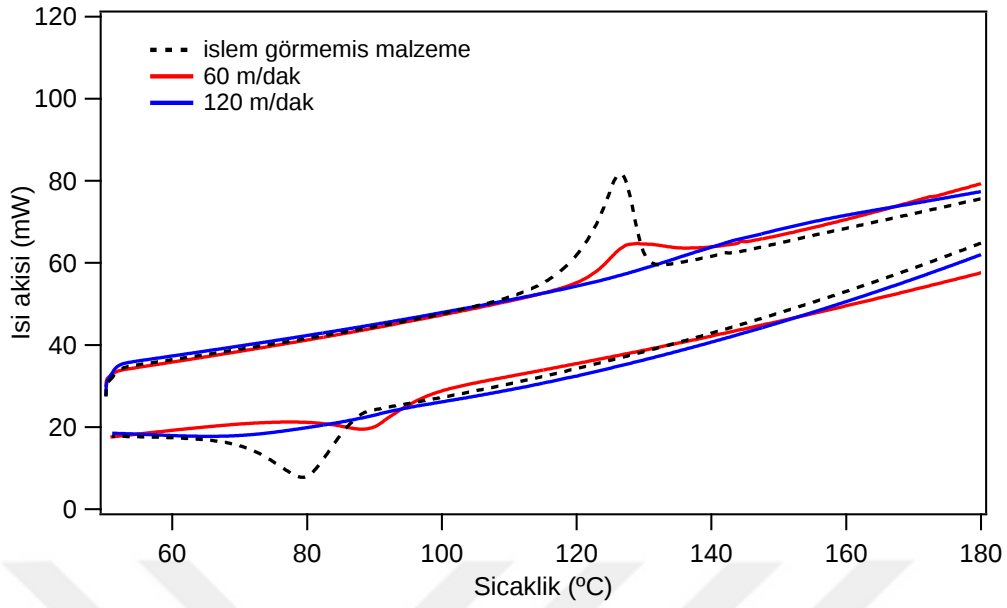
Şekil 3.27. Kuru kesme koşulunda oluşan DSC eğrileri.

Minimum miktarda yağlama koşulunda yapılan testlerin sonucunda elde edilen DSC eğrileri Şekil 3.28’de sunulmuştur. 60 m/dak ve 120 m/dak kesme hızlarında oluşan DSC eğrileri işlem görmemiş malzemenin DSC eğrisiyle kıyaslanmıştır. Malzemenin ısıtma esnasında martenzit fazından östenit fazına geçiş başlangıç sıcaklıkları işlem görmemiş malzeme, 60 ve 120 m/dak kesme hızında işlenmiş malzeme için sırasıyla 107, 105 ve 109 °C’dir. Isıtma esnasındaki östenit bitiş sıcaklıkları ise sırasıyla 134, 142 ve 136 °C olmuştur. Gizli ısı değerleri ise sırasıyla 13.29, 13.74 ve 11.74 J/g olarak ölçülmüştür. 60 m/dak kesme hızında işlenmiş malzemenin gizli ısı değeri işlem görmemiş malzemeye göre %3 daha fazla olmuştur. 120 m/dak kesme hızında ise %12 oranında azalma olmuştur. Gizli ısının işlem görmüş malzemelerde azalması faz dönüşümü için gerekli olan enerjinin daha az olması gerektiğindendir. Soğutma esnasında malzemenin östenit fazından martenzit fazına geçiş başlangıç sıcaklıkları sırasıyla 94, 100 ve 96 °C olmuştur. Martenzit fazı bitiş sıcaklıkları ise 59, 56 ve 60 °C olarak ölçülmüştür. Soğutma esnasında oluşan DSC eğrilerinden elde edilen gizli ısı değerleri işlem görmemiş malzemede 12,85 J/g iken bu değer 60 m/dak da 12.88 J/g olmuştur. 120 m/dak da ise 10.23 J/g olarak ölçülmüştür.



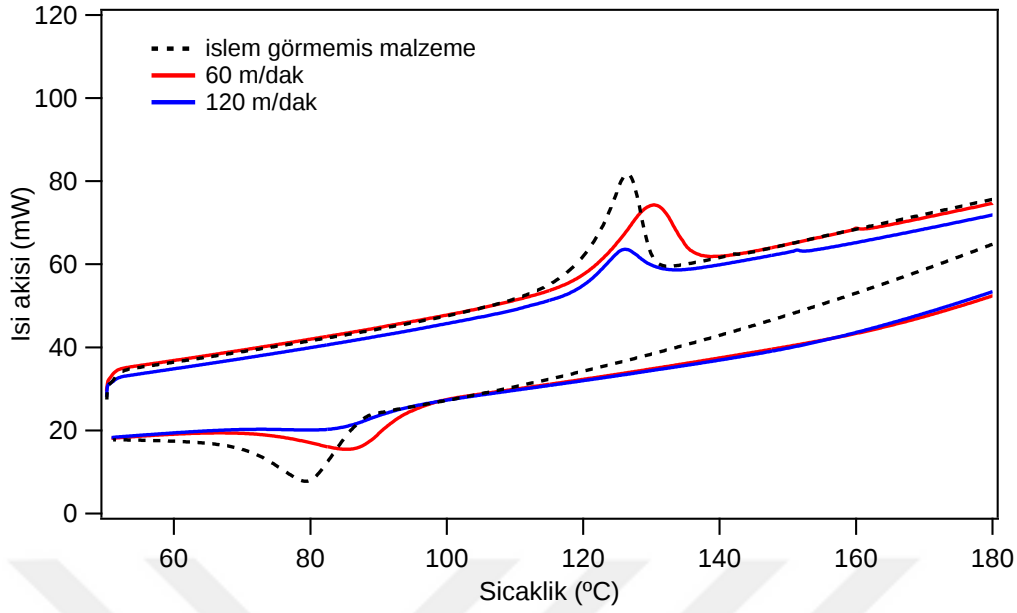
Şekil 3.28. MQL koşulunda oluşan DSC eğrileri.

Şekil 3.29’da kesme sıvısı koşulunda oluşan DSC eğrileri sunulmuştur. Isıtma sırasında malzemenin martenzit fazından östenit fazına geçiş başlangıç sıcaklıkları sırasıyla 107, 116 ve 126 °C olmuştur. Östenit fazı bitiş sıcaklıkları ise sırasıyla 134, 140 ve 192 °C’dir. Kesme sıvısı koşuluyla yapılan testler sonrasında alınan DSC eğrilerinden elde edilen gizli ısı değerleri sırasıyla 13.29, 6.18 ve 5.77 J/g olarak ölçülmüştür. Soğutma sırasında malzemenin östenit fazından tekrar martenzit fazına geçiş başlangıç sıcaklıkları sırasıyla 94, 104 ve 98 °C’dir. Martenzit fazı bitiş sıcaklıkları ise sırasıyla 59, 67 ve 59 °C’dir. Oluşan gizli ısı değerleri işlem görmemiş malzemede 12.85 J/g, 60 m/dak da 10 J/g ve 120 m/dak da 3.38 J/g olarak elde edilmiştir.



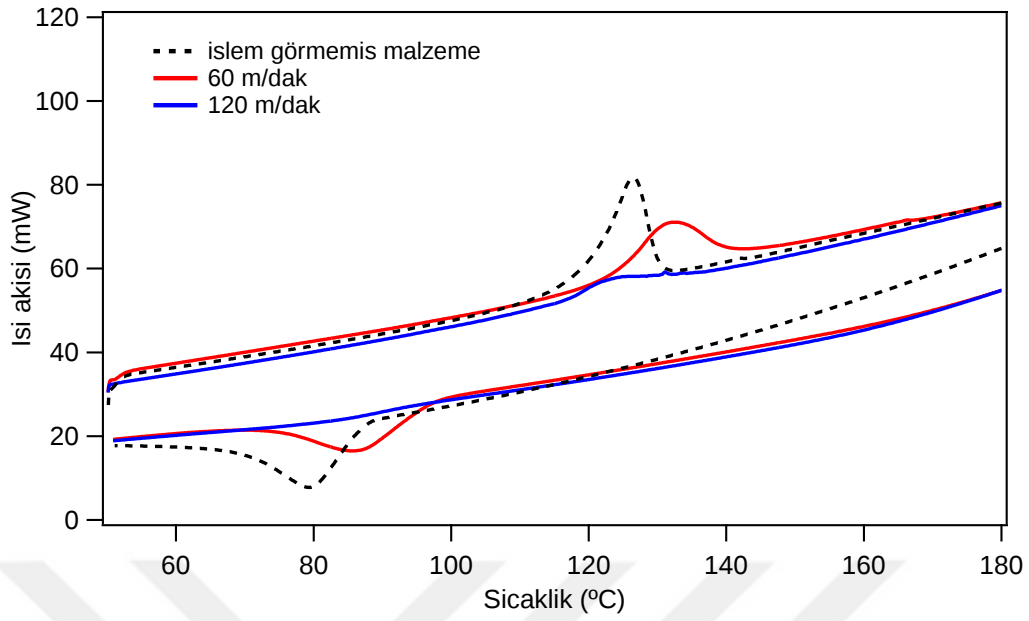
Şekil 3.29. Kesme sıvısı koşulunda oluşan DSC eğrileri.

MQL+CO₂ kesme koşulunda yapılan test sonuçlarında elde edilen DSC eğrileri Şekil 3.30'da kesme hızına bağlı olarak sunulmuştur. İşlem görmemiş malzemenin ısıtma sırasında östenit başlangıç sıcaklığı 107 °C, östenit bitiş sıcaklığı ise 134 °C olarak ölçülmüştür. Gizli ısı değeri 13.29 J/g olmuştur. 60 m/dak kesme hızında işlenen malzemenin ısıtma sırasında östenit başlangıç sıcaklığı 106 °C iken bitiş sıcaklığı 141 °C olmuştur. Gizli ısı değeri ise 12.73 J/g' dır. 120 m/dak kesme hızında işlenen malzemenin östenit başlangıç sıcaklığı 108 °C, bitiş sıcaklığı 137 °C olmuştur. Gizli ısı değeri ise 120 m/dak da 8.18 J/g olmuştur.



Şekil 3.30. MQL+CO₂ koşulunda oluşan DSC eğrileri.

Sıvı azot yardımlı soğutma koşulunda yapılan testlerin sonucunda elde edilen DSC eğrileri Şekil 3.31’de sunulmuştur. Talaşlı işleme sonrasında oluşan DSC eğrileri işlem görmemiş malzemenin DSC eğrisiyle kıyaslanmıştır. Malzemenin ısıtma esnasında martenzit fazından östenit fazına geçiş başlangıç sıcaklıkları işlem görmemiş malzeme, 60 ve 120 m/dak kesme hızında işlenmiş malzeme için sırasıyla 107, 114 ve 111 °C’dir. Isıtma esnasındaki östenit bitiş sıcaklıkları ise sırasıyla 134, 145 ve 139 °C olmuştur. Gizli ısı değerleri ise sırasıyla 13.29, 9.56 ve 7.31 J/g olarak ölçülmüştür. Soğutma esnasında malzemenin östenit fazından martenzit fazına geçiş başlangıç sıcaklıkları sırasıyla 94, 106 ve 92 °C olmuştur. Martenzit fazı bitiş sıcaklıkları ise 59, 59 ve 67 °C olarak ölçülmüştür. Soğutma esnasında oluşan DSC eğrilerinden elde edilen gizli ısı değerleri işlem görmemiş malzemede 12,85 J/g iken bu değer 60 m/dak da 12.67 J/g olmuştur. 120 m/dak da ise 2.32 J/g olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.31. LN2 koşulunda oluşan DSC eğrileri.

İşlem görmemiş malzemenin ve 60 m/dak kesme hızında talaşlı işlemeden sonra elde edilen numunelerin, östenit başlangıç sıcaklıkları(A_s), östenit bitiş sıcaklıkları(A_f), martenzit başlangıç sıcaklıkları(M_s) ve martenzit bitiş(M_f) sıcaklıklarının °C cinsinden değerleri Tablo 13'te sunulmuştur.

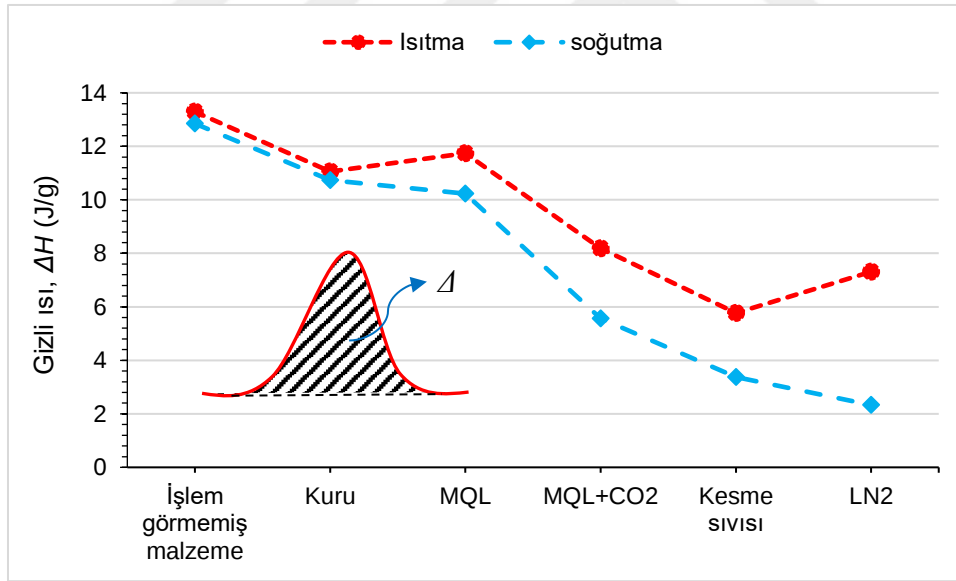
Tablo 3.1. 60 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarındaki faz dönüşüm sıcaklık değerleri.

NiTiHf	A_s (°C)	A_f (°C)	M_s (°C)	M_f (°C)
İşlem görmemiş malzeme	107	134	94	59
Kuru	105	141	102	61
MQL	105	142	100	56
Kesme sıvısı	116	140	104	67
MQL+CO ₂	106	141	103	57
LN ₂	114	145	106	59

Şekil 3.32'de 120 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarında işlenmiş numunelerin DSC eğrilerinden elde edilen gizli ısı değerleri sunulmuştur. Grafik incelendiğinde NiTiHf

şekil hafızalı malzemenin talaşlı işlenmesinin sonrasında DSC eğrilerindeki gizli ısının etkilendiği görülmektedir. Literatürde talaşlı imalat sonrasında yüzey ve yüzey altında meydana gelen deformasyonların ve deformasyon oranlarının gizli ısı değerini etkilediği bilinmektedir. Şöyle ki en fazla deformasyon gösteren kesme koşulunda dönüşüm için en az gizli ısı değeri oluşur. Bunun sebebi alınan örnek numunenin dönüşüme izin veren yüzdesiyle ilgilidir. Bu durum deformasyon mekanizmasının dönüşümü etkilemesi ile ilgilidir[18].

İşlem görmemiş malzemenin ısıtma sırasındaki gizli ısı değeri 13.29 j/g olurken soğutma esnasında ise 12.85 j/g olmuştur. Farklı kesme koşulları altında işlenen numuneler arasında ve ısıtma sırasında en yüksek gizli ısı değeri minimum miktarda yağlama koşulunda 11.74 j/g olmuştur. En düşük gizli ısı değeri ise sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda 2.33 g/j olarak karşımıza çıkmıştır. Soğutma sırasında ise en yüksek gizli ısı değeri kuru kesme koşulunda 10.74 j/g olarak meydana gelirken en düşük gizli ısı değeri 5.77 g/j olarak kesme sıvısı koşulunda meydana gelmiştir.



Şekil 3.32. 120 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarındaki gizli ısı değerleri.

