



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TORNALAMADA KRİYOJENİK SOĞUTMA VE MİNİMUM
MİKTARDA YAĞLAMANIN KESİCİ TAKIM AŞINMASI VE
TİTREŞİMİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

ONUR ÖZBEK

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. HAMİT SARUHAN**

DÜZCE, 2020

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TORNALAMADA KRİYOJENİK SOĞUTMA VE MİNİMUM
MİKTARDA YAĞLAMANIN KESİCİ TAKIM AŞINMASI VE
TİTREŞİMİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Onur ÖZBEK tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Hamit SARUHAN

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Hamit SARUHAN

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. İlyas UYGUR

Düzce Üniversitesi

Doç.Dr. Fuat KARA

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Kubilay ASLANTAŞ

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Prof. Dr. Uğur KÖKLÜ

Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 30/06/2020

BEYAN

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

30 Haziran 2020

Onur ÖZBEK



TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimimde gösterdiği destek ve yardımdan dolayı değerli hocam Prof. Dr. Hamit SARUHAN'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen arkadaşlarım Doç Dr. Fuat KARA, Dr. Öğr. Üyesi Engin NAS, Öğr. Gör. Oğuzhan KENDİRLİ, Öğr. Gör. Gültekin ÇAKIR ve Öğr. Gör. Sabri UZUNER'e teşekkür ederim.

Büyük fedakârlıklarla beni büyüten, okutan anne ve babama, her zaman sabrı ile maddi manevi olarak yanımda olan eşim Nursel ALTAN ÖZBEK'e, oğlum Yağız ve kızım Yaren'e teşekkür ederim.

Deneylerin gerçekleştirilebilmesi için MQL sistemlerini kullanmamıza izin veren Zirve Sanayi Ürünlerine teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP- 2019.06.05.974 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

30 Haziran 2020

Onur ÖZBEK

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
KISALTMALAR.....	xi
SİMGELER	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
EXTENDED ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM	25
3.1. İŞ PARÇASI NUMUNESİ	25
3.2. KESİCİ TAKIM VE TAKIM TUTUCU.....	25
3.3. KESME PARAMETRELERİ.....	28
3.4. MQL SİSTEMİ	28
3.5. KRİYOJENİK SOĞUTMA SİSTEMİ.....	30
3.6. KESME BÖLGESİ SICAKLIĞININ ÖLÇÜLMESİ	31
3.7. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN ÖLÇÜLMESİ.....	32
3.8. KESİCİ TAKIM TİTREŞİMİNİN ÖLÇÜLMESİ.....	33
3.9. KESİCİ TAKIM AŞINMASININ ÖLÇÜLMESİ	35
3.10. CNC TORNA TEZGÂHI VE DENEY DÜZENEĞİ.....	35
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA.....	38
4.1. KESME BÖLGESİ SICAKLIĞININ DEĞERLENDİRİLMESİ	38
4.2. KESİCİ TAKIM TİTREŞİMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	43
4.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	60
4.4. KESİCİ TAKIM AŞINMASININ DEĞERLENDİRİLMESİ	65
4.5. KESİCİ TAKIM ÖMRÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ	79
4.6. TALAŞ ŞEKİLLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	88
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	92
5.1. SONUÇLAR.....	92
5.2. ÖNERİLER.....	94
6. KAYNAKLAR.....	95
ÖZGEÇMİŞ	105

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1. Tornalama iş parçası numunesi	25
Şekil 3.2. CNMG 120408 MT TT 5080 serisi kesici takım boyutları	26
Şekil 3.3. CVD ve PVD kaplı kesici takımların mikrosertlik değerleri	26
Şekil 3.4. CVD kaplı takımın mikroyapı görüntüsü	27
Şekil 3.5. PVD kaplı takımın mikroyapı görüntüsü.....	27
Şekil 3.6. PCLNR2020M12-TB takım tutucu ve boyutları	28
Şekil 3.7. Deneylerde kullanılan MQL cihazı nozul bağlantısı	29
Şekil 3.8. Deneylerde kullanılan kriyojenik soğutma sistemi	30
Şekil 3.9. Deneylerde kullanılan termal kameranın konumu.....	31
Şekil 3.10. Kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın ölçümü.....	32
Şekil 3.11. Yüzey pürüzlülüğünün ölçümü	32
Şekil 3.12. Kesici takımın bulunduğu katere üç eksen (X,Y ve Z) monte edilen ivmeölçer	33
Şekil 3.13. Kesici takımın bulunduğu katere üç eksen (X,Y ve Z) ivmeölçerinin montajının görünüşü.....	33
Şekil 3.14. SpectraQuest veri toplama sistemi	34
Şekil 3.15. VibraQuest titreşim analiz programı	34
Şekil 3.16. Kesici takım aşınmasının ölçüldüğü DINO LITE 2.0 mikroskop	35
Şekil 3.17. Kesici takımlarda oluşan yanak aşınmasının ölçülmesi	35
Şekil 3.18. Deney düzeneği	37
Şekil 4.1. Farklı kesme koşulları altında talaş akışının termal görüntüsü	38
Şekil 4.2. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda en yüksek kesme bölgesi sıcaklıkları ($f=0,06$ mm/dev)	42
Şekil 4.3. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda en yüksek kesme bölgesi sıcaklıkları ($f=0,09$ mm/dev)	42
Şekil 4.4. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda en yüksek kesme bölgesi sıcaklıkları ($f=0,12$ mm/dev)	43
Şekil 4.5. CVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,06$ mm/dev, $V=60$ m/dak)	44
Şekil 4.6. CVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,06$ mm/dev, $V=90$ m/dak)	45
Şekil 4.7. CVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,06$ mm/dev, $V=120$ m/dak)	45
Şekil 4.8. CVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,09$ mm/dev, $V=60$ m/dak)	46
Şekil 4.9. CVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,09$ mm/dev, $V=90$ m/dak)	46
Şekil 4.10. CVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,09$ mm/dev, $V=120$ m/dak)	47
Şekil 4.11. CVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,12$ mm/dev, $V=60$ m/dak)	47
Şekil 4.12. CVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,12$ mm/dev, $V=90$ m/dak)	48
Şekil 4.13. CVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,12$ mm/dev, $V=120$ m/dak)	48
Şekil 4.14. PVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,06$	

mm/dev, V=60 m/dak)	49
Şekil 4.15. PVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri (f=0,06 mm/dev, V=90 m/dak)	49
Şekil 4.16. PVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri (f=0,06 mm/dev, V=120 m/dak)	50
Şekil 4.17. PVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri (f=0,09 mm/dev, V=60 m/dak)	50
Şekil 4.18. PVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri (f=0,09 mm/dev, V=90 m/dak)	51
Şekil 4.19. PVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri (f=0,09 mm/dev, V=120 m/dak)	51
Şekil 4.20. PVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri (f=0,12 mm/dev, V=60 m/dak)	52
Şekil 4.21. PVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri (f=0,12 mm/dev, V=90 m/dak)	52
Şekil 4.22. PVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri (f=0,12 mm/dev, V=120 m/dak)	53
Şekil 4.23. X ekseninde 0,06 mm/dev ilerleme hızında farklı kesme hızlarında kesici takım titreşim genlik değerlerinin ortalaması.....	55
Şekil 4.24. X ekseninde 0,09 mm/dev ilerleme hızında farklı kesme hızlarında kesici takım titreşim genlik değerlerinin ortalaması.....	55
Şekil 4.25. X ekseninde 0,12 mm/dev ilerleme hızında farklı kesme hızlarında kesici takım titreşim genlik değerlerinin ortalaması.....	56
Şekil 4.26. Y ekseninde 0,06 mm/dev ilerleme hızında farklı kesme hızlarında kesici takım titreşim genlik değerlerinin ortalaması.....	57
Şekil 4.27. Y ekseninde 0,09 mm/dev ilerleme hızında farklı kesme hızlarında kesici takım titreşim genlik değerlerinin ortalaması.....	57
Şekil 4.28. Y ekseninde 0,12 mm/dev ilerleme hızında farklı kesme hızlarında kesici takım titreşim genlik değerlerinin ortalaması.....	58
Şekil 4.29. Z ekseninde 0,06 mm/dev ilerleme hızında farklı kesme hızlarında kesici takım titreşim genlik değerlerinin ortalaması.....	59
Şekil 4.30. Z ekseninde 0,09 mm/dev ilerleme hızında farklı kesme hızlarında kesici takım titreşim genlik değerlerinin ortalaması.....	59
Şekil 4.31. Z ekseninde 0,12 mm/dev ilerleme hızında farklı kesme hızlarında kesici takım titreşim genlik değerlerinin ortalaması.....	60
Şekil 4.32. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda Ra yüzey pürüzlülük değerleri (f=0,06 mm/dev)	62
Şekil 4.33. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda Ra yüzey pürüzlülük değerleri (f=0,09 mm/dev)	63
Şekil 4.34. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda Ra yüzey pürüzlülük değerleri (f=0,12 mm/dev)	63
Şekil 4.35. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda Rz yüzey pürüzlülük değerleri (f=0,06 mm/dev)	64
Şekil 4.36. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda Rz yüzey pürüzlülük değerleri (f=0,09 mm/dev)	65
Şekil 4.37. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda Rz yüzey pürüzlülük değerleri (f=0,12 mm/dev)	65
Şekil 4.38. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda yanak aşınmasındaki değişim (f=0,06 mm/dev)	69
Şekil 4.39. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda yanak	

aşınmasındaki değişim ($f=0,09$ mm/dev).....	70
Şekil 4.40. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda yanak aşınmasındaki değişim ($f=0,12$ mm/dev).....	70
Şekil 4.41. CVD kaplı takımların farklı kesme ortamlarında yanak aşınmasındaki değişim fotoğrafları	72
Şekil 4.42. PVD kaplı takımların farklı kesme ortamlarında yanak aşınmasındaki değişim fotoğrafları	73
Şekil 4.43. CVD kaplı kesici takımın kuru işleme koşullarında SEM fotoğrafları ($f=0,09$ mm/dev, $V=120$ m/dak)	74
Şekil 4.44. CVD kaplı kesici takımların EDX analizi ve takım üzerindeki mikro çatlakların SEM fotoğrafı.....	75
Şekil 4.45. CVD kaplı kesici takımların EDX analizi	75
Şekil 4.46. PVD kaplı kesici takımların kuru işleme koşullarında SEM fotoğrafları ($f=0,09$ mm/dev, $V=120$ m/dak)	76
Şekil 4.47. CVD kaplı kesici takımların MQL işleme koşullarında SEM fotoğrafları ($f=0,09$ mm/dev, $V=120$ m/dak)	76
Şekil 4.48. PVD kaplı kesici takımların MQL işleme koşullarında SEM fotoğrafları ($f=0,09$ mm/dev, $V=120$ m/dak)	77
Şekil 4.49. CVD kaplı kesici takımların kriyojenik soğutma ile işleme koşullarında SEM fotoğrafları ($f=0,09$ mm/dev, $V=120$ m/dak).....	77
Şekil 4.50. PVD kaplı kesici takımların kriyojenik soğutma ile işleme koşullarında SEM fotoğrafları ($f=0,09$ mm/dev, $V=120$ m/dak).....	78
Şekil 4.51. CVD kaplı kesici takımların MQL+Kry işleme koşullarında SEM fotoğrafları ($f=0,09$ mm/dev, $V=120$ m/dak)	78
Şekil 4.52. PVD kaplı kesici takımların MQL+Kry işleme koşullarında SEM fotoğrafları ($f=0,09$ mm/dev, $V=120$ m/dak)	79
Şekil 4.53. CVD kaplı kesici takımların farklı ortamlarda takım ömrü değişimi ($f=0,09$ mm/dev ve 90 m/dak).....	81
Şekil 4.54. PVD kaplı kesici takımların farklı ortamlarda takım ömrü değişimi ($f=0,09$ mm/dev ve 90 m/dak).....	82
Şekil 4.55. CVD kaplı kesici takımın Kuru işleme koşullarında ömür deneyleri sonrası SEM fotoğrafları	83
Şekil 4.56. CVD kaplı kesici takımın MQL işleme koşullarında ömür deneyleri sonrası SEM fotoğrafları	84
Şekil 4.57. CVD kaplı kesici takımın Kry işleme koşullarında ömür deneyleri sonrası SEM fotoğrafları	84
Şekil 4.58. CVD kaplı kesici takımın MQL+Kry işleme koşullarında ömür deneyleri sonrası SEM fotoğrafları	85
Şekil 4.59. PVD kaplı kesici takımın Kuru işleme koşullarında ömür deneyleri sonrası SEM fotoğrafları	85
Şekil 4.60. PVD kaplı kesici takımın MQL işleme koşullarında ömür deneyleri sonrası SEM fotoğrafları	86
Şekil 4.61. PVD kaplı kesici takımın Kry işleme koşullarında ömür deneyleri sonrası SEM fotoğrafları	86
Şekil 4.62. PVD kaplı kesici takımın MQL+Kry işleme koşullarında ömür deneyleri sonrası SEM fotoğrafları	87
Şekil 4.63. PVD kaplı kesici takımın MQL+Kry işleme koşullarında ömür deneyleri sonrası oluşan krater aşınmasının SEM fotoğrafı	87
Şekil 4.64. CVD kaplı kesici takımın farklı kesme ortamlarında gerçekleştirilen deneyler sonrası oluşan talaşların fotoğrafları.....	90

Şekil 4.65. PVD kaplı kesici takımın farklı kesme ortamlarında gerçekleştirilen deneyler sonrası oluşan talaşların fotoğrafları..... 91



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 3.1. AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin kimyasal bileşenleri	25
Çizelge 3.2. Kesme parametreleri	28
Çizelge 3.3. MQL sistemi genel özellikleri	29
Çizelge 3.4. Bitkisel MQL kesme yağı özellikleri.....	30
Çizelge 3.5. CNC torna tezgâhının teknik özellikleri	36
Çizelge 4.1. Farklı kesme ortamlarında gerçekleştirilen ömür deneyleri sonrası kesici takımlardaki yanak aşınmalarının fotoğrafları	83



KISALTMALAR

CNC	Computer numerical control (Bilgisayarlı sayısal denetim)
CO ₂	Karbondioksit
CVD	Chemical vapour deposition (Kimyasal buhar biriktirme)
HSS	High speed steel (Yüksek hız çeliği)
Kry	Kriyojenik soğutma ile işleme
LN ₂	Liquid nitrogen (Sıvı azot)
MQL	Minimum quantity lubrication (Minimum miktarda yağlama)
MQL+Kry	Minimum miktarda yağlama + Kriyojenik soğutma
PVD	Physical vapour deposition (Fiziksel buhar çökeltme)
SEM	Scanning electron microscope (Taramalı elektron mikroskobu)
WC	Tungsten karbür

SİMGELER

a	Kesme Derinliği, mm
f	İlerleme hızı, mm/dev
Hz	Hertz (Herz)
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülüğü μm
Rz	En yüksek 5 girinti ve çıkıntının ortalama yüzey pürüzlülüğü μm
V	Kesme hızı, m/dak
Vb	Yanak aşınması, mm



ÖZET

TORNALAMADA KRİYOJENİK SOĞUTMA VE MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMANIN KESİCİ TAKIM AŞINMASI VE TİTREŞİMİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Onur ÖZBEK

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Hamit SARUHAN

Haziran 2020, 104 sayfa

İnsanoğlunun ihtiyaçlarını karşılayabilmek için teknoloji gelişiminin hiç olmadığı kadar ivme kazandığı günümüzde hem üretim verimliliği hem de ekolojik verimliliğe duyulan ihtiyacın belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Bu nedenle sürdürülebilir imalat kapsamında içinde bulunduğumuz yüzyılda teknolojinin gelişimiyle birlikte yeni soğutma ve yağlama çalışmaları giderek önem kazanmıştır. Bu çalışmada, sürdürülebilir imalat için en basit yöntem sayılabilecek kuru tornalama ile minimum miktarda yağlama, kriyojenik soğutma ve bu iki yöntemin birlikte kullanıldığı karma bir yöntem deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Deneyler CVD (Chemical Vapour Deposition - Kimyasal Buhar Biriktirme) ve PVD (Physical Vapour Deposition - Fiziksel Buhar Çökeltme) yöntemleri ile kaplanmış tungsten karbür takımlar kullanılarak 60, 90, 120 m/dak kesme hızlarında; 0,06, 0,09, 0,12 mm/dev ilerleme hızlarında ve 1 mm sabit kesme derinliğinde gerçekleştirilmiştir. Tüm kesme şartları için toplamda 72 adet deney gerçekleştirilmiş ve bu deneylerin tümünde yüzey pürüzlülüğü için Ra, Rz değerleri, kesme bölgesi sıcaklığı, üç ekseninde kesici takım titreşimi ve kesici takım aşınması değerleri ölçülmüştür. Ayrıca farklı soğutma yağlama türlerinin kesici takım ömrüne etkisinin belirlenebilmesi için bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları MQL (Minimum Quantity Lubrication - Minimum Miktarda Yağlama) tekniğinin yüzey pürüzlülüğünde kuru tornalamaya göre %90,12 daha iyi, MQL+Kry (Minimum miktarda yağlama+Kriyojenik soğutma) yönteminin kesme bölgesi sıcaklığı açısından kuru tornalamaya göre %53,59 daha düşük değerler verdiğini göstermiştir. Ayrıca MQL+Kry yönteminin kullanılması ile takım ömrü kuru tornalamaya kıyasla altı kat artmıştır.

Anahtar sözcükler: Kriyojenik soğutma, Minimum miktarda yağlama, Takım aşınması, Yüzey pürüzlülüğü, Kesici takım titreşimi.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS IN TURNING OF CRYOGENIC COOLING AND MINIMUM QUANTITY LUBRICATION ON CUTTING TOOL WEAR AND VIBRATION

Onur ÖZBEK

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Hamit SARUHAN

June 2020, 104 pages

It is observed that the need for both production efficiency and ecological efficiency has increased significantly today, as technology development has gained momentum to meet the needs of human beings. For this reason, with the development of technology, new cooling and lubrication studies have gradually gained importance within the scope of sustainable manufacturing. In this study, dry turning which is considered as the simplest method for sustainable manufacturing, minimum quantity lubrication (MQL), cryogenic cooling (Kry), and a mixture of minimum quantity lubrication and cryogenic cooling (MQL+Kry) were utilized and compared experimentally. Experiments were conducted using tungsten carbide cutting tools coated with CVD (Chemical Vapor Deposition) and PVD (Physical Vapor Deposition) methods at 60, 90 and 120 m/min cutting speeds and 0.06, 0.09, and 0.12 mm/rev feed rates by having constant depth of cut 1 mm. A total of 72 experiments were carried out to see the effects on cutting temperature, cutting tool vibration, tool wear, surface roughness (Ra and Rz) and tool life. The experimental results showed that the MQL technique yielded 90.12% better in surface roughness than dry turning, and the MQL+Kry method showed 53.59% lower in terms of cutting zone temperature than dry turning. In addition, with the use of the MQL+Kry method, the tool life has increased six-fold compared to dry turning. Also, for both cutting tool types PVD and CVD using dry and MQL cutting conditions with increased cutting speed, the cutting zone temperature, cutting tool vibration amplitude values, surface roughness (Ra and Rz) and tool wear increased as well.

Keywords: Cryogenic cooling, Minimum quantity lubrication, Tool wear, Surface roughness, Cutting tool vibration.

EXTENDED ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS IN TURNING OF CRYOGENIC COOLING AND MINIMUM QUANTITY LUBRICATION ON CUTTING TOOL WEAR AND VIBRATION

Onur ÖZBEK

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Hamit SARUHAN

June 2020, 104 pages

1. INTRODUCTION

Especially in the framework of sustainable manufacturing, dry processing, cryogenic application to cutting tools, minimum quantity lubrication (MQL), cryogenic cooling (Kry), high-pressure cooling techniques have become prominent and their usage has become widespread to avoid using less or no coolant. Because it does not contribute to the health of the employee due to the absence of coolant, the absence of coolant to be eliminated after processing can also be considered among the reasons for the dry processing. However, due to the high temperatures in the cutting area, tool wear increases, so important parameters such as surface roughness and tool life are negatively affected. It is preferred because of the lack of coolant to be disposed of, such as dry machining, in MQL processing and especially the vegetable cutting fluids used have no negative effects on employee health. Another contribution of the MQL method is its contribution to surface roughness with its lubrication feature. However, in this method, the tool life is not at the desired level since the cutting zone temperature that falls compared to dry turning is incomparably higher than the use of coolant. In the cryogenic cooling process based on cooling the cutting zone, various cryogenic gases are sent to the cutting zone. This method, which reduces the formation of wear types caused by temperature by lowering the cutting zone temperature, is newer than other methods. However, as with other methods, this method has negative aspects. The most important negative aspect of cryogenic cooling is the lack of lubricating properties. Since it has no lubricant feature, it does not give positive results as the MQL method in terms of surface roughness. To eliminate this negativity, a mixture of minimum quantity lubrication and cryogenic cooling (MQL+Kry) has been tried. With this method, both the cryogenic cooling decreases the cutting zone temperature, and the lubricating feature of the MQL method is used.

In this study, it is aimed to determine the cutting tool vibration, cutting area temperature, tool wear, tool life, and surface roughness change that affect the workpiece quality as well as turning the AISI D2 cold work tool steel, which is widely used, with different cooling lubrication methods. To determine the effect of cutting tool coating and cutting parameters on these outputs, two different cutting tool coating types and three different cutting speeds and three different feed rates are used. In this way, it is aimed to contribute to sustainable production as well as obtaining data that can be utilized by companies that intensely shake the industry.

2. MATERIAL AND METHODS

AISI D2 cold work tool steel with high strength, hardness and wear resistance was used due to its high carbon and chromium ratio. As a cutting tool for turning experiments, the PVD method of the TaeguTec brand CNMG 120408 MT TT 5080 series and the TiAlN-TiN coated tungsten carbide tool, and the TiCN-Al₂O₃-TiN coated tungsten carbide tool of the CNMG 120408 MT TT 8225 series were used. Turning experiments were repeated at constant cutting depth for three different cutting speeds and three different feed rates for 4 different cooling conditions. B1-210 model produced by Bielomatik firm was used as an MQL system. 100% biodegradable vegetable-based SAMNOS ZM-22W cutting oil was used in turning experiments. In the turning experiments, the temperature formed in the cutting area was measured with OPTRIS brand PI 450 thermal camera. The vibration data are measured by accelerometers in three directions (x, y and z axes) and the data are collected simultaneously using the SpectraQuest data acquisition system with analog data collection inputs. The amount of flank wear in the cutting tools was measured with the aid of a microscope. Photographs were taken using scanning electron microscopy (SEM) to better understand the types and mechanisms of tool wear.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

In this thesis, the results and discussion section are examined in five sections. The first Section is the evaluation of the cutting zone temperature. In experiments, it was observed that for both cutting tool types, the highest temperature occurred in the dry cutting environment at all feed rates and cutting speeds, and temperature decreased significantly in MQL, Kry, and MQL+Kry cutting environments. The lowest cutting zone temperature is provided in the MQL+Kry cutting environment. Also, it has been determined that in all cutting environments, the temperature in the cutting zone increases with the advance

speed and cutting speed. It is thought that increasing the feed rate and cutting speed causes friction in the cutting tool and chip interface to increase, thus increasing the temperature of the cutting zone. In the second Section, cutting tool vibration is evaluated. In the cutting tool vibration values measured in three axes, the highest values were measured in the Z-axis in the direction of travel and showed the effect of progression in cutting tool vibration. Besides, cutting tool vibration has increased with increasing cutting speed and feed rate. Four different environments were utilized in the experiments, the cutting tool vibration was at the highest dry turning, while the lowest values were obtained under MQL+Kry turning conditions. In the third Section, the workpiece surface roughness is examined in two different outputs as Ra and Rz. The results overlap with cutting zone temperature and cutting tool vibration values. While the highest Ra and Rz values were obtained in dry turning conditions, the lowest values were obtained in turning conditions with MQL. This result showed that lubrication is more effective in surface roughness than cooling. In the fourth Section, the cutting tool wear is examined. It is determined that PVD coated tools wear less than CVD tools. Also, the increase in cutting speed and feed rate has been shown to increase cutting tool wear. The highest cutting tool wear values are obtained in dry turning, while the lowest cutting tool wear values are obtained in the MQL+Kry machining environment. In, the fifth Section the life tests of the cutting tools have been made and it has been seen that the PVD coated tool has a longer life in machining AISI D2 cold work tool steel. Also, 6 times more tool life has been determined in MQL+Kry conditions compared to dry turning.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

In this thesis, AISI D2 cold work tool steel is processed with four different cooling methods, three different feed rates (0.06, 0.09 and 0.12 mm/rev), three different cutting speeds (60, 90 and 120 m/min), Cutting tools with two different coating types, CVD and PVD, were used. The results showed that the cutting area temperature of the CVD coated tool was higher than that of the PVD coated tool. CVD tool has higher cutting tool vibration values than the PVD coated tool. Besides, it was concluded that the wear values of the CVD tool are high due to the high cutting zone and cutting tool values. It was observed that lubrication was more important than the cutting zone temperature for the surface roughness value. In terms of tool life, it was determined that the PVD coated tool removed more amount of tool life for AISI D2 cold work tool steel.

It can be concluded that the PVD coated tool has a longer life in machining AISI D2 cold

work tool steel. Also, 6 times more tool life has been determined in MQL+Kry conditions compared to dry turning. Also, it was determined that the best result was in MQL+Kry cooling and lubrication condition. This can be explained by the high temperatures and vibrations generated in the cutting zone of the CVD-coated tool, which increased the wear on the cutting tool, thus reducing its tool life.



1. GİRİŞ

Gün geçtikçe daha fazla ürüne ihtiyaç duyan insanoğlunun beklentilerini karşılayabilmek için teknoloji aynı oranda gelişim göstermektedir. Teknoloji gelişiminin hiç olmadığı kadar ivme kazandığı günümüzde üretim verimliliğine duyulan ihtiyacın belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Gelecek nesillerin kendi ihtiyaçlarını karşılama yeteneğinden ödün vermeden günümüz insanın ihtiyacını karşılamaya çalışmak için ekolojik olarak ta verimli bir üretim sistemi her geçen gün daha da önem kazanır hale gelmiştir. Tüm bu beklentiler göz önüne alındığında kaliteli, teknolojik ve daha fazla ürünün çevreye zarar vermeden üretilmesi yani sürdürülebilir imalat için çalışmaların yapılması bilimin odak noktası olmalıdır.

Sürdürülebilir imalat; ürünün, sürecin kalitesini iyileştirirken daha az olumsuz çevresel etki oluşturması, daha az kaynak kullanılması, minimum miktarda atık üretmesi ve daha fazla operasyonel güvenliğin sağlanmasının yanında kişisel sağlık sağlanması olarak vurgulanmıştır [1]. Sürdürülebilir imalat kavramını tartışabilmek için birkaç yüzyıl geriye gitmek gerekmektedir. Sanayi devrimiyle birlikte artan ihtiyaçların karşılanması amacıyla daha fazla metal çeşidi üretilmeye ve işlenmeye başlanmıştır. Ölçü tamlığı, yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü açısından kuru işleme şartları oldukça düşük performans verdiğinden 20. yüzyılın başlarında kesme sıvısı kullanımı yaygınlaşmıştır [2]–[4].

Kesme sıvılarının nihai ürün kalitesini ve üretim hızını arttırmasının yanında insan sağlığına zararlarından ekonomik olmamalarına kadar pek çok olumsuz özelliğe de sahip olduğu bilinmekte ve bu alanda pek çok çalışmanın yapıldığı anlaşılmaktadır [5]–[9].

Ayrıca 20.yüzyılın son çeyreğinden itibaren teknoloji olarak daha hızlı gelişim gösteren yeni metalleri işlemede verimli olmayan kesme sıvısının ömrünü tamamladıktan sonra bertarafının maliyeti kesme sıvısının maliyetinin iki katını bulabilmektedir [10], [11]. Dahası sürdürülebilir imalatta daha az kaynak kullanımı için daha az kesici takım kullanımı gereği doğmuştur. Dayanımı yüksek metallerin kullanımlarının artmasıyla birlikte kesici takım maliyetleri de artış göstermiştir. Bu maliyete önceleri kesici takım ömürlerinin düşük olması nedeniyle kesici takımlardan yüksek miktarlarda kullanılması

katkı sağlarken, sonraları kesici takımlar içinde teknolojinin gelişmesiyle yapılan araştırma-gelişme maliyeti de eklenmiştir. Bu beklentilerin yanında ürün kalitesini doğrudan etkileyen ölçü tamlığı, yüzey pürüzlülüğü, düşük titreşim dolayısıyla düşük gürültüde çalışabilme gibi kalite standartları da gün geçtikçe artmaktadır. Dolayısıyla 20.yüzyılın sonlarında yeni soğutma ve yağlama çalışmaları da hız kazanmıştır.

Özellikle sürdürülebilir imalat çerçevesinde daha az miktarda ya da hiç kesme sıvısı kullanmamak için son yıllarda kuru işleme, kesici takımlara kriyojenik uygulama, MQL, kriyojenik soğutma, yüksek basınçlı soğutma teknikleri öne çıkmış ve kullanımları yaygınlaşmıştır. Kesme sıvısı kullanılmaması nedeniyle çalışan sağlığına önemli katkı sunmasının yanında işleme sonrası berteraf edilecek kesme sıvısı olmaması da kuru işlemenin tercih sebepleri arasında sayılabilir. Ancak kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıklar nedeniyle takım aşınması artmakta dolayısıyla yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü gibi önemli parametreler olumsuz etkilenmektedir. MQL ile işlemede de kuru işleme gibi bertaraf edilecek kesme sıvısı olmaması ve özellikle kullanılan bitkisel kesme sıvılarının çalışan sağlığına olumsuz etkilerinin olmaması nedeniyle tercih edilmektedir. MQL yönteminin diğer bir katkısı da sağladığı yağlama özelliği ile düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilebilmesidir. Ancak bu yöntemde de kuru tornalamaya göre düşük kesme bölgesi sıcaklığı, soğutma sıvısı kullanımına göre kıyaslanamayacak kadar yüksek olması nedeniyle takım ömrü istenilen düzeyde değildir. Kesme bölgesini soğutma esasına dayanan kriyojenik soğutma işleminde kesme bölgesine çeşitli kriyojenik gazlar (O₂, CO₂, LN₂) gönderilmektedir. Kesme bölgesi sıcaklığının düşürülmesi ile sıcaklık nedeniyle oluşan aşınma tiplerinin önemli ölçüde oluşumunun düşürüldüğü bu yöntem diğer yöntemlere göre daha yenidir. Ancak diğer yöntemlerde olduğu gibi bu yöntemde olumsuz yanları bulunmaktadır. En önemli olumsuz yanı kriyojenik soğutmanın yağlayıcı özelliğinin olmamasıdır. Yağlayıcı özelliği olmadığından yüzey pürüzlülüğü açısından MQL yöntemi kadar olumlu sonuçlar vermemektedir. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için hibrit bir yöntem olan MQL+Kriyojenik soğutma yöntemi denenmeye başlanmıştır. Bu yöntem ile hem kriyojenik soğutmanın kesme bölgesi sıcaklığını düşürmesinden hem de MQL yönteminin yağlayıcı özelliğinden faydalanılmaktadır.