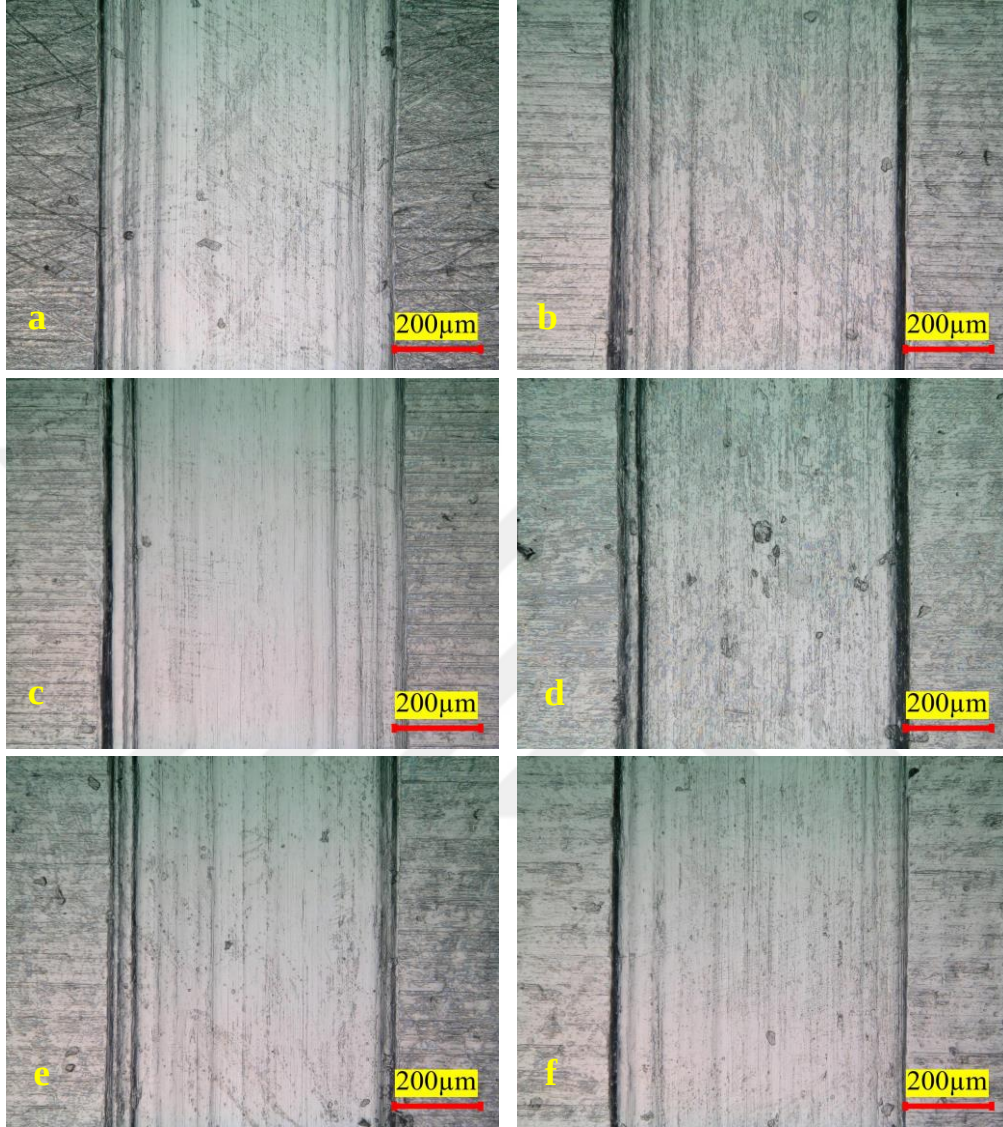
3.4.6 Aşınma Dayanımı

Talaşı imalat operasyonları tamamlanan NiTiHf şekil hafızalı malzemelerin aşınma testleri bu bölüm altında incelenmiştir. Talaşlı imalat ile işlenen malzemeler havacılık, otomotiv, inşaat, takım tezgâhları, hidrolik ve pnomatik sistemlerde başka parçalar ile birlikte çalışmakta ve bunun sonucunda aşınma mekanizmalarına maruz kalmaktadır. Kayma aşınma testleri uygulanan NiTiHf alaşım malzemeleri ileri-geri aşındırma tekniği ve “pin/ball-on-plate” yöntemi ile aşındırılmıştır. Aşındırma testleri sonucunda numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izleri incelenmiştir. Ayrıca bu aşınma izleri dijital mikroskop ile görüntülenerek topografileri oluşturulmuş, aşınma genişlikleri ve derinlikleri analiz edilerek aşınma oranının hesaplanması için kullanılmıştır.

Lineer aşınma testleri, pistonlu bir tribometre kullanılarak ASTM G133 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Aşınma testi 1 saat boyunca 15 N' luk bir yük altında, 6 mm strok uzunluğu ve herhangi bir soğutma olmadan hava atmosferinde 6 mm çapında bir tungsten karbür bilyesi (WC% 94, CO% 6) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.33'de 60 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarında işlenen NiTiHf alaşımının 2 boyutlu aşınma görüntüleri gösterilmiştir. Aşınma mekanizması açısından incelendiğinde malzemenin maruz kaldığı adhesif ve abrasif aşınmanın aynı anda oluşması durumu gözlenmektedir. Abrasif aşınma, aşınma testi başlangıcında, parçacıkların sert veya normal temas basıncı altında daha yumuşak bir yüzeye nüfuz etmesi ve bu yüzeyden talaş kaldırması ile sonuçlanmaktadır. Tungsten karbür bilyenin NiTiHf alaşım malzemesine göre çok daha sert malzeme olması, teğetsel bir hareket uygulandığında, daha yumuşak olan tarafın oluklar ve çizikler oluşturacak şekilde aşınmasına ve böylece abrasif aşınma mekanizmasını ortaya çıkarmasına neden olur. Ayrıca bu mekanizma türünde mikro-yarık veya mikro-oluk gibi aşınma kalıntılarının oluşması da söz konusudur. Oluşan bir diğer aşınma türü olan adhesif aşınma ise iki temas yüzeyinin birbirleri ile göreceli olarak hareket etmesi sonucu zayıf olan yüzeyden malzemenin yırtılması ve bunun sonucunda malzeme taşınmasının oluşması olarak tanımlanmaktadır. Transfer edilen parça, kayma işlemi devam ederken plastik olarak deforme edilir, böylece aktarılan malzeme karşı yüzeyde katmanlı bir yüzey morfolojisinin oluşması ile sonuçlanır. Bir sonraki aşamada, büyük olasılıkla katman ile malzeme arasındaki bağın

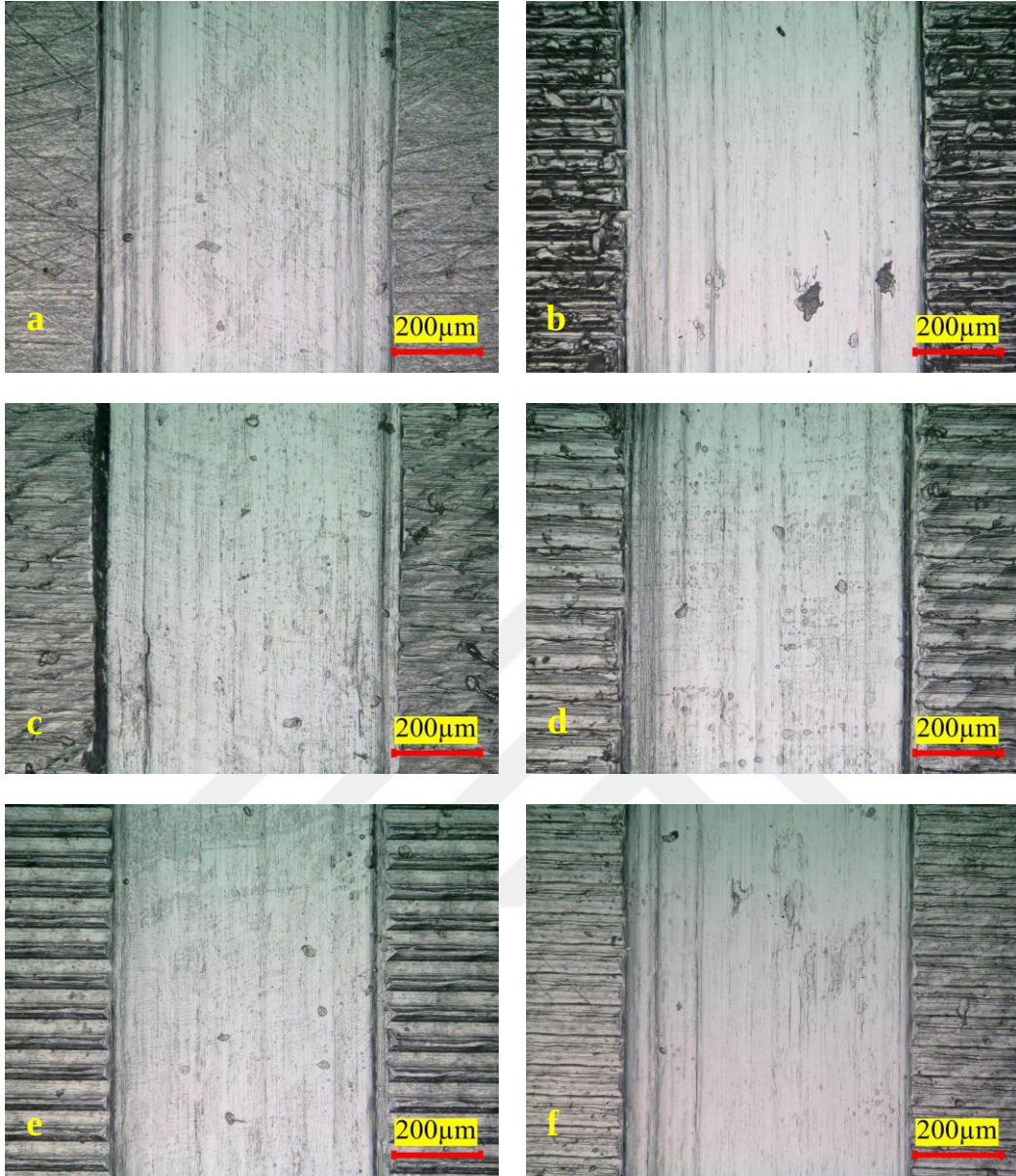
sağlanması ve aktarılan katmanın ayrılması ile sonuçlanacaktır. NiTiHf malzemesinde oluşan bu aşınma mekanizmaları şekil 142’de gösterilmiştir.



Şekil 3.33. 60 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarında oluşan aşınma izleri

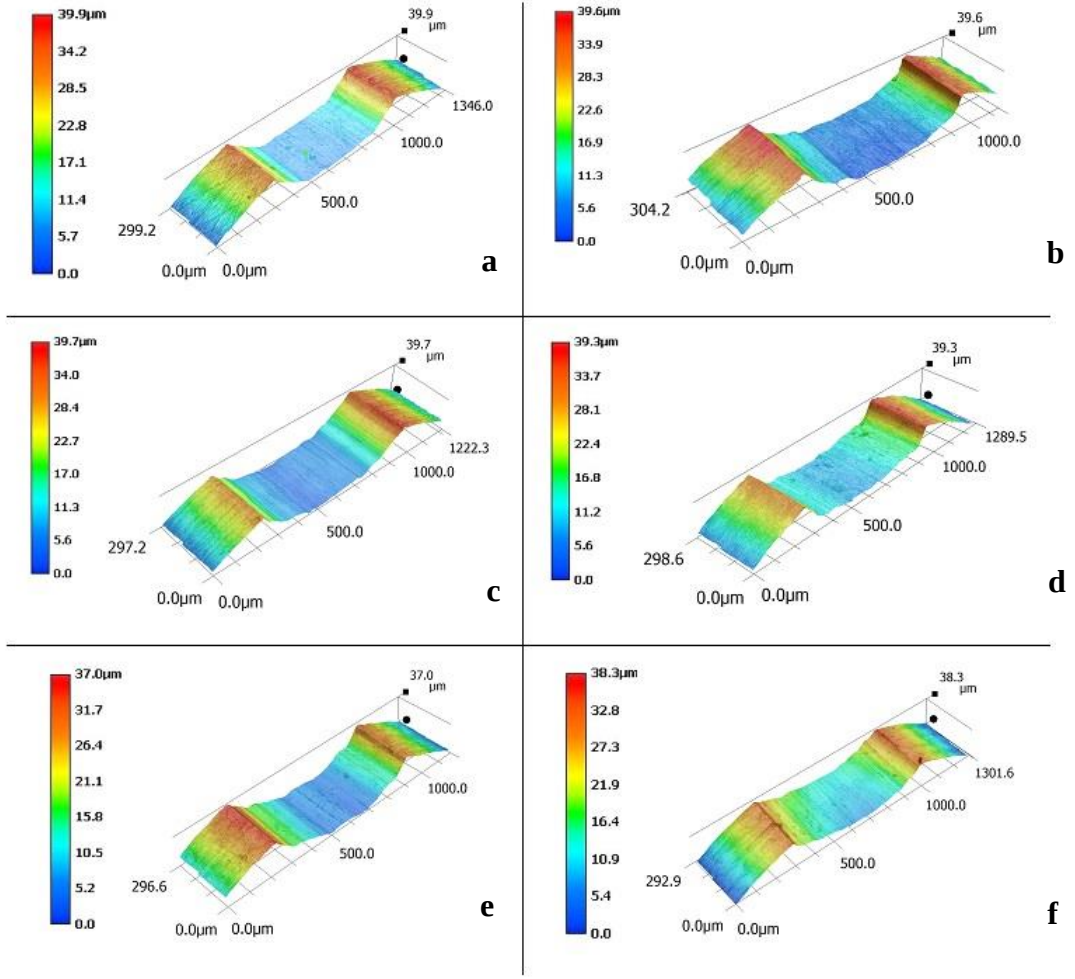
(a) İşlem Görmemiş, (b) Kuru Kesme, (c) MQL, (d) MQL+CO₂, (e) Kesme Sıvısı, (f) LN₂

Şekil 3.34’te 120 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarında işlenen NiTiHf alaşımının 2 boyutlu aşınma görüntüleri gösterilmiştir. Kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüklerinin arttığı açıkça görülmektedir. Aşınma davranışları açısından izlendiğinde Şekil Xte gösterilen aşınma mekanizmalarına benzer mekanizmalar gözlemlenmiştir. Sonuç olarak kesme hızının aşınma mekanizmalarına olan etkisinin sınırlı kaldığı söylenebilmektedir.



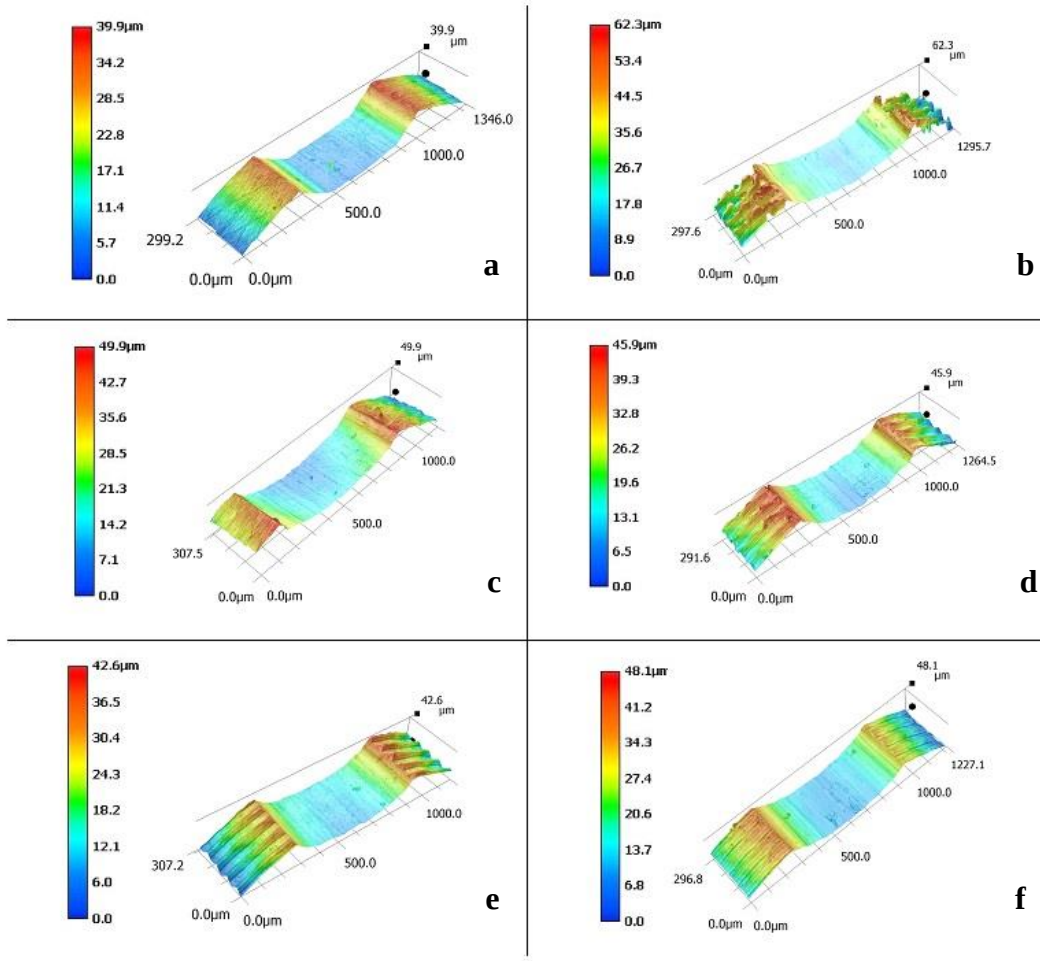
Şekil 3.34. 120 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarında oluşan aşınma izleri
(a) İşlem Görmemiş, (b) Kuru Kesme, (c) MQL, (d) MQL+CO₂, (e) Kesme Sıvısı, (f)
LN₂

Şekil 3.35'te 60 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarında oluşan aşınma topografileri gösterilmiştir. 3 boyutlu optik mikroskop yardımıyla alınan görüntülerde aşınma tiplerinin benzer olduğu görülmektedir. Topografi görüntülerinden kesitler alınarak aşınma genişlikleri ve derinlikleri hesaplanmakta ve böylece malzemelerin aşınma oranları hesaplanarak aşınma dayanımları karşılaştırılmaktadır.



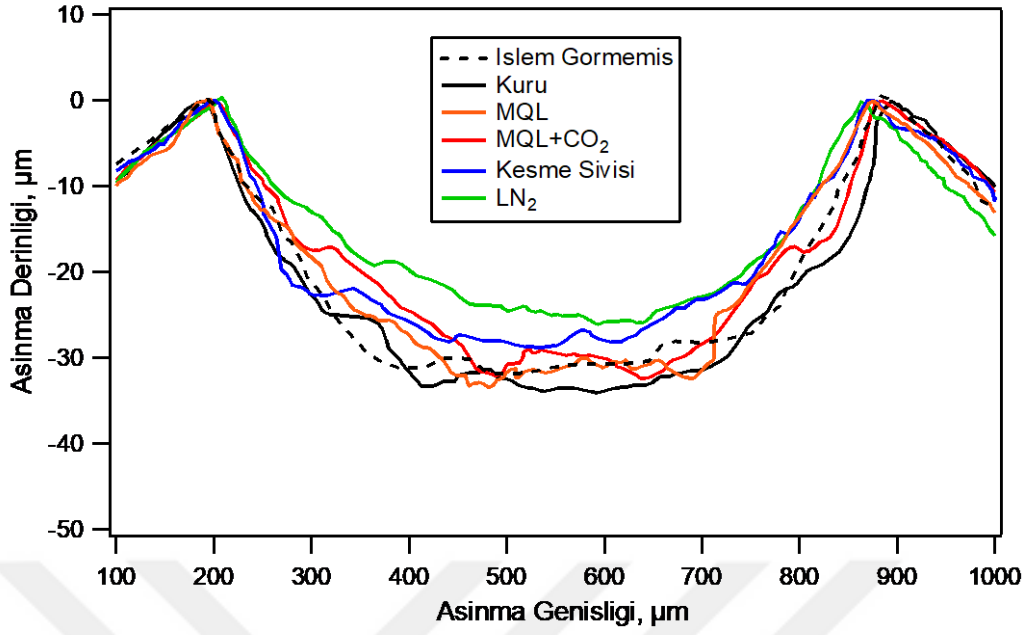
Şekil 3.35. 60 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarında oluşan aşınma topografileri (a) İşlem Görmemiş, (b) Kuru Kesme, (c) MQL, (d) MQL+CO₂, (e) Kesme Sıvısı, (f) LN₂

Şekil 3.36’da 120 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarında oluşan aşınma topografileri gösterilmiştir. Kesme hızının artmasıyla birlikte yüzeyde oluşan pürüzlülükler açıkça görülmektedir. Düşük kesme hızı ile yapılan testlerde oluşan aşınma davranışına benzer aşınma davranışı sergilenmiştir. Pürüzlülüğün ise görsel olarak bir etkisi olmamakla birlikte bu durum profil kesitlerinde daha detaylı olarak araştırılmaktadır.



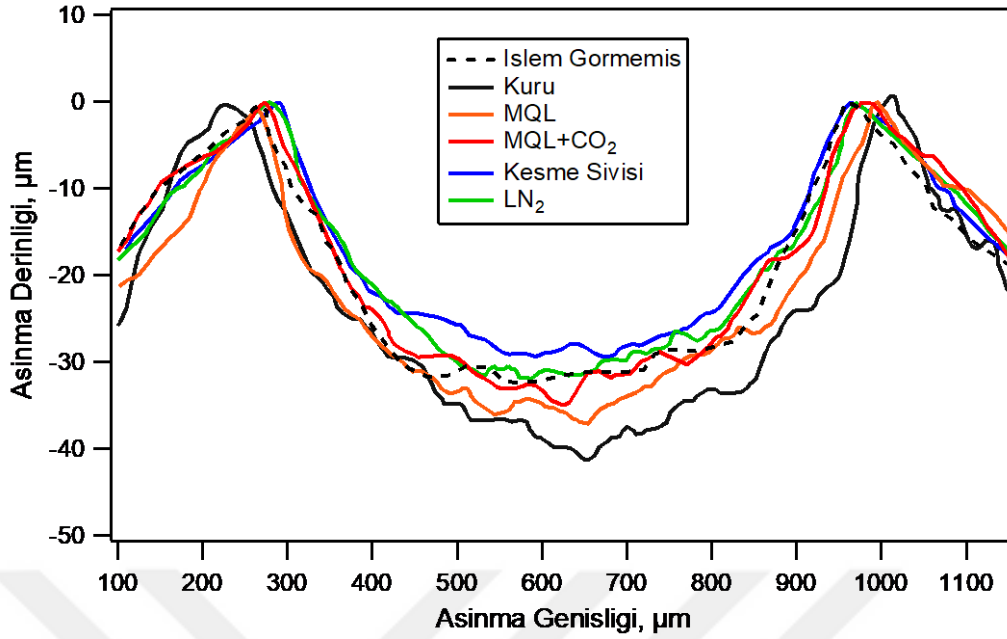
Şekil 3.36. 120 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarında oluşan aşınma topografileri (a) İşlem Görmemiş, (b) Kuru Kesme, (c) MQL, (d) MQL+CO₂, (e) Kesme Sıvısı, (f) LN₂

Aşınma testleri sonucu oluşan aşınma izlerinin deneysel ve analitik olarak hesaplanması aşınma oranı formülleriyle hesaplanmaktadır. Bu hesapların yapılabilmesi için malzemelerde oluşan aşınma profillerinin oluşturulması ve gereken aşınma verilerinin elde edilmesi gerekmektedir. Şekil 3.37’de 60 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarında oluşan aşınma profilleri gösterilmiştir. Aşınma derinliği ve genişliği açısından incelendiğinde LN₂ ve kesme sıvısı koşulunun diğer koşullara nazaran daha iyi aşınma direnci gösterdiği kuru koşulunun ve işlem görmemiş malzemenin ise diğer koşullara göre bir nebze daha çok aşındığı gözlemlenmiştir. MQL ve MQL ile CO₂ kullanılan koşulların ise diğer koşulların arasında bir aşınma direnci gösterdiği söylenebilir.



Şekil 3.37. 60 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarında oluşan aşınma profilleri

Şekil 3.38'de 120 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarında oluşan aşınma profilleri gösterilmiştir. Aşınma derinliği ve genişliği açısından incelendiğinde 60 m/dak kesme hızında olduğu gibi LN₂ ve kesme sıvısı koşulunun diğer koşullar ile karşılaştırıldığında daha iyi aşınma direnci gösterdiği kuru koşulunun diğer koşullardan daha çok aşındığı. İşlem görmemiş malzemenin, MQL ve MQL ile CO₂ kullanılan koşulların ise diğer koşulların arasında bir aşınma direnci gösterdiği görülmektedir. Malzemeler aşınma profilleri açısından yorumlandığında kesme hızı ve kesme koşullarının etkilerinin kısıtlı kaldığı, aşınma genişlikleri ve derinlikleri açısından ciddi bir fark oluşmadığı görülmektedir. Bu durum Şekil 149'da gösterilen aşınma oranları incelendiğinde daha net bir şekilde anlaşılmaktadır.



Şekil 3.38. 120 m/dak kesme hızında ve farklı kesme koşullarında oluşan aşınma profilleri

Farklı kesme hızlarında ve kesme koşullarında işlenen NiTiHf malzemesine ait aşınma oranları Şekil 3.39’da gösterilmektedir. Aşınma hacmi, aşağıdaki gibi tanımlanmış olan 1 denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Burada V mm³ cinsinden aşınma hacmi, L mm cinsinden sürtünme mesafesi (strok uzunluğu), w mm cinsinden aşınma izi genişliği ve r mm cinsinden karbür bilyenin yarıçapıdır.

$$V = L \left[r^2 \sin^{-1} \left(\frac{w}{2r} \right) - \frac{w}{2} \left(r^2 - \frac{w^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \right] + \frac{\pi}{3} \left[2r^3 - 2r^2 \left(r^2 - \frac{w^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{w^2}{4} \left(r^2 - \frac{w^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (1)$$

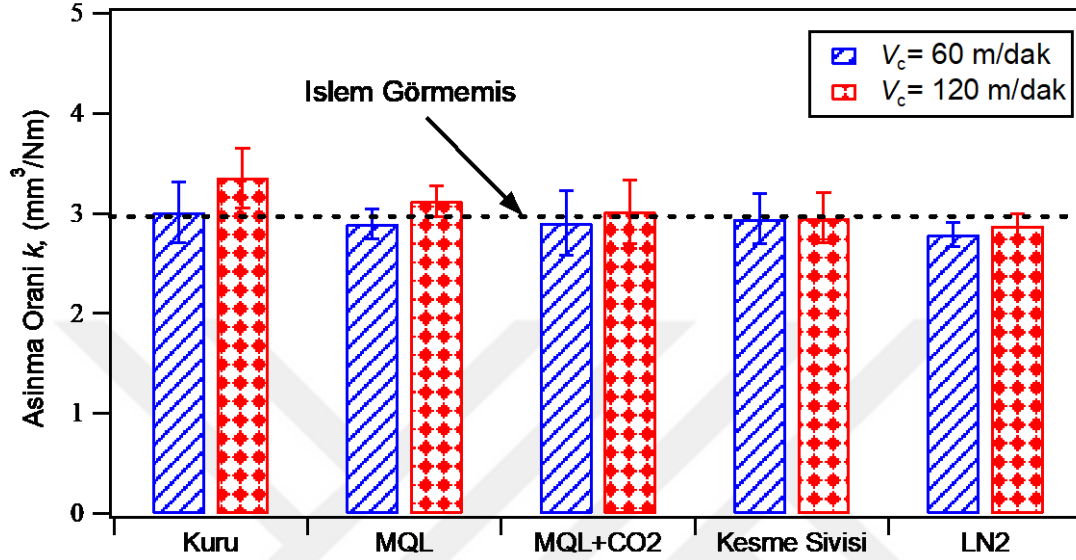
Aşınma oranı aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$k = \frac{V}{N \times L} \quad (2)$$

Burada k , mm³/Nm cinsinden aşınma oranı ve N ise Newton cinsinden uygulanan normal kuvvettir.

Şekil 3.39’da görüldüğü gibi, farklı kesme hızlarının ve farklı kesme koşullarının aşınma oranı üzerinde etkileri kısıtlı olmuştur. Aşınma oranları kıyaslandığında en yüksek fark %11.5 ile kuru kesmede olurken, en düşük fark %0,3 ile kesme sıvısında olmuştur. MQL koşulunda bu fark %7,6 olurken, MQL ile CO₂’nin birlikte kullanıldığı koşulda %3,8’lik

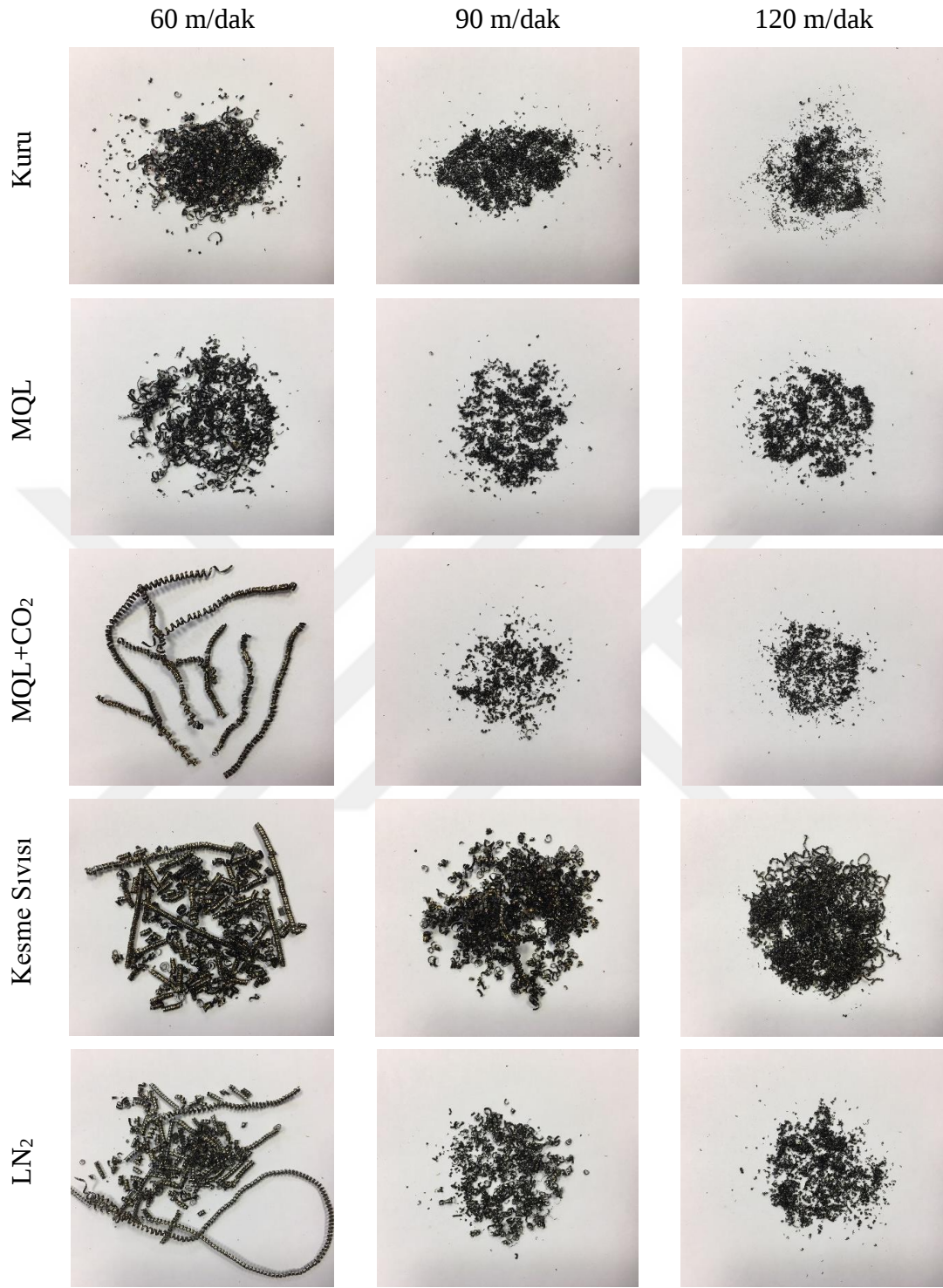
bir fark olmuşmuştur. LN₂ koşulunda da %3.1 oranında bir fark oluşmuştur. Oluşan farklar bütün koşullarda 120 m/dak kesme hızındaki aşınma oranının 60 m/dak kesme hızına göre nispeten yüksek olduğunu göstermektedir. Kesme hızı arttıkça mikrosertlik değerlerinin azalması, aşınma oranının artmasına yol açmıştır.