Bu çalışmada yaygın kullanım alanına sahip AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin farklı soğutma yağlama yöntemleri ile tornalanması esnasında kesici takımında oluşan kesici takım titreşimi, kesme bölgesi sıcaklığı, takım aşınması, takım ömrünün yanında iş parçası kalitesini doğrudan etkileyen yüzey pürüzlülüğü değişiminin belirlenmesi

amaçlanmıştır. Kesici takım kaplamasının ve kesme parametrelerinin de bu çıktılar üzerinde etkisinin belirlenebilmesi için üç farklı kesme hızı ve üç farklı ilerleme hızı kullanılmıştır. Ayrıca kaplama türünün bahsedilen tüm bu değişkenler üzerine etkisinin de belirlenmesi için iki farklı kesici takım kaplama türü (CVD - PVD) için deneyler tekrarlanmıştır. Böylece endüstride yoğun şekilde talaşlı imalat yapan işletmelerin faydalanabileceği verilerin elde edilmesinin yanında sürdürülebilir imalata katkı sağlanması amaçlanmıştır.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Talaşlı imalat, talaş kaldırmak suretiyle malzemeleri belirli bir şekil ve boyuta getirme işlemidir. Malzemeyi istenilen şekil ve boyuta getirirken fazla malzemeyi kaldırmak için kuvvet uygulanması gerekir. Malzeme üzerinden talaş kaldırılırken kesme kuvvetlerini oluşturmak için kullanılan enerjinin tamamına yakını ısıya dönüşmektedir. Bu nedenle kesme bölgesinde oluşan bu ısı, tüm talaş kaldırma işleminde önemli bir faktör olup, takım performansı ve iş parçasının kalitesi açısından büyük bir öneme sahiptir [12]. Aşırı ısınma yetersiz takım ömrünün ve kesme hızı sınırlamalarının belli başlı nedenlerindedir. Bu sorunu çözmek için yayınlanmış çalışmada kesme bölgesine su vererek talaş kaldırıldığında kesme hızının %30 oranında arttırılabildiği 19. yüzyılın sonlarında rapor edilmiştir [13]. Kesme bölgesini soğutma yöntemi, kesme parametrelerini yükselterek hızlı imalata imkân sağlamalarının yanı sıra kesici takımı, termal çatlaklar ve aşınma gibi termal etkilerden korumak için de yapılır. Ancak teknolojinin gelişimiyle birlikte ortaya çıkan yeni metalleri işlemede geleneksel soğutma sıvıları da yetersiz kalmıştır. Geleneksel soğutma sıvıları ve yöntemleri yüksek kesme sıcaklıklarını ve hızlı takım aşınmasını dolayısıyla takım ömrünü kontrol etmede verimli olmadığı gibi sürdürülebilir imalat açısından da uygun değildir [14], [15]. Ayrıca başka bir çalışmada da Amerika Birleşik Devletleri İş Sağlığı ve Güvenliği İdaresinin metal işleme sıvılarında maruziyet üst limiti 5 mg/m^3 iken otomotiv parçası üreten bazı işletmelerin soğutma sıvısı kullanımında bu değer 20-90 mg/m^3 aralığında değiştiği bilinmektedir. [16]. Yoğun miktarda soğutma sıvısı kullanıldığında makine operatörü iş parçasına ya da soğutma sıvısına temas ettiğinde dermatit, folliculitis gibi önemli cilt hastalıklarının yanında ölümcül olabilecek cilt kanserine de yakalanabilmektedir. Soğutma sıvısının cilt rahatsızlıklarına neden olmalarının yanında solunum rahatsızlıklarına da sebep olduğu rapor edilmiştir [17]. Bu sebeplerden ötürü günümüzde geleneksel soğutma sıvılarına alternatif olarak kuru işleme, MQL, kriyojenik soğutma, yüksek basınçlı soğutma teknikleri gibi yöntemler kullanılmaktadır.

Kuru işlemenin soğutma sıvısı kullanımına alternatif olarak görülmesinin nedenleri çalışanların sağlığına olumsuz etkilerinin olmamasının yanında soğutma sıvısının bertarafının getirdiği maddi yüküdür. Ancak kuru işlemeye göre kesme parametrelerini

yükseltmesi dolayısıyla daha hızlı ve verimli olması nedeniyle geliştirilen soğutma sıvısı ile işlemeye tekrar kuru işlemenin rakip olabilmesi için bazı yeniliklerin olması gerekmiştir. Bu yeniliklerden en önemlisi şu an kullanılan yeni nesil kesici takımların gelişimindeki en büyük teknolojik yeniliklerden biri olan sert kaplama teknolojisidir. Kesici takımlar üzerine uygulanan sert kaplamalar ile kesme hızı ve ilerleme hızı gibi hızlı üretimin olmazsa olmazlarının yanında yüzey pürüzlülüğü ve ölçü tamlığı gibi ürün kalitesini doğrudan etkileyen parametreleri de olumlu yönde etkilemektedir [18]–[20]

Son zamanlarda gerçekleştirilen tornalama ile talaş kaldırma işleminin %75'i sert kaplamalı karbür takımlar ile gerçekleştirilmektedir [13]. Özellikle tungsten karbür kesici takımların kaplama yöntemlerinden CVD ve PVD kaplama yöntemleri arasındaki farklar ve malzeme türlerine göre hangi kaplama ile işleneceğinin tayini üzerine pek çok çalışma yapılmıştır [21]–[23]. Ayrıca kuru işlemede takım aşınması, takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvvetleri gibi çıktıları iyileştirmek amacıyla kaplamalı ya da kaplamasız kesici takımlara kriyojenik işlem uygulanmaya başlanmıştır. Bu yöntem aslında geleneksel ısı işlemi tamamlayıcı bir ısı işlem türüdür. Bu yöntemde kesici takımlar sıg (-50 °C ve -100 °C) ya da derin (-125 °C ve -196 °C) kriyojenik sıcaklıklara belli bir süre maruz bırakılır [24], [25]. Kesici takımlara kriyojenik işlem uygulama yönteminin özellikle HSS (High Speed Steel – Yüksek Hız Çeliği) kesici takımlarda takım ömrünü %817 oranında artırdığına ilişkin rapor edilen çalışma mevcuttur [18]. HSS kesici takımlarda takım ömrüne önemli etkisinin görülmesinden sonra tungsten karbür kesici takımlar üzerine de pek çok çalışmaya konu olmuştur [26]–[29].

Tüm bunlara rağmen yeni malzeme türlerine ve bu malzemelerin işlenmesine olan ihtiyaç gün geçtikçe daha hızlı artmaktadır. Sürdürülebilir imalat şartlarını kuru işleme ve soğutma sıvısı ile işleme karşılayamadığından yeni yöntemlerin araştırılması da önem kazanmıştır. Bu yeni yöntemlerden birisi de bu tez çalışmasının önemli konularından biri olan MQL yöntemidir. MQL; 60 l/saat soğutma sıvısı yerine kesme bölgesine 40 mm'den küçük çaplı iş parçaları için 50 ml/saat, 40 mm'den büyük çaplı malzemeler için 50-150 ml/saat kesme sıvısının yüksek basınç ile ulaştırılması olarak tanımlanabilir [30]. MQL sisteminin en önemli avantajı, yağlama maddesinin doğrudan temas alanına ulaşmasıdır. Bu küçük damlacık nedeniyle, kesici takımın termal şoku azalır, bununla birlikte takım ömrü ve çalışma performansı artar [31]. MQL tekniği tornalama [32], frezeleme [33], delik delme [34], taşlama [35] gibi talaşlı imalat operasyonlarında farklı malzeme, kesme yağları ve katkı maddeleri yanında nozulun yeri, nozul çapı, yağ miktarı ve basıncı gibi

pek çok değişkenin etkilerini gözlemlmek için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda araştırmacılar kesme bölgesi sıcaklığı, takım talaş arayüzeyi sıcaklığı, takım temas arayüzeyi alanı, yüzey pürüzlülüğü, kesici takım aşınması, takım ömrü, enerji tüketimi ve birim başına maliyet gibi konularda önemli iyileşmeler bildirmişlerdir.

St 52 malzemesi geleneksel soğutma sıvısı, kuru ve MQL kesme şartlarında işlenmiş kesme kuvvetlerine, kesici takım ömrüne ve kesme bölgesi sıcaklığına etkileri araştırılmıştır. Deneylede tornalama, frezeleme ve broşlama yöntemleri kullanılarak talaş kaldırılmıştır. St 52 malzemesi 1 mm talaş derinliğinde, 200 m/dak kesme hızında 25 mm boyunca tornalanması sonucu en düşük takım aşınması MQL ile işlemede elde edilmiştir. Böylece MQL yöntemi kullanıldığında takım ömründe soğutma sıvısına göre %10, kuru tornalamaya göre %14 artış gözlemlenmiştir. Ayrıca aşınmanın artışının tüm tornalama şartlarında kesme bölgesi sıcaklığını yaklaşık aynı değerlerde artırdığı görülmüştür. Ayrıca St 52'nin frezelenmesinde MQL yönteminde kullanılan yağın miktarının kesme bölgesi sıcaklığını önemli oranda değiştirdiği görülmüştür [36].

312 l/saat geleneksel soğutma sıvısı ile 200-300 ml/saat kesme yağı kullanılan MQL tekniğinin yanında kuru tornalama, hava ile tornalama gibi farklı soğutma ve yağlama yöntemlerinin kıyaslandığı başka bir çalışmada MQL tekniği 8 mm gibi büyük çaptaki bir nozul ile 2 bar'lık düşük basınçta denenmiştir. SNMG 120404 tungsten karbür kesici takımlar ile AISI 1040 eliği 2 mm sabit talaş derinliğinde, 15-300 m/dak aralığında 11 farklı kesme hızında, 0.05-0.45 mm/dev aralığında 6 farklı ilerleme hızında oldukça fazla parametre ile tornalama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Farklı kesme ortamlarında ve kesme parametrelerinde yüzey pürüzlülüğü, talaş kalınlığı ve kesme kuvveti varyasyonlarındaki değişimler gözlemlenmiştir. Bazı varyasyonlarda MQL yönteminin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğünde soğutma sıvısından daha iyi sonuç verdiği ancak hava su karışımının atık sorununu önlemesine karşı korozyona neden olduğu bildirilmiştir [37].

Birden farklı nozulu kesici takımın burun ve yanak aşınmasının görüldüğü yüzeylere 20 mm mesafeye yerleştirerek kesme bölgesine çok düşük miktarlarda kesme yağını (0,6 ila 9,6 ml/saat) 6 bar sabit basınç ile ulaştırarak gerçekleştirilen farklı bir MQL çalışmasında nozul çapı 2 mm olarak deneyler gerçekleştirilmiştir. İş parçası malzemesi olarak AISI 1045 eliği kullanılan deneyler kuru, hava ile soğutma, geleneksel soğutma sıvısı ve MQL tekniği olmak üzere dört farklı kesme ortamında gerçekleştirilmiştir. MQL tekniğinde 5 farklı kesme sıvısı farklı miktarlarda kesme bölgesine ulaştırılmıştır. Takım aşınması,

yüzey pürüzlülüğü, kesme bölgesi sıcaklığı ve BUE (Build-Up Edge – Yığıntı Talaş) oluşumu gibi çıktılar incelenmiştir. Yapılan bu çalışmanın en farklı çıktısı kesme bölgesindeki sıcaklığın kesici takım üzerindeki dağılımını belirlemeye çalışmasıdır. MQL ile tornalamada kuru ve geleneksel soğutma sıvısı kullanımına göre daha az BUE oluşumunu bildirmişlerdir. Kuru tornalamaya göre MQL ve soğutma sıvısı kullanıldığında takım aşınmasının benzer oranlarda veya daha az olduğu bildirilmiştir. MQL ile talaş kaldırılırken kesici takımda oluşan sıcaklık, kesme kenarından yaklaşık 1,2 mm uzaklıkta oda sıcaklığına tekrar gelirken hava ile soğutulduğunda bu değer 1,5 mm, kuru tornalamada ise 1,8 mm olarak ölçülmüştür [38].

İki nozul kullanılarak gerçekleştirilen MQL tekniğine örnek olabilecek başka bir çalışmada AISI P20 benzeri plastik kalıp takım çeliği olan 35 HRC sertliğinde Assab 718HH çeliğini frezelemişlerdir. Kuru, geleneksel soğutma sıvısı ve MQL tekniği kullanılan deneylerde MQL tekniğinde kesme sıvısı 2 mm çapında iki nozul ile kesme bölgesine dışarıdan ulaştırılmıştır. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri kuru işlemede iken geleneksel soğutma sıvısı ile MQL tekniği ile işlemede benzer yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmayı diğerlerinden ayıran en önemli fark ise MQL tekniğinde takım aşınmasının geleneksel soğutma sıvısı kullanımına göre daha kötü sonuçlar vermesidir. Ayrıca MQL tekniği kullanıldığında oluşan talaşların diğer yöntemlere göre küçük olduğu bildirilmiştir [39].

MQL tekniği delinebilirlik çalışmalarında da kullanılmıştır. Kaplamasız ve elmas kaplı karbür takımlarla A356 (Alminyum-Silikon Alaşımı) malzemesinin farklı soğutma ortamında delinebilirliği araştırılmıştır. Soğutma ortamı olarak MQL tekniği ve çözülebilir yağ ile yağlama yöntemleri kullanılmıştır. Deneylerde takım aşınması, deliklerin yüzey pürüzlülüğü ve ölçüsel sapma miktarı kıyaslanmıştır. MQL, çözülebilir yağlamaya göre genellikle benzer ya da daha iyi sonuçlar verdiği bildirilmiştir. Bu çalışmada kaplamalı takımlar kaplamasız takımlara kıyasla çok da iyi sonuçlar sağlamamıştır [40].

60 HRC sertliğinde AISI 52100 çeliğinin 10, 30 ve 60 ml/saat kesme sıvısı ile MQL, kuru, basınçlı hava ve geleneksel soğutma sıvısı kullanarak TiN kaplı CBN (Cubic Boron Nitride - Kübik Bor Nitrür) takımlarla tornalanmasında kesme ortamının takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerinin araştırılmıştır. Çalışmada geleneksel soğutma sıvısı ile işlemin kuru ve MQL ile işleme ortamlarına kıyasla daha yüksek takım aşınması oluşmasına sebep olurken daha düşük yüzey pürüzlülüğü sağladığı bildirilmiştir.

MQL tekniğini kuru, geleneksel soğutma sıvısı ve basınçlı hava ile kıyaslayan pek çok çalışmadan farklı olarak gerçekleştirilen deney sonuçlarına göre bu çalışmada, daha iyi yüzey pürüzlülüğü ve daha az takım aşınması için kuru tornalama önerilmiştir [41].

MQL tekniğini, kuru ve geleneksel soğutma sıvısı ile kıyaslayan başka bir çalışmada AISI 1040 çeliğinin tornalanmasının kesme sıcaklığı, talaş biçimi ve ölçüsel tamlık üzerine etkilerini araştırmışlardır. Deneyler, 1 mm sabit kesme derinliğinde 120408 ebatlarında kaplamasız karbür takımlarla üç farklı kesme ortamında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kesme bölgesine harici bir nozul ile kesme sıvısı 60 ml/saat miktarda 7 bar basınç ile ulaştırılmıştır. 64, 80, 110 ve 130 m/dak kesme hızı ve 0,1, 0,13, 0,16 ve 0,2 mm/dev ilerleme hızlarında deneyler tekrar edilmiştir. Ayrıca takım talaş arayüzü sıcaklığını ölçmek için termokupl kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, MQL tekniğinin kesme hızı ve ilerleme hızı seviyelerine bağlı olarak kesme sıcaklığı ve ölçüsel hata oranında önemli azalmalar sağladığını göstermiştir. Kuru tornalama ile MQL tekniği arasında takım talaş arayüzeyi sıcaklığında yaklaşık 100°C sıcaklık farkının olduğu bu farkın ilerleme hızının artışı ile düştüğü görülmektedir. MQL tekniği kullanıldığında takım talaş arayüzü sıcaklığının kuru ve soğutma sıvısı kullanımına göre daha düşük olduğu tespit edildiği nedeninin MQL tekniği ile kesme bölgesine daha iyi nüfuz eden kesme sıvısından kaynaklandığı bildirilmiştir. Ayrıca MQL kesme şartlarında talaş biçimi ve takım-talaş etkileşiminin daha uygun hale geldiği belirtilerek; kanıt olarak talaş rengindeki mavi rengin MQL tekniğinde azaldığını gri renge yakın olduğu bildirilmiştir [42]. AISI 1040 çeliği ile gerçekleştirilen çalışmanın ardından aynı deney düzeneği ile AISI 4340 çeliğinin tornalanmasında MQL ile soğutmanın takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve ölçüsel sapmaya etkileri araştırılmıştır. Kesme işlemi; kuru, geleneksel soğutma sıvısı ve MQL tekniği ile olmak üzere üç farklı ortamda gerçekleştirilmiştir. İş parçası malzemesinin kuru şartlarda ve geleneksel soğutma sıvısı ile işlenmesinde kesici takımlarda birbirine yakın değerlerde aşınma görülürken MQL ile işlemede çok daha düşük takım aşınması olduğu görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğünde ise yine en iyi sonuç MQL ile işlemede elde edilirken en kötü yüzey pürüzlülüğü değerleri soğutma sıvısı ile işlemede elde edilmiştir. Benzer şekilde MQL ile işlemede ölçüsel sapma değerleri minimum değerde iken soğutma sıvısı ile işlemede en yüksek sapma değerlerinin olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak bu çalışma MQL ile talaş kaldırmanın yüzey pürüzlülüğüne ve takım aşınmasına MQL kesme sıvısının kesme bölgesinde yağlama yapması nedeni ile olumlu etkileri olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca MQL tekniği

sayesinde takımın formunu daha uzun süre koruyabildiği dolayısıyla aşınmanın düşük olduğu, yüzey pürüzlülük değerlerinde de formunu daha uzun süre koruması nedeniyle MQL tekniğinde daha iyi sonuç elde edildiği bildirilmiştir [43].

MQL tekniğinde kesme yağı dışarıdan bir nozul yardımı ile ya da katerin içinden kesme bölgesine ulaştırılabilir. Bu iki yöntemin kesici takım aşınmasına etkisini araştıran çalışmada kanal tornalama üzerine kuru, geleneksel soğutma sıvısı ve MQL ile olmak üzere üç farklı kesme ortamında, %0,45 karbon oranına sahip çelik kullanılarak yüksek hızlarda takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değişimi araştırılmıştır. Ayrıca bu çalışmada deneysel veriler sonlu elemanlar yöntemi ile de analiz edilmiştir. Deneysel hem burun aşınması hem de yanak aşınması açısından MQL tekniği ile kesme ortamında daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca MQL tekniğinde kesme yağı içten verildiğinde kesici takım aşınmasında daha etkili olduğu rapor edilmiştir [44].

Kesme yağı olarak bitkisel kızartma yağı kullanılan MQL uygulamaları denenmiştir. AISI 1060 çeliğinin tornalanmasında kuru ve MQL tekniği kıyaslanmıştır. Dört farklı ilerleme ve kesme hızı ile 1,5 mm sabit kesme derinliğinde kaplamasız tungsten karbür takımlar kullanılmıştır. Bu çalışmada kesme bölgesi sıcaklığının kuru tornalamaya göre MQL tekniğinde %5-12 oranlarında düştüğü bildirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda MQL ile talaş kaldırmanın kesme kuvvetlerini %15 oranında düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bu durum MQL'in kesme bölgesindeki ısıyı düşürmesinden kaynaklandığı savunulmuştur. Ayrıca MQL tekniği kullanıldığında düşen sıcaklığın kesme hızının artışı ile yükseldiği bildirilmiş ve bu artış yüksek kesme hızı ile artan plastik deformasyon ile açıklanmıştır [45]. MQL tekniğinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerine etkisinin araştırıldığı diğer bir çalışmada bu kez MQL tekniği geleneksel soğutma sıvısı kullanımı ile kıyaslanmıştır. Yüzey pürüzlülüğünü ve kesme kuvvetleri açısından, MQL ile tornalamanın geleneksel soğutma sıvısı ile tornalamadan daha fazla avantaja sahip olduğu bildirilmiştir [46]. MQL tekniği için farklı kesme yağı denemelerine örnek olabilecek diğer bir çalışmada AISI 4340 çeliğini tornalamak için MQL kesme sıvısı olarak soya yağı, hindistan cevizi yağı ve kanola yağı kullanılmıştır. PVD yöntemi ile kaplanmış ALTİN kaplamalı tungsten karbür takımlarla 0,25 sabit kesme derinliğinde, 0,1 sabit ilerleme hızında ve 200, 220 ve 240 m/dak kesme hızlarında gerçekleştirilen deneylerde yüksek kesme hızında tüm yağlar aynı takım ömrü sağlamıştır. Ancak düşük kesme hızında en iyi sonucu kanola yağı sağlarken en kısa takım ömrü sağlayan yağ soya yağı olmuştur. Kanola yağının takım ömrüne diğer yağlara kıyasla fazla olan katkısının nedeni

olarak kanola yağının yüksek yoğunlukta ve termal iletkenliğinin fazla olması gösterilmiştir [47].

Talaşın kesme bölgesinden uzaklaştırılmasında ve talaşı kırmada problem yaşanan malzeme türlerinden biri olan paslanmaz çeliklerde, MQL tekniği sıklıkla denenmekte ve olumlu sonuçlar bildirilmektedir. AISI 420 martenzitik paslanmaz çeliği %1 oranında nano MoS₂ ile karıştırılarak bitkisel kesme sıvısı ile frezeleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler tungsten karbür kesici takımlarla sabit kesme derinliği, kesme hızı ve ilerleme hızında gerçekleştirmiştir. Deneylerde kuru işlemenin yanında MQL tekniği de kullanılmıştır. MQL kesme yağı miktarı olarak 20 ve 40 ml/saat tercih edilmiştir. 5 bar basınç altında gerçekleştirilen MQL tekniğinde 1 mm çapındaki nozulun kesici takıma mesafesi olarak 50 mm belirlenmiştir. Deneyler sonucunda takım aşınmasının kuru tornalamaya kıyasla MQL yöntemi ile 20 ve 40 ml/saat akış hızları için sırası ile %9,8 ve %15,5 oranlarında düştüğü bildirilmiştir. Ayrıca MQL kesme sıvısına nano MoS₂ katkı maddesi eklendiğinde kuru tornalamaya kıyasla aşınmanın 20 ve 40 ml/saat akış hızları için %16,8 ve %19,9 oranlarında düştüğü bildirilmiştir. Böylece nano katkılı kesme yağının katkısız yağla oranla takım aşınmasında daha kesme iyi sonuç verdiği ayrıca kesme sıvısı ve katkı oranı yükseldikçe aşınmanın düştüğü bildirilmiştir. Çalışmada kesici takım aşınmasının yanında nano MoS₂ katkısının ve akış hızının yüzey pürüzlülüğüne etkileri de incelenmiştir. Kuru frezelemeye oranla 20 ve 40 ml/saat akış hızları için sırası ile %8,8 ve %22,5 oranlarında yüzey pürüzlülüğünde iyileşme sağlamıştır. Ayrıca MQL kesme sıvısına nano MoS₂ katkı maddesi eklendiğinde kuru tornalamaya kıyasla yüzey pürüzlülüğü değerlerinde 20 ve 40 ml/saat akış hızları için %36,3 ve %39,2 oranlarında düştüğü bildirilmiştir [48].

Inconel 718 süper alaşımının farklı kaplama yöntemleri ile kaplanmış karbür takımlar ile tornalanmasında MQL tekniği takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü açısından olumlu etkiler sağlamıştır. CVD yöntemi ile TiCN/Al₂O₃/TiN kaplı, PVD yöntemi ile TiN/AlN ve TiAlN kaplı üç tungsten karbür takım ile gerçekleştirilen deneyler kuru, geleneksel soğutma sıvısı ve MQL tekniği olmak üzere üç farklı ortamda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca MQL tekniği 4 ve 6 bar olmak üzere iki farklı basınçta kater içerisinden kesme bölgesine iki farklı noktadan ulaştırılmıştır. Takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü değişimlerine odaklanan çalışmanın en dikkat çekici bulgusu, MQL tekniğinde basıncın artırılması ile takım ömrünün artmasıdır. Ayrıca CVD kaplı takımın Inconel 718 süper alaşım iş parçasını işlerken daha uzun takım ömrüne sahip

olduğu bildirilmiştir. Çalışmada ayrıca MQL sisteminde hava ile argon gazı kullanılmış MQL sisteminde argon gazı kullanımının takım ömrünü artırdığı bildirilmiştir [49].

MQL tekniğinin kaplamasız karbür takımlar kullanılarak AISI 9310 alaşım eliğinin (257 BHN) tornalanmasında kesme ortamının takım-talaş arayüzey sıcaklığı, talaş oluşumu, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri araştırılmıştır. Deneyler; kuru, geleneksel soğutma sıvısı ve MQL tekniği olmak üzere üç farklı kesme ortamında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda; MQL ile işlemenin, kesme parametrelerine bağlı olarak takım-talaş arayüzey sıcaklığında %10'a varan oranlarda azalma sağladığı ve bu düşük oranın dahi takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğünde önemli iyileşmelere neden olduğu bildirilmiştir. Bununla birlikte MQL tekniğinin, kuru ve geleneksel soğutma tekniği kullanılarak yapılan deneylerdeki gibi sürekli talaş oluşumunu engelleyemediği ancak talaşları daha pürüzsüz ve parlak hale getirdiği bildirilmiştir [50].

Inconel 718'in MQL tekniği ile tornalandığı başka bir çalışmada, kuru ve MQL tekniği ile PVD kaplı CNMG 120408 tungsten karbür takımlar kullanılmıştır. MQL tekniğinde 50 ve 100 ml/saat olmak üzere iki farklı akış hızı kullanılarak MQL tekniğinin yüzey pürüzlülüğü ve yüzey bütünlüğüne etkileri araştırılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünde en düşük değer olarak 100 ml/saat kesme sıvısı kullanılan deney sonuçları sunulurken MQL tekniğinin tornalama sonrası yüzey sertliğini bir miktar düşürdüğü ve bunda kullanılan kesme sıvısı miktarının önemli olduğu belirtilmiştir [51].

MQL tekniğinin HSS takımlar kullanılarak AISI 4140 eliğinin tornalanmasında, kuru, geleneksel soğutma sıvısı ve MQL tekniği kullanılmıştır. Kesme ortamının kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve kesici takım sıcaklığı üzerine etkileri araştırılmıştır. 0,5, 1 ve 1,5 mm olmak üzere üç farklı talaş derinliğinde gerçekleştirilen deneyler sonucu talaş derinliğinin %200 artırılmasının yüzey pürüzlülük değerini % 50 artırdığı bildirilmiştir. Takımın talaş yüzeyinden, takımın yan yüzeyinden ve her iki yüzeyden olmak üzere üç farklı şekilde MQL uygulanmıştır. Tek bir noktadan verilen MQL kesme yağının HSS takımın sıcaklığını kuru tornalamaya kıyasla yaklaşık 200°C, iki noktadan verilen MQL kesme sıvısının ise kesici takım sıcaklığını yaklaşık 350 °C düşürdüğü bildirilmiştir. Ayrıca kuru tornalamaya kıyasla geleneksel soğutma sıvısı kullanımının kesici takım sıcaklığını 300°C düşürdüğü bildirilmiştir. Çalışma sonucunda en yüksek kesme kuvveti değerleri kuru kesme şartlarında elde edilirken geleneksel soğutma sıvısının kullanıldığı şartlarda kuru kesme şartlarına kıyasla daha düşük kesme kuvvetleri elde edilmiştir. En düşük kesme kuvveti değerleri ise takımın talaş yüzeyinden ve her iki yüzeyden MQL

uygulanması ile elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirildiğinde ise yine benzer şekilde kuru kesme şartlarında daha kötü yüzey pürüzlülüğü değerleri gözlenmiş ve geleneksel soğutma sıvısı ile yüzey pürüzlülüğünde iyileşme gerçekleşmiştir. Genel olarak en düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri takımın yan yüzeyinden ve her iki yüzeyden MQL uygulanması ile elde edilmiştir. Diğer yandan, tüm kesme şartlarında artan kesme derinliği ve ilerleme hızı ile kesme kuvveti değerleri de artmıştır [52].

PVD yöntemi ile kaplanmış 3 farklı kaplama malzemesine sahip tungsten karbür takımlar kullanılarak 55 HRC sertliğinde AISI 4340 çeliğinin kuru ve MQL tekniği ile işleme şartlarında tormalanmasında, kesme ortamının aşınma davranışları üzerine etkisi araştırılmıştır. Her üç takımında da tüm kesme parametrelerinde MQL ile kesme işleminde daha düşük burun aşınması olduğu görülmüştür. Artan kesme hızıyla birlikte tüm takımlarda takım ömrü azalırken kuru kesme ortamına kıyasla MQL ile kesmenin daha uzun takım ömrü sağladığı bildirilmiştir. Ayrıca kesme hızının %50 artırılmasının kesici takım ömrünü %70 oranında düşürdüğü görülmektedir [53].