Şekil 3.39. Farklı kesme hızlarında ve kesme koşullarında oluşan aşınma oranları

3.5 Talaş Formu ve Kırılabilirliği

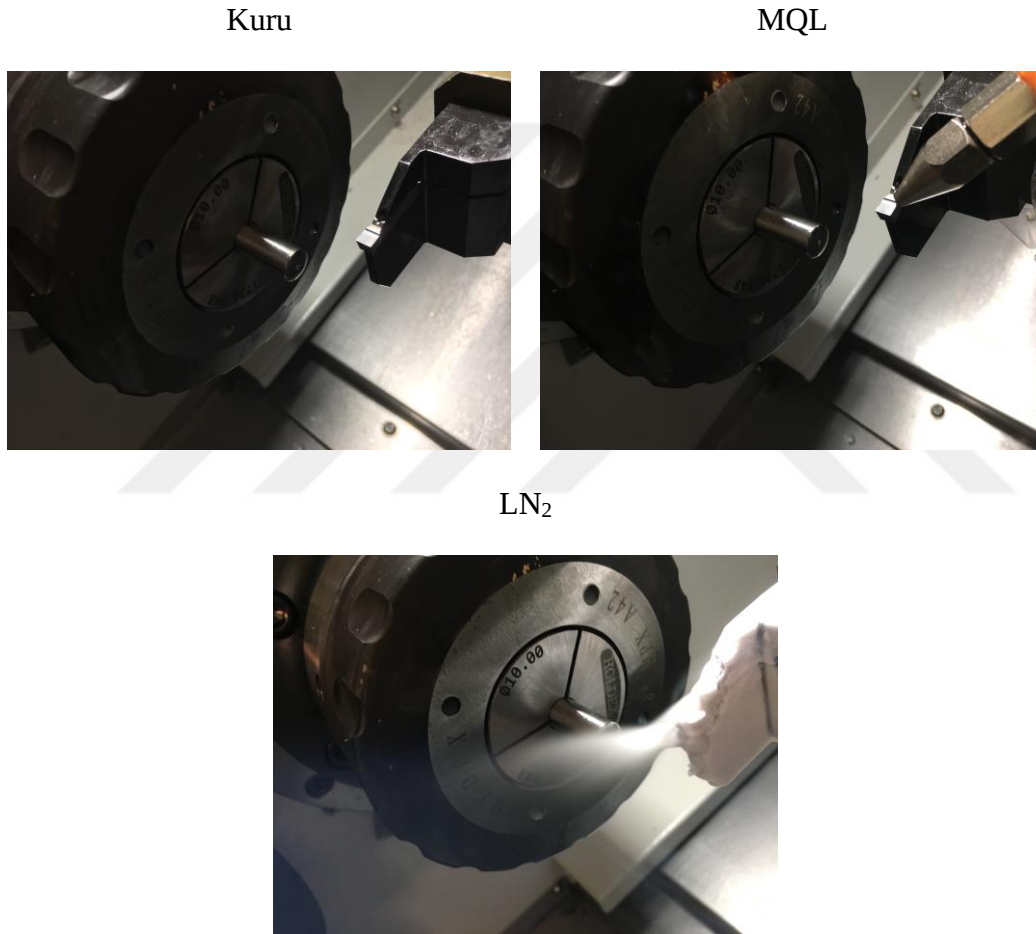
Şekil 3.40'ta farklı kesme hızı ve kesme koşullarında işlenen NiTiHf alaşımının oluşturduğu talaş formları gösterilmektedir. Şekilde kesme hızının ve kesme koşullarının talaş kırılabilirliğine etkisi net bir şekilde görülmektedir. Kesme hızı değerlerinin artmasıyla birlikte talaş kırılabilirliği de önemli ölçüde artmıştır. Düşük kesme hızında kuru ve MQL koşullarında kısa, helisel ve toz haline gelen talaşlar oluşmuşken, MQL ve CO₂, kesme sıvısı ve LN₂ koşullarında sürekli, helisel ve uzun formda talaşlar oluşmuştur. 90 m/dak kesme hızında çıkıldığında bütün koşulların talaş kırılabilirliği açısından bir artış görülmüştür. 120 m/dak kesme hızında ise tüm kesme koşullarında talaş kırılabilirliği açısından bir problem gözlemlenmemiş ve tüm talaşlar toz halinde ve küçük boyutlarda oluşmuştur.



Şekil 3.40. Farklı kesme koşulunda ve kesme hızlarındaki talaş formları

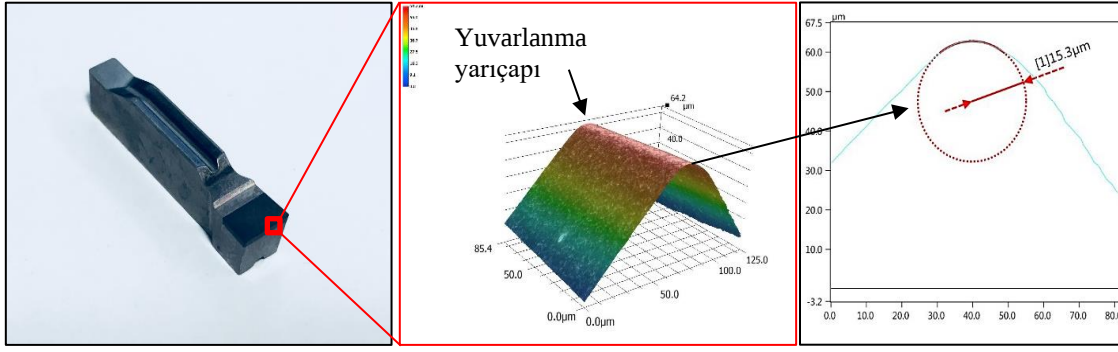
3.6 Dik kesme deneyleri

Tez çalışması kapsamında NiTiHf alaşım malzemesine dik kesme operasyonları da uygulanmıştır. Dik kesme deneyleri kuru kesme, MQL ve sıvı azot yardımlı soğutma ile olmak üzere üç kesme koşulunda gerçekleştirilmiştir. Dik kesme deneyleri 0,025 mm talaş derinliği ile yapılmıştır. Kesme hızları ise 7, 14 ve 21 m/dak olarak belirlenmiştir. Dik kesme deneyleri esnasında alınan görüntüler kesme koşuluna bağlı olarak Şekil 3.41’ de sunulmuştur.



Şekil 3.41. Dik kesme deneyleri esnasında uygulanan farklı kesme koşullarının görüntüsü

Dik kesme deneyleri sonrası yapılacak olan simülasyonlar için kesici takımın yuvarlanma yarıçapı optik mikroskop kullanılarak ölçülmüştür. Kesici takımın yuvarlanma yarıçapı Şekil 3.42’ de sunulmuştur.

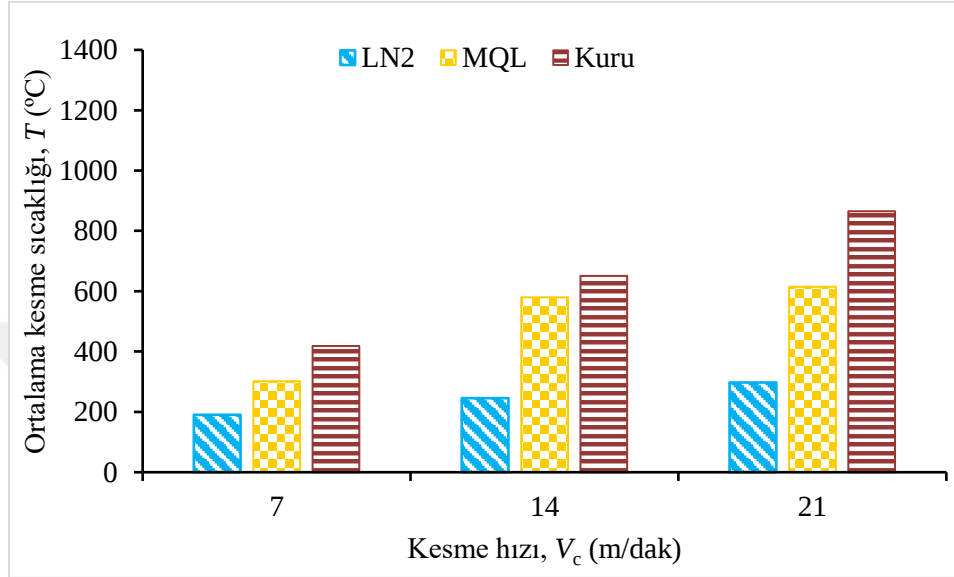


Şekil 3.42. Dik kesme deneylerinde kullanılan kesici ucun yuvarlanma yarıçapı

3.6.1 Kesme sıcaklıkları

Dik kesme operasyonu esnasında oluşan kesme bölgesindeki ortalama sıcaklık değerleri Şekil 3.43’ de sunulmuştur. Şekil kesme hızına ve kesme koşuluna bağlı olarak oluşturulmuştur. Şekil genel olarak incelendiğinde kesme koşulunun ve kesme hızının sıcaklık değerlerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir. Kesme hızı açısından şekil incelenecek olursa kesme hızının artması ile ortalama kesme sıcaklıklarında artış görülmüştür. Bu durum, kesme hızı arttıkça, sürtünme kuvveti arttığından ve birincil ve ikincil deformasyon bölgelerindeki gerilme oranının da artmasından dolayı olmaktadır[45]. Kesme hızının 7 den 21 m/dak ya artması ile sıvı azot yardımcı soğutma koşulundaki sıcaklık artışı yaklaşık olarak %56 olmuştur. Minimum miktarda yağlama koşulunda kesme hızının artması ile ortalama sıcaklıkta meydana gelen artış %103 iken kuru kesme koşulunda bu değer %106 olmuştur. Görüldüğü üzere en fazla sıcaklık artışı kuru kesme koşulunda olurken en az sıcaklık artışı ise sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda olmuştur. Kesme koşullarının ortalama sıcaklıklardaki etkilerine bakıldığında 7 m/dak kesme hızında sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda 190 °C sıcaklık oluşurken minimum miktarda yağlama koşulunda 302 °C, kuru kesme koşulunda ise 419 °C olmuştur. Dolayısı ile minimum miktarda yağlama koşulunda kuru kesmeye göre %28 daha az sıcaklık oluşmuştur. Sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda ise kuru kesmeye göre %55 daha az ortalama sıcaklık değeri ölçülmüştür. En yüksek kesme hızı olan 21 m/dak kesme hızında ise sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda 298 °C, minimum miktarda yağlama koşulunda 615 °C ve kuru kesme koşulunda ise 865 °C ortalama sıcaklık oluşmuştur. Görüldüğü üzere minimum miktarda yağlama koşulu kuru kesmeden %29 daha az sıcaklık oluştururken sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda bu oran %66

olmuştur. Dolayısı ile tüm kesme hızlarında en yüksek sıcaklık kuru kesme koşulunda, en düşük sıcaklık ise sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda oluşmuştur. Sıvı azot yardımcı soğutma koşulunun kesme bölgesinde oluşan sıcaklık değerlerini azaltmada oldukça etkili olduğu görülmektedir.



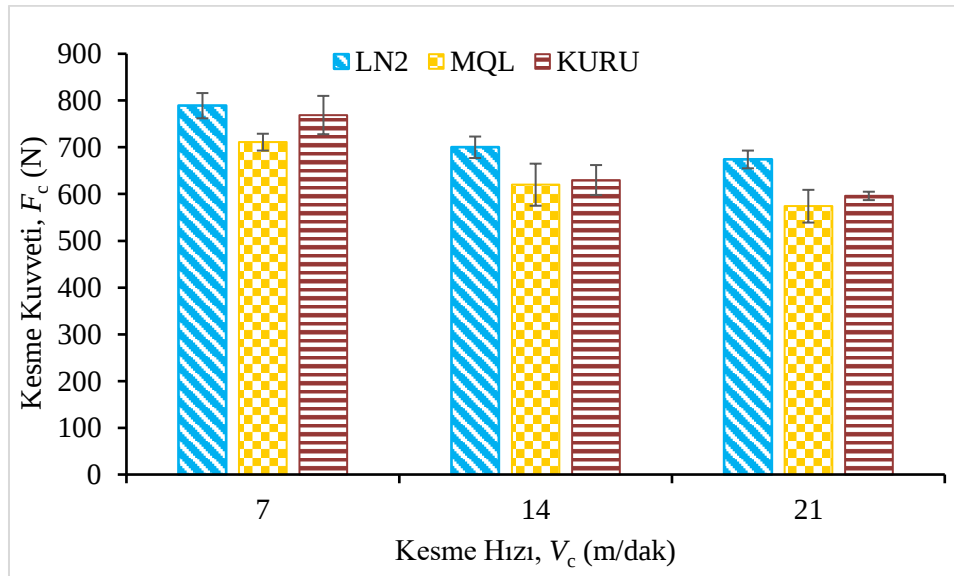
Şekil 3.43. Farklı kesme hızlarında ve farklı kesme koşullarındaki ortalama sıcaklık değerleri.

3.6.2 Kesme Kuvvetleri

Dik kesmede, kesme kuvveti ve itme kuvveti olmak üzere iki farklı kuvvet bileşeni oluşmaktadır. Dik kesme operasyonuna göre yapılan çalışmaların sonucunda oluşan kesme kuvvetleri Şekil 3.44’ de sunulmuştur. Şekil genel olarak incelendiğinde kesme koşulları ve kesme hızına bağlı olarak kesme kuvvetlerinde değişiklik gözlemlenmiştir. Kesme hızının artması ile tüm kesme koşullarında oluşan kesme kuvvetlerinde azalma meydana gelmiştir. Kesme hızının artması ile kesme kuvvetlerindeki azalma, sıcaklığın artması ile meydana gelen termal yumuşamanın artması ve talaş kesit alanının azalması ile ilişkilidir [72]. Sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda kesme hızının 7 den 21 m/dak ya artması ile kesme kuvvetinde %15 azalma görülmüştür. Minimum miktarda yağlama koşulunda ise kesme hızının artması ile %19 azalma görülürken kuru kesme koşulunda bu oran %23 olmuştur. Görüldüğü üzere kesme kuvvetlerinde en fazla azalma kuru kesme koşulunda meydana gelirken en az azalma ise sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda olmuştur. Bunun sebebi kesme hızının artması ile en fazla sıcaklığa ulaşan kuru kesmenin

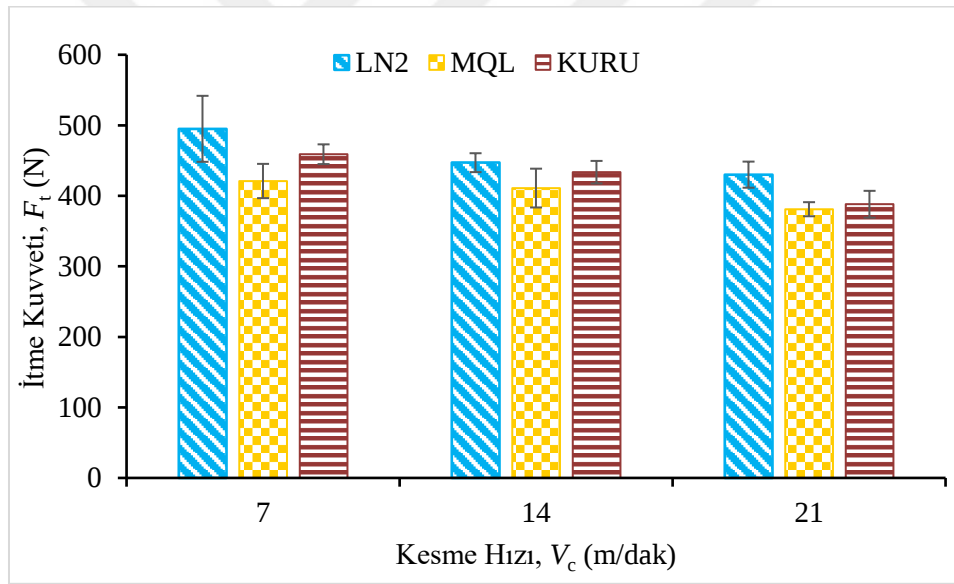
olması ve sıvı azot yardımcı soğutmanın termal yumuşamayı engellemesidir [73]. 7 m/dak kesme hızında oluşan kesme kuvvetlerindeki en yüksek değer sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda 789 N olmuştur. Minimum miktarda yağlama koşulunda 711 N, kuru kesme koşulunda ise 769 N olmuştur. Bu durumda en düşük kesme kuvveti minimum miktarda yağlama koşulunda olmuş ve kuru kesme koşulundan %8 daha az kuvvet oluşmuştur. Bunun sebebi minimum miktarda yağlama koşulunun takım talaş arasına nüfus etmesiyle sürtünme kuvvetlerini azaltması ile açıklanabilir [74]. Sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda ise oluşan kesme kuvveti değeri kuru kesme koşulundan %3 oranında daha fazla olmuştur. Sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda kesme kuvvetlerinin yüksek çıkmasının sebebi sıvı azotun malzemeyi soğutarak termal yumuşamaya engel olması ve malzemeyi sertleştirme eğiliminde olmasıdır [75].

En yüksek kesme hızı olan 21 m/dak kesme hızında en yüksek kesme kuvveti sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda olmuştur. 674 N olarak ölçülen bu değer kuru kesme koşulundan yaklaşık olarak %13 daha fazla olmuştur. Minimum miktarda yağlama koşulunda ise kuru kesme koşulundan %4 daha az kesme kuvveti oluşmuştur. Görüldüğü üzere minimum miktarda yağlama koşulu tüm kesme hızlarında kesme kuvvetlerini azaltıcı bir etmen olurken, sıvı azot yardımcı soğutma koşulu kesme kuvvetlerinde bir artışa neden olmuştur.



Şekil 3.44. Farklı kesme hızlarında ve farklı kesme koşullarındaki kesme kuvvetleri.