MQL tekniği ve kuru tormalamanın kıyaslanması için 55-62 HRC sertliğinde AISI D2 soğuk iş takım çeliği bitkisel esaslı Accu lube LB-6000 kesme yağı kullanılarak tormalanmıştır. Deneyleri üç farklı kesme hızı (79, 96 ve 130 m/dak) ve ilerleme hızında (0,05, 0,10 ve 0,16 mm/dev) 1 mm kesme derinliğinde 5 bar MQL hava basıncı ile gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada tüm kesme hızı ve ilerleme değerlerinde kesme bölgesi sıcaklığı ölçülmüş ve MQL ile işlemede kuru işlemeye göre kesme bölgesi sıcaklığı tüm deneylerde yaklaşık 100°C düşmüştür. Kesme bölgesi sıcaklığının kuru işlemeye göre MQL tekniği kullanıldığında %50 düştüğü bildirilmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğü değerinin kuru tormalamaya kıyasla MQL tekniği kullanıldığında %55 oranında iyileştiği tespit edilmiştir [54]. 66 HRC sertliğindeki D2 soğuk iş takım çeliğinin MQL tekniği ile tormalandığı başka bir çalışmada, MQL kesme sıvısı olarak SAE 20W-40 motor yağının içine üretilen karbon nano tüpler ilave edilmiştir. Termokupl ile kesme bölgesi sıcaklığının ölçüldüğü çalışmanın odaklandığı diğer bir çıktı ise yüzey pürüzlülüğüdür. Üç farklı kesme hızı (51, 78 ve 123 m/dak), ilerleme (0,10, 0,15 ve 0,20 mm/dev) ve hava basıncı (5,6 ve 7 bar) ile yapılan deneyler taguchi deney tasarımı ile optimize edilmiştir. Karbon nano tüp ilavesi ile gerçekleştirilen MQL tekniğinin, saf kesme yağı ile gerçekleştirilen MQL tekniğine göre kesme bölgesi sıcaklığını düşürdüğü bildirilmiştir. Ayrıca kesme hızı, ilerleme hızı ve basıncın artışının kesme bölgesi sıcaklığı üzerine

olumsuz etkilerinin olduğu bildirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün karbon nano tüp ilavesi ile iyileştiği bildirilen çalışmada bunun sebebi olarak kesme bölgesi sıcaklığının nanoMQL uygulamasında düşük olması nedeniyle takım aşınmasının düşmesi olarak bildirilmiştir. [55].

Nano parçacık eklenerek gerçekleştirilen MQL tekniklerine bir diğer örnekte ise bitkisel yağ su karışımına 7 farklı oranda TiO₂ nano parçacık eklenerek termal iletkenliği artırmak amaçlanmıştır. AISI 1040 çeliği kaplamasız karbür takımlarla kuru, geleneksel soğutma sıvısı ve MQL tekniği ile tornalanmıştır. Kesme parametrelerinin sabit tutulduğu deneylerde kesme hızı 96,7 m/dak, ilerleme hızı 0,1 mm/dev ve kesme derinliği olarak 1 mm belirlenmiştir. Kuru tornalamada 2,6 µm olan Ra yüzey pürüzlülük değeri nano parçacıklı MQL tekniğinde %47,8 oranında düşmüştür. Geleneksel soğutma sıvısı kullanımına göre nano parçacıklı MQL tekniği yüzey pürüzlülüğü değerini %25,5 oranında iyileştirmiştir. Nano parçacık ilavesinin takım aşınmasını kuru işlemeye göre %58,1 soğutma sıvısı kullanımına göre %35,85 oranlarında, kesme kuvvetlerini de %62,6 – 34,8 aralığında düşürdüğü bildirilmiştir. Çalışmanın dikkat çeken diğer bir yönü TiO₂ nano parçacık ilavesi ile termal iletkenliğinde doğru orantılı olarak artmasıdır. Kesme bölgesinin sıcaklığının MQL tekniğinde düşmesi ile kuru tornalamada mavi renkli olan talaşların MQL tekniğinde altın sarısı renkte olduğu, geleneksel soğutma sıvısı kullanıldığında ise gri renkte olduğu bildirilmiştir. [56].

MQL tekniği için oldukça yüksek sayılabilecek 500,1000 ve 1500 ml/saat akış hızı ile gerçekleştirilen deneylerde MQL kesme yağı 1,3 ve 5 saniye aralıklarında püskürtülerek 600 HB sertliğindeki AISI 1060 çeliği tornalanmıştır. Üç farklı kesme hızı (66,82 ve 100 m/dak) ve ilerleme hızında (0,18, 0,22 ve 0,25 mm/dev) gerçekleştirilen deneysel çalışmalar yapay sinir ağları ile desteklemişlerdir. MQL akış hızının yüzey pürüzlülüğüne %73 oranında etki ettiğini bildirmişlerdir. Kesme bölgesinin yetersiz yağlanması sonucu sıcaklık değişimlerinin nedeni olarak 3 ve 5 saniye gibi yüksek aralıklı kesme yağı püskürtülmesinin yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilediği bildirilmiştir [57].

MQL kesme sıvısına nano parçacık ekleyerek gerçekleştirilen deneylerde 48 HRC sertliğinde 52100 rulman çeliği üç farklı yoğunlukta hazırlanan kesme sıvısı ile tornalanmıştır. Alümina nano garafen parçacıklı ve Al₂O₃ parçacıklı kesme sıvısı ile yapılan deneylerde takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü gibi çıktıların yanında tezgâhın harcadığı gücü ve yöntemlerin maliyeti bildirerek farklı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünde en iyi sonucun yüksek yoğunluktaki alümina nano garafen

parçacıklı kesme sıvısı olduğu bildirilmiştir. Ayrıca alümina nano garafen parçacıklarının ısı iletimlerinin yüksek kabiliyetinden ötürü kesme bölgesi sıcaklığının düştüğü dolayısıyla takım aşınmasını düşürdüğü belirtilmiştir. Bunların yanında sürdürülebilir imalat için MQL kesme sıvısı içine eklenecek katkı maddeleri ile tezgâhın enerji tüketiminde ve toplam maliyette önemli iyileştirmeler yapılabileceği bildirilmiştir [58].

Kesme bölgesi sıcaklığını düşürmesi nedeniyle kesici takım aşınmasını azaltarak kesici takımın ömrünü arttıran MQL tekniği kesme parametrelerinin yükseltilmesi ile de talaşlı imalat hızını artırmasına katkıda bulunur. Ayrıca takım talaş ara yüzünde yağlama sağlayarak yüzey pürüzlülüğüne de olumlu katkılar sağladığı pek çok çalışmada belirtilmiştir [59]–[61]. Ancak takım aşınmasının başlıca nedeni olan kesme bölgesi sıcaklığını düşürmeye odaklanan ve soğutma için -196°C 'de sıvı azot kullanılan kriyojenik soğutma yöntemi [62] sürdürülebilir imalat için önemli olan sıfır atık prensibine daha çok katkı sağlayacağı pek çok çalışmada rapor edilmiştir [63]–[66]. Ayrıca kesme bölgesi sıcaklığını daha çok düşürdüğü dolayısıyla takım aşınmasına daha faydalı olduğu da belirtilmiştir. Bu tez çalışmasının önemli konularından olan kriyojenik soğutma yönteminin gelişimi için özellikle son zamanda pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalardan öne çıkanlar sunulmuştur.

Kriyojenik soğutmanın farklı malzeme gruplarında kesme bölgesi sıcaklığını ne kadar düşürdüğü ve kesme bölgesi sıcaklığının bu farklı malzemeler için takım aşınmasına ne kadar etki ettiği belirlemek amacıyla bir dizi tornalama uygulaması gerçekleştirilmiştir. AISI 1070 yüksek karbonlu çeliğinin yanında, AISI 1010 düşük karbonlu çeliği, AISI 52100 gibi yüksek mukavemetli çeliği, A390 sünek alüminyum malzemeyi ve işlenirken kesme bölgesi sıcaklığı oldukça yüksek olan titanyum alaşımı Ti-6Al-4V malzemeleri kriyojenik soğutma uygulaması ile tormalanmıştır. Kriyojenik soğutmanın iş parçasını soğutmak yerine kesici takımları soğutmada kullanıldığında kesici takım ömrünü yükselttiği ayrıca Ti-6Al-4V malzemesinde talaşın iş parçası malzemesinden ayrılmasında kriyojenik soğutmanın büyük avantaj sağladığı belirtilmiştir [67]. Kesme bölgesi sıcaklığını düşürmede oldukça etkili olan kriyojenik soğutma yöntemini doğru uygulayabilmek için doğru noktaya sıvı azotun ulaştırılması gerektiği düşünülerek gerçekleştirilen çalışmada ise doğru noktadan azotun verilmesi dışında nozul tasarımları üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca önceki kriyojenik işleme çalışmalarında bildirilen soğutma yaklaşımlarına ilaveten, bu çalışmalarda mikrojetler aracılığıyla sıvı nitrojeni kesici takımın farklı yüzeylerine yönlendiren yeni ve ekonomik dağıtma metodu

denenmiştir. Kesme sıcaklıkları teorik olarak sonlu elemanlar yöntemiyle tahmin edilmiş ve kesme hızının etkisi analiz edilmiştir. Karbür uçların içine yerleştirilmiş termokupllar sayesinde kesme sıcaklıkları ve kesme hızının etkisi deneysel olarak doğrulanmıştır. Kriyojenik işlemedeki sıcaklıklar kuru ve geleneksel soğutma sıvısı ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, kesme kenarına lokal olarak uygulanan küçük bir miktar sıvı nitrojenin kesme sıcaklığını düşürmede soğutma sıvısı kullanılarak yapılan talaş kaldırmaya göre daha üstün olduğunu göstermiştir [68]–[70].

Korozyon direnci yüksek tantalyumun tornalanmasında geleneksel soğutma sıvısı ile kriyojenik soğutma yönteminin takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerinin araştırıldığı çalışmada kriyojenik soğutma yönteminin kesici takım-iş parçası arayüzey sıcaklığını azaltarak takım ömrünü %300'e varan oranlarda artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünün %200 ve kesme kuvvetlerinin de %60 oranda azaldığı tespit edilmiştir [71].

Kriyojenik soğutma yöntemi ve plazma esaslı işleme ile geleneksel tornalamayı bir araya getiren yeni bir yaklaşımın sunulduğu çalışmada Inconel 718 süper alaşımı işlenmiştir. Kriyojenik soğutma yöntemi, işleme esnasında kesici takımda oluşan sıcaklıkları azaltmak için kullanılmaktadır. Böylece, sıcaklığa bağlı takım aşınması azalarak takım ömrünün artması sağlanmaktadır. Oysa plazma esaslı işleme, iş parçasındaki sıcaklıkları artırarak yumuşatmak için kullanılmaktadır. Kesici takım ve iş parçası üzerine zıt etkili olan bu iki teknik birlikte kullanıldığında, klasik işlemeye göre yüzey pürüzlülüğü değerinin %250'ye yakın azaldığı, kesme kuvvetleri değerlerinin yaklaşık olarak %30-50 azaldığı ve takım ömrünün ise %170'e kadar arttığı tespit edilmiştir [72].

Sertleştirilmiş toz metalurjisi çeliklerinden yapılan otomotiv parçalarının büyük bir bölümü son montajdan önce ince tornalamaya tabi tutulurlar. Karakteristik olarak düşük işlenebilirlik ve yüksek yüzey pürüzlülüğü gereksinimlerinden dolayı klasik P/M (Powder Metallurgy – Toz Metalurjisi) tornalama operasyonları, genellikle sıvı soğutmalı polikristalin kübik boron nitrit (Cubic Boron Nitride – CBN) kesici takımların kullanımını gerektirmektedir. Bu kesici takımlar yüksek işleme maliyetlerine, çalışma ortamı ve güvenliğine olumsuz etkiye sebep olmaktadır. Bu sebeple, kriyojenik soğutmalı seramik takımlar kullanılan ve çevre güvenliğini ön planda tutan toz metalürjisi ile üretilen parçayı tornalama için maliyet açısından avantajlı yeni bir alternatif sunan çalışmada, 6,7 ve 7,2 mg/m³ yoğunluğa kadar sinterlenmiş ve tavlanmış yapı çelikleri için; takım ömrü, kesme kuvvetleri ve yüzey tamlığı açısından karşılaştırma yapılmıştır.

Deney sonuçları, kriyojenik soğutulmuş seramik kesici takımların, CBN takımlardan daha uzun ömürlü olduğunu ve daha iyi iş parçası yüzeyi sunduğunu göstermiştir [73].

Kriyojenik soğutma uygulaması talaşlı imalat türlerinin hepsinde uygulanmıştır. Tornalama ve frezeleme gibi uygulamaların yanında taşlama da denenmiş ve olumlu sonuçlar alınmıştır. Kriyojenik soğutma uygulaması ile AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin yüzey kalitesini iyileştirmeyi amaçlayan bir çalışmada değerlendirme kriterleri olarak taşlanabilirlik, yüzey tamlığı ve korozyon direnci karakterizasyonu ele alınmıştır. Sabit talaş miktarındaki taşlama deneyleri kuru, çözülebilir yağ ve kriyojenik soğutma olmak üzere üç farklı ortamda yapılmıştır. Deney sonuçlarında, kriyojenik soğutma en düşük taşlama sıcaklığını üretirken, taşlama kuvveti üzerinde önemli farklar gözlenmemiştir. Bununla birlikte, yüzey tamlığı olarak azımsanmayacak iyileşmeler gerçekleşmiştir. Kriyojenik soğutma kullanarak yüzey pürüzlülüğünde %40'tan daha fazla bir iyileşme gerçekleşmiştir [74].

Kuru kesme şartlarında, geleneksel soğutma sıvısı ve kriyojenik soğutma yöntemi ile gerçekleştirilen başka bir tornalama deneyinde C60 çeliğinin kaplamasız tungsten karbür takımlarla endüstriyel uygulamalarda kullanılan kesme hızı ve ilerleme hızlarında takım aşınması, ölçüsel sapma ve bitirme yüzeyi üzerine kesme ortamının etkilerini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar kriyojenik soğutma yönteminin takım aşınmasını azaltmakla birlikte takım ömrü, ölçüsel sapma ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiğini göstermiştir [75].

İşlenebilirliği zor olan Ti6Al4V alaşımı, kaplamasız karbür takımlarla kuru, geleneksel soğutma sıvısı ve kriyojenik soğutma ile 2 mm sabit kesme derinliği, 0,2 mm/dev sabit ilerleme hızı ve üç farklı kesme hızı (70, 100 ve 117 m/dak) ile işlenmiştir. Düşük kesme hızlarında kuru, geleneksel soğutma sıvısı kullanılarak ve kriyojenik soğutma ile yapılan talaş kaldırma işlemlerinde takım ömrü sırasıyla 7 - 14 - 24 dakika olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca titanyum alaşımının işlenebilirliğinde kriyojenik soğutmanın düşük kesme hızlarında daha etkili olduğunu bildirilmiştir [76]. Ti6Al4V malzemesinin tornalanmasında geleneksel soğutma sıvısı ve kriyojenik soğutma yönteminin kıyaslandığı başka bir çalışmada takım aşınması, takım ömrü ve kesme kuvvetleri incelenmiştir. Deneyler 1,2 mm sabit kesme derinliği, 0,2 mm/dev sabit ilerleme hızı ve 50 m/dak kesme hızında gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar; kriyojenik soğutma yönteminin, geleneksel soğutma sıvısı ile kesmeye göre takım ömrünü %40 oranında arttırabildiğini göstermiştir. Diğer yandan kesme kuvvetlerinde genel bir azalma ve

sürtünme katsayısında küçük ancak önemli bir azalma olduğu bildirilmiştir [77]. Ti6Al4V süper alaşımının kriyojenik soğutma ile işlendiği diğer bir çalışmada, işlenebilirliği artırıp kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın düşürerek takım aşınmasının düşürmesi amaçlanmıştır. Tungsten karbür TiAlN kaplamalı (CNMG120404-SM1105) kesici takımlar kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde sıvı azot kesme bölgesine 10 bar basınç ile ulaştırılmıştır. Çalışma sonunda kriyojenik soğutmanın kesme bölgesindeki sıcaklığı düşürmesi nedeniyle krater oluşumunu %58'e varan oranlarda düşürdüğü bildirilmiştir. Ayrıca sıvı azotun son zamanlarda soğutma özelliklerinin yanında toksin olmayan sürdürülebilir temiz üretim açısından biyomedikal alanında kullanılabilmesine vurgu yapılmıştır. [78].

Çeliklerin işlenmesi esnasında kesici takım ömrünün azalmasına, aynı zamanda ürün kalitesinin bozulmasına neden olan yüksek kesme sıcaklıklarının düşürülmesi için TiCN/Al₂O₃ kaplı karbür kesici takımlar ile yüksek kesme hızlarında (165, 194, 239 ve 264 m/dak), ilerleme hızlarında (0,10, 0,13 0,16 ve 0,20 mm/dev) 1,5 mm kesme derinliğinde AISI 4037 çeliği tornalanmıştır. Sıvı azot püskürtülerek yapılan kriyojenik soğutmanın kesme sıcaklığı, takım aşınması, bitirme yüzeyi ve çapsal sapma üzerine etkisini araştırılmıştır. Çalışma sonuçları, kriyojenik soğutmanın takım ömrü, bitirme yüzeyi ve çapsal sapma üzerine önemli derecede faydalı olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca kesme bölgesi sıcaklığının kuru tornalamaya göre kriyojenik soğutma uygulandığında 150°C düştüğü bildirilmiştir. [14]. Kesme bölgesi sıcaklığının da ölçüldüğü kriyojenik soğutma ile kuru tornalamayı kıyaslarken farklı bir yol izleyen çalışmada AISI 4140 çeliği karbondioksit ve azot kullanarak kriyojenik soğutucuların farkları araştırılmıştır. Deneylerde sabit 90 m/dak kesme hızı, 0,15 mm/dev ilerleme hızı ve 0,8 ve 1,6 mm olmak üzere iki farklı talaş derinliği kullanılmışlardır. Takım aşınması, bileşke kuvvet, kesme sıcaklığı, sürtünme katsayısı ve talaş kırılabilirliği ile işlenmiş parçanın yüzey kalitesi dikkate alınmıştır. Karbondioksit ve azot kullanılarak elde edilen bu çıktılar kuru tornalamada elde edilen verilerle kıyaslanmıştır. Sıvı azot ile yapılan deneylerin çıktılarının (kesme kuvvetleri, takım aşınması ve sürtünme katsayıları), karbondioksit ile yapılan deneylerin çıktıklarına nazaran daha düşük bildirilmiştir. Böylece sıvı azotun AISI 4140 malzemenin işleme performansının artırılmasına katkısının daha fazla olduğunu ortaya koyulmuştur. Optris PI 400 marka termal kamera ile ölçülen kesme bölgesi sıcaklığının 1,6 mm kesme derinliğinde kuru tornalamada 870°C, -78,5°C karbondioksit kullanıldığında 400°C ve -196°C sıvı azot kullanıldığında 300°C olduğu,

0,8mm kesme derinliğinde kuru tornalamada 625°C, karbondioksit kullanıldığında 315°C ve sıvı azot kullanıldığında 220°C olduğu bildirilmiştir. Ayrıca büyük talaş derinliklerine kıyasla, düşük talaş derinliklerinin karbondioksit kullanılarak yapılan talaş kaldırmada işleme performansının iyileştiği bildirilmiştir [79].

Yüksek talaş debisi, daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve düşük takım aşınmasını işlenebilirliğin büyük gereksinimleri olarak tanımlayarak bu gereksinimleri karşılamak için takımın, işleme esnasında uygun soğutma yöntemiyle soğutulması gerektiği düşünülerek AISI 304 paslanmaz çeliği sıvı azot ile tornalanmıştır. Sıvı azot ve geleneksel soğutma sıvısı uygulaması diğer uygulamalardan farklı olarak kesici takıma delik açarak gerçekleştirilmiştir. Böylece kesme bölgesinin daha iyi soğutulması amaçlanmıştır. SUS 304 (AISI 304) paslanmaz çeliğini TiCN kaplı takımla ile işlemiş ve takım ömrünün kriyojenik soğutma ile dört kattan fazla arttığını gözlemlenmiştir. Yüksek kesme hızı ve ilerleme hızlarında kriyojenik soğutmanın daha etkili olduğu ortaya koyulmuştur. Ayrıca kriyojenik soğutmanın daha yüksek kesme derinliğinden ziyade düşük kesme derinliklerinde daha yüksek performans gösterdiği bildirilmiştir [80]. AISI 304 paslanmaz çeliğinin kriyojenik soğutma ile tornalanması üzerine başka bir çalışmada, geleneksel soğutma sıvısı ve kriyojenik soğutma tekniği karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda geleneksel soğutma sıvısına kıyasla kriyojenik soğutma yönteminin kesme sıcaklığında %44-51 oranda, kesme kuvvetlerinde %16 oranda ve yüzey pürüzlülüğünde %22-34 oranda azalma sağladığı gözlemlenmiştir [81].

Inconel 718'in kuru, geleneksel soğutma sıvısı ve kriyojenik şartlar altında işlenerek işlenmiş yüzeylerde oluşan kalıntı gerilme ve mikro sertlik üzerine etkileri araştırılmıştır. Kriyojenik soğutma ile talaş kaldırdıktan sonra malzemenin yüzeyinde mikroyapısal olarak herhangi bir değişiklik olmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca malzeme yüzeyinde en yüksek sertlik ölçümü 800HV olarak ölçülmüş, kriyojenik soğutma ile MQL sisteminin karışımından elde edilen bu sertliğin malzeme yüzeyinden derinlere inildikçe düştüğü ve 40µm mesafede malzemenin normal sertliği olan 500HV'e düştüğü bildirilmiştir [82]. Inconel 718 malzemesinin TiAlN kaplı karbür takımlarla frezelenmesinde ise kriyojenik soğutmanın yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar kuru kesme işlemine kıyasla kriyojenik soğutma işleminin güç tüketiminde önemli bir artış olmaksızın yüzey pürüzlülüğünde önemli bir şekilde iyileşme sağladığını göstermiştir. Kriyojenik soğutma ile güç tüketiminin %1,9 oranda arttığı, bunun yanı sıra yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri ve (Rz) değerlerinin sırasıyla %33 ve %40'lara varan oranlarda

iyileştiği bildirilmiştir [83].

elik dışında yapılan araştırmalarda dikkat çeken bir çalışma dizisinde AZ31B magnezyum alaşımı yüzey bütünlüğünü incelemek için kuru ve kriyojenik soğutma şartları altında işlemiş, sonlu elemanlar metodu kullanarak sonuçlar desteklenmiştir. Dışarıdan iki nozul aracılığı ile sıvı azot kesme bölgesine ulaştırılmıştır. Biyomedikal implant yapımında kullanılan magnezyum alaşımının işlenmesinde kriyojenik soğutmanın yüzey bütünlüğüne faydasının yanında korozyon direncini de artırdığı bildirilmiştir. Ayrıca yüzey bütünlüğüne uç radyüsünün etkilerini de araştırılmıştır. U radyüsü daha büyük olan kesici takımların yüzeyde daha derin plastik deformasyona neden olduğu grlmştir. Kriyojenik işlemenin malzeme yüzeyinde önemli metalurjik değişikliklere neden olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda kriyojenik işlemede oluşan talaşların daha kk olduklarını bu çalışmalarla birlikte bildirmiştir [84]–[87].

Kriyojenik soğutma uygulaması ile normalleştirme tavrı uygulanmış 229 HV sertliğinde ve ısıl işleme 850 HV (64 HRC) sertliğine getirilen iki farklı sertlikteki AISI 52100 rulman çeliğinin kullanıldığı deneylerde, düşük sertlikteki malzemeden geleneksel soğutma sıvısı ve kriyojenik soğutma ile talaş kaldırırken yüksek sertlikteki malzemeden kuru ve kriyojenik soğutma yöntemlerini kullanarak talaş kaldırılmıştır. Düşük sertlikteki malzemeden kriyojenik soğutma %23 daha fazla talaş hacmi işlerken yüksek sertlikteki malzemede kuru işlemeye göre kriyojenik soğutma %12 daha fazla talaş hacmi kaldırmıştır. Düşük sertlikteki malzemede kriyojenik soğutma geleneksel soğutma sıvısına göre %370 daha az takım aşınmasına neden olmuştur. 64 HRC sertliğindeki malzeme işlenirken kriyojenik soğutmanın kuru işlemeye göre %37 daha az takım aşınmasına neden olduğu bildirilmiştir [88].

Seramik takımlar kullanılarak kriyojenik soğutma yapılan 52 HRC sertliğindeki AISI 4150 malzemesinin işlendiği deneylerde sabit kesme hızı ($V_c=120$ m/dak), ilerleme ($f = 0,18$ mm/dev) ve kesme derinliği ($a_p=1,5$ mm) kullanılmıştır. Deneyler kuru, geleneksel soğutma sıvısı ve kriyojenik soğutma olmak üzere üç farklı kesme ortamında gerçekleştirilmiştir. Kuru kesme şartlarında tornalamada 157000 mm³ talaş hacminde takım kırılmıştır. Geleneksel soğutma sıvısı kullanılarak yapılan tornalamada 275000 mm³ talaş kaldırırken yanak aşınması değer 0,24 mm'ye ulaşmıştır. Kriyojenik soğutma ile yapılan takım ömrü deneyinde ise 306000 mm³ talaş hacmine ulaşıldığında kesici takım yanak aşınması 0,05 mm'de kalmıştır. Çalışma yüzey pürüzlülüğü açısından incelendiğinde kuru tornalamada $3\mu\text{m}$ 'a 150000 mm³ talaş hacminde ulaşıldığını,

soğutma sıvısı kullanıldığında 300000 mm³ talaş hacminde 0,7µm iken kriyojenik soğutma uygulamasında 300000 mm³ talaş hacminde 1,7µm Ra değerleri elde edildiği bildirilmiştir. Kriyojenik soğutma uygulamasının kuru tornalama ve geleneksel soğutma sıvısı kullanımına göre daha iyi yüzey bütünlüğü (daha yüksek yüzey sertliği, daha düşük kalıntı gerilmeler ve daha az beyaz katman) sağladığı bildirilmiştir. Takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü açısından ise kriyojenik soğutma uygulamasının kuru tornalamaya kıyasla daha üstün olduğu ancak geleneksel soğutma sıvısı kullanımına göre daha kötü sonuçlar verdiği bildirilmiştir [89]. Yüzey bütünlüğü üzerine kriyojenik soğutmanın etkisinin araştırıldığı diğer bir çalışmada NiTi alaşımlı iş parçasının işleme şartlarının faz dönüşüm sıcaklığı ve yüzey bütünlüğü özelliklerinin değişimine etkilerini gözlemleyebilmek amacıyla kuru işleme ve kriyojenik soğutma ile tornalanmıştır. Sonuçlar kriyojenik soğutmanın yüzey bütünlüğü üzerine olumlu etkilerini ortaya koymuştur [90].

Kriyojenik soğutma yaparak kesici takımın uç radyüsünün yüzey sertliğine etkisinin araştırıldığı çalışmada AISI 4140 çeliği tornalanmıştır. Deneyler farklı uç radyüslerine sahip (0,15, 0,30 ve 0,70 mm) kaplamalı karbür takımlarla kuru ve kriyojenik soğutma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Kriyojenik soğutma ile yapılan deneylerden önce iş parçası sıvı azotla bir miktar soğutulmuştur. Deney sonuçları yüksek uç radyüsüne sahip kesici takımların daha iyi yüzey kalitesi elde ettiğini ancak kriyojenik soğutma ile kuru işlemenin karşılaştırıldığında kriyojenik soğutmanın kuru işlemeye göre tane boyutlarının küçülmesi nedeni ile daha iyi aşınma sonuçları verdiği bildirilmiştir [91].

SS304 paslanmaz çelik malzemenin kriyojenik soğutma ile işlenebilirliğinin araştırıldığı çalışmada, geleneksel soğutma sıvısı ile kriyojenik soğutma kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, takım ömrü açısından kıyaslanmıştır. Deneyler sonrası paslanmaz çelik malzemenin yüzeyinde kriyojenik soğutma sonrasında 2-3 HRC sertlik artışı gözlemlenmiştir. Kriyojenik soğutmanın talaş boyunu küçültmesi nedeniyle yüzey pürüzlülüğüne olumlu etkilerinin olduğu ayrıca takım aşınmasının düştüğü ve takım ömründe %61,78'e varan iyileşme gözlemlenmiştir. Çalışmada kriyojenik soğutmanın teğetsel kesme kuvvetlerini %19,61 oranında düşürdüğü bildirilmiştir [92].

Haynes 25 alaşımının tornalanmasında kriyojenik soğutmanın takım aşınması üzerine etkilerini araştırılmıştır. Düşük kesme hızlarında (30, 45 ve 60 m/dak), 1 mm sabit kesme derinliğinde ve 0,08, 0,12 ve 0,16 mm/dev ilerleme hızlarında kaplamasız takımlarla yapılan deneyler sonucunda, kuru işlemeye kıyasla kriyojenik soğutma yönteminin takım

aşınmasını %60'a varan oranda azalttığı gözlenmiştir. Ayrıca SEM görüntüleri ile kriyojenik soğutmada BUE oluşumu yanında difüzyon aşınmalarında oldukça yoğun olduğu bildirilmiştir [93].

Havacılık endüstrisinde kullanılan Al 7050-T7451 alüminyum alaşımını kuru ve kriyojenik soğutma şartları altında 50, 100 ve 200 m/dak kesme hızında tormalanmıştır. Deneyler esnasında oluşan kesme kuvvetleri ölçülmüş ve artan kesme hızı ile birlikte kesme kuvvetlerinin arttığını ayrıca düşük kesme hızlarında kriyojenik soğutmanın kesme kuvvetlerini düşürdüğü görülmüştür. Düşük kesme hızlarında kriyojenik soğutmanın kesme bölgesindeki ısıyı %50 oranında düşürdüğü kesme hızının artmasıyla birlikte kesme bölgesindeki ısı farkının azaldığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda çalışmada kesme hızının artışı ile yüzeyde oluşan sertleşmenin önemli oranda düştüğü, düşük kesme hızlarında kuru işleminin daha düşük yüzey sertliğine neden olduğu görülmüştür. Çalışmada ayrıca kriyojenik tormalama sonrası talaş sertliğinin kuru tormalamaya göre daha sert olduğu bunun nedeni olarak kuru tormalamada oluşan yüksek sıcaklık neticesinde çıkan talaşın sertliğinin düştüğünün düşünüldüğü bildirilmiştir. [94].

AISI 1045 çeliğinin kriyojenik soğutma ve kuru işleme şartlarında tormalanması sonucu, takım talaş temas boyu ve kesme kuvvetlerinin incelendiği çalışmada kriyojenik soğutmanın talaşların kesme bölgesinden kırılarak daha kolay uzaklaştığını ortaya koymuştur. Ayrıca kriyojenik soğutmanın takım talaş temas boyunu %10 dan daha fazla düşürdüğünü bunun neticesinde kesme kuvvetlerinde düştüğü bildirilmiştir [95]. AISI 1045 çeliğinin tormalanmasında kriyojenik soğutma uygulamasının yapıldığı diğer bir çalışmada ise kesme bölgesi sıcaklığı ve kesme kuvvetleri incelenmiştir. Deform 2D programı yardımıyla sonlu elemanlar metodu kullanarak modelleme yapılmış deneysel sonuçlar analiz edilmiştir. Üç farklı kesme hızı iki ilerleme hızı ve sabit kesme derinliği ile yapılan modellemeler sonucunda kriyojenik soğutmanın kuru işleme göre %22,12 daha düşük kesme sıcaklığı ile talaş kaldırdığını ayrıca kriyojenik soğutmanın kuru işleme nazaran kesme kuvvetlerini arttırdığı bildirilmiştir [96]. Bu çalışmanın aksine kuru tormalamaya göre soğutma sıvısı kullanımı ile kesme kuvvetlerinin ölçüldüğü başka bir çalışmada ise kesme kuvvetlerinin %26-56 arasında düştüğü bildirilmiştir. AISI 4340 çeliğini kriyojenik soğutma ve kuru işleme olarak işlenmesi sırasında meydana gelen takım talaş ara yüzeyinde oluşan sıcaklık modellemiş ve çıkan sonuçlar deneysel olarak doğrulamıştır. 120 m/dak kesme hızı, 1 mm kesme derinliği ve 0,3 mm/dev ilerleme hızında gerçekleştirilen deneylerde kuru tormalamada yüzey pürüzlülüğü 2,35 µm

ölçüldüğü bildirilmiştir. Kriyojenik soğutma ile talaş kaldırıldığında takım talaş arayüzeyindeki sıcaklığın %32 oranında düştüğünü hem modelleme ile hemde deneysel olarak göstermiştir. Termal kamera ile ölçülen sıcaklık değeri ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analiz sonuçlarında %5-7 arasında fark olduğu bildirilmiştir. Ayrıca oluşan talaşların düşük sıcaklık neticesinde daha kırılğan ve süreksiz olduğunu bunun da kesme bölgesinden ısının daha rahat uzaklaştırılması ile yüzey pürüzlülüğüne %11 oranında olumlu etki ettiği bildirilmiştir [97].

Kriyojenik soğutma uygulaması ile MQL tekniğinin bileşimi olan hibrit soğutma ve yağlama uygulaması için Inconel 625 süper alaşım malzemesi tormalanmıştır. MQL tekniği için kesme sıvısına 70 nm ebatlarında hegzagonal bor nitrür ve Al_2O_3 parçacıklarını farklı hacimlerde eklenmiştir. MQL tekniğinde kullanılan hegzagonal bor nitrür katkı maddesinin kesme bölgesi sıcaklığını Al_2O_3 'den daha fazla düşürdüğü bildirilmiştir. Nedeni olarak da hegzagonal bor nitrürün ısı iletim katsayısının daha yüksek olması gösterilmiştir. MQL tekniği kullanıldığında kesme bölgesi sıcaklığının %26,77 kriyojenik soğutma yapıldığında %45,58 oranında düştüğü bildirilmiştir. Ayrıca kesme bölgesi sıcaklığını en fazla düşüren deneme olarak nano katkılı MQL tekniği ile birlikte kriyojenik soğutma olduğu ve kesme bölgesi sıcaklığının %58,32 oranında düştüğü bildirilmiştir. Ayrıca nano parçacık katkılı MQL uygulaması ile birlikte kriyojenik soğutma uygulandığında yüzey pürüzlülüğünün %68,94 oranında iyileştirilebileceği de çalışmada bildirilmiştir [98].

Bu çalışmanın önemli konularından olan kesici takım titreşimi üzerine fazla olmasa da literatürde çalışmalar mevcuttur. Al 6063 malzemesinin CNC torna tezgâhında tormalanmasında iş mili titreşiminin yüzey pürüzlülüğüne etkileri araştırılmıştır. Üç farklı kesme hızı (150, 200 ve 250 m/dak), kesme derinliği (0,5, 0,75 ve 1 mm) ve ilerleme hızının (0,1, 0,2 ve 0,3 mm/dev) kullanıldığı deneyler yapay sinir ağları ile desteklenmiştir. Deneysel sonuçlar ile kullanılan tüm kesme parametrelerinin artışının iş mili titreşimini arttırdığı dolayısıyla yüzey kalitesinin düşmesine neden olduğunu bildirilmiştir [99].

İlerleme hızının kesici takım titreşimi ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini araştırmak için ilerleme yönünde tek eksene yerleştirilen ivmeölçer kullanılarak gerçekleştirilen tormalama deneylerinde MQL tekniği kuru tormalama ile kıyaslanmıştır. Deneylerde aralıklı tormalama uygulaması da denenmiş bunun için iş parçasına kanal açılmıştır. 200 m/dak sabit kesme hızı, 0,25 kesme derinliğinde 0,1 ve 0,2 mm/dev ilerleme hızlarında

gerçekleştirilen deneylerde, MQL tekniği için kesme sıvısı 30 ml/saat akış hızında denenmiştir. Deney sonuçları kuru tornalamada ilerleme hızının artırılmasının kesici takım titreşimini artırdığı ancak MQL ile tornalamada ilerleme hızına bağlı kesici takım titreşiminin düştüğü bildirilmiştir. Ayrıca Kesici takım titreşimi ile yüzey pürüzlülüğü arasında doğrusal bir ilişki olduğu, titreşimin artması ile yüzey pürüzlülüğü değerinin arttığı bildirilmiştir [100].

Kesme parametrelerinin titreşim ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerinin araştırıldığı çalışmada, orta karbonlu mikro alaşımlı 38MnSiVS5 çeliği ısıtma işlemler sonrası 3 farklı iş parçasına dönüştürülmüş, mikro yapının titreşim ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri araştırılmıştır. Kesme kuvvetleri bir dinamometre ile ölçerken kesici takım titreşimi kater üzerine yerleştirilen ivmeölçer aracılığı ile ölçmüştür. Deneyler sonunda işlem ile farklı mikro yapı özellikleri kazandırılan malzemelerin tornalanmasında farklı kesme kuvvetlerinin yanında farklı kesici takım titreşimi ve yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilebileceği bildirilmiştir. Çalışmada ayrıca kesme hızının artışının kesici takım titreşimi artırdığı dolayısıyla yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilediği bildirilmiştir [101].

Kesme parametrelerinin kesme bölgesi sıcaklığı üzerine etkisinin araştırıldığı çalışmada 50 HRC sertliğindeki AISI H11 sıcak iş takım çeliği tornalanmıştır. 45 m/dak ile 500 m/dak arasında 7 farklı kesme hızı, 0,08 mm/dev ile 0,24 mm/dev arasında 7 farklı ilerleme hızı, 0,05 mm ile 0,6 mm arasında kesme derinliklerinde tornalanmış ve kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı ölçülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda kesme sıcaklığını en fazla etkileyen parametrenin kesme hızı olduğu ayrıca tüm kesme parametrelerinin artışıyla kesme bölgesi sıcaklığının arttığı bildirilmiştir. Kesme derinliğinin artışı ile talaş kesitinin artacağını bununla sürtünmeyi önemli oranlarda arttırdığını, sürtünme etkisi ile kesme bölgesi sıcaklığının önemli oranlarda arttığı bildirilmiştir [102].

Bu tez çalışmasında sürdürülebilir imalat için en basit yöntem sayılabilecek kuru tornalama ile minimum miktarda yağlama, kriyojenik soğutma ve bu iki yöntemin birlikte kullanıldığı karma bir yöntem, deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Deneyler CVD ve PVD yöntemleri ile kaplanmış tungsten karbür takımlar kullanılarak 60, 90, 120 m/dak kesme hızlarında; 0,06, 0,09, 0,12 mm/dev ilerleme hızlarında ve 1 mm sabit kesme derinliğinde gerçekleştirilmiştir. Tüm kesme şartları için toplamda 72 adet deney gerçekleştirilmiş ve bu deneylerin tümünde yüzey pürüzlülüğü için Ra, Rz değerleri, kesme bölgesi sıcaklığı, üç eksenli kesici takım titreşimi ve kesici takım aşınması

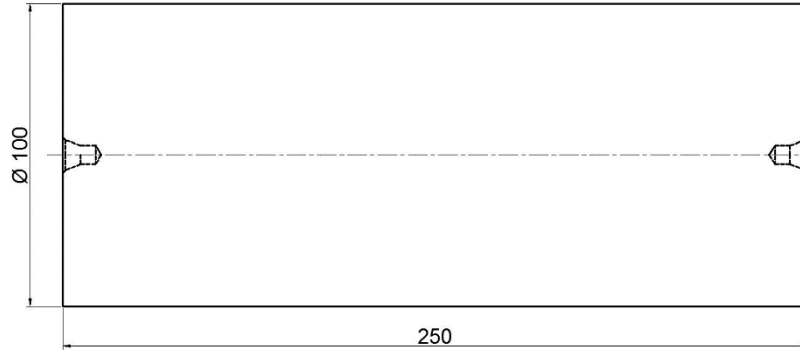
değerleri ölçülmüştür. Ayrıca farklı soğutma ve yağlama türlerinin kesici takım ömrüne etkisinin belirlenebilmesi için bir dizi deney gerçekleştirilmiştir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. İŞ PARÇASI NUMUNESİ

Bu çalışmada karbon ve krom oranı nedeniyle yüksek mukavemet, sertlik ve aşınma direncine sahip AISI D2 soğuk iş takım çeliği kullanılmıştır. Tornalama deneyleri için AISI D2 takım çelikleri Şekil 3.1’de görüldüğü üzere 250 mm boyunda ve 100 mm çapında ve 50 HRC sertliğinde titreşimi azaltmak için iş parçasının iki alın yüzeyine de punta delikleri açılmış olarak temin edilmiştir. İş parçasının kimyasal bileşenleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.



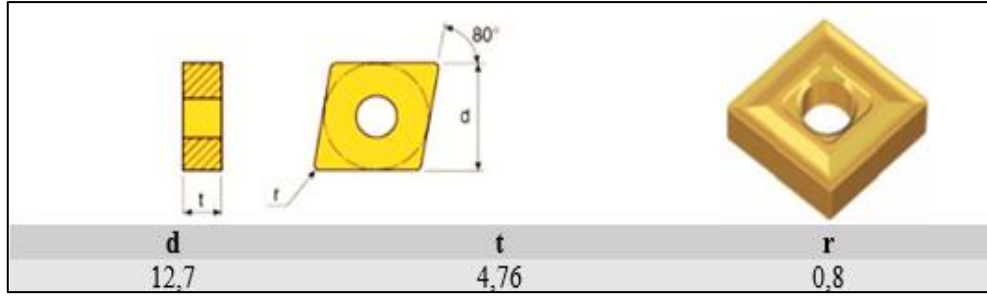
Şekil 3.1. Tornalama iş parçası numunesi.

Çizelge 3.1. AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin kimyasal bileşenleri [103].

Element	C	Si	Mn	P	Cr	Mo	V
%	1,575	0,32	0,3	0,024	11,7	0,74	0,96

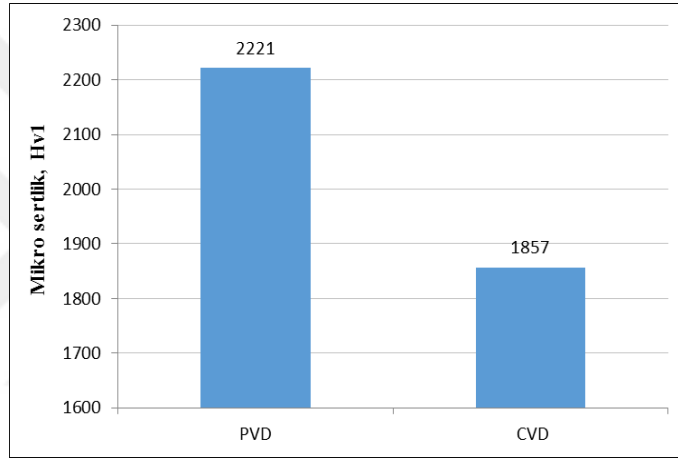
3.2. KESİCİ TAKIM VE TAKIM TUTUCU

Tornalama deneyleri için kesici takım olarak TaeguTec marka CNMG 120408 MT TT 5080 seri PVD yöntemi ile TiAlN-TiN kaplı tungsten karbür takım ve CNMG 120408 MT TT 8125 serisi CVD yöntemi ile TiCN-Al₂O₃-TiN kaplı tungsten karbür takımlar kullanılmıştır. CNMG 120408 MT TT 5080 kesici takım boyutları Şekil 3.2’de verilmiştir.



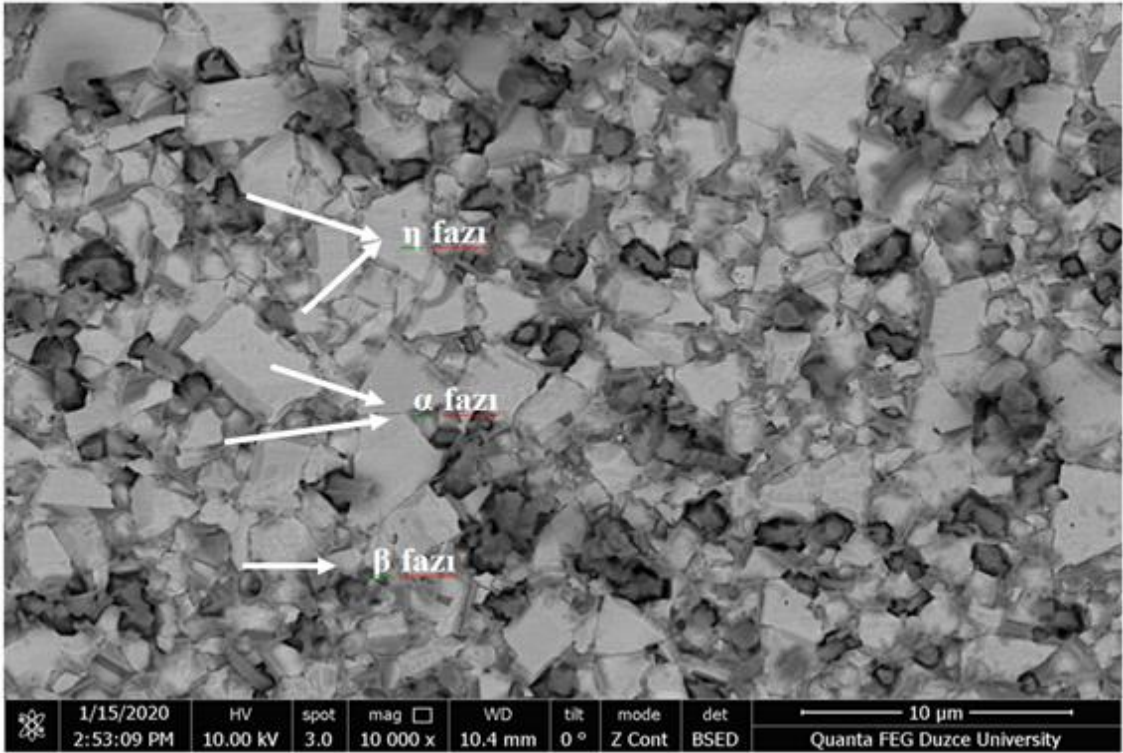
Şekil 3.2. CNMG 120408 MT TT 5080 serisi kesici takım boyutları [104].

Yapılan mikro sertlik deneyleri sonucu PVD kaplı takım sertliği yapılan ölçümlerde 2221 Hv iken CVD kaplı takımın sertliği 1857 Hv ölçülmüştür (Şekil 3.3). PVD kaplı takımın CVD kaplı takıma göre %19,6 daha sert olduğu görülmüştür.

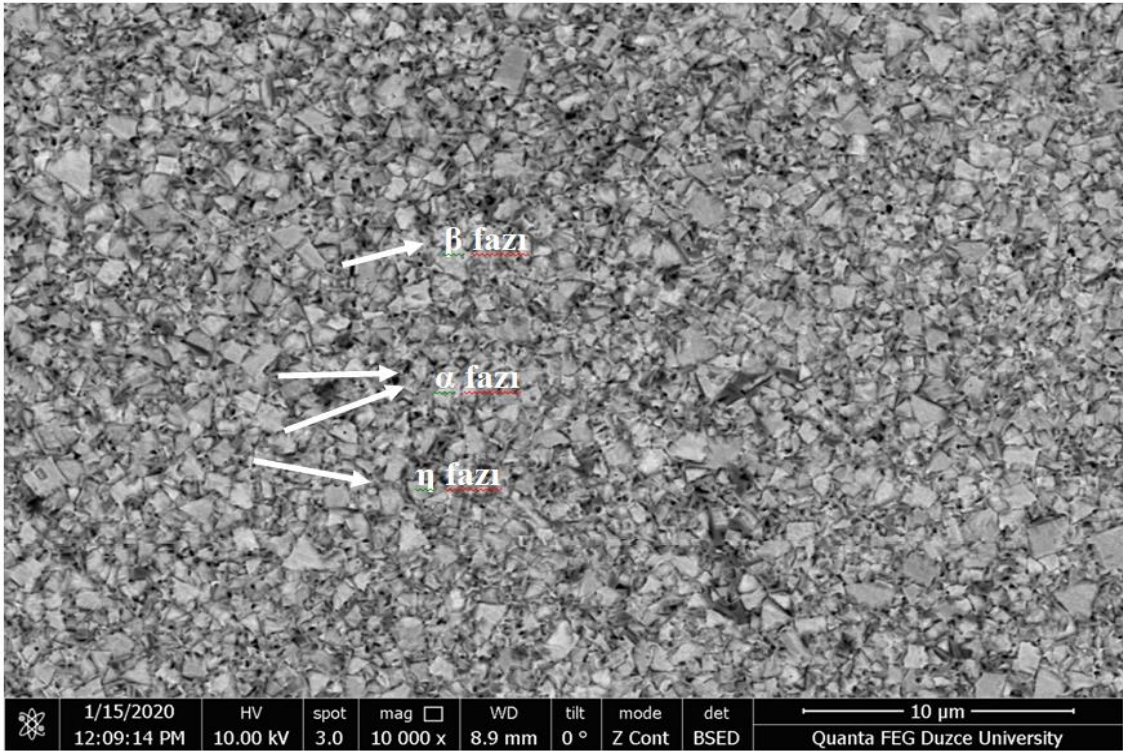


Şekil 3.3. CVD ve PVD kaplı kesici takımların mikrosertlik değerleri.

Aynı içeriğe sahip malzemelerden imal edilmiş kesici takım olmalarına rağmen farklı sertliklerde olmaları farklı yüzey kaplamalarının yanında tungsten karbür tane büyüklüğünden kaynaklandığı düşünülmüş, kesici takımların üzerlerindeki kaplamalar zımpara ile kaldırıldıktan sonra kesici takımların mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Şekil 3.4’de görülen CVD kaplı takımların Şekil 3.5’de görülen PVD kaplı takımlara kıyasla çok daha büyük tane yapısına sahip oldukları görülmektedir. Toz metalürjisi ile üretilen malzemelerde tane yapısının küçültülmesi sertliği artırma yöntemlerinden biridir. Mikroyapıdaki bu tane büyüklüğü farkı, PVD ve CVD kaplı kesici takımlar arasındaki sertlik farkının sadece kaplama malzemesinin sertliğinden ibaret olmadığı anlaşılmaktadır.



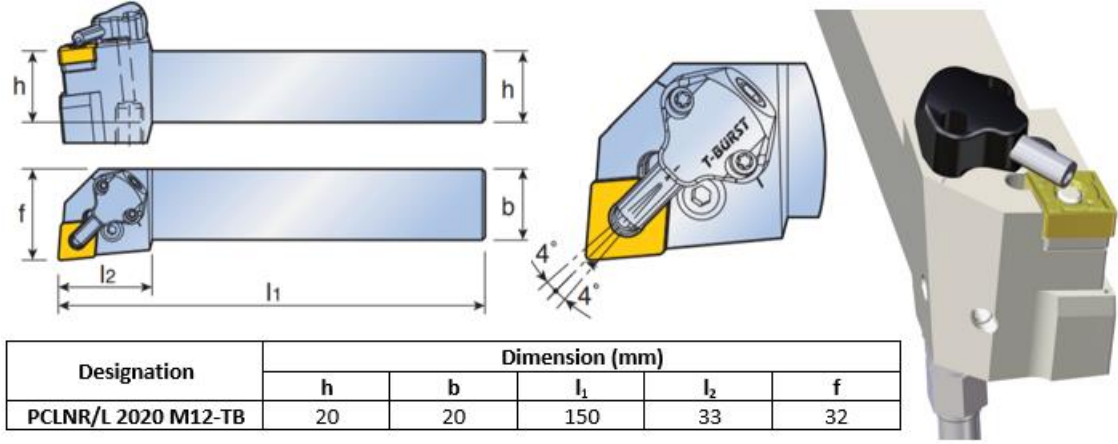
Şekil 3.4. CVD kaplı takımın mikroyapı görüntüsü.



Şekil 3.5. PVD kaplı takımın mikroyapı görüntüsü.

Tornalama deneyleri için TaeguTec firması tarafından üretilen PCLNR2020M12-TB serisi T-Burst içten soğutmalı 300 bar basınca dayanıklı takım tutucu kullanılmıştır.

Kesici takımın uç kısmına hem üstten hem de alttan iki farklı noktadan sıvı azot ulaştırabilmektedir. Takım tutucunun şekli ve ölçüleri Şekil 3.6’da görülmektedir.



Şekil 3.6. PCLNR2020M12-TB takım tutucu ve boyutları [105].

3.3. KESME PARAMETRELERİ

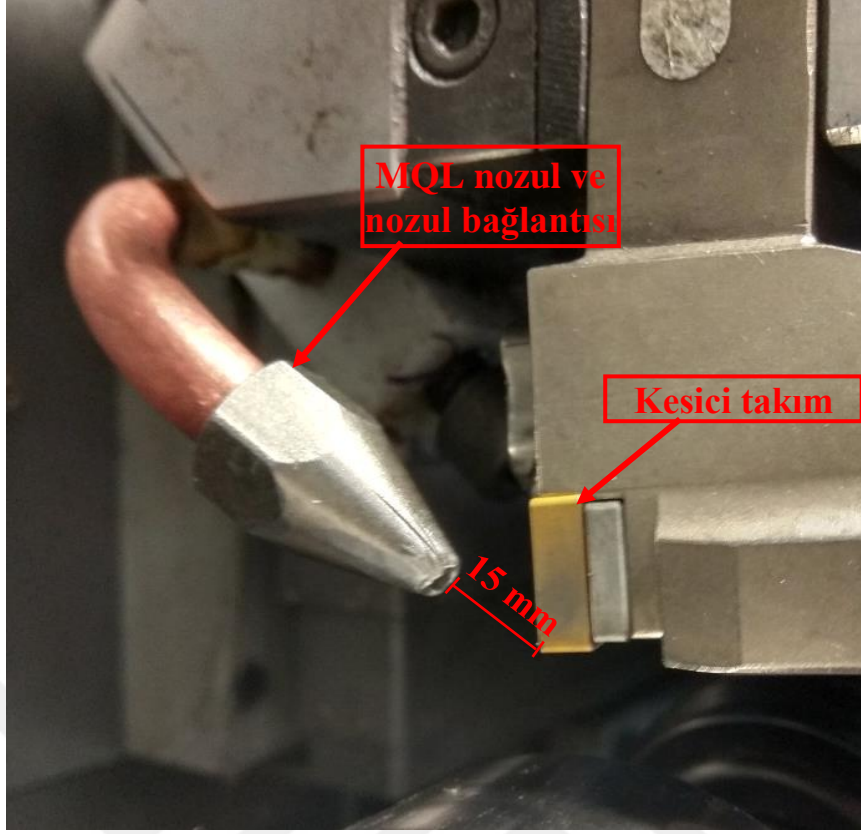
Tornalama deneyleri sabit kesme derinliğinde, üç farklı kesme hızı ve üç farklı ilerleme hızında 4 farklı soğutma şartı için tekrar edilmiştir (Çizelge 3.2). Aşınma deneyleri 5000 mm³’lük sabit talaş hacminde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.2. Kesme parametreleri

Kesici Takım	Kesme Hızı (m/dak)	İlerleme Hızı (mm/dev)	Kesme Derinliği (mm)
CVD Kaplı Takım	60	0,06	1
	90	0,09	
PVD Kaplı Takım	120	0,12	

3.4. MQL SİSTEMİ

MQL sistemi olarak Bielomatik firması tarafından üretilen B1-210 modeli kullanılmıştır. Yağ 6 bar basınçla 1 mm çapındaki nozul ile 15 mm mesafeden 150 ml/saat debi ile kesme bölgesine ulaştırılmıştır. Deneylerde kullanılan MQL cihazı ve nozul bağlantısı Şekil 3.7’de görülmektedir. Cihazın genel özellikleri Çizelge 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Deneylerde kullanılan MQL cihazı nozul bağlantısı.

Çizelge 3.3. MQL sistemi genel özellikleri.

MQL Sistemi Genel Özellikleri	
Kullanılabilir max. yağ dolum miktarı	1,8 litre
Giriş basıncı	Min. 5 bar - Max. 10 bar
Hava tüketimi	45 m ³ /s
Yağ miktarı	50-100-150 ml/s

Tornalama deneylerinde %100 biyolojik olarak çözülebilen bitkisel esaslı SAMNOS ZM-22W kesme yağı kullanılmıştır. Yağın özellikleri Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. Bitkisel MQL kesme yağı özellikleri.

SAMNOS ZM-22W	
Yoğunluk	: ca. 1 g/cm ³ (20°C)
Kinematik Viskozite	: 1,7 mm ² /s (20°C) - 1,0 mm ² /s (40°C)
Kaynama Noktası	: 100°C
Parlama Noktası	: Yanmaz
Renk	: Renksiz
PH	: 7-9
Buhar Basıncı	: 23 hPA (20°C)

3.5. KRİYOJENİK SOĞUTMA SİSTEMİ

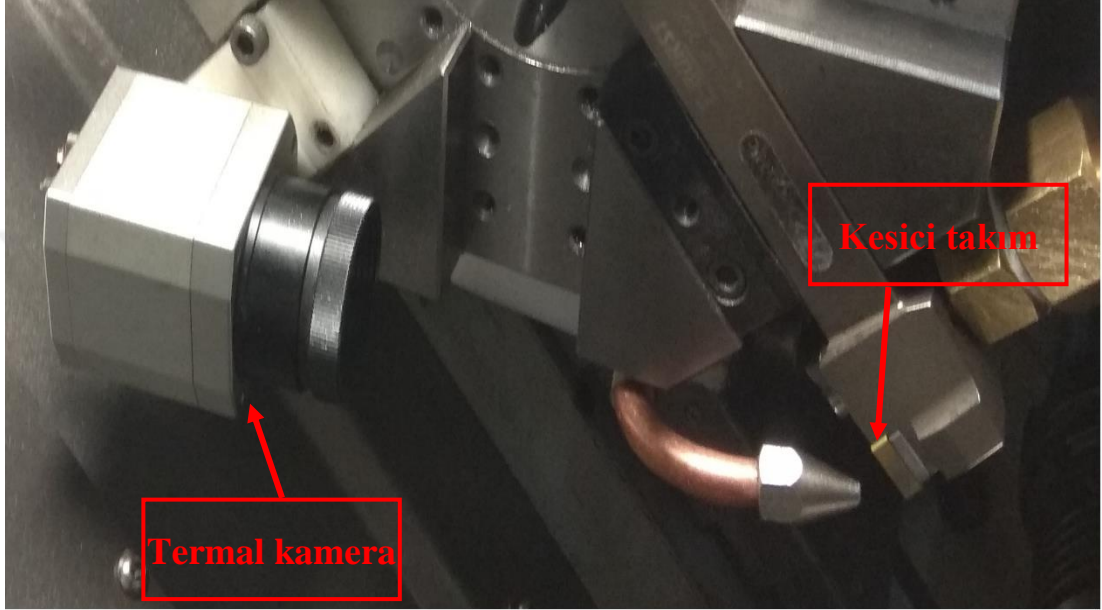
Kriyojenik soğutma şartlarına uygun ve 300 bar basınca dayanıklı T-Burst içten soğutmalı kater üzerinden kesici takıma ulaştırılacak olan sıvı azot (LN₂) 15 bar sabit basınç ile sıvı halde depolandığı tanktan paslanmaz çelik örgülü fleks bağlantı hortumu yardımı ile alınmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Deneylerde kullanılan kriyojenik soğutma sistemi.

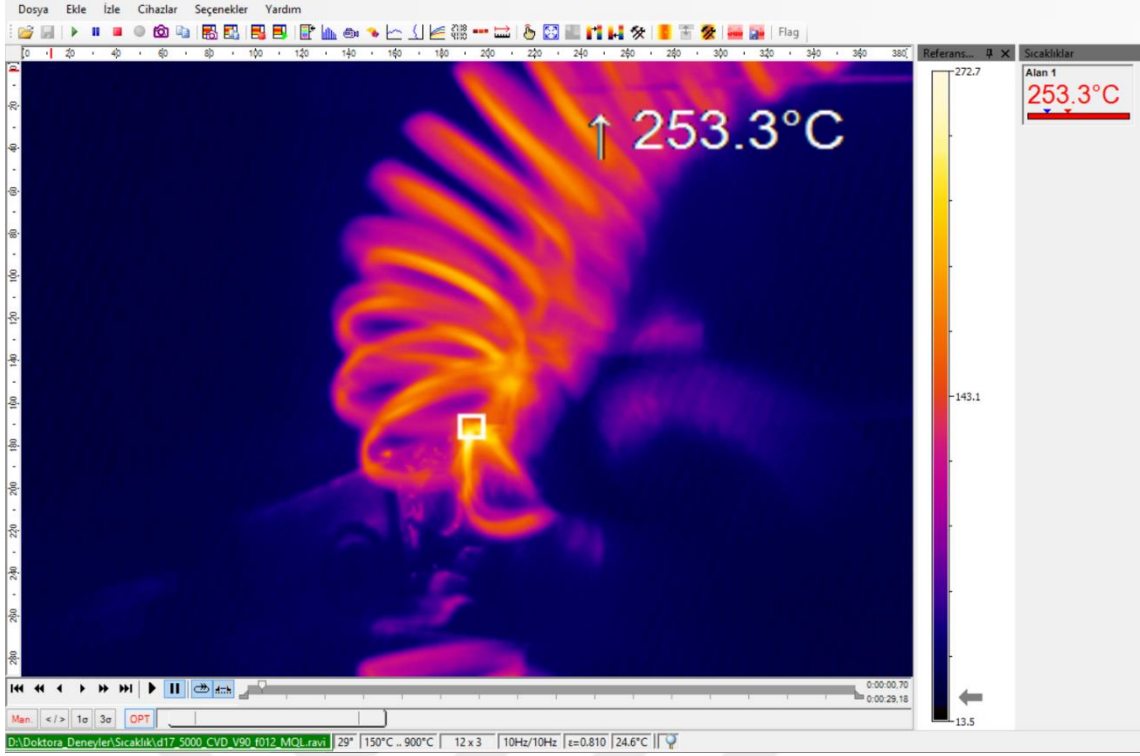
3.6. KESME BÖLGESİ SICAKLIĞININ ÖLÇÜLMESİ

Tornalama deneylerinde kesme bölgesinde oluşan sıcaklık OPTRIS marka PI 450 termal kamera ile ölçülmüştür. Kesme esnasında kesici takımın hareketi ile birlikte kameranın hareket edebilmesi için kesme bölgesine 250 mm mesafede kamera tarete sabitlenmiştir (Şekil 3.9). Böylece aynı açı ile kesme bölgesi sıcaklığının deneyler esnasında video kaydına alınması mümkün olmuştur.