Dik kesme operasyonu sonucunda oluşan itme kuvvetleri Şekil 3.45’ de sunulmuştur. Kesme hızının artması kesme kuvvetlerinde olduğu gibi itme kuvvetlerinde de bütün koşullarda azalmaya sebep olmuştur. 7 m/dak kesme hızında oluşan en yüksek itme kuvveti sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda 495 N, olarak ölçülmüştür. Minimum miktarda yağlama koşulunda 421 N, kuru kesme koşulunda ise 459 N olarak ölçülmüştür. İtme kuvvetlerinin en yüksek sıvı azot yardımcı soğutma koşulunda en düşük ise kuru kesme koşulunda olma trendi diğer kesme hızlarında da devam etmiştir. 21 m/dak kesme hızında sıvı azot yardımcı soğutma, minimum miktarda yağlama ve kuru kesme koşullarında oluşan itme kuvvetleri sırasıyla 430, 381, 388 N olarak ölçülmüştür. Kesme hızının 7 den 21 m/dak ya artması ile itme kuvvetlerinde sıvı azot yardımcı kesme koşulunda %13, minimum miktarda yağlama koşulunda %9, kuru kesme koşulunda ise %15 azalma meydana gelmiştir.

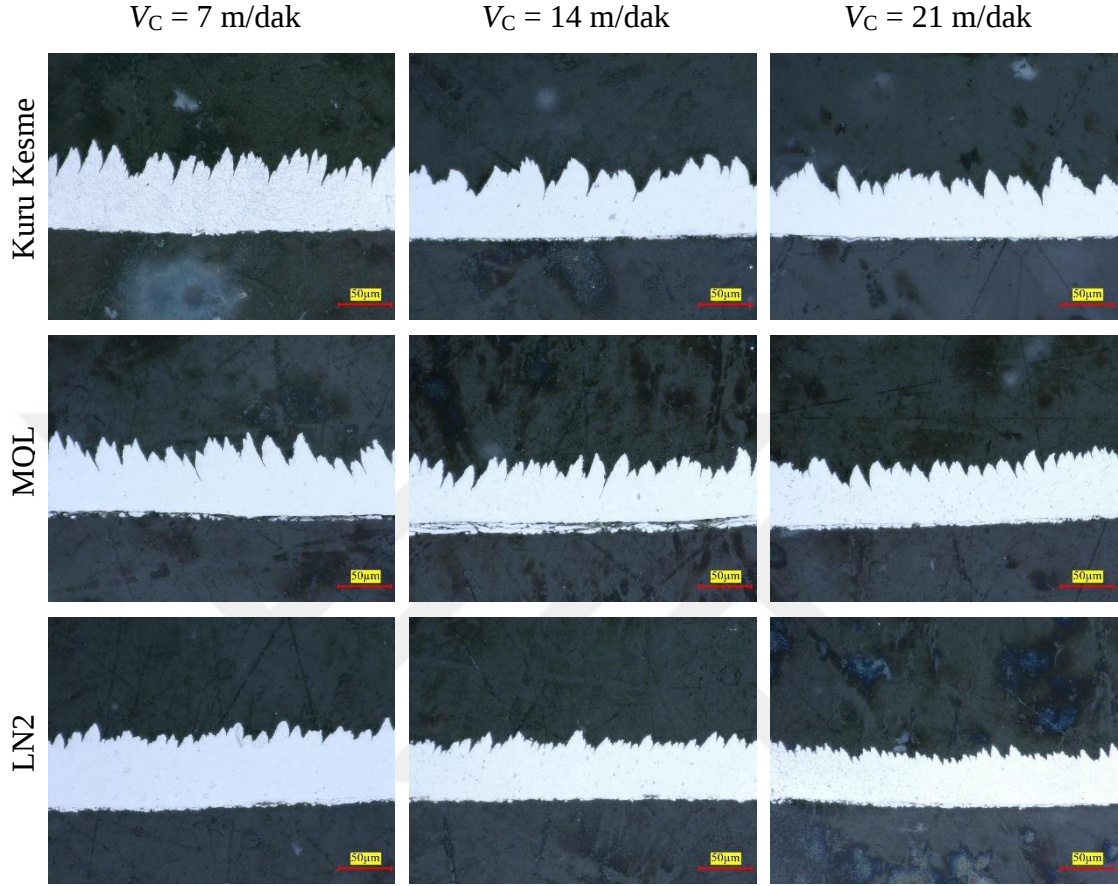


Şekil 3.45. Farklı kesme hızlarında ve farklı kesme koşullarındaki itme kuvvetleri.

3.6.3 Talaş Morfolojisi

Farklı kesme koşulları ve kesme hızlarında elde edilen talaş görüntülerinin dijital optik mikroskop yardımıyla alınan görüntüleri Şekil 3.46’ de sunulmuştur. Şekilde açıkça görüldüğü üzere bütün kesme koşullarında ve kesme hızlarında testere geometrili talaşlar oluşmuştur. Kesme hızının artması oluşan talaşların testere ağızlı formunu daha belirgin hale getirmiştir. Sıvı azotlu kesme koşulunda oluşan talaşların minimum miktarda yağlama ve kuru kesme koşulunda oluşan talaşlara göre daha az testere formunda olduğu

görülmektedir. Kuru kesme koşulunda ve minimum miktarda yağlama koşulunda nispeten birbirine benzer sonuçlar elde edilmiştir.

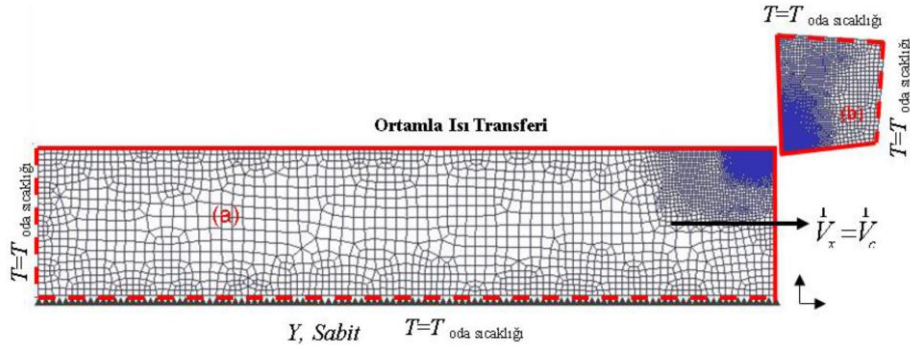


Şekil 3.46. Farklı kesme hızlarında ve kesme koşullarında oluşan talaş görüntüleri.

3.7 Simülasyon Çalışması

Sonlu elemanlar simülasyonu için DEFORM-2D (V11.) yazılımı kullanılmıştır. Simülasyon çalışmaları için oluşturulan kesici takım geometrisi ve boyutsal özellikleri deneysel çalışmada kullanılan kesici takım dikkate alınarak belirlenmiştir. Kesici takımda herhangi bir aşınmanın olmadığı kabul edilmiş olup rijit malzeme olarak tanımlanmıştır. Kesici takım yuvarlanma yarıçapı 15 µm ve boşluk açısı 7° olarak tanımlanmıştır. Talaş açısı ise 0°dir.

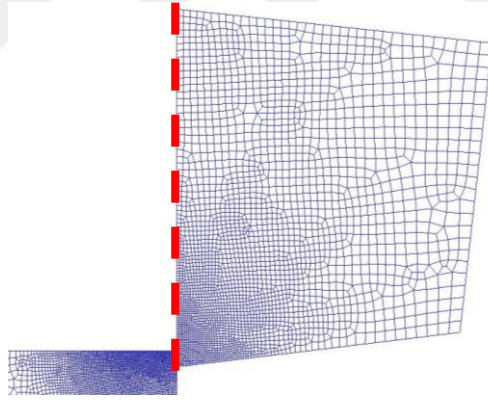
Sınır koşullarında, iş parçasının üstü ve sağ tarafı için ortamla ısı transferi sağlanmasına izin verilmiştir. Kesici takımın talaş yüzeyi ve boşluk açısı yüzeylerinin ortamla ısı transferi gerçekleştirilmelerine imkan verilmiştir. Bu durum Şekil 3.47’te sürekli kırmızı çizgilerle belirtilmiştir.



Şekil 3.47. NiTiHf alaşım malzemesinden talaş kaldırma sürecinde sınır koşulları ve ağ yapısı, a) iş parçası, b) kesici takım

Isı taşınım katsayısı DEFORM 2D'de serbest ısı taşınımının varsayılan değeri olan 20 W/m²K olarak kullanılmıştır [76]. Malzeme katsayısı, D 400 olarak sabit alınmıştır. Literatür taraması sonucu malzeme sabitinin titanyum alaşımları için 100 ila 400 arasında alındığı görülmüştür [72, 77, 78].

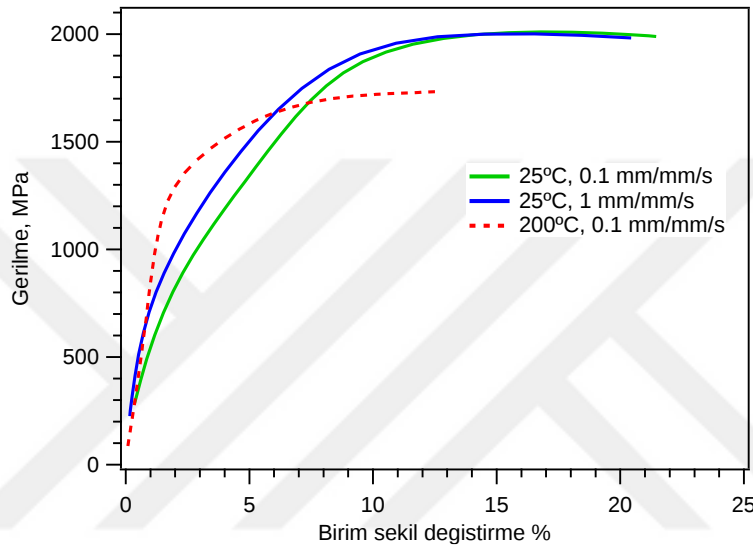
Deneylerde kullanılan kesici takım talaş açısı (0°) aynen simülasyona tanımlanmıştır. Talaş açısının simülasyondaki gösterimi Şekil 3.48'te sunulmuştur.



Şekil 3.48. Kesici takım açılarının simülasyonda gösterimi 0°

Sonlu elemanlar modeli ve kesme simülasyonunun NiTiHf alaşım malzemesinin deformasyon ve faz dönüşümü davranışını deneysel verilerle kıyaslayabilmek için yapılan deneysel çalışma sonuçları bir önceki bölümde sunulmuştur. Deneysel çalışmada kullanılan iş parçası malzemesi NiTiHf alaşım olup herhangi bir ısıl işlem yapılmamış ekstrüzyon yöntemiyle üretildiği halde (As-extruded) kullanılmıştır. Simülasyon çalışmasının deneysel verilerle kıyaslanabilir olması için NASA Glenn Research Center ile irtibata geçilmiş ve kendilerinin herhangi bir işlem görmemiş (as-extruded) malzemeyi

test etmelerini ve test sonucu paylaşımlarını dolayısı ile de talaş kaldırma simülasyon çalışmalarını bunun üzerine inşaa etmek istediğimiz iletilmiştir. NASA Glenn Research Center bu talebi olumlu karşılamış ve gereken testi yaparak sunmuştur (Şekil 171). NASA Glenn Research Center yüksek deformasyon hızlarında testler yapmamaktadır. Ancak Şekil 3.49’de sunulandan farklı deformasyon hızında (10 katı daha fazla) yapıldığı test sonucunda da dikkate alınmayacak farklılık olduğunu görülmüştür. Dolayısı ile tek deformasyon hızı referans alınmıştır.



Şekil 3.49. Simülasyonda kullanılan gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi.

3.7.1 Kesici Takım-Talaş Arayüzey Sürtünmesi ve Kırılma Kriteri

Talaş kaldırma simülasyonu için iş parçası ile talaş arasındaki sürtünme aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [79]

$$\tau = m \cdot K_{chip} \quad (3)$$

Burada τ kesici takımın talaş yüzeyi ile talaş arasındaki gerilmeyi, m kayma faktörünü ve K_{chip} ise talaşın kayma gerilmesini ifade etmektedir. m değeri bir sonraki bölümde sunulan hassasiyet çalışması ile bu simülasyon çalışması için belirlenmiştir.

Talaş oluşumu için kırılma kriteri olarak Cockcroft ve Latham tarafından önerilen model kullanılmıştır [80]

$$\int_0^{\bar{\epsilon}} \sigma_1 d\bar{\epsilon} = D \quad (4)$$

Burada σ_1 maksimum asal gerilmeyi, D ise malzeme katsayısını ifade etmektedir. Bu sabit bir sonraki bölümde sunulan hassasiyet çalışması ile bu simülasyon çalışması için belirlenmiştir.

3.7.2 NiTiHf Alaşımı İçin Hassasiyet Analizi

Tez çalışması kapsamındaki deneysel çalışmada kullanılan NiTiHf alaşımın elde edilen (Şekil 171) gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi dikkate alınarak, talaş kaldırma simülasyonu için hassasiyet analizleri bu bölümde sunulmuştur. Malzemenin gerçek deformasyon davranışı (flow stress) dikkate alınarak simülasyonlar yapılmış olup tipik bir talaş kaldırma simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

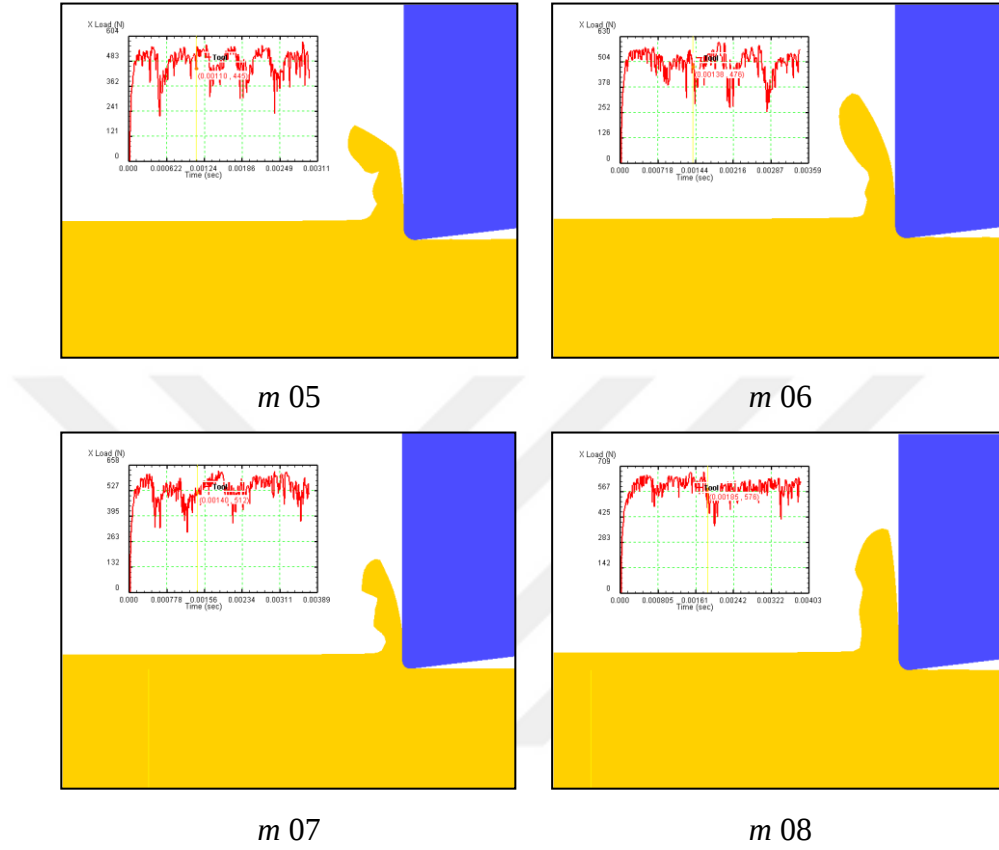
Hassasiyet analizinin yapılmasındaki amaç malzeme modelinin simülasyonda deneysel verilere ulaşabileceği en yakın parametreleri belirlemektir. Dolayısıyla hassasiyet analizinden sonra tüm koşullar ve parametreler için simülasyon yaparak oluşabilecek durumları tahmin etmek mümkün olacaktır [81]. Bu amaç doğrultusunda simülasyon için yapılan testlerdeki 14 m/dak kesme hızı ve kuru kesme koşulu dikkate alınmıştır. Bu kesme koşulunda yapılan hassasiyet analizi sonucunda elde edilen parametreler diğer kesme hızlarına adapte edilerek simülasyonlar gerçekleştirilecektir. Hassasiyet analizi için kesme derinliği deneysel çalışmalarda olduğu gibi 0.025 mm olarak alınmıştır.