Şekil 3.9. Deneylerde kullanılan termal kameranın konumu.

Termal kamera görüntülerinden sıcaklık tayin edilirken önemli girdilerden biriside emisivite değeridir. Deney numunesi olarak seçilen AISI D2 soğuk iş takım çeliği için emisivite değeri 0,81 alınmıştır [106]. Talaş sıcaklığı ölçülmeden kesme bölgesi sıcaklığının ölçülebilmesi için kamera programının özelliği sayesinde kesici takımın iş parçası numunesine temas ettiği bölgenin üzerinden 5 mm²'lik alan belirlenmiş, bu alanın içerisindeki en yüksek sıcaklık değeri dört farklı tornalama ortamı için ölçülmüştür (Şekil 3.10). Böylece kesme parametrelerinin ve kesme ortamlarının belirlenen alandaki sıcaklık farklılıkları belirlenebilmiştir.



Şekil 3.10. Kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın ölçümü.

3.7. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN ÖLÇÜLMESİ

Malzemenin yüzey kalitesinin belirlenmesi için, her bir deneyin ardından Mahr PS10 profilometre ile 5 farklı noktadan yüzey pürüzlülüğünün aritmetik ortalaması (Ra) ve en yüksek 5 girinti ve 5 çıkıntının ortalaması (Rz) ölçümleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Yüzey pürüzlülüğünün ölçümü.

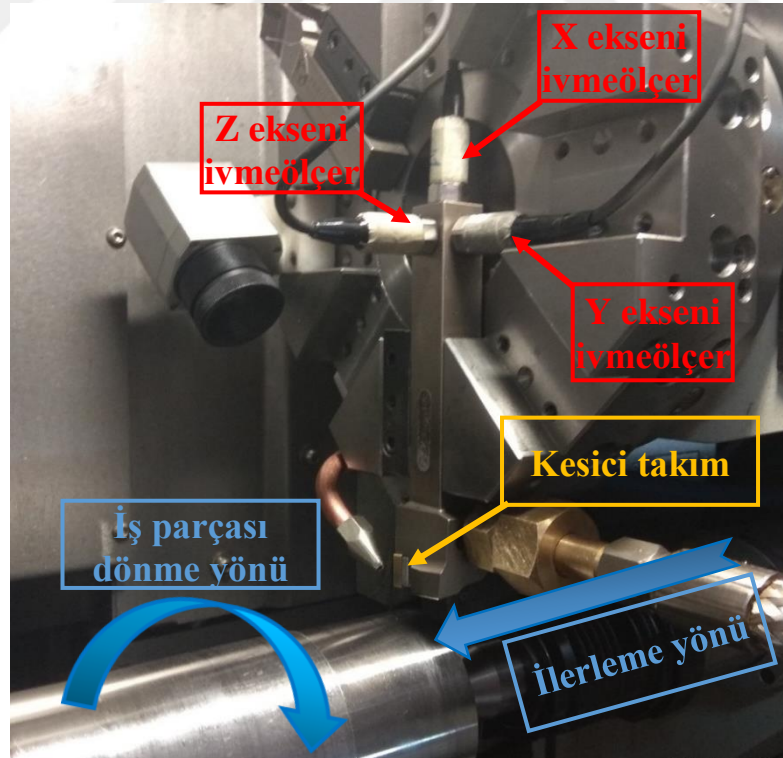
3.8. KESİCİ TAKIM TİTREŞİMİNİN ÖLÇÜLMESİ

Tornalama esnasında kesme anında oluşan titreşim verileri, piezoelektrik kristaller yardımıyla mekanik enerjiyi elektrik sinyallerine dönüştüren Şekil 3.12’de görülen ivmeölçerler yardımıyla ölçülmüştür.



Şekil 3.12. Kesici takımın bulunduğu katere üç eksende (X,Y ve Z) monte edilen ivmeölçer.

İvmeölçerler kesici takımın bulunduğu katere Şekil 3.13’de görüldüğü gibi üç eksende (X, Y ve Z) monte edilmiştir. İvmeölçerler yardımıyla alınan veriler Şekil 3.14’da görülen aynı anda analog dört veri toplama girişine sahip SpectraQuest veri toplama sistemi aracılığı ile toplanmıştır.

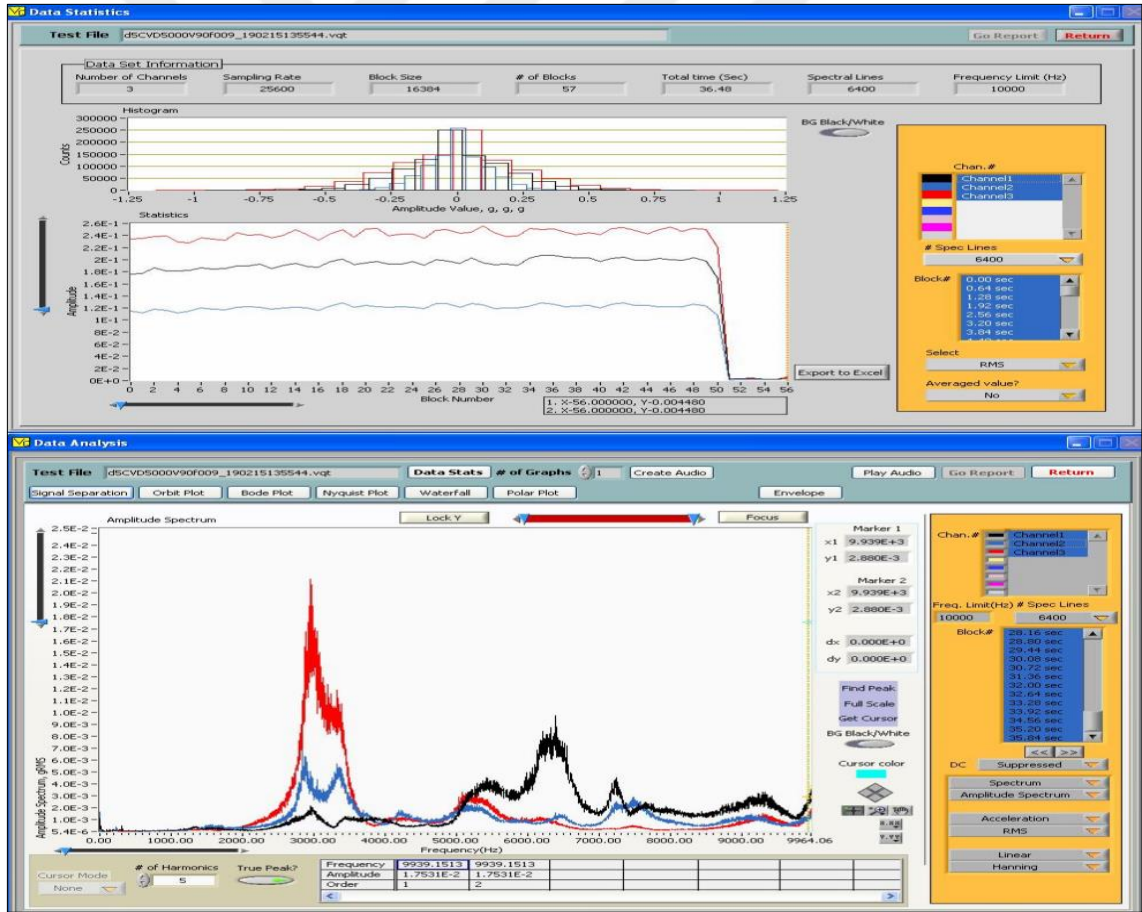


Şekil 3.13. Kesici takımın bulunduğu katere üç eksende (X,Y ve Z) ivmeölçerin montajının görünüşü.



Şekil 3.14. SpectraQuest veri toplama sistemi.

SpectraQuest yazılım programı VibraQuest yardımı ile titreşim verileri gRMS (Root mean square) cinsinden toplanıp Şekil 3.15’de görüldüğü gibi analiz edildikten sonra ortalaması her bir eksene göre alınıp katerin X,Y ve Z eksenlerinde titreşim genlik değerleri grafikleri çıkarılmıştır.



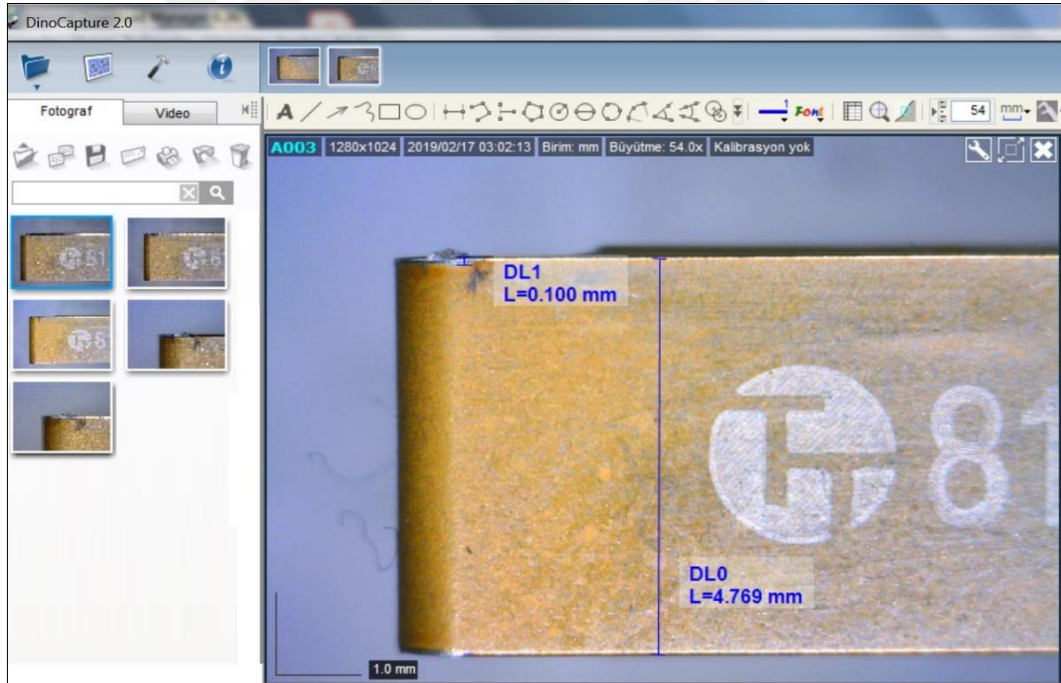
Şekil 3.15. VibraQuest titreşim analiz programı.

3.9. KESİCİ TAKIM AŞINMASININ ÖLÇÜLMESİ

Kesici takımlarda oluşan yanak aşınması miktarları Şekil 3.16’de görülen DINO LITE 2.0 mikroskop yardımı ile ölçülmüştür (Şekil 3.17). Oluşan aşınma tipleri ve aşınma mekanizmalarının daha iyi anlaşılabilmesi için FEI Quanta FEG 250 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak fotoğrafları çekilmiştir.



Şekil 3.16. Kesici takım aşınmasının ölçüldüğü DINO LITE 2.0 mikroskop.



Şekil 3.17. Kesici takımlarda oluşan yanak aşınmasının ölçülmesi.

3.10. CNC TORNA TEZGÂHI VE DENEY DÜZENEĞİ

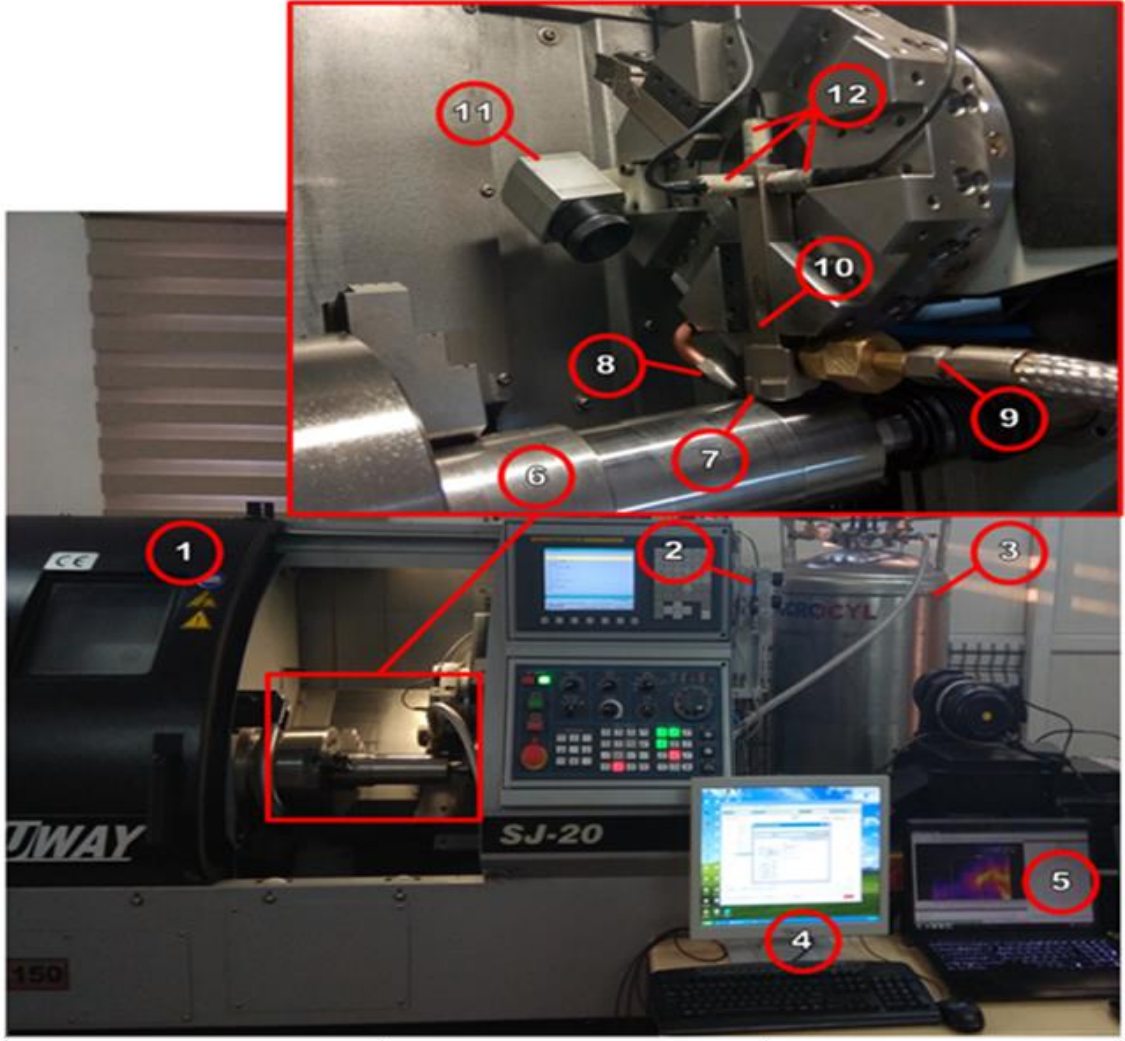
Tüm tornalama deneyleri Düzce Üniversitesi bünyesinde bulunan Fanuc kontrol üniteli Accuway SJ-20 marka Bilgisayarlı Sayısal Denetimli (CNC - Computer Numerical

Control) torna tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Tezgâhın bazı teknik özellikleri Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5. CNC torna tezgâhının teknik özellikleri.

İş mili motor gücü	7,5 kW
En fazla tornalama çapı	225 mm
En fazla tornalama boyu	320 mm
Taret istasyonu sayısı	8 adet
Kater boyutu	20x20 mm
Azami iş devri	6000 dev/dak
Ayna Çapı	6 inç

Takım tezgâhına monte edilen MQL sistemi ile kriyojenik soğutma sisteminin yanı sıra kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın ölçüldüğü termal kameranın montajı ile kesici takımda meydana gelen titreşimin tespit edildiği sensörlerin kater üzerinde yerleşimini bir bütün olarak gösteren deney düzeneği Şekil 3.18’de verilmiştir.



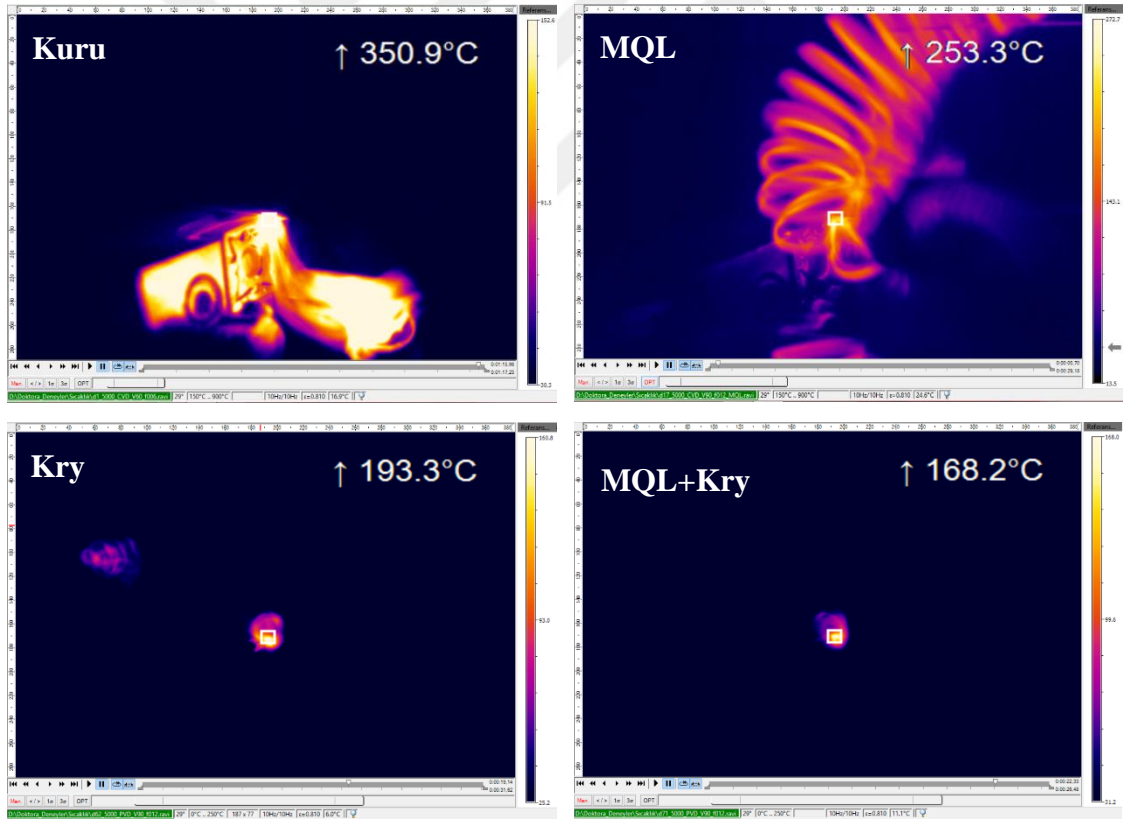
1. CNC Torna Tezgâhı	5. Termal Sıcaklık Programı	9. Kriyojenik Bağlantı Düzeneği
2. MQL Sistemi	6. İş Parçası	10. İçten Soğutmalı Kater
3. Kriyojenik Tank	7. Kesici Takım	11. Termal Kamera
4. Titreşim Analiz Programı	8. MQL Nozul	12. Titreşim Sensörleri

Şekil 3.18. Deney düzeneği.

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. KESME BÖLGESİ SICAKLIĞININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Kesme anında oluşan sürtünmenin etkisi ile kesme bölgesinde yüksek miktarda ısı oluşmaktadır. Belirli bir değere kadar oluşan bu ısı iş parçası malzemesinin akma dayanımını bir miktar düşürdüğünden kesme işlemini kolaylaştırmaktadır. Ancak sıcaklığın daha da artması kesici takım sertliğini olumsuz etkilediğinden kesici takımın aşınmasını hızlandırmaktadır [79], [107]. Bu sebeple kesme bölgesinde oluşan sıcaklıkların tespit edilmesi önem arz etmektedir. Yapılan tüm deneylerde kesme esnasında kesme bölgesi termal kamera ile izlenerek kesme bölgesi sıcaklıkları tespit edilmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Farklı kesme koşulları altında talaş akışının termal görüntüsü.

İki farklı kesici takım türü (CVD ve PVD kaplı kesicitaım), dört farklı kesme ortamı (kuru, MQL, Kry, MQL+Kry), üç farklı ilerleme hızı (0,06, 0,09 ve 0,12 mm/dev) ve üç farklı kesme hızında (60, 90 ve 120 m/dak) gerçekleştirilen tornalama deneyleri

sonucunda kesme bölgesinde oluşan en yüksek sıcaklıklar Şekil 4.2 - Şekil 4.4 arasında verilmiştir. Deneylede, her iki kesici takım türü için de tüm ilerleme hızı ve kesme hızlarında en yüksek kesme bölgesi sıcaklığının kuru kesme ortamında oluştuğu ve bu sıcaklığın MQL, Kry ve MQL+Kry kesme ortamlarında önemli oranlarda düştüğü gözlemlenmiştir. En düşük kesme bölgesi sıcaklığı MQL+Kry kesme ortamında oluşmuştur.

Grafiklerde, MQL sisteminin kesme bölgesi sıcaklığını yaklaşık 100°C'ye kadar düşürebildiği görülmektedir. MQL sisteminin kuru tornalamaya kıyasla kesme bölgesi sıcaklığını CVD kaplı takımlarda 74,7°C ile 101°C arasında, PVD kaplı takımlarda ise 56,8°C ile 93,4°C arasında değişen değerlerde düşürdüğü tespit edilmiştir. Oransal olarak bakıldığında, MQL sistemi kuru kesmeye kıyasla kesme bölgesi sıcaklığını CVD kaplı takımlarda %20-25,75 oranlarda, PVD kaplı takımlarda ise %16,92-24,13 arasında değişen oranlarda azalttığı görülmektedir. MQL ile tornalamada kesme bölgesi sıcaklığındaki azalma; oda sıcaklığındaki kesme sıvısı ile hava karışımının 5 bar basınç ile kesme bölgesine ulaştırılarak oluşan talaşın kesme bölgesinden uzaklaşmasının sağlanması ve kesici takım-iş parçası ara yüzeyinde bir miktar yağlama özelliği sağlayarak sürtünmeyi azaltması ile açıklanabilir [61], [108]. MQL tekniği ile kuru tornalamanın kesme bölgesi sıcaklığına etkisinin araştırıldığı çalışmada kesme parametrelerinin kesme bölgesi sıcaklığını %5-10 arasında azalttığı bildirilmiştir [109]. Kuru ve MQL tekniği arasında ise kesme bölgesi sıcaklığının CBN takımlar ile AISI 4340 malzemesi işlenirken %36 oranında düştüğü [110], başka bir çalışmada ise 17-4 PH sertleştirilmiş çeliğinin tornalanmasında sıcaklık farkının %48 olduğu bildirilmiştir [111]. HSS takımlar ile gerçekleştirilen tornalama deneyinde kuru tornalamaya kıyasla tek nozul kullanılarak gerçekleştirilen MQL tekniğinde kesme bölgesi sıcaklığının 200°C, iki nozul kullanıldığında ise 350°C düştüğü bildirilmiştir [52]. Bu tez çalışmasında kullanılan AISI D2 iş parçasının işlendiği bir çalışmada ise kuru tornalamaya göre MQL tekniği kullanıldığında kesme bölgesi sıcaklığının %50 (100°C) azaldığı bildirilmiştir [54].

Kriyojenik kesme ortamında gerçekleştirilen deneylerde ise; kuru tornalamaya kıyasla kesme bölgesi sıcaklığının CVD kaplı takımlarda 150,4 °C ile 171,3°C arasında, PVD kaplı takımlarda ise 115,6°C ile 164,4°C arasında değişen değerlerde azaldığı tespit edilmiştir. Böylece kriyojenik kesme ortamının kuru kesme ortamına kıyasla kesme bölgesi sıcaklığını, CVD kaplı takımlarla yapılan deneylerde %36,9 ile %44,46, PVD

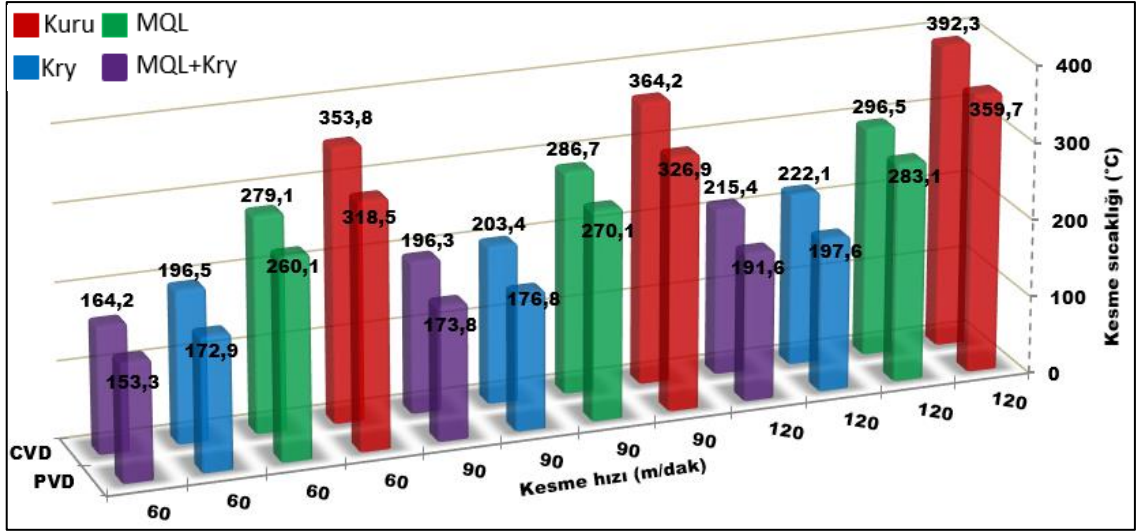
kaplı takımlarla yapılan deneylerde ise %33,29 ile %45,92 arasında değişen oranlarda azalttığı ortaya çıkmıştır. Kriyojenik soğutma ile kuru tornalama uygulamasının kesme bölgesi sıcaklığına etkisinin araştırıldığı çalışmada AISI 4340 çeliği tornalanmış takım talaş ara yüzeyinde oluşan sıcaklık modellenerek ve çıkan sonuçlar deneysel olarak doğrulanmıştır. 120 m/dak kesme hızı, 1 mm kesme derinliği ve 0,3 mm/dev ilerleme hızında gerçekleştirilen deneylerde kriyojenik soğutma ile talaş kaldırıldığında kuru tornalamaya göre takım talaş arayüzeyindeki sıcaklığın %32 oranında düştüğünü hem modelleme ile hemde deneysel olarak göstermiştir. Termal kamera ile ölçülen sıcaklık değeri ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan analiz sonuçlarında %5-7 arasında fark olduğu bildirilmiştir [98]. Ayrıca benzer bir çalışmada kriyojenik soğutmanın kuru tornalamaya göre kesme bölgesi sıcaklığını 150°C düşürdüğü bildirilmiştir [14]. Kriyojenik soğutma uygulamasının geleneksel soğutma sıvısı ile karşılaştırıldığı çalışmada ise kesme bölgesi sıcaklığının kriyojenik soğutma ile %51 oranında düştüğü bildirilmiştir [81]. MQL kesme ortamına göre kıyaslandığında, kesme bölgesi sıcaklığında CVD kaplı takımlarda %16,95-29,59, PVD kaplı takımlarda ise %15,95 - 34,54 arasında değişen oranlarda azalma sağlanmıştır. Kriyojenik kesme ortamında -196°C deki sıvı azotun kesme bölgesine ulaştırılması sonucu kesme bölgesi sıcaklığının büyük oranda azaldığı düşünülmektedir. Ayrıca, sıvı azotun 15 bar basınç ile kesme bölgesine uygulanması sayesinde kesme esnasında oluşan talaşın kesme bölgesinden hızla uzaklaştırılmasının sağlanmasının da kesme bölgesi sıcaklığının azalmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Şekil 4.1’de farklı işleme şartlarında kesme bölgesinden çıkan talaşın termal görüntülerinde bu durum net bir şekilde görülmektedir. Kuru ve MQL kesme ortamlarında gerçekleştirilen tornalama deneylerinde sürekli talaş çıkarken kriyojenik soğutma ve MQL+Kry ile tornalamada kesikli talaş çıktığı gözlemlenmiştir. Kesme esnasında oluşan sıcaklığın büyük bir bölümü talaş ile uzaklaştırılmaktadır. Böylece kesikli talaş oluşumu, kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın talaş ile taşınıp kesme bölgesinden uzaklaştırılması hususunda önem arz etmektedir.