NiTiHf alaşımı için yapılan hassasiyet analizi ısı transfer katsayısı (h) ve kayma faktörüne (m) göre gerçekleştirilmiştir. Kayma faktörü etkisinden kaynaklanan kuvvetler deneysel verilerle karşılaştırılarak en uygun değer seçilmiştir. En uygun kayma faktörü seçildikten sonra ısı transfer katsayısı etkisinden kaynaklanan kesme sıcaklıkları karşılaştırılarak deneysel verilerle uyumlu h değeri seçilmiştir.

Kayma faktörü m için çalışma aralığı 0.5 ile 0.8 olarak seçilmiştir ve malzeme sabiti 400 olarak sabit alınmıştır. Isı transfer katsayısı ise başlangıç olarak 200 kW/m²K değerinde sabit tutulmuştur. Kayma faktörünün hassasiyet analizinden sonra ısı transfer katsayısının hassasiyet işlemi gerçekleştirilecektir.

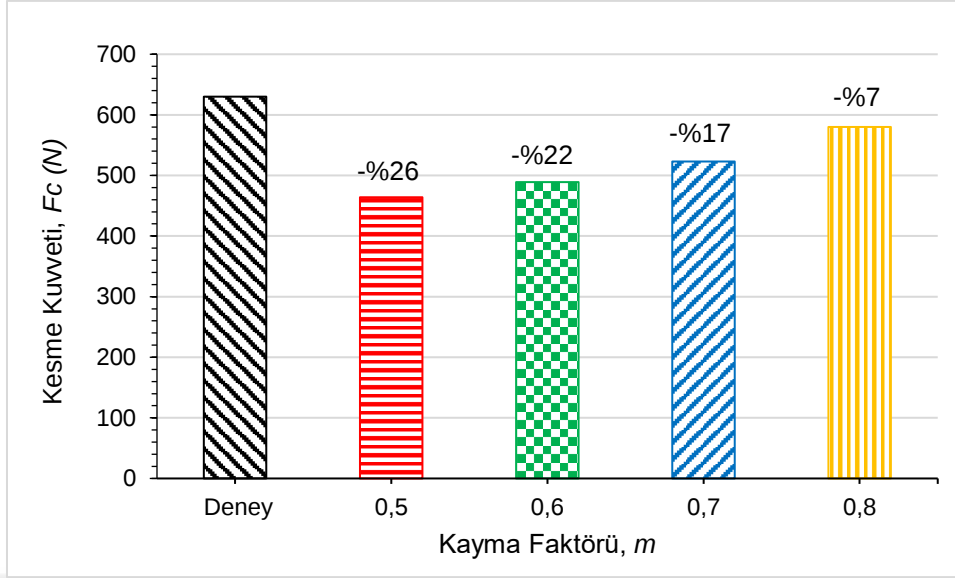
Şekil 3.50’de farklı kayma faktörlerinin simülasyon programında oluşturduğu kuvvet grafikleri sunulmuştur. Kayma faktörünün 0,5 ile 0,8 arasında değişmesiyle oluşan kesme kuvveti grafiklerinde gözlemlenen farklılıklar, kayma faktörünün artmasıyla artış gösterme eğiliminde olmuştur. Deform sonlu elemanlar yazılımından elde edilen kuvvet

değerleri, excel dosyasına aktarılıp kesme süresi boyunca oluşan kuvvetlerin ortalaması alınmıştır. Grafiklerde görülen farklılıklar ortalama kuvvetler alındığında daha net olarak gözlemlenmiştir.



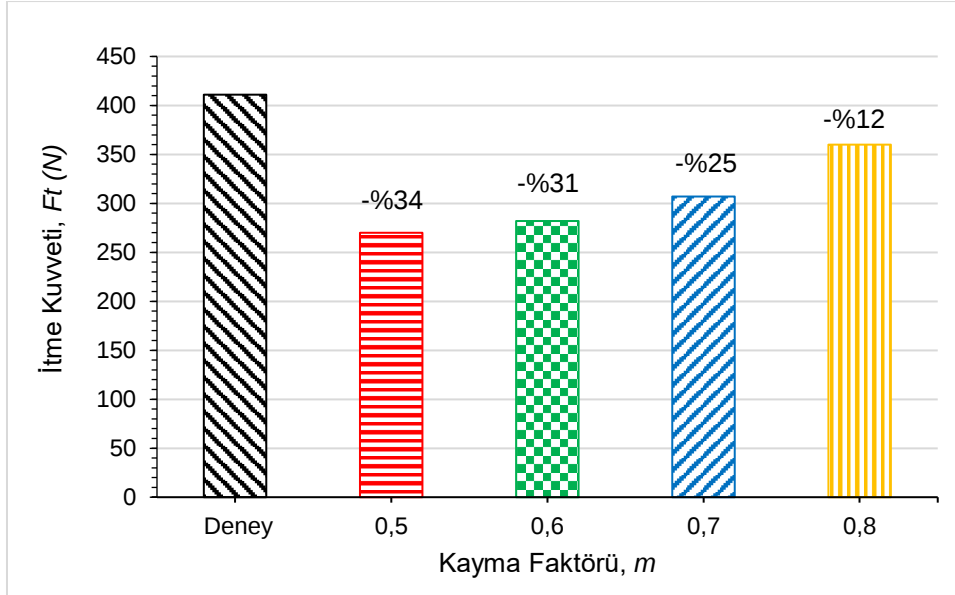
Şekil 3.50. Deform yazılımından farklı kayma faktörüne bağlı olarak elde edilen kesme kuvveti grafikleri.

Şekil 3.51’te 14 m/dak kesme hızı ve kuru kesme koşulunda kayma faktörünün değişmesiyle elde edilen kesme kuvvetleri sunulmuştur. Şekil genel olarak incelendiğinde kayma faktörünün artmasıyla elde edilen kesme kuvvetlerinde artış eğilimi görülmüştür. Deney sonucunda elde edilen ortalama kesme kuvveti 630 N olmuştur. Kayma faktörünün 0.5 olduğu durumda deneysel çalışmaya göre %26 oranında hata payı elde edilirken, 0.6 değerinde %22 hata payı olmuştur. 0.7 ve 0.8 değerlerinde ise sırasıyla %17 ve %7 oranında hata payı elde edilmiştir. Görüleceği üzere deneysel çalışmaya en yakın sonucu veren kayma faktörü değeri 0.8 olmuştur.



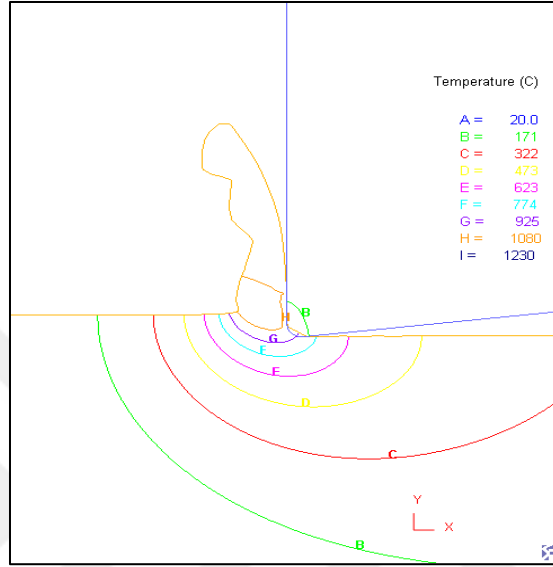
Şekil 3.51. Farklı kayma faktörüne bağlı olarak tahmin edilen kesme kuvvetleri.

Şekil 3.52’te 14 m/dak kesme hızı ve kuru kesme koşulunda kayma faktörünün değişmesiyle elde edilen itme kuvvetleri sunulmuştur. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen ortalama itme kuvveti değeri 411 N olmuştur. 0.5, 0.6, 0.7 ve 0.8 kayma faktörlerinde oluşan itme kuvvetleri sırasıyla 270, 282, 307 ve 360 N olarak elde edilmiştir. Kayma faktörünün itme kuvvetleri üzerindeki hassasiyet çalışmasında en yakın sonucu kesme kuvvetlerinde olduğu gibi %12 hata oranında 0.8 değeri vermiştir.



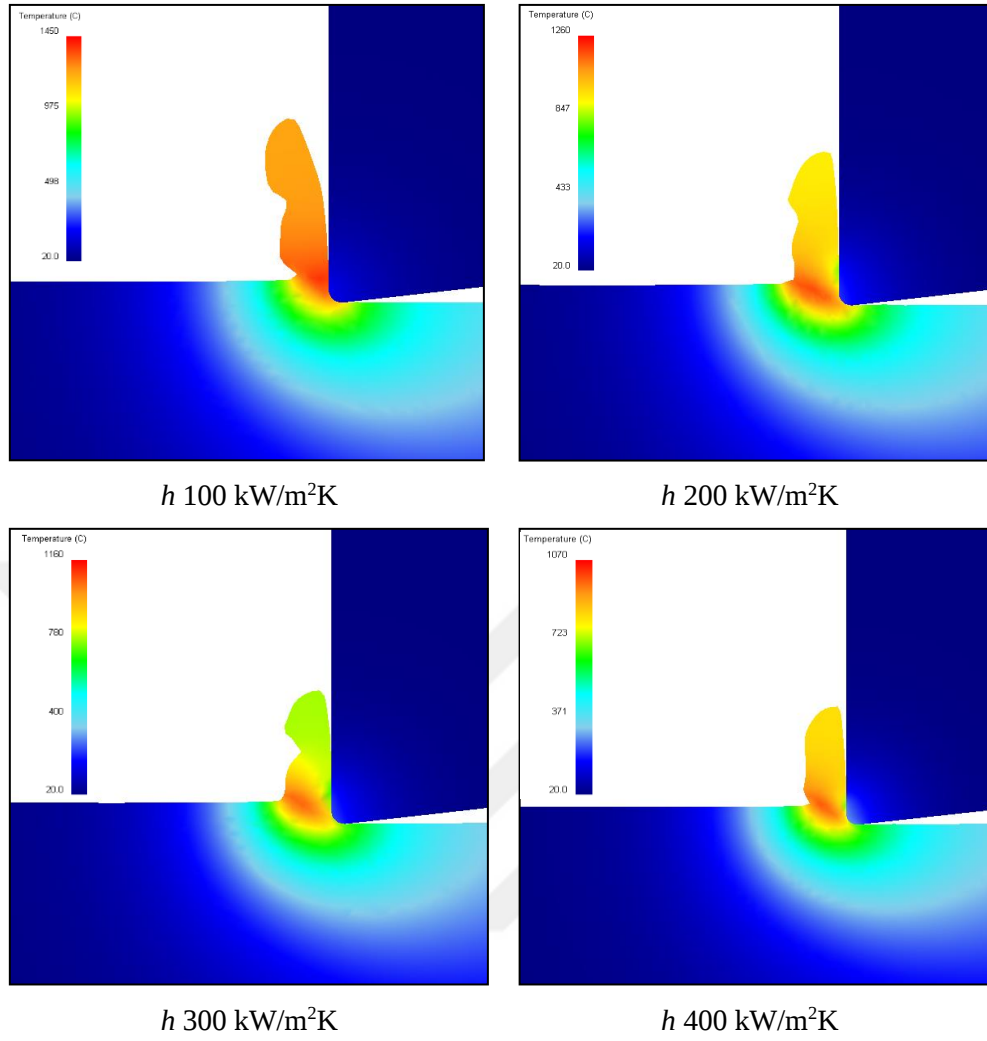
Şekil 3.52. Farklı kayma faktörüne bağlı olarak tahmin edilen itme kuvvetleri.

Deform yazılımında yapılan simülasyonlar sonrasında ortalama kesme sıcaklıkları literatürde yapılan çalışmalarda yaklaşım doğrultusunda belirlenmiştir [82]. Çizgisel olarak elde edilen kesme sıcaklığı verileri kullanılarak ortalama kesme sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Çizgisel olarak elde edilen örnek sıcaklık görüntüsü Şekil 3.53'te sunulmuştur.



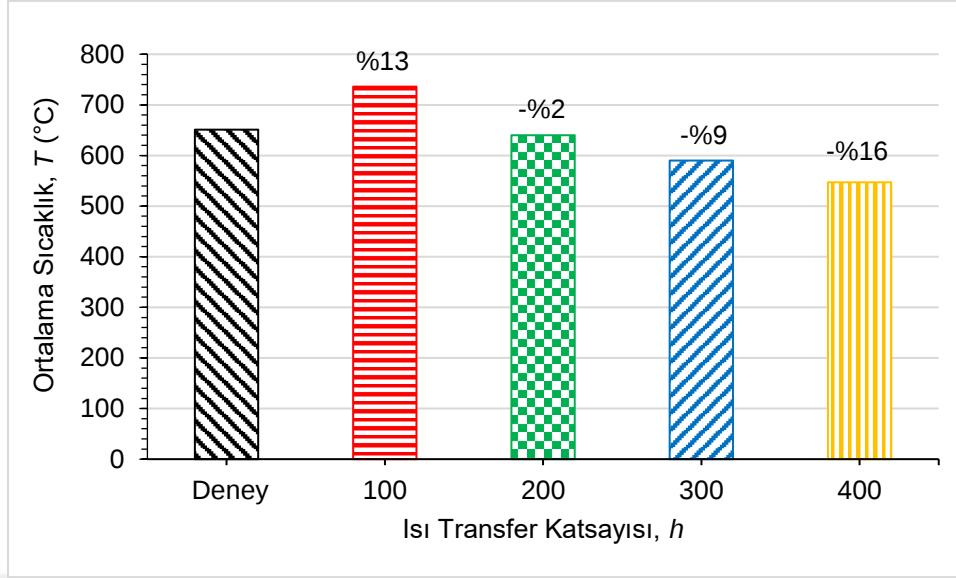
Şekil 3.53. Deform yazılımında ortalama sıcaklık değerinin belirlenmesi.

Şekil 3.54'da farklı ısı transfer katsayılarında meydana gelen sıcaklık görüntüleri sunulmuştur. Isı transfer katsayısının değişimiyle elde edilen sıcaklıklardaki değişim şekilde de net olarak görülmektedir. Isı transfer katsayısının artması sıcaklıkların azalmasına sebebiyet vermiştir.



Şekil 3.54. Farklı ısı transfer katsayılarında meydana gelen sıcaklık görüntüleri.

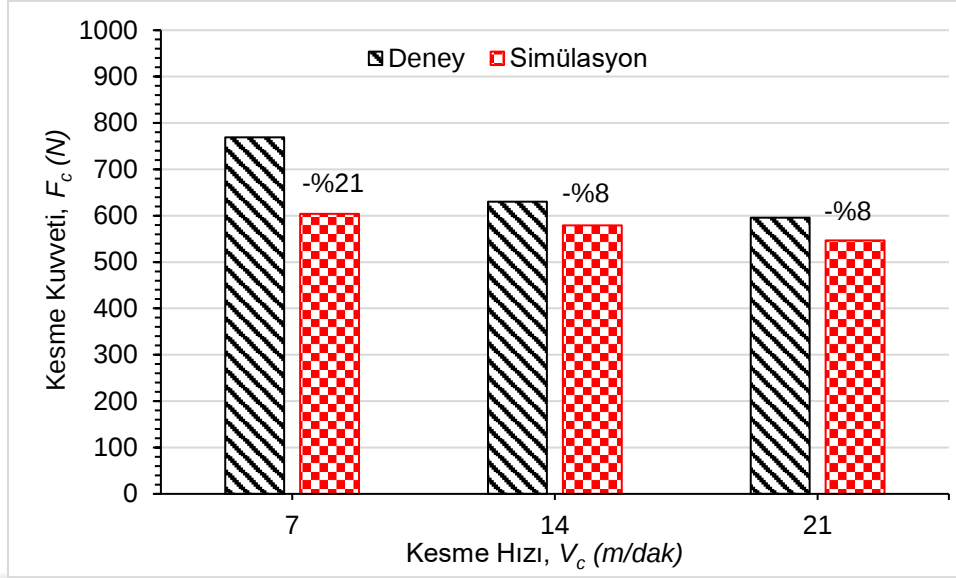
Kayma faktörünün hassasiyet analizi sonucunda elde edilen m değeri ısı transfer katsayısının hassasiyetini belirlerken optimum değer olarak (0.8) sabit alınmıştır. Şekil 3.55’de farklı ısı transfer katsayılarına bağlı ortalama sıcaklık değerleri sunulmuştur. Şekil genel olarak incelendiğinde ısı transfer katsayısının artması kesme sıcaklıklarında azalma eğilimi göstermiştir. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen ortalama sıcaklık değeri 651°C iken 100, 200, 300 ve $400 \text{ kW/m}^2\text{K}$ değerlerinde sırasıyla 736, 640, 590 ve 547°C olarak bulunmuştur. $200 \text{ kW/m}^2\text{K}$ ısı transfer katsayısı değerinde elde edilen sonuç %2 hata oranıyla deneysel çalışmada elde edilen ortalama sıcaklık değerine en yakın sonucu vermiştir.