Deneylerde en düşük kesme bölgesi sıcaklıkları MQL+Kry kesme ortamında görülmüştür. Kuru kesmeye kıyasla kesme bölgesi sıcaklığını, CVD kaplı takımlarda %39,4 ile %53,59 arasında değişen oranlarda, PVD kaplı takımlarda %38,8 ile %51,87 arasında değişen oranlarda azalttığı tespit edilmiştir. MQL kesme ortamına göre kıyaslandığında kesme bölgesi sıcaklığının CVD kaplı takımlarda %20,85-41,16, PVD kaplı takımlarda %19,74-41,06 arasında değişen oranlarda, Kry kesme ortamına göre

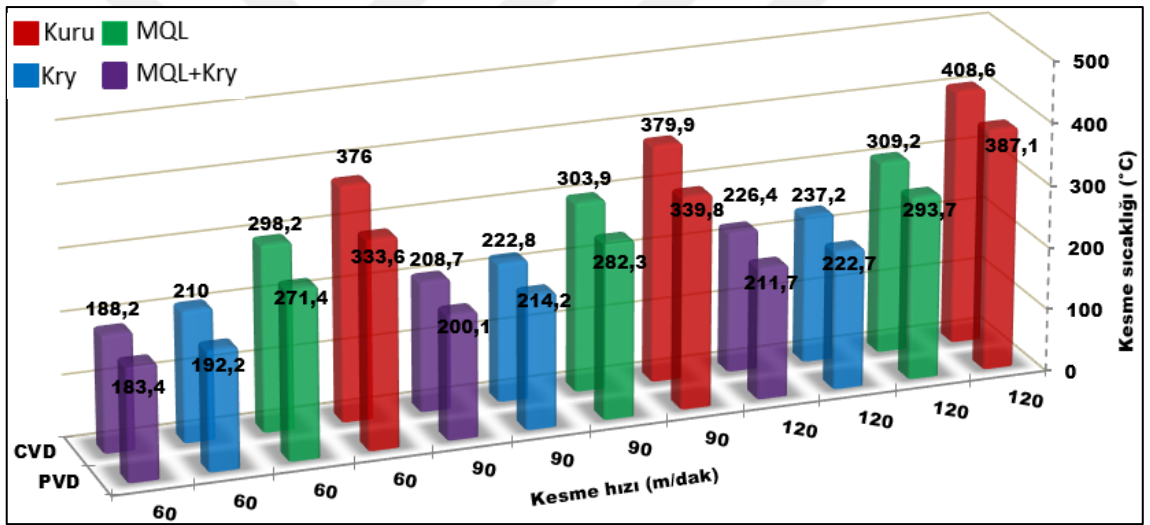
kıyaslandığında ise CVD kaplı takımlarda %3,01-16,43, PVD kaplı takımlarda %1,69-12,47 arasında değişen oranlarda azaldığı görülmüştür. MQL+Kry kesme ortamının, kesme bölgesine MQL yöntemi ile aktarılan kesme sıvısının yağlayıcı özelliği ile -196°C 'deki sıvı azotun üstün soğutma performansının birleşimi sayesinde kesme bölgesi sıcaklığını azaltmada bu kadar etkili olduğu düşünülmektedir.

Tüm kesme ortamlarında ilerleme hızı ve kesme hızının artması ile kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın da arttığı tespit edilmiştir. İlerleme hızı ve kesme hızının artması, kesici takım ile talaş ara yüzeyindeki sürtünmenin artmasına sebep olduğundan kesme bölgesi sıcaklığını da artırmıştır [112]–[114]. Deneysel olarak, tüm kesme ortamları ve ilerleme hızları birlikte değerlendirildiğinde CVD kaplı takım kesme bölgesi sıcaklığının kesme hızının %50 oranda artırılmasıyla (60 m/dak'dan 90 m/dak'ya çıkarılmasıyla) %19,55, %100 oranda artırılmasıyla (60 m/dak'dan 120 m/dak'ya çıkarılmasıyla) %31,18'lere varan oranlarda arttığı görülmüştür. Benzer şekilde PVD kaplı takım kesme hızının %50 ve %100 oranlarda artırılmasıyla kesme bölgesi sıcaklığının %13,47 ve %24,98'lere varan oranlarda arttığı tespit edilmiştir. Kesme bölgesi sıcaklığının ilerleme hızına göre değişimleri incelendiğinde ise; CVD kaplı takım kesme bölgesi sıcaklığının, ilerleme hızının %50 oranda artırılmasıyla (0,06 mm/dev'den 0,09 mm/dev'e çıkarılmasıyla) %14,62, %100 oranda artırılmasıyla (0,06 mm/dev'den 0,12 mm/dev'e çıkarılmasıyla) %24,67'lere varan oranlarda arttığı gözlenmiştir. PVD kaplı takım kesme hızının %50 ve %100 oranlarda artırılmasıyla kesme bölgesi sıcaklığındaki bu artış; %21,15 ve %31 oran olarak hesaplanmıştır.

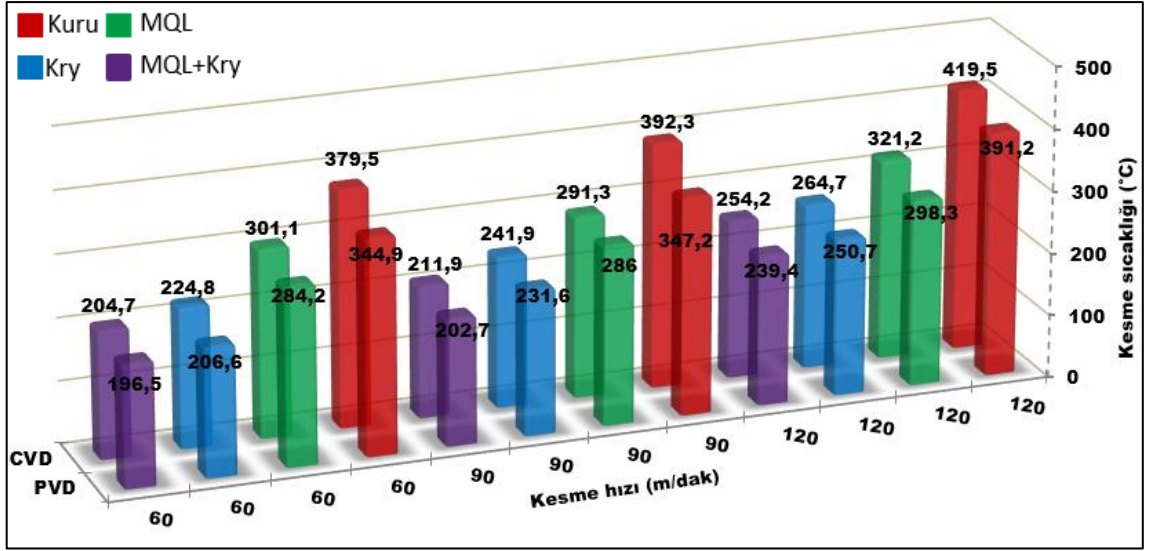
Deneysel olarak, tüm kesme şartlarında CVD kaplı takımlara kıyasla PVD kaplı takımlarla daha düşük kesme bölgesi sıcaklığı oluştuğu görülmüştür. Bu durumun, CVD kaplı takımın orta katmanında bulunan Al_2O_3 kaplama malzemesinin termal iletkenliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Al_2O_3 malzemesi yüksek sıcaklıklarda düşük termal iletkenlik özelliği gösterir. Böylece kesici takım ucunda oluşan sıcaklığının kesme bölgesinden uzaklaşması zorlaşır [115]–[118]. CVD kaplı takımın uç kısmında daha fazla sıcaklık tutulduğundan kesme bölgesindeki sıcaklık CVD takımında daha yüksek çıkmaktadır.



Şekil 4.2. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda en yüksek kesme bölgesi sıcaklıkları ($f=0,06$ mm/dev).



Şekil 4.3. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda en yüksek kesme bölgesi sıcaklıkları ($f=0,09$ mm/dev).



Şekil 4.4. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda en yüksek kesme bölgesi sıcaklıkları ($f=0,12$ mm/dev).

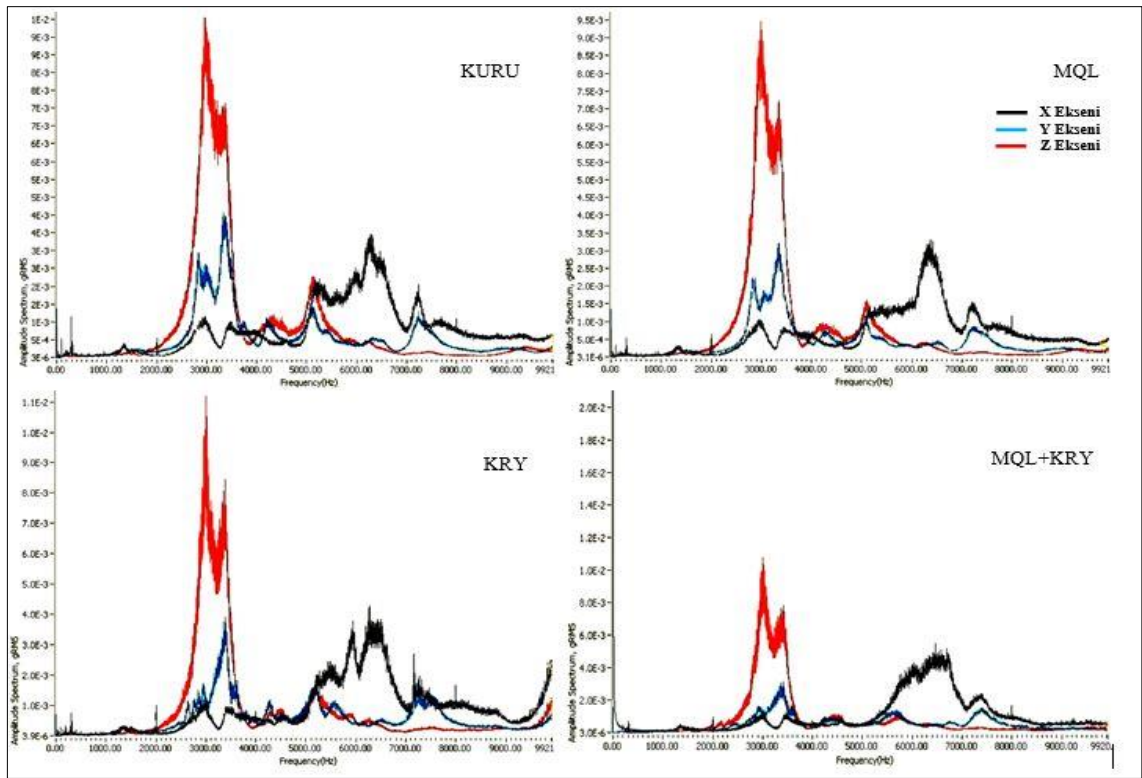
4.2. KESİCİ TAKIM TİTREŞİMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin dört farklı soğutma yöntemi ile işlenmesinde, üç farklı ilerleme hızı (0,06, 0,09, 0,12 mm/dev), üç farklı kesme hızında (60, 90, 120 m/dak), CVD ve PVD olmak üzere iki farklı kaplama türüne sahip kesici takım kullanılmış ve kesici takımda meydana gelen titreşim grafikleri Şekil 4.5 - Şekil 4.22 arasında sırasıyla verilmiştir. Soğutma yöntemlerinin titreşim üzerine etkilerini daha net görebilmek amacıyla aynı kesme parametrelerinde dört farklı soğutma yönteminde toplanan titreşim verileri gruplar halinde verilmiştir. Ayrıca dört farklı soğutma yönteminde tüm kesme parametrelerinde toplanan titreşim genlik değerlerinin ortalamaları da X, Y ve Z eksenlerine göre Şekil 4.23 - Şekil 4.31 arasında verilmiştir.

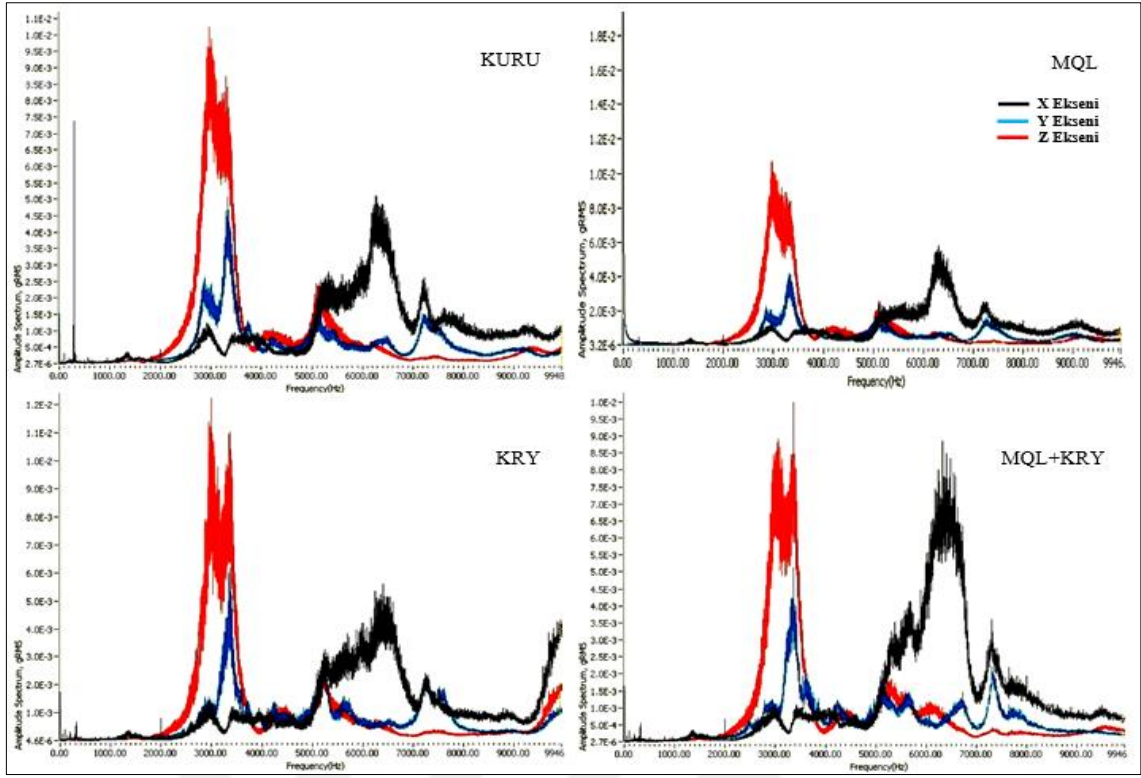
Grafikler incelendiğinde X ekseninde tüm kesme şartlarında, Y ve Z ekseninde ise çoğu kesme şartında PVD kaplı takımların CVD kaplı takımlardan daha düşük kesici takım titreşim genlik değeri sergilediği görülmektedir. Tüm kesme şartları birlikte değerlendirildiğinde; CVD kaplı takımlara kıyasla PVD kaplı takımlarla X ekseninde %45,25, Y ekseninde %42,14 ve Z ekseninde %36,52'lara varan oranlarda daha düşük titreşim genlik değerleri ölçüldüğü gözlenmiştir. Bu durum, sahip olduğu daha yüksek sertliği sayesinde PVD kaplı takımın daha az aşınması ile ilişkilendirilmiştir. Bilindiği üzere kesici takım aşınması ile titreşim doğru orantılı olarak birbirini etkilemektedir. Her üç eksenindeki titreşim genlik değerleri kendi aralarında değerlendirildiğinde, Z

eksenindeki titreşim genlik değerlerinin diğerlerine göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kesme işlemi için gereken ilerleme hareketinin Z ekseninde olması nedeni ile diğer eksenlere göre daha yüksek titreşim genlik değerinin ölçüldüğü düşünülmektedir. Kesici takım titreşim değerinin ölçüldüğü çalışmada da Z eksen titreşim değerleri yüksek çıkmış, bu durum ilerleme hareketine bağlanmıştır [119].

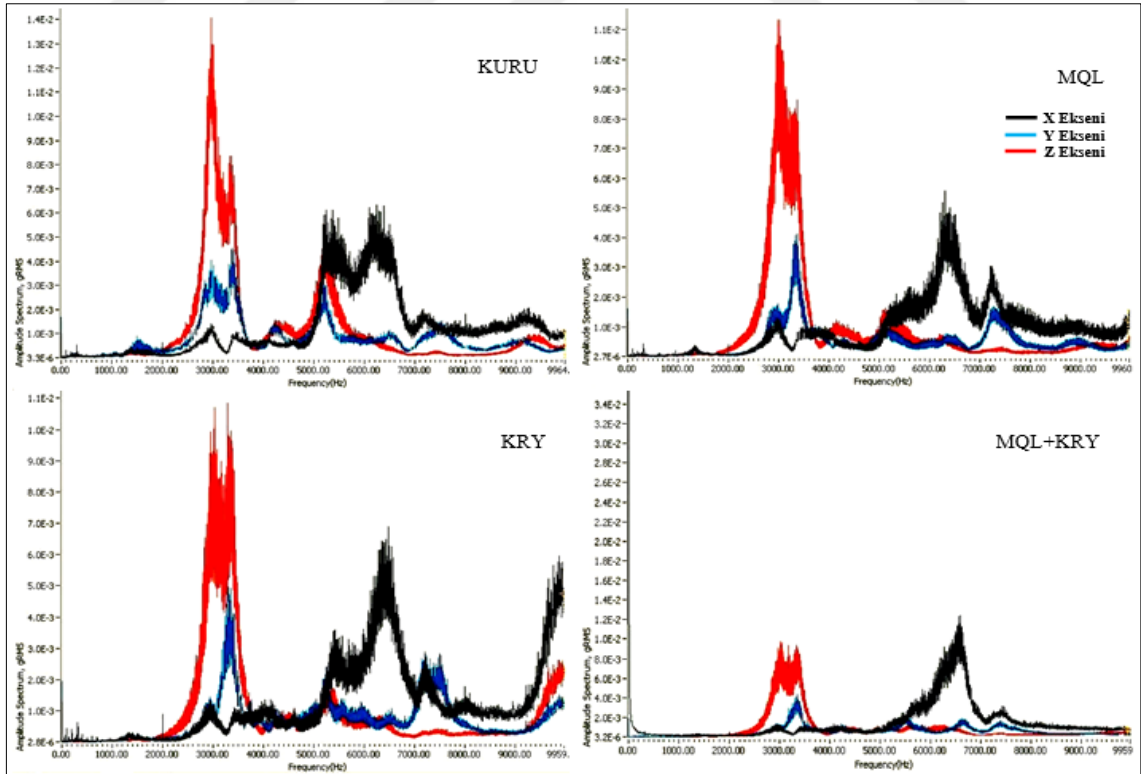
Tüm deneylerde en yüksek titreşim genlik değerleri kuru kesme ortamında ölçülmüştür. Diğer üç kesme ortamında da kuru kesme ortamından daha düşük titreşim genlik değerleri oluşmuş ve en düşük titreşim genlik değerleri MQL+Kry kesme ortamında elde edilmiştir.



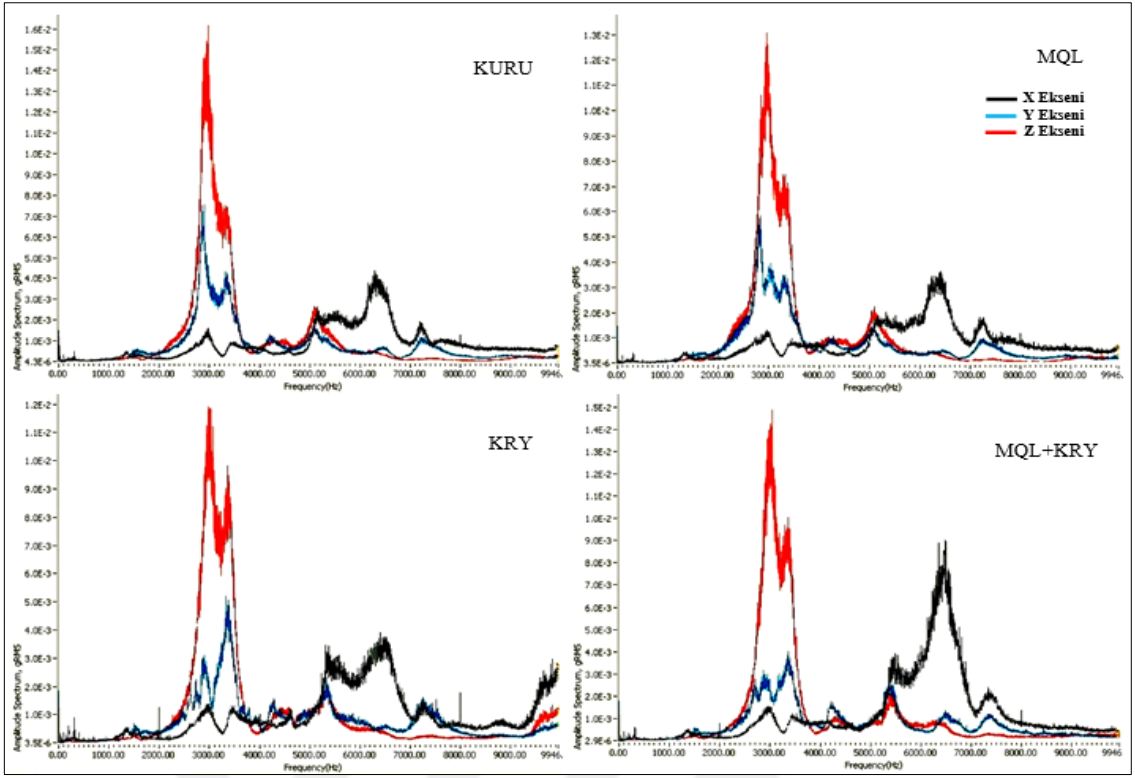
Şekil 4.5. CVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,06$ mm/dev, $V=60$ m/dak).



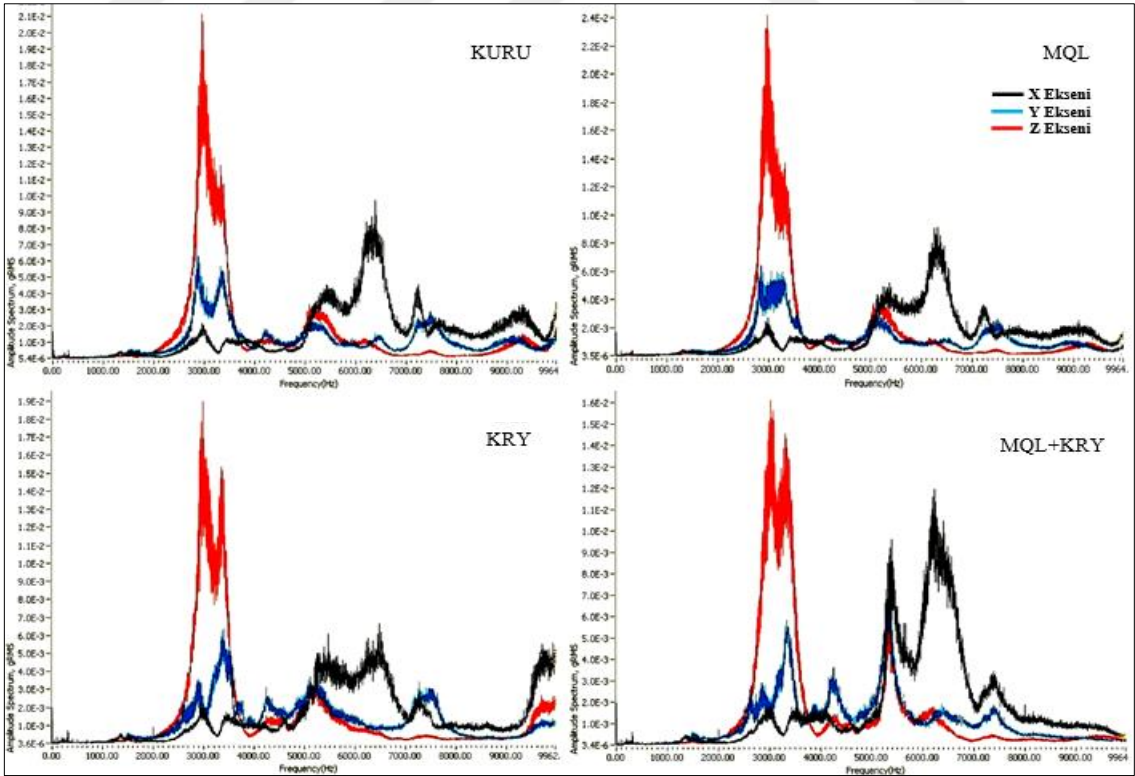
Şekil 4.6. CVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,06$ mm/dev, $V=90$ m/dak).



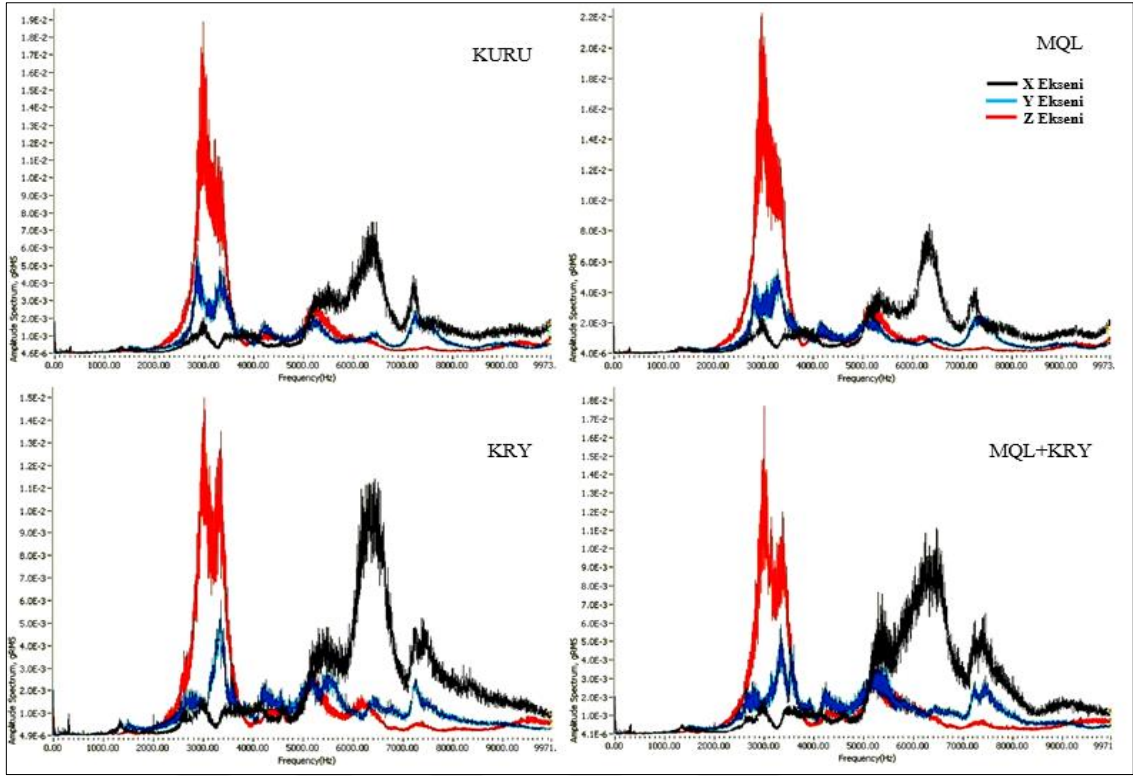
Şekil 4.7. CVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,06$ mm/dev, $V=120$ m/dak).



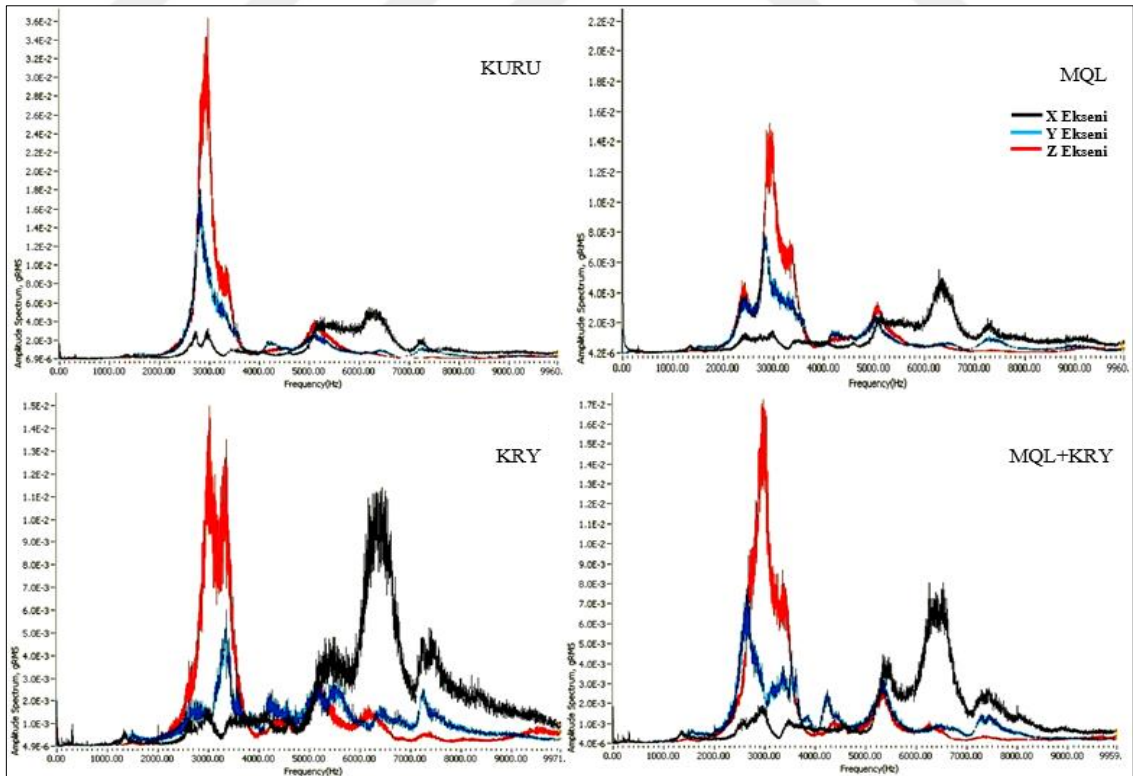
Şekil 4.8. CVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,09$ mm/dev, $V=60$ m/dak).