Şekil 3.55. Farklı ısı transfer katsayısına bağlı olarak tahmin edilen kesme sıcaklıkları.

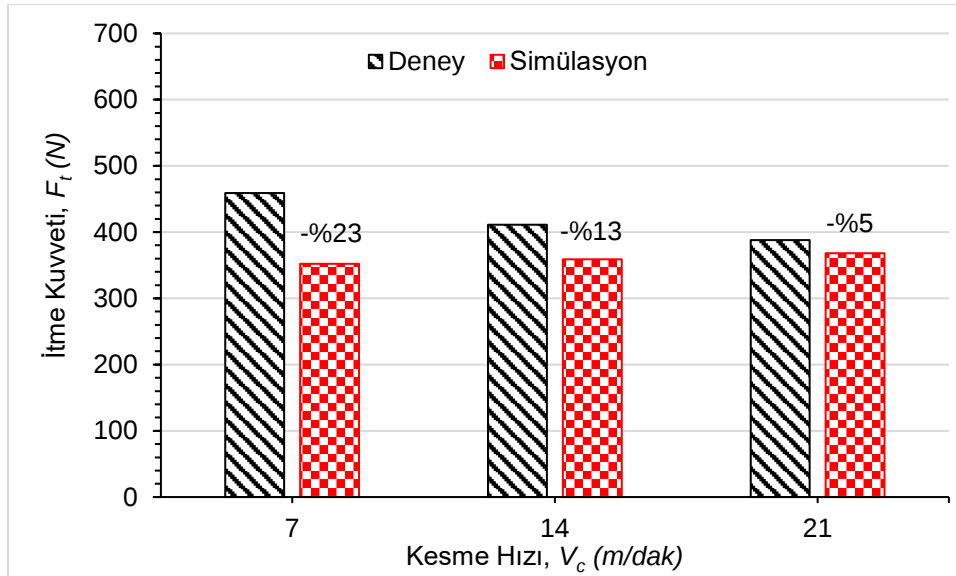
3.7.3 Simülasyon Sonuçları

Simülasyon çalışmasında, deneysel çalışmadaki tüm kesme hızları dikkate alınmıştır. Bu kesme hızları 7, 14 ve 21 m/dak' dır. Talaş kaldırma simülasyonları 500 adım olarak gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlarda hassasiyet analizleri sonucunda elde edilen parametreler kullanılmıştır. Bu parametreler ısı transfer katsayısının 200 kW/m²K, kayma faktörünün 0.8 olduğu durumdur. Şekil 3.56'de kuru kesme koşulunda yapılan deneysel çalışmadaki kesme kuvveti sonuçları simülasyonla elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. 7 m/dak kesme hızında deneysel çalışmayla simülasyon çalışması arasındaki fark %21 iken, 14 ve 21 m/dak kesme hızlarında %8 fark oluşmuştur. Görüleceği üzere 14 ve 21 m/dak kesme hızlarında yapılan simülasyon çalışması deneysel çalışmada elde edilen değerlere oldukça yakın sonuçlar vermiştir.



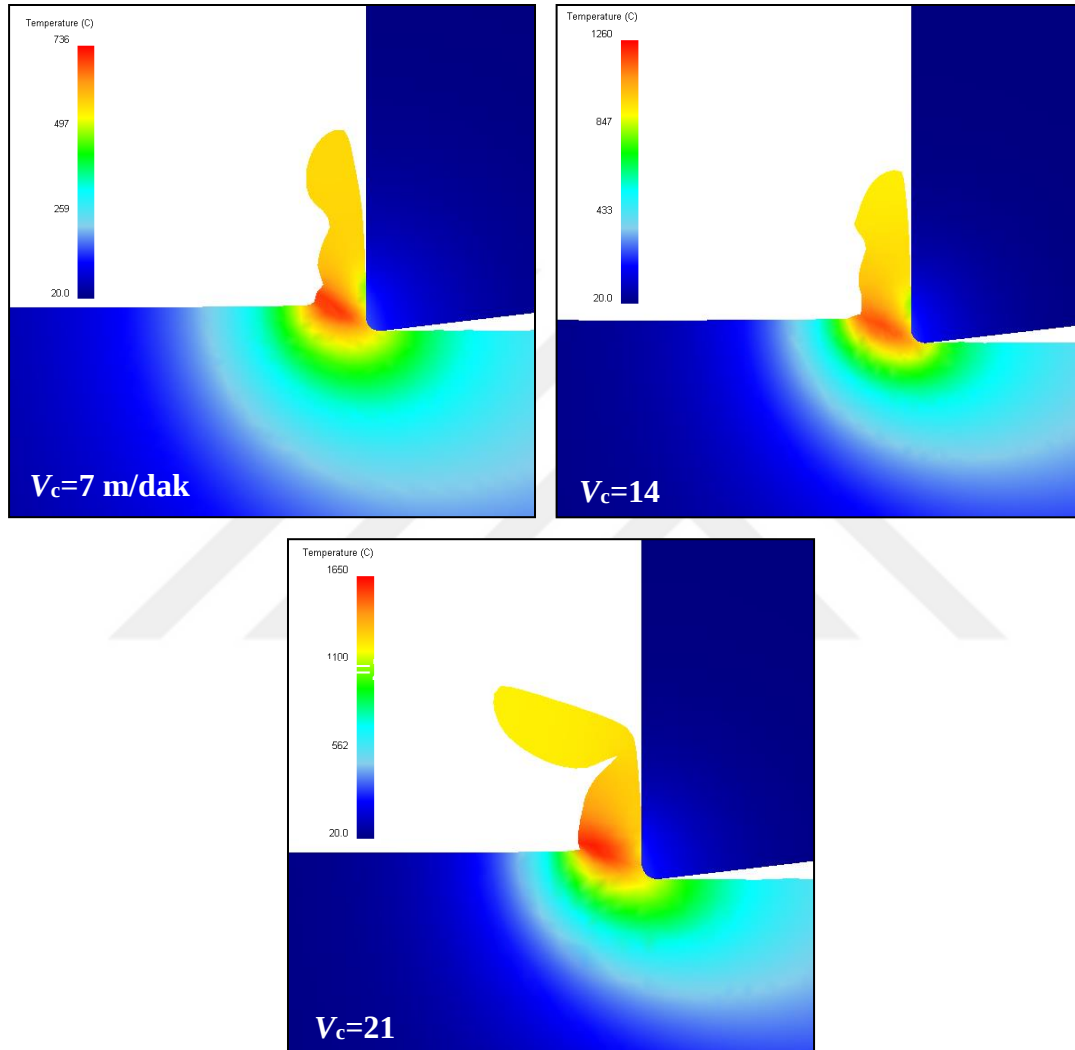
Şekil 3.56. Farklı kesme hızlarında ve kuru kesme koşulundaki deneysel çalışma ve simülasyon sonucunda elde edilen kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.

Deneysel çalışmalarda elde edilen itme kuvveti değerleri, simülasyonlar sonucunda elde edilen itme kuvveti değerleriyle Şekil 3.57’de kıyaslanmıştır. 7 m/dak kesme hızındaki hata oranı %23 olurken 14 m/dak kesme hızında %13 ve 21 m/dak kesme hızında %5 olmuştur. Deneysel sonuca en yakın olan simülasyon sonucu 21 m/dak kesme hızında görülmüştür. En yüksek hata oranı ise 7 m/dak kesme hızında %23 oranında olmuştur.



Şekil 3.57. Farklı kesme hızlarında ve kuru kesme koşulundaki deneysel çalışma ve simülasyon sonucunda elde edilen kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.

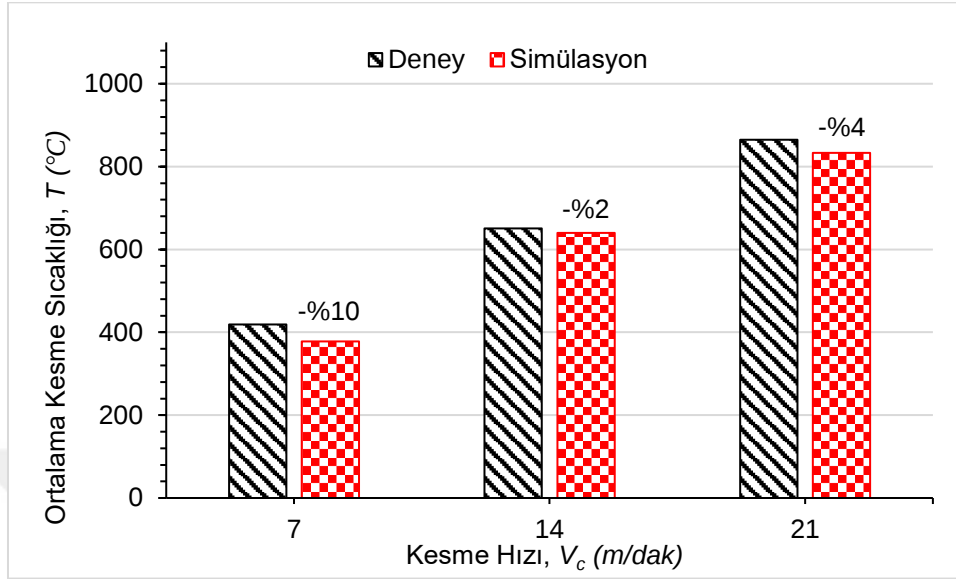
Farklı kesme hızlarında yapılan simülasyon sonuçlarında elde edilen sıcaklık görüntüleri Şekil 3.58’de sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere kesme hızının 7 m/dak kesme hızından 21 m/dak kesme hızına doğru artmasıyla oluşan kesme sıcaklıklarında bariz artış görülmektedir. Bu durum deneysel çalışmada olduğu gibidir ve deneysel çalışmayı destekler nitelikte olmuştur.



Şekil 3.58. Simülasyon sonucunda farklı kesme hızlarında oluşan sıcaklık görüntüleri.

Ortalama kesme sıcaklıkları deney ve simülasyon sonuçlarına göre Şekil 3.59’da sunulmuştur. En düşük kesme hızı olan 7 m/dak kesme hızında %90 oranında yakınsama elde edilirken, 14 m/dak kesme hızında bu oran %98 olmuştur. En yüksek kesme hızı olan 21 m/dak kesme hızında ise yakınsama oranı %96 olmuştur. Görüldüğü üzere simülasyon

sonuçları deneysel çalışma sonucunda elde edilen sıcaklık değerlerine oldukça yakın çıkmıştır.



Şekil 3.59. Farklı kesme hızlarında ve kuru kesme koşulundaki deneysel çalışma ve simülasyon sonucunda elde edilen ortalama kesme sıcaklıklarının karşılaştırılması.

Simülasyonlar sonucunda kesme kuvvetleri, itme kuvvetleri ve ortalama sıcaklık değerleri oldukça iyi bir yakınsama oranı ile tahmin edilmiştir.



4. SONUÇLAR

Bu tezde, uzay, havacılık ve biyomedikal sektöründe kullanılan şekil hafızalı alaşım olan NiTiHf alaşım malzemesinin talaşlı imalat performansı ve yüzey bütünlüğü karakteristikleri incelenmiştir.

Yapılan deneylerde farklı kesme hızları ve soğutma performansını iyileştirme çalışmaları kapsamında MQL, MQL+CO₂, kesme sıvısı ve LN₂ soğutucuları kullanılmış ve elde edilen değerleri kuru kesme sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Yapılan talaşlı imalat testlerinde kesme koşullarının talaşlı imalat performansına etkisi oldukça fazla olmuştur. Farklı soğutma koşulları kapsamında yapılan çalışmalar, kesici takım aşınması, kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülük değerleri, yüzey altı sertliği ve faz dönüşüm sıcaklıkları açısından incelenmiştir.

Farklı soğutma koşulları altında yapılan test sonuçları takım aşınması perspektifinden incelendiğinde, soğutma koşullarının takım aşınmasında ciddi oranda etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca takım aşınmasını etkileyen bir diğer parametre ise kesme hızı olarak karşımıza çıkmıştır.

Kesme kuvvetleri değerlendirildiğinde kesme hızının artması ile artan takım aşınması nedeniyle kuvvetlerde artış gözlemlenmiştir. Ayrıca takım aşınma değerlerindeki artış yüzey pürüzlülük değerlerindeki etkilemiştir.

Testler sonucunda alınan numuneler bakelite alınarak mikrosertlik değerleri açısından değerlendirilmiştir. Yüzey altı mikrosertlik değerlerinde malzemenin işlem görmemiş sertliğine oranla artış görülmüştür. Bu duruma kesme esnasında meydana gelen deformasyonlar neden olmuştur.

Faz dönüşüm sıcaklıkları için yapılan analizler sonucunda talaşlı işlemenin NiTiHf şekil hafızalı alaşım malzemesinin faz dönüşüm sıcaklıklarını ve faz dönüşüm için ihtiyaç duyulan enerjiyi önemli oranda etkilediği net olarak görülmüştür.

NiTiHf alaşımının talaşlı imalat simülasyonlarında kullanılacak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar üç farklı kesme hızında ve üç farklı kesme koşulunda yapılmıştır. Simülasyon çalışmalarında malzeme modeli olarak NASA Glenn Research Center'dan gelen gerilme-birim şekil değiştirme grafiği kullanılmıştır. Talaş kaldırma simülasyonlarında önemli parametreler olan kayma faktörü ve ısı transfer

katsayısının hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Hassasiyet analizinden elde edilen parametreler kullanılarak esas simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler, simülasyon sonuçlarıyla kıyaslanarak simülasyonların doğrulanması gerçekleştirilmiştir.



KAYNAKLAR

1. Karaca, H., et al., *NiTiHf-based shape memory alloys*. Materials Science and Technology, 2014. **30**(13): p. 1530-1544.
2. Noebe, R., T. Biles, and S. Padula, *NiTi-based high-temperature shape-memory alloys: properties, prospects, and potential applications*. MATERIALS ENGINEERING-NEW YORK-, 2006. **32**: p. 145.
3. Hartl, D.J. and D.C. Lagoudas, *Aerospace applications of shape memory alloys*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2007. **221**(4): p. 535-552.
4. Weinert, K. and V. Petzoldt, *Machining of NiTi based shape memory alloys*. Materials Science and Engineering: A, 2004. **378**(1-2): p. 180-184.
5. Mabe, J., F. Calkins, and G. Butler. *Boeing's variable geometry chevron, morphing aerostructure for jet noise reduction*. in 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 14th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 7th. 2006.
6. Auricchio, F., E. Boatti, and M. Conti, *SMA cardiovascular applications and computer-based design*, in *Shape Memory Alloy Engineering*. 2015, Elsevier. p. 343-367.
7. Weinert, K., V. Petzoldt, and D. Kötter, *Turning and drilling of NiTi shape memory alloys*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2004. **53**(1): p. 65-68.
8. Huang, H., *A study of high-speed milling characteristics of nitinol*. Materials and Manufacturing Processes, 2004. **19**(2): p. 159-175.
9. Kaynak, Y., et al., *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**(1-2): p. 51-63.
10. Kaynak, Y., H. Karaca, and I. Jawahir, *Cutting speed dependent microstructure and transformation behavior of NiTi alloy in dry and cryogenic machining*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015. **24**(1): p. 452-460.
11. Kaynak, Y., et al., *Analysis of tool-wear and cutting force components in dry, preheated, and cryogenic machining of NiTi shape memory alloys*. Procedia CIRP, 2013. **8**: p. 498-503.
12. Firstov, G., J. Van Humbeeck, and Y.N. Koval, *High temperature shape memory alloys problems and prospects*. Journal of intelligent material systems and structures, 2006. **17**(12): p. 1041-1047.
13. Simon, A.A., *Shape memory response and microstructural evolution of a severe plastically deformed high temperature shape memory alloy (NiTiHf)*. 2006, Texas A&M University.
14. Belbasi, M., M.T. Salehi, and S.A.A.A. Mousavi, *Hot Deformation Behavior of NiTiHf Shape Memory Alloy Under Hot Compression Test*. Journal of materials engineering and performance, 2012. **21**(12): p. 2594-2599.

15. Steiner, G., et al. *TEM investigation of severely deformed NiTi and NiTiHf shape memory alloys*. in *EMC 2008 14th European Microscopy Congress 1–5 September 2008, Aachen, Germany*. 2008. Springer.
16. Belbasi, M., et al., *A study on the mechanical behavior and microstructure of NiTiHf shape memory alloy under hot deformation*. *Materials Science and Engineering: A*, 2013. **560**: p. 96-102.
17. Kockar, B., et al., *A method to enhance cyclic reversibility of NiTiHf high temperature shape memory alloys*. *Scripta materialia*, 2006. **54**(12): p. 2203-2208.
18. Karaca, H., et al., *Effects of nanoprecipitation on the shape memory and material properties of an Ni-rich NiTiHf high temperature shape memory alloy*. *Acta Materialia*, 2013. **61**(19): p. 7422-7431.
19. Thierry, B., et al., *Effect of surface treatment and sterilization processes on the corrosion behavior of NiTi shape memory alloy*. 2000. **51**(4): p. 685-693.
20. Rondelli, G., B. Vicentini, and A.J.C.s. Cigada, *The corrosion behaviour of nickel titanium shape memory alloys*. 1990. **30**(8-9): p. 805-812.
21. Rondelli, G.J.B., *Corrosion resistance tests on NiTi shape memory alloy*. 1996. **17**(20): p. 2003-2008.
22. Ryhänen, J., et al., *Biocompatibility of nickel-titanium shape memory metal and its corrosion behavior in human cell cultures*. 1997. **35**(4): p. 451-457.
23. Starosvetsky, D. and I.J.B. Gotman, *Corrosion behavior of titanium nitride coated Ni–Ti shape memory surgical alloy*. 2001. **22**(13): p. 1853-1859.
24. Guo, Y., et al., *Machinability and surface integrity of Nitinol shape memory alloy*. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2013. **62**(1): p. 83-86.
25. Weinert, K. and V. Petzoldt, *Machining NiTi micro-parts by micro-milling*. *Materials Science and Engineering: A*, 2008. **481**: p. 672-675.
26. Gaikwad, V. and V.S. Jatti, *Optimization of material removal rate during electrical discharge machining of cryo-treated NiTi alloys using Taguchi's method*. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2016.
27. Akbari, J., et al. *Ultrasonic-assisted turning of NiTi shape memory alloy*. in *International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds*. 2009.
28. Huang, H., et al., *Ultrasonic vibration assisted electro-discharge machining of microholes in Nitinol*. *Journal of micromechanics and microengineering*, 2003. **13**(5): p. 693.
29. Kaynak, Y., *Machining and phase transformation response of room-temperature austenitic NiTi shape memory alloy*. *Journal of materials engineering and performance*, 2014. **23**(9): p. 3354-3360.
30. Kaynak, Y., et al., *The effects of machining on the microstructure and transformation behavior of NiTi Alloy*. *Scripta Materialia*, 2014. **74**: p. 60-63.

31. Motahari, S., M. Ghassemieh, and S. Abolmaali, *Implementation of shape memory alloy dampers for passive control of structures subjected to seismic excitations*. Journal of Constructional Steel Research, 2007. **63**(12): p. 1570-1579.
32. Lagoudas, D.C., *Shape memory alloys: modeling and engineering applications*. 2008: Springer.
33. Jawahir, I., et al., *Surface integrity in material removal processes: Recent advances*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011. **60**(2): p. 603-626.
34. Kaynak, Y., et al., *Progressive tool-wear in machining of room-temperature austenitic NiTi alloys: The influence of cooling/lubricating, melting, and heat treatment conditions*. Journal of Materials Processing Technology, 2015. **215**: p. 95-104.
35. Kaynak, Y., et al., *Surface Characteristics of Machined NiTi Shape Memory Alloy: The Effects of Cryogenic Cooling and Preheating Conditions*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017. **26**(7): p. 3597-3606.
36. Kaynak, Y., H. Karaca, and I. Jawahir, *Surface integrity characteristics of NiTi shape memory alloys resulting from dry and cryogenic machining*. Procedia CIRP, 2014. **13**: p. 393-398.
37. Green, S., D. Grant, and N.J.P.m. Kelly, *Powder metallurgical processing of Ni-Ti shape memory alloy*. 1997. **40**(1): p. 43-47.
38. Kaynak, Y., et al., *Cutting speed dependent microstructure and transformation behavior of NiTi alloy in dry and cryogenic machining*. 2015. **24**(1): p. 452-460.
39. Khalil-Allafi, J., et al., *On the influence of heterogeneous precipitation on martensitic transformations in a Ni-rich NiTi shape memory alloy*. 2004. **378**(1-2): p. 148-151.
40. Stanford, M.K., *Friction and Wear of Unlubricated NiTiHf with Nitriding Surface Treatments*. 2018.
41. Li, D.Y., *Wear behaviour of TiNi shape memory alloys*. Scripta Materialia, 1996. **34**(2): p. 195-200.
42. Lin, H., et al., *Wear characteristics of TiNi shape memory alloys*. 1997. **28**(9): p. 1871-1877.
43. Campo, K., et al., *On the hardenability of Nb-modified metastable beta Ti-5553 alloy*. Journal of Alloys and Compounds, 2016. **667**: p. 211-218.
44. Shaw, M.C. and J. Cookson, *Metal cutting principles*. Vol. 2. 2005: Oxford university press New York.
45. Sulaiman, S., A. Roshan, and S. Borazjani. *Effect of cutting parameters on tool-chip interface temperature in an orthogonal turning process*. in *Advanced Materials Research*. 2014. Trans Tech Publ.
46. Standard, I., 3685. Tool-life Testing with Single Point Turning Tools, 1993.
47. Ezugwu, E., et al., *Evaluation of the performance of CBN tools when turning Ti-6Al-4V alloy with high pressure coolant supplies*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005. **45**(9): p. 1009-1014.

48. Shaw, M.C., *Metal cutting principles*. Oxford series on Advanced Manufacturing, 2 nd edition.; New York, Oxford University Press, USA, 2005.
49. Kirmacioglu, E., Y. Kaynak, and O. Benafan, *Machinability of Ni- Rich NiTiHf High Temperature Shape Memory Alloy* Smart Materials & Structures, 2018. **Under Review**(Under Review): p. Under Review.
50. Ezugwu, E., *High speed machining of aero-engine alloys*. Journal of the Brazilian society of mechanical sciences and engineering, 2004. **26**(1): p. 1-11.
51. Oraby, S. and D. Hayhurst, *Development of models for tool wear force relationships in metal cutting*. International journal of mechanical sciences, 1991. **33**(2): p. 125-138.
52. Jawahir, I., et al., *Surface integrity in material removal processes: Recent advances*. CIRP annals, 2011. **60**(2): p. 603-626.
53. Rahman, M., Z.-G. Wang, and Y.-S. Wong, *A review on high-speed machining of titanium alloys*. JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, 2006. **49**(1): p. 11-20.
54. Sun, J. and Y. Guo, *A comprehensive experimental study on surface integrity by end milling Ti-6Al-4V*. Journal of Materials Processing Technology, 2009. **209**(8): p. 4036-4042.
55. Pusavec, F., et al., *Surface integrity in cryogenic machining of nickel based alloy—Inconel 718*. Journal of Materials Processing Technology, 2011. **211**(4): p. 773-783.
56. Sauvage, X., et al., *Phase transformations in surface layers of machined steels investigated by X-ray diffraction and Mössbauer spectrometry*. Materials Science and Engineering: A, 2003. **362**(1-2): p. 181-186.
57. Guerville, L., et al., *Influence of machining conditions on residual stresses*. Metal Cutting and High Speed Machining, Kluwer Academic Plenum Publishers, 2002: p. 201-210.
58. Sasahara, H., T. Obikawa, and T. Shirakashi, *Prediction model of surface residual stress within a machined surface by combining two orthogonal plane models*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004. **44**(7-8): p. 815-822.
59. Akhtar, W., J. Sun, and W. Chen, *Effect of machining parameters on surface integrity in high speed milling of super alloy GH4169/Inconel 718*. Materials and Manufacturing Processes, 2016. **31**(5): p. 620-627.
60. Stipkovic, M.A., et al., *Surface integrity analysis in machining of hardened AISI 4140 steel*. Materials Research, 2017. **20**(2): p. 387-394.
61. Tai, T. and K. Nguyen, *The grain size effect of polycrystalline diamond on surface integrity by using micro EDM*. Procedia CIRP, 2016. **42**: p. 305-310.
62. Motahari, S.A. and M. Ghassemieh, *Multilinear one-dimensional shape memory material model for use in structural engineering applications*. Engineering Structures, 2007. **29**(6): p. 904-913.

63. Green, S., D. Grant, and N. Kelly, *Powder metallurgical processing of Ni–Ti shape memory alloy*. Powder metallurgy, 1997. **40**(1): p. 43-47.
64. Yasa, E. and J.-P. Kruth, *Microstructural investigation of Selective Laser Melting 316L stainless steel parts exposed to laser re-melting*. Procedia Engineering, 2011. **19**: p. 389-395.
65. Yasa, E., J.-P. Kruth, and J. Deckers, *Manufacturing by combining selective laser melting and selective laser erosion/laser re-melting*. CIRP annals, 2011. **60**(1): p. 263-266.
66. Kaynak, Y., T. Lu, and I. Jawahir, *Cryogenic machining-induced surface integrity: a review and comparison with dry, MQL, and flood-cooled machining*. Machining Science and Technology, 2014. **18**(2): p. 149-198.
67. Vajpayee, S., *Analytical study of surface roughness in turning*. Wear, 1981. **70**(2): p. 165-175.
68. Quan, Y. and B. Ye, *The effect of machining on the surface properties of SiC/Al composites*. Journal of Materials Processing Technology, 2003. **138**(1-3): p. 464-467.
69. Jawahir, I., et al. *Cryogenic processing of materials for enhanced product life, performance and sustainability*. in *Proc. of 15th International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies*, Wollongong, Australia. 2012.
70. Varin, R.A., T. Czujko, and Z.S. Wronski, *Nanomaterials for solid state hydrogen storage*. 2009: Springer Science & Business Media.
71. Erdoğan, H.O., *Niti Şekil Bellekli Alaşımların Süperelastik Özelliklerinin Termo-Mekanik İşlemlerle İyileştirilmesi*. 2015.
72. Kaynak, Y., A. Gharibi, and M. Ozkutuk, *Experimental and numerical study of chip formation in orthogonal cutting of Ti-5553 alloy: the influence of cryogenic, MQL, and high pressure coolant supply*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. **94**(1-4): p. 1411-1428.
73. Kaynaka, Y. *Cryogenic cooling-induced machining performance of AISI 1045 steel*. in *2nd International Iron and Steel Symposium (IISS'15)*. 2015.
74. Sreejith, P., *Machining of 6061 aluminium alloy with MQL, dry and flooded lubricant conditions*. Materials letters, 2008. **62**(2): p. 276-278.
75. Yildiz, Y. and M. Nalbant, *A review of cryogenic cooling in machining processes*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008. **48**(9): p. 947-964.
76. Manual, D., *User Manual SFTC- Deform V11*, C. Scientific Forming Technologies Corporation Ed, OH, USA, Editor. 2015.
77. Umbrello, D., *Finite element simulation of conventional and high speed machining of Ti6Al4V alloy*. Journal of materials processing technology, 2008. **196**(1-3): p. 79-87.
78. Caruso, S., et al., *Finite element modeling of microstructural changes in Waspaloy dry machining*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017. **89**(1-4): p. 227-240.

79. Yen, Y.-C., et al., *Computer simulation of orthogonal cutting using a tool with multiple coatings*. Machining science and technology, 2004. **8**(2): p. 305-326.
80. Cockcroft, M. and D. Latham, *Ductility and the workability of metals*. J Inst Metals, 1968. **96**(1): p. 33-39.
81. Sartkulvanich, P., T. Altan, and A. Göçmen, *Effects of flow stress and friction models in finite element simulation of orthogonal cutting—a sensitivity analysis*. Machine Science and Technology, 2005. **9**(1): p. 1-26.
82. Yen, Y.-C., A. Jain, and T. Altan, *A finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries*. Journal of materials processing technology, 2004. **146**(1): p. 72-81.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Emre Taşcıoğlu
Doğum Yeri ve Tarihi : Bakırköy/ 10.04.1993
İletişim : emre_tascioglu@hotmail.com

EĞİTİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans :Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü
Lisans :Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

İŞ TECRÜBELERİ

Torun Bakır Alaşımları Metal San. Ve Tic. A.Ş.
Görevi: AR-GE Mühendisi
Başlangıç yılı: 2019
Bitiş yılı: Devam ediyor

PROJELER

"Şekil Hafızalı Nitinol Malzemelerin Talaşlı İmalatı-Yüzey Bütünlüğü-Ürün Performansı Arasındaki İlişkinin Araştırılması", Destekleyen Kuruluş: TÜBİTAK ARDEB (TÜBİTAK-1001 Projesi), NASA Glenn Research Center, ABD, Görev: Proje Bursiyeri, Proje NO: 116M346

YAYINLAR

- Tascioglu, E., Y. Karabulut, and Y. Kaynak, (2020) Influence of heat treatment temperature on the microstructural, mechanical, and wear behavior of 316L stainless steel fabricated by laser powder bed additive manufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020: p. 1-10.
- Zoghipour, N., Tascioglu, E., Atay, G., & Kaynak, Y. (2020). Machining-induced surface integrity of holes drilled in lead-free brass alloy. Procedia CIRP, 87, 148-152.
- Karabulut, Y., E. Tascioglu, and Y. Kaynak, (2019) Heat treatment temperature-induced microstructure, microhardness and wear resistance of Inconel 718 produced by selective laser melting additive manufacturing. Optik, 2019: p. 163907.

- Tascioglu, E., Kaynak, Y., Poyraz, Ö., Orhangül, A., & Ören, S. (2019, September). The Effect of Finish-Milling Operation on Surface Quality and Wear Resistance of Inconel 625 Produced by Selective Laser Melting Additive Manufacturing. In International Conference on Advanced Surface Enhancement (pp. 263-272). Springer, Singapore.
- Tascioglu, E., Gharibi, A., & Kaynak, Y. (2019). High speed machining of near-beta titanium Ti-5553 alloy under various cooling and lubrication conditions. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 102(9-12), 4257-4271.
- Tankus, K., Tascioglu, E., Atay, G., Brunken, H., & Kaynak, Y. (2020). The effect of cutting parameters and cutting tools on machining performance of carbon graphite material. Machining Science and Technology, 24(1), 96-111.
- Kaynak, Y., Tascioglu, E., & Benafan, O. (2019, September). Surface Integrity Characteristics of NiTiHf High Temperature Shape Memory Alloys. In International Conference on Advanced Surface Enhancement (pp. 254-262). Springer, Singapore.
- Karabulut, Y., Tascioglu, E., and Kaynak, Y., (2019). Şekil hafızalı NiTiHf alaşım malzemesinden talaş kaldırma sürecinin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenerek simülasyonu ve deneysel verilerle doğrulanması, 10th International Congress On Machining (pp.1-10). Antalya, Turkey
- Kamber, Ö. Ş., & Taşcıoğlu, E. The Effect of Processing on the Surface and Subsurface Characteristic of Plastic Injection Mold Steel. International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences, 31, 17-22.
- Kaynak, Y., & Tascioglu, E. (2019). Post-processing effects on the surface characteristics of Inconel 718 alloy fabricated by selective laser melting additive manufacturing. Progress in Additive Manufacturing, 1-14.
- Kıtay, Ö., Taşcıoğlu, E., Kaş, M., Nesli Ş., Kaynak, Y., Yılmaz, O. (2018) Seçici Lazerle Ergitme Yöntemi ile Üretilen Inconel 625 Alaşımlı Parçada Yüzey Bütünlüğünün İncelenmesi, UMTIK 2018, Eskişehir, Turkey
- Kaynak, Y., & Tascioglu, E. (2018). Finish machining-induced surface roughness, microhardness and XRD analysis of selective laser melted Inconel 718 alloy. Procedia Cirp, 71, 500-504.

- Dengiz, M., Sarıçan, Ö., Kıtay, Ö., Taşcıoğlu, E., Kaynak, Y. (2017) 316LVM Paslanmaz Çelik Malzemesinin Talaşlı İmalat ve Yüzey Bütünlüğü Analizi, 8th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, Turkey.
- Sirin, T., Taşcıoğlu, E., Kaynak, Y. (2019). Farklı Kesme Koşullarında İşlenmiş Ti-5553 Alaşım Malzemesinin Aşınma Dayanımının İncelenmesi, 10th International Congress On Machining . Antalya, Turkey
- Taşcıoğlu, E., Çiçek, S., Kaynak, Y. (2019). Kriyojenik Soğutma Kullanılarak İşlenmiş Kurşunsuz Pirinç Malzemelerin Yüzey Bütünlüğü Karakteristiklerinin İncelenmesi, 10th International Congress On Machining . Antalya, Turkey