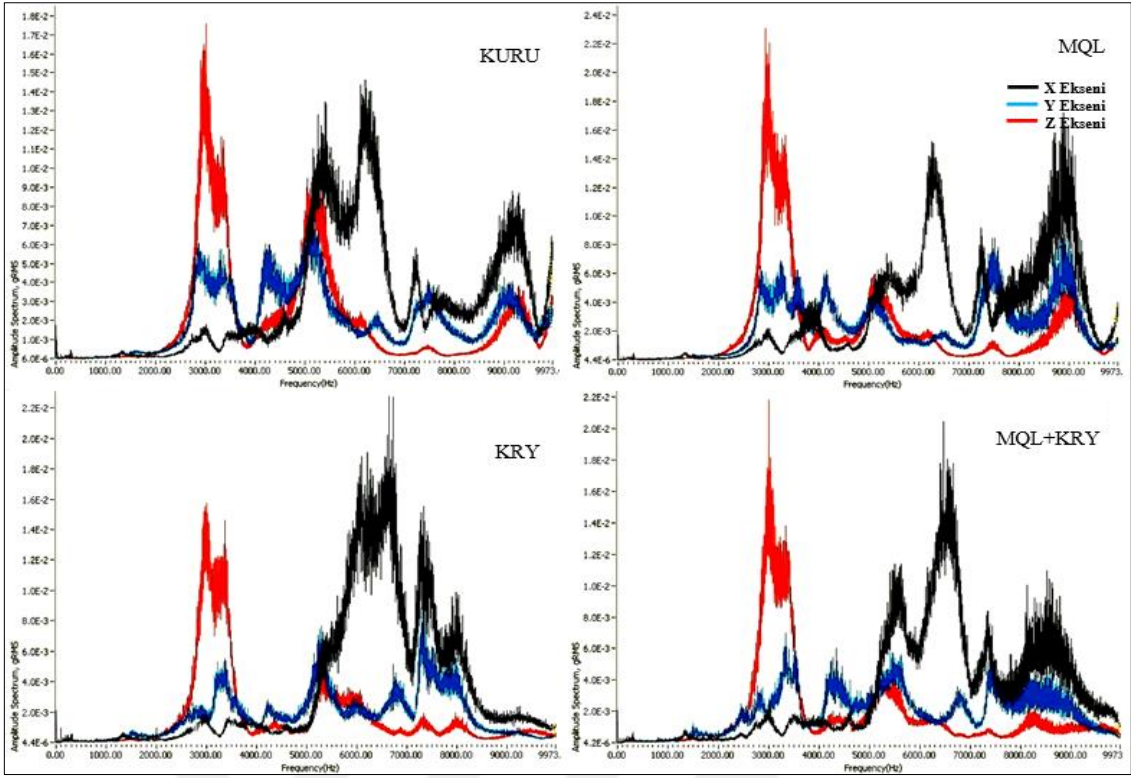
Şekil 4.9. CVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,09$ mm/dev, $V=90$ m/dak).



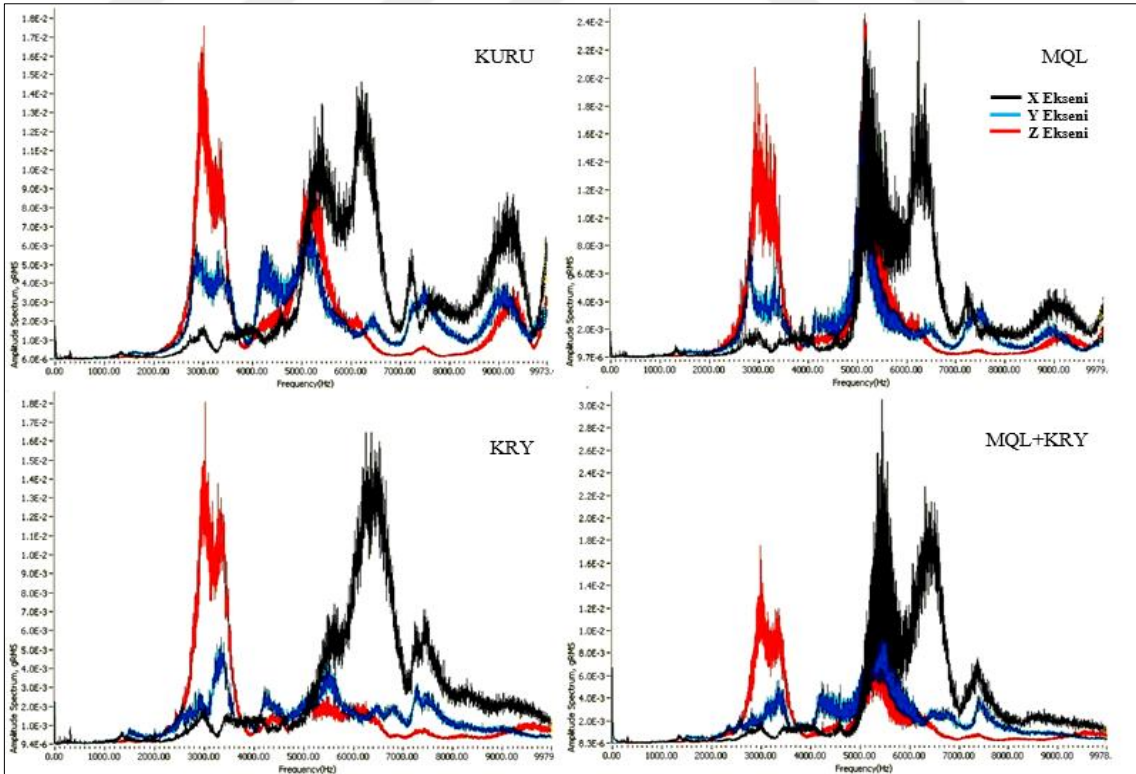
Şekil 4.10. CVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,09$ mm/dev, $V=120$ m/dak).



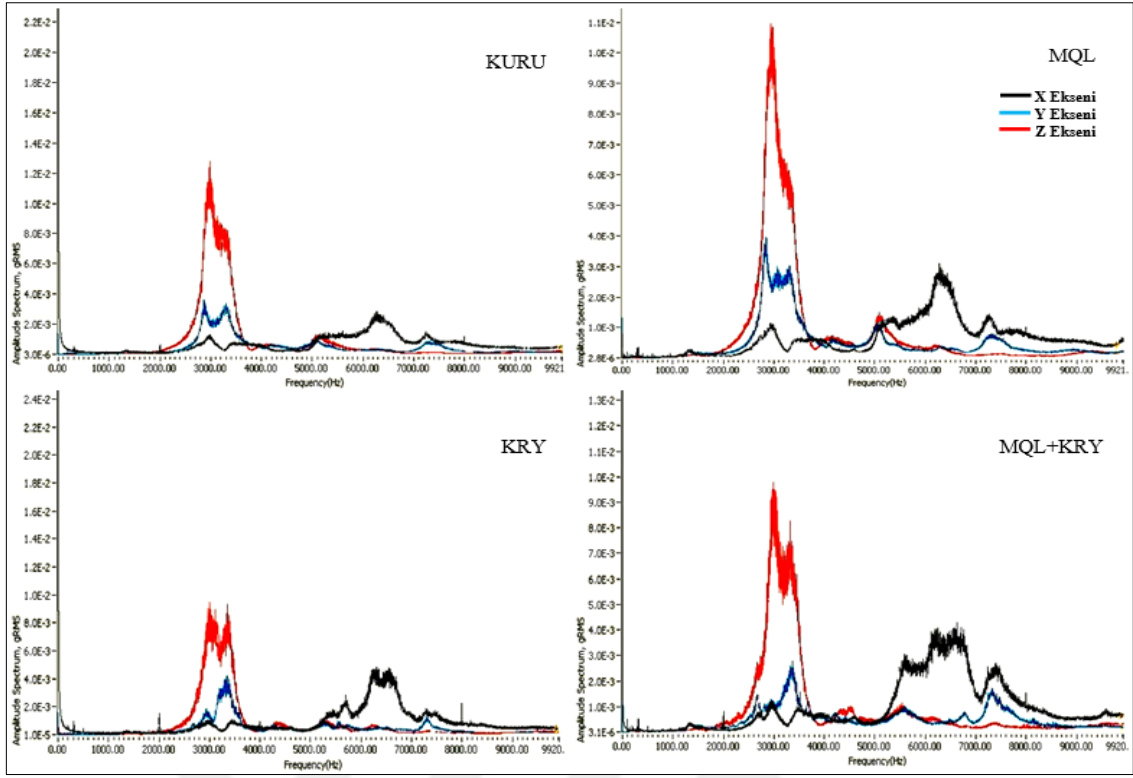
Şekil 4.11. CVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,12$ mm/dev, $V=60$ m/dak).



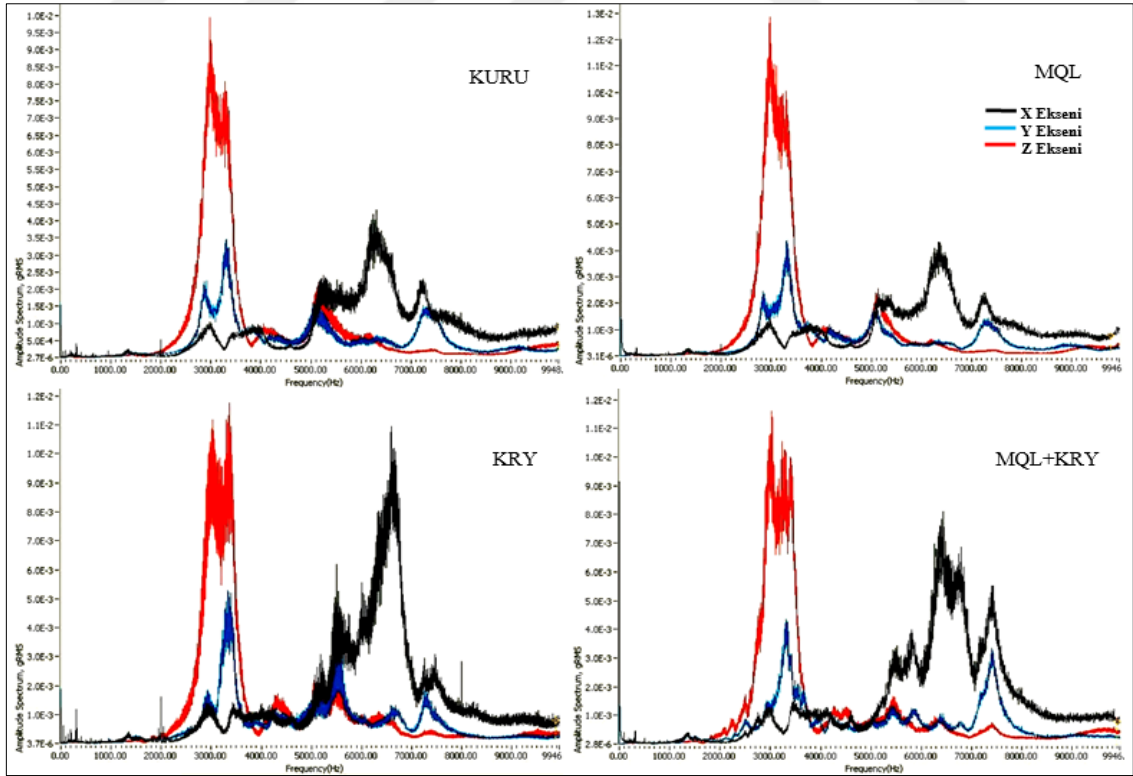
Şekil 4.12. CVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,12$ mm/dev, $V=90$ m/dak).



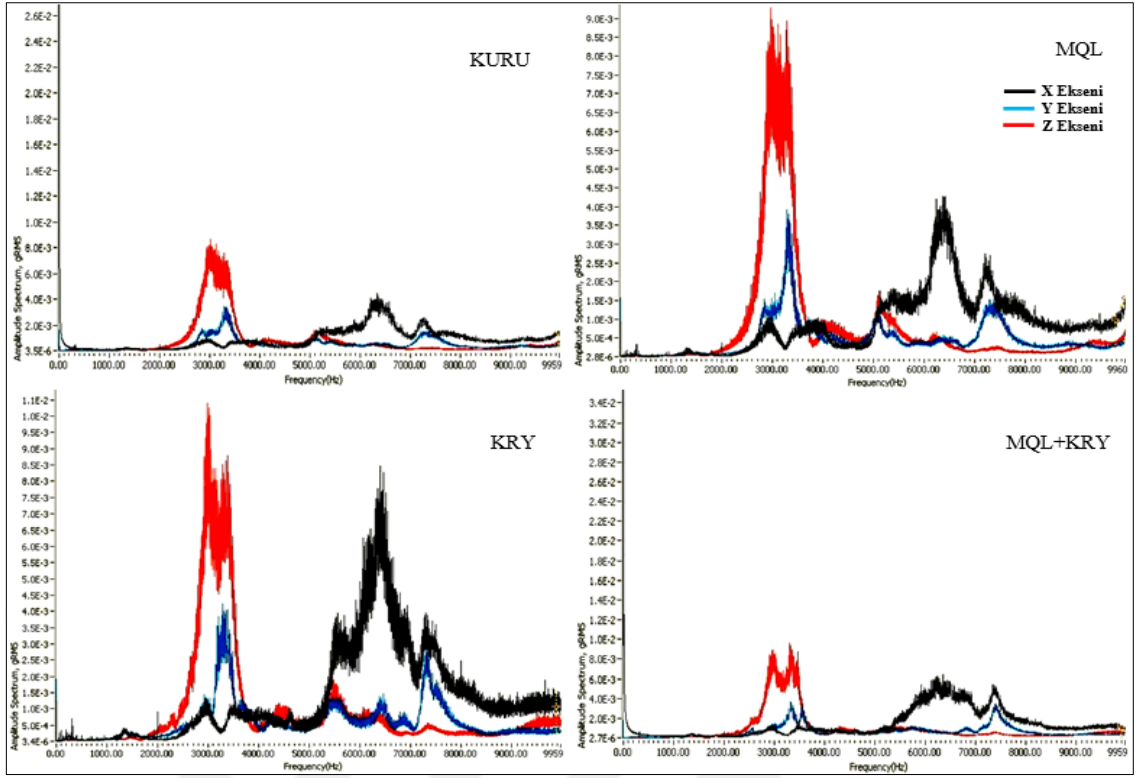
Şekil 4.13. CVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,12$ mm/dev, $V=120$ m/dak).



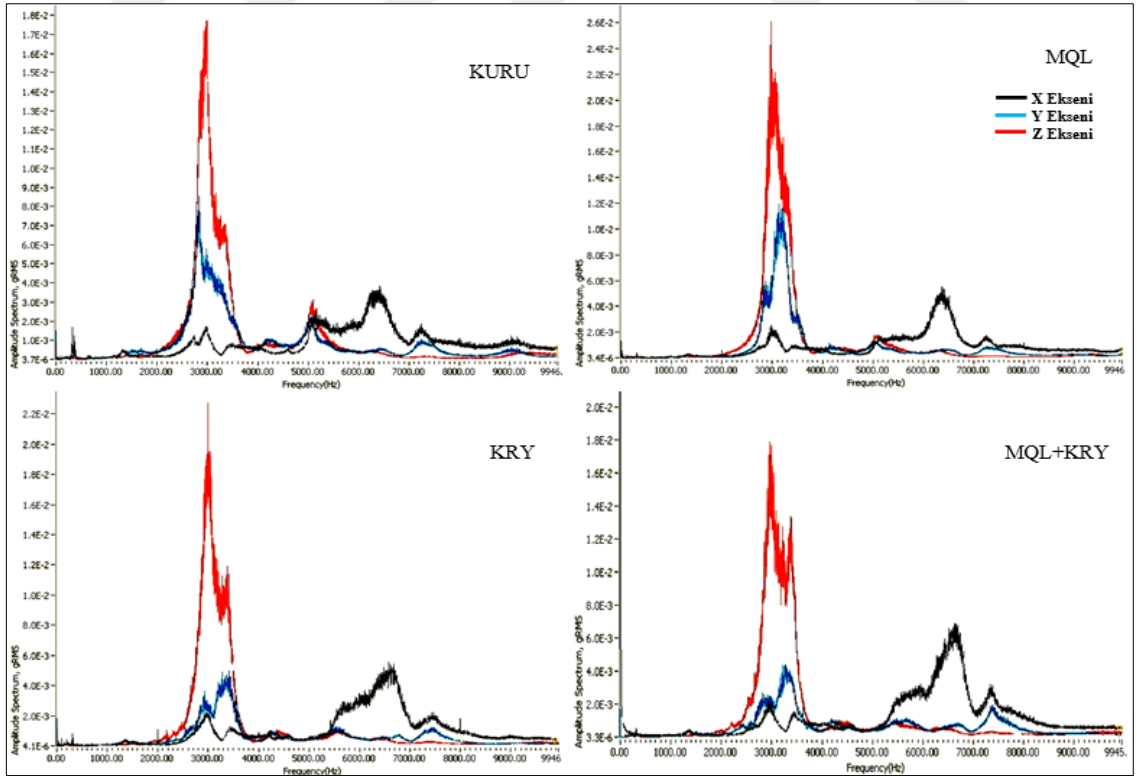
Şekil 4.14. PVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,06$ mm/dev, $V=60$ m/dak).



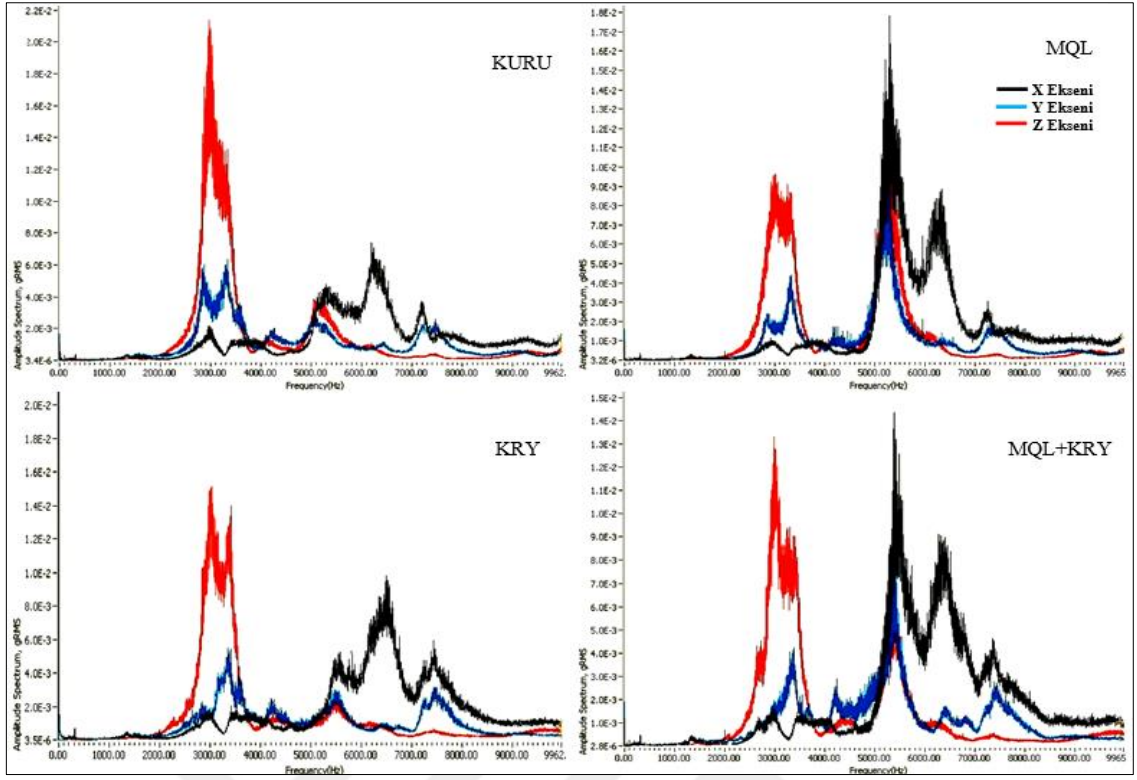
Şekil 4.15. PVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,06$ mm/dev, $V=90$ m/dak).



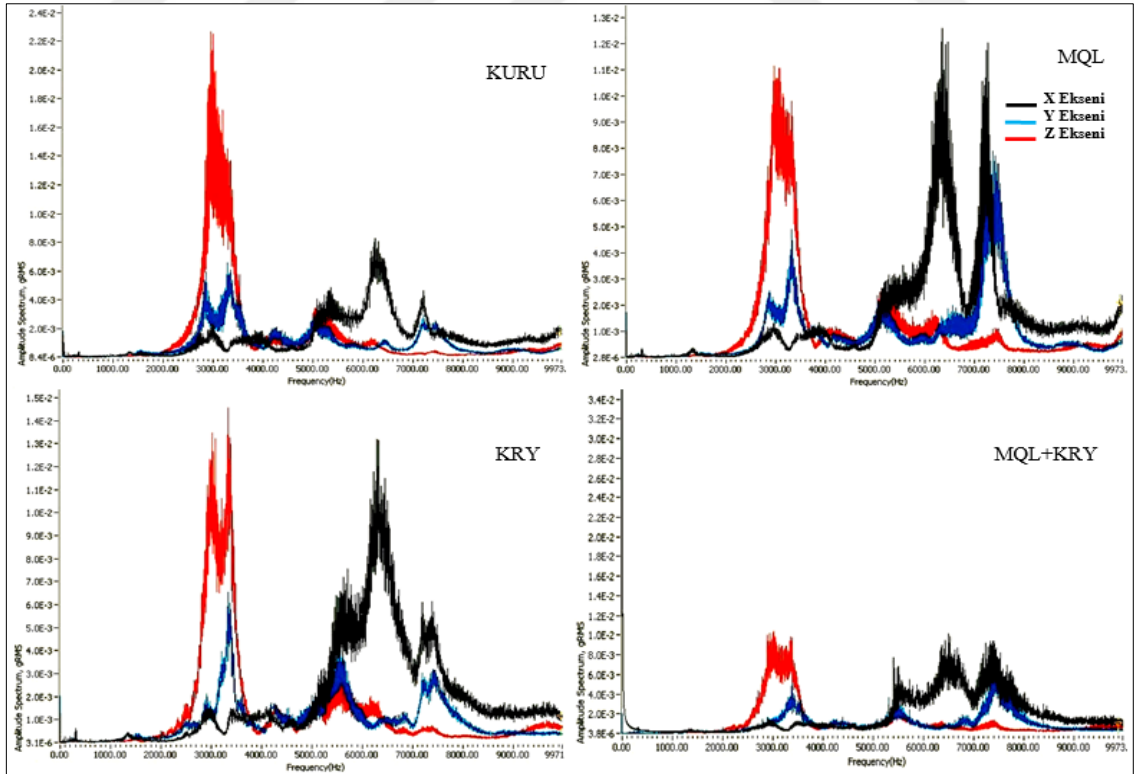
Şekil 4.16. PVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,06$ mm/dev, $V=120$ m/dak).



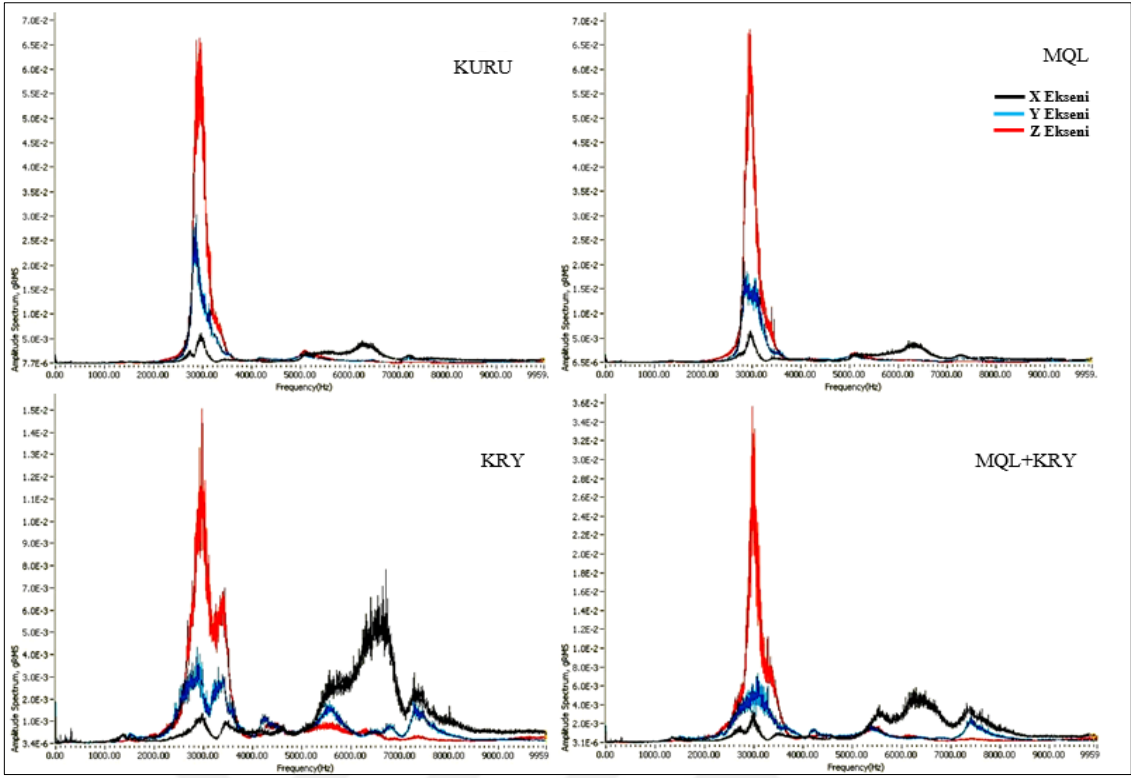
Şekil 4.17. PVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,09$ mm/dev, $V=60$ m/dak).



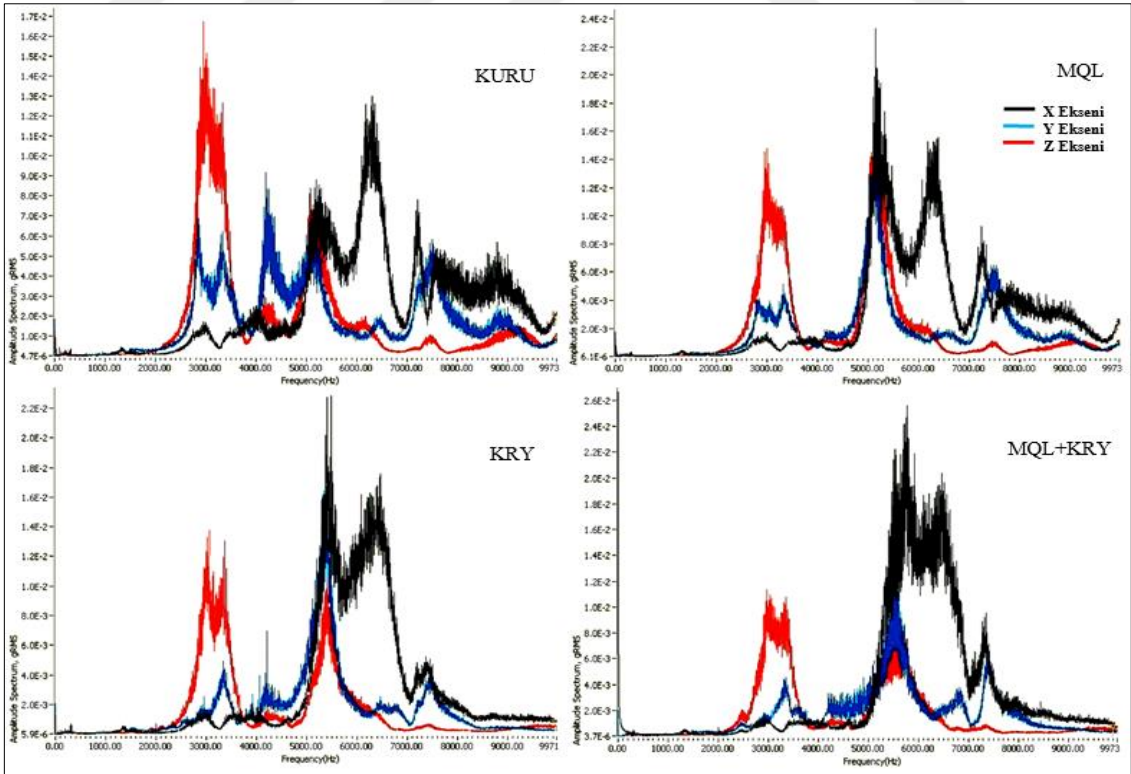
Şekil 4.18. PVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,09$ mm/dev, $V=90$ m/dak).



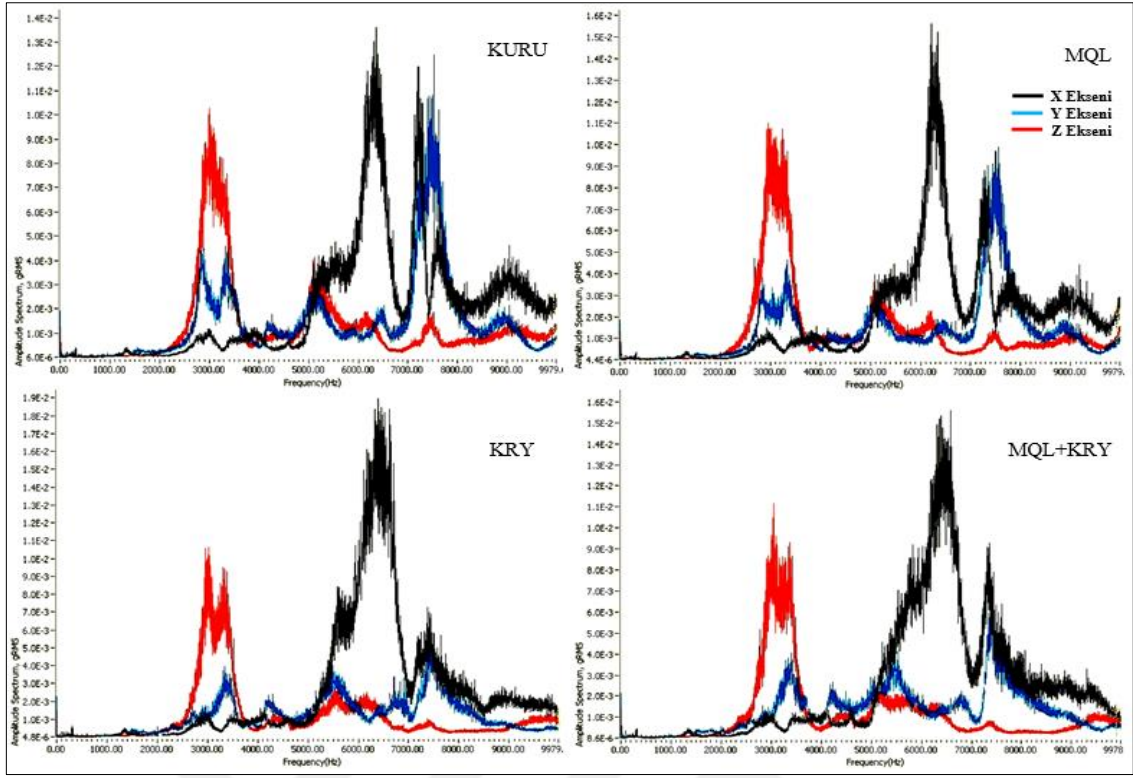
Şekil 4.19. PVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,09$ mm/dev, $V=120$ m/dak).



Şekil 4.20. PVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,12$ mm/dev, $V=60$ m/dak).



Şekil 4.21. PVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,12$ mm/dev, $V=90$ m/dak).



Şekil 4.22. PVD kaplı kesici takım ile elde edilen titreşim genlik değerleri ($f=0,12$ mm/dev, $V=120$ m/dak).

Şekil 4.23 - Şekil 4.25 arasındaki grafikler incelendiğinde, X ekseninde MQL kesme ortamının kuru kesme ortamına kıyasla, CVD kaplı takımlarda %30'lara varan oranlarda, PVD kaplı takımlarda ise %30,38'lere varan oranlarda daha düşük titreşim genlik değerleri ölçüldüğü görülmektedir. MQL ile işlemenin, kesme bölgesine püskürtülen kesme sıvısı ile kesici takım-iş parçası malzemesi ara yüzeyinde bir miktar yağlama özelliği sağlaması sayesinde sürtünmeyi azaltması ve kesici takım aşınmasını olumsuz etkileyen kesme sıcaklığını azaltmasıyla daha düşük titreşim genlik değerlerinin oluştuğu düşünülmektedir. Ayrıca literatürde 30 ml/saat ile MQL tekniği kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde kuru tornalamaya kıyasla MQL tekniğinde daha yüksek titreşim değerleri bulunduğu bildirilmiştir [100]. Ancak başka bir çalışmada 150 ve 300 ml/saat kesme sıvısı debisi ile gerçekleştirilen MQL tekniği kullanımında 150 ml/saat debide daha düşük titreşim değerleri elde edildiği bildirilmiştir [120]. Literatürdeki bu çalışma sonuçlarına göre bu çalışmada 150 ml/saat debi ile gerçekleştirilen MQL tekniğinde kuru tornalamaya göre oldukça düşük kesici takım titreşim genlik değerleri elde edilmiştir.

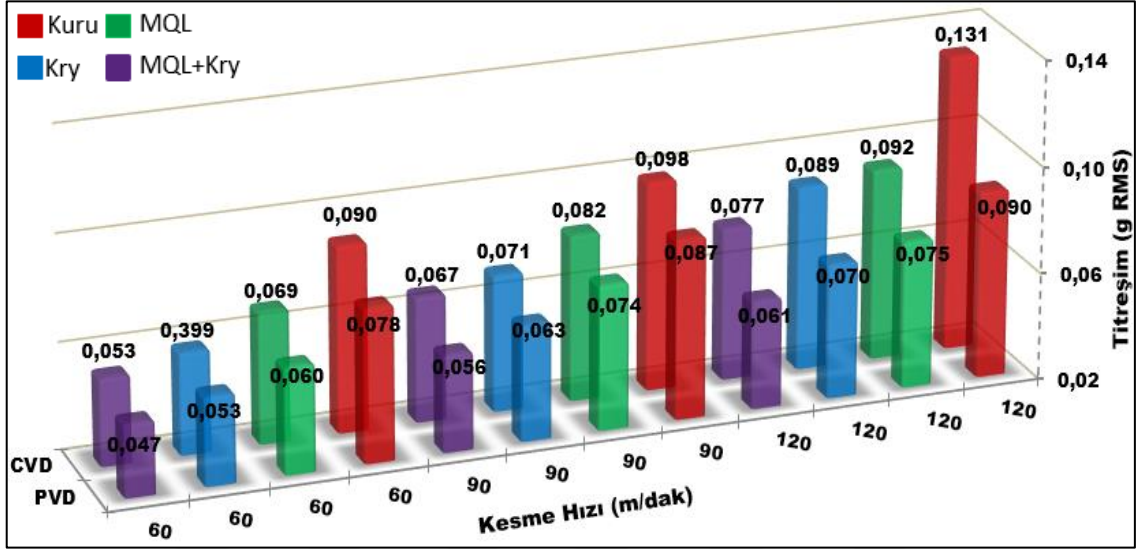
Kriyojenik kesme ortamında oluşan kesici takım titreşim genlik değerlerine bakıldığında kuru tornalamaya kıyasla CVD kaplı takımlarda %44,16 ve PVD kaplı takımlarda %44,94'lere varan oranlarda daha düşük olduğu görülmektedir. MQL ile işlemeye göre kıyaslandığında kriyojenik kesme ortamının CVD kaplı takımlarda %38,2 ve PVD kaplı takımlarda %20,90'lara varan oranlarda titreşim genlik değerlerinde azalma olduğu tespit edilmiştir. MQL kesme ortamına kıyasla kriyojenik kesme ortamında gerçekleştirilen deneylerde kesici takım daha az aşınmakta dolayısıyla kesici takım formunu daha uzun süre koruyabilmekte olduğundan daha düşük kesici takım titreşim genlik değerleri sergilediği düşünülmektedir. Formunu koruyan kesici takım, daha düşük takım talaş ara yüzey alanı ile daha az sürtünmeye maruz kalarak daha düşük kuvvet ile kesme yapabilmektedir.

MQL+Kry kesme ortamında ise, kuru tornalamaya kıyasla CVD kaplı takımlarda %53,81 ve PVD kaplı takımlarda %49,37'lere varan oranlarda daha düşük kesici takım titreşim genlik değerleri ölçüldüğü görülmüştür. MQL ile işlemeye göre kıyaslandığında, CVD kaplı takımlarda %48,87 ve PVD kaplı takımlarda %27,27'lere varan oranlarda, Kry kesme ortamına göre kıyaslandığında ise CVD kaplı takımlarda %25,23 ve PVD kaplı takımlarda %14,28'lere varan oranlarda daha düşük titreşim genlik değerleri olduğu görülmüştür.

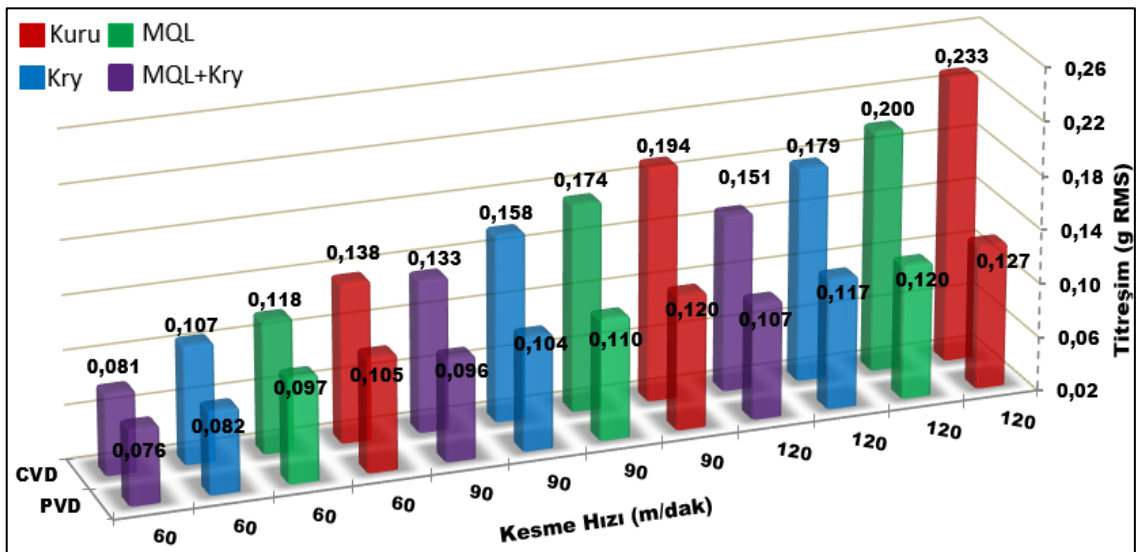
Grafiklerde kesme hızı ve ilerleme hızının artmasıyla kesici takım titreşim genlik değerlerinin de arttığı görülmektedir. Kesme hızı ve ilerleme hızının artması, birim zamanda kaldırılan talaş miktarını, kesme kuvvetlerini ve sürtünmeyi artırdığından kesme bölgesi sıcaklığının yükselmesine ve dolayısıyla kesici takım aşınmasını hızlandırdığı düşünülmektedir ve kesici takım titreşiminin arttığı tespit edilmiştir. Kesici takım ucunda aşınma nedeniyle meydana gelen kayıplar neticesinde talaş kırıcı formu ve kesici takımın uç radyüsü talaş kaldırıldıkça bozulur. Bu durum kesici takım iş parçası temas bölgesinde sürekli şekil ve alan değişimi gerçekleşmektedir. Ayrıca artan sıcaklıklar nedeniyle de kesici takım üzerinde oluşan BUE kesici takım aşınmasını ve iş parçası yüzey pürüzlülüğünü artırmaktadır. Tüm bu değişimler nedeni ile kesici takım üzerine gelen kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve titreşim değerlerinde değişimler olmaktadır.

Kesme hızının 60 m/dak'dan %50 oranda artırılarak 90 m/dak değerine çıkarılmasıyla kesici takım titreşim genlik değerleri CVD kaplı takımlarda %85,98, PVD kaplı takımlarda %89,87'lere varan oranlarda artış göstermiştir. Kesme hızının 60 m/dak'dan %100 oranda artırılarak 120 m/dak değerine çıkarılmasıyla ise kesici takım titreşim genlik

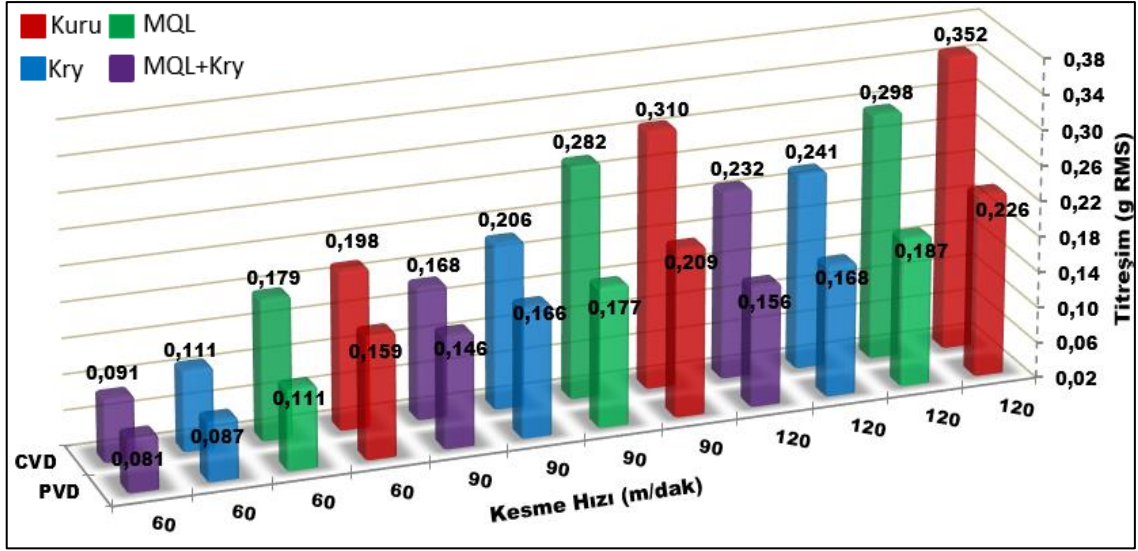
değerlerindeki bu artışın CVD kaplı takımlarda %154,59, PVD kaplı takımlarda %92,94'lere varan oranlarda olduğu görülmüştür. İlerleme hızının 0,06 mm/dev'den %50 ve %100 oranlarda artırılmasıyla kesici takım titreşim genlik değerleri CVD kaplı takımlarda %122,52 ve %242,91, PVD kaplı takımlarda ise %75,74 ve %162,35'lere varan oranlarda artmıştır. Bu sonuçlara dayanarak kesici takım titreşim genlik değerleri üzerinde ilerleme hızının kesme hızından daha etkili olduğu söylenebilir.



Şekil 4.23. X ekseninde 0,06 mm/dev ilerleme hızında farklı kesme hızlarında kesici takım titreşim genlik değerlerinin ortalaması.



Şekil 4.24. X ekseninde 0,09 mm/dev ilerleme hızında farklı kesme hızlarında kesici takım titreşim genlik değerlerinin ortalaması.



Şekil 4.25. X ekseninde 0,12 mm/dev ilerleme hızında farklı kesme hızlarında kesici takım titreşim genlik değerlerinin ortalaması.

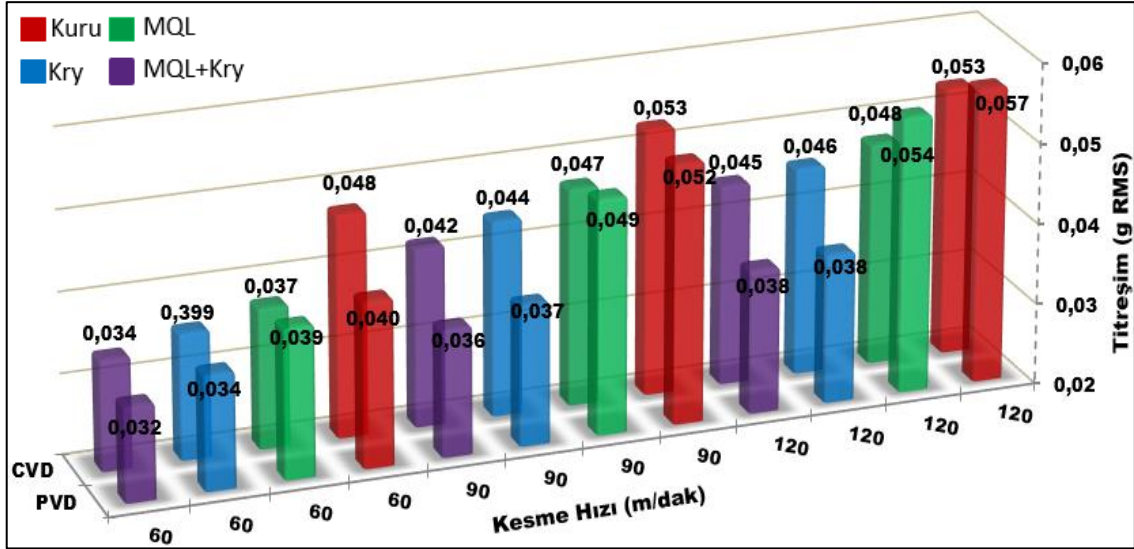
Şekil 4.26 - Şekil 4.28 arasında verilen Y eksenindeki kesici takım titreşim genlik değerlerini gösteren grafikler incelendiğinde, kuru kesme ortamına kıyasla MQL kesme ortamının, CVD ve PVD kaplı takımlarda %44,14 ve %19,92'lara varan oranlarda titreşim genlik değerlerinde azalma sağladığı tespit edilmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi bu durum, MQL ile işlemenin kesme bölgesine püskürtülen kesme sıvısı ile bir miktar yağlama özelliği sağlaması sayesinde sürtünmeyi azaltması ve kesici takım aşınmasını olumsuz etkileyen kesme sıcaklığını azaltmasıyla ilişkilendirilmiştir.

Kriyojenik kesme ortamında, kuru tornalamaya kıyasla CVD kaplı takımlarda %34,83 ve PVD kaplı takımlarda %44,09'lara varan oranlarda kesici takım titreşim genlik değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. MQL ile işlemeye kıyasla ise CVD kaplı takımlarda %22,27 ve PVD kaplı takımlarda %37,75'lere varan oranlarda daha düşük titreşim genlik değerleri ölçülmüştür.

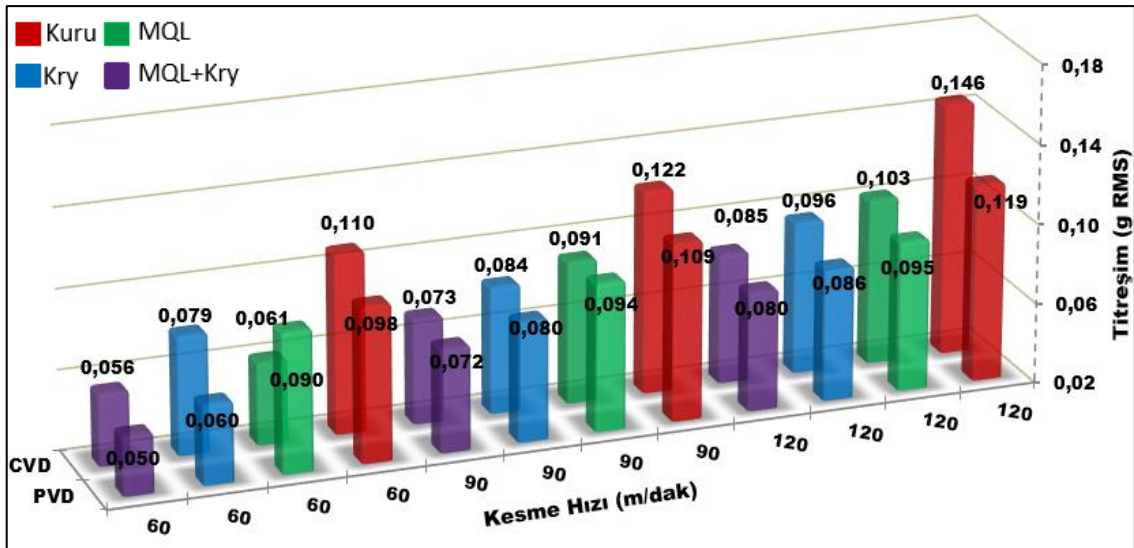
MQL+Kry kesme ortamında ise, kuru tornalamaya göre CVD kaplı takımlarda %48,9 ve PVD kaplı takımlarda %49,14'lere varan oranlarda kesici takım titreşim genlik değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. MQL ile işlemeye kıyasla CVD kaplı takımlarda %33,77 ve PVD kaplı takımlarda %44,98'lere varan oranlarda, son olarak Kry kesme ortamına kıyasla CVD kaplı takımlarda %29,26 ve PVD kaplı takımlarda %17,17'lere varan oranlarda titreşim genlik değerlerinde azalma gözlemlenmiştir.

Kesme hızındaki %50 ve %100 oranlardaki artışla kesici takım titreşim genlik değerleri; CVD kaplı takımlarda %48,7 ve % 67,71, PVD kaplı takımlarda ise %45,06 ve

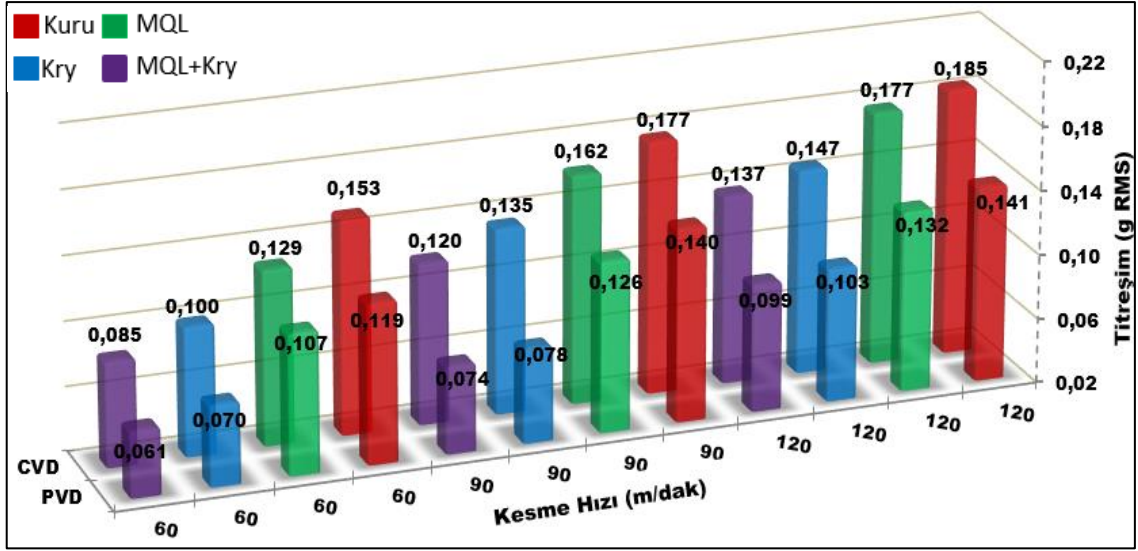
%61,82'lere varan oranlarda artış göstermiştir. Benzer şekilde ilerleme hızının %50 ve %100 oranlarda artmasıyla kesici takım titreşim genlik değerleri; CVD kaplı takımlarda %174,78 ve %272,64, PVD kaplı takımlarda ise %141,11 ve %194,18'lere varan oranlarda artmıştır. Böylece kesici takım titreşim genlik değerleri üzerinde ilerleme hızının kesme hızından daha etkin olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.26. Y ekseninde 0,06 mm/dev ilerleme hızında farklı kesme hızlarında kesici takım titreşim genlik değerlerinin ortalaması.



Şekil 4.27. Y ekseninde 0,09 mm/dev ilerleme hızında farklı kesme hızlarında kesici takım titreşim genlik değerlerinin ortalaması.



Şekil 4.28. Y ekseninde 0,12 mm/dev ilerleme hızında farklı kesme hızlarında kesici takım titreşim genlik değerlerinin ortalaması.

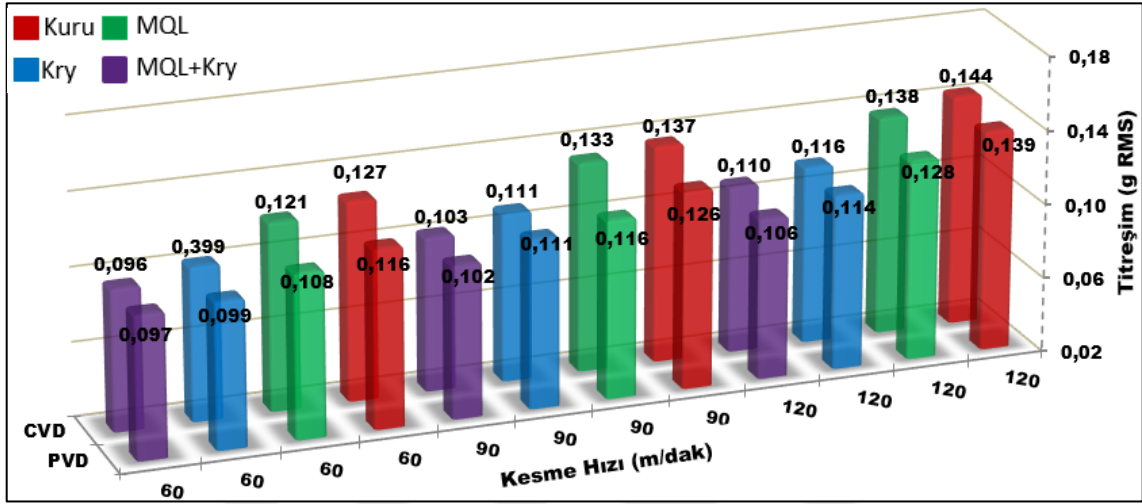
Şekil 4.29 - Şekil 4.31 arasındaki grafikler incelendiğinde, Z ekseninde MQL ile işlemenin kuru tornalamaya kıyasla, CVD kaplı takımlarda %20,32 ve PVD kaplı takımlarda %27,76'lara varan oranlarda daha düşük titreşim genlik değerlerine sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Kriyojenik kesme ortamı ise, kuru tornalamaya kıyasla CVD kaplı takımlarda %39,11 ve PVD kaplı takımlarda %42,96'lara varan oranlarda daha düşük kesici takım titreşim genlik değerlerine sahip olduğu anlaşılmaktadır. MQL ile işlemeye göre kıyaslandığında, Kriyojenik kesme ortamında CVD kaplı takımlarda %31,21 ve PVD kaplı takımlarda ise %38,02'lere varan oranlarda kesici takım titreşim genlik değerlerinde azalma gözlemlenmiştir.

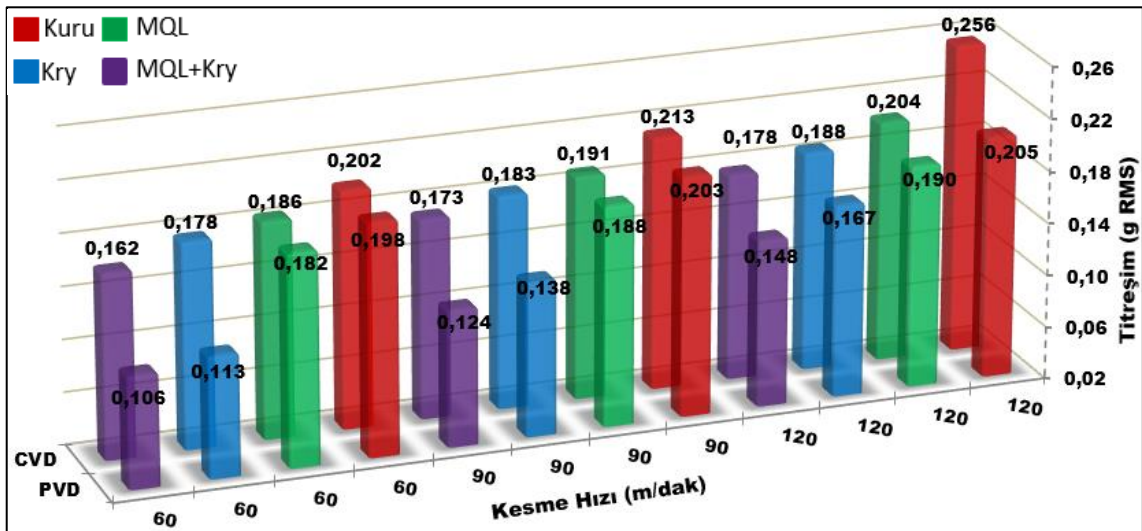
MQL+Kry kesme ortamında ise, kuru tornalamaya kıyasla CVD kaplı takımlarda %45,06 ve PVD kaplı takımlarda %52,41'lere varan oranlarda daha düşük titreşim genlik değerleri olduğu görülmüştür. MQL kesme ortamına göre kıyaslandığında titreşim genlik değerlerindeki bu azalmanın CVD kaplı takımlarda %36,98 ve PVD kaplı takımlarda %41,85'lere varan oranlarda olduğu tespit edilmiştir. Kry kesme ortamına göre kıyaslandığında ise CVD kaplı takımlarda %9,77 ve PVD kaplı takımlarda %21,67'lere varan oranlarda daha düşük kesici takım titreşim genlik değerleri olduğu görülmüştür.

Kesme hızı ve ilerleme hızının kesici takım titreşim genlik değerleri üzerine etkileri incelendiğinde; kesme hızının %50 ve %100 oranlarda artırılması ile kesici takım titreşim

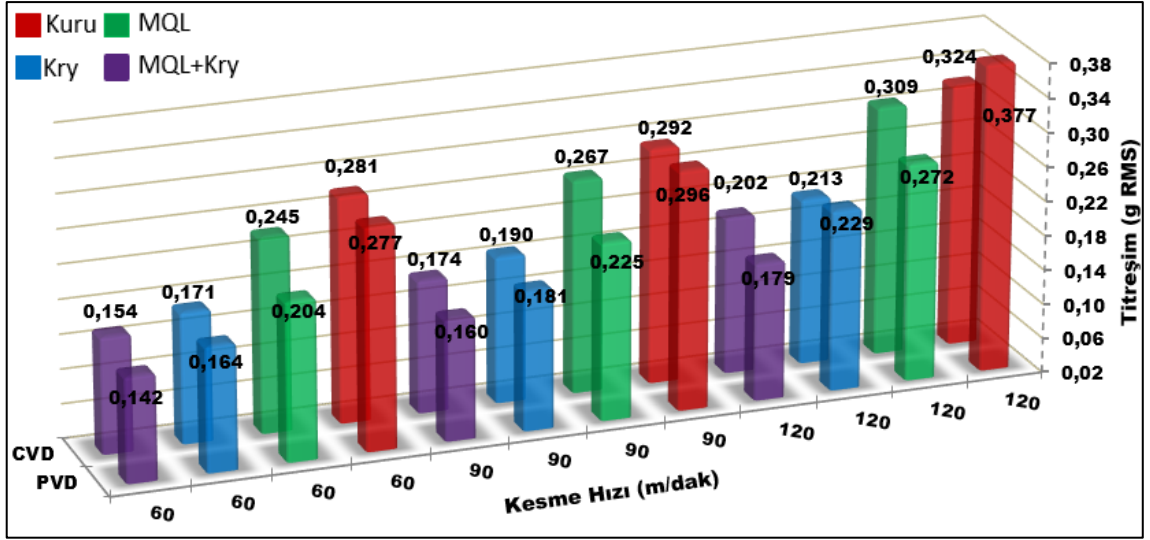
genlik değerlerinde de CVD kaplı takımlarda %12,45 ve %30,96, PVD kaplı takımlarda %22,56 ve %48,27'lere varan oranlarda artış meydana geldiği görülmüştür. Benzer değerlendirme ilerleme hızı için yapıldığında, ilerleme hızındaki %50 ve %100 oranlardaki artışın kesici takım titreşim genlik değerlerini CVD kaplı takımlarda %77,77 ve %124,52, PVD kaplı takımlarda ise %70,34 ve %171,38'lere varan oranlarda artırdığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.29. Z ekseninde 0,06 mm/dev ilerleme hızında farklı kesme hızlarında kesici takım titreşim genlik değerlerinin ortalaması.



Şekil 4.30. Z ekseninde 0,09 mm/dev ilerleme hızında farklı kesme hızlarında kesici takım titreşim genlik değerlerinin ortalaması.



Şekil 4.31. Z ekseninde 0,12 mm/dev ilerleme hızında farklı kesme hızlarında kesici takım titreşim genlik değerlerinin ortalaması.

4.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ

CVD ve PVD kaplı takımlar için dört farklı kesme ortamında gerçekleştirilen tormalama deneyleri sonrasında elde edilen Ra ve Rz yüzey pürüzlülük değerlerinin değişimleri Şekil 4.32 - Şekil 4.37 arasında verilmiştir.

Bu çalışmadaki tüm kesme şartları için Ra değerleri 0,23 – 3,58 μm aralığında ölçülmüştür. Şekil 4.32- Şekil 4.34 arası grafikler incelendiğinde, tüm kesme şartları için CVD kaplı takımlara kıyasla PVD kaplı takımlarla daha düşük Ra değerleri elde edildiği görülmektedir. Bu durum PVD kaplı takımların daha iyi aşınma performansı göstererek daha az aşınması ile ilişkilendirilmiştir. Bilindiği üzere yüzey pürüzlülüğü ile kesici takım aşınması arasında doğrudan bir ilişki vardır [121], [122].

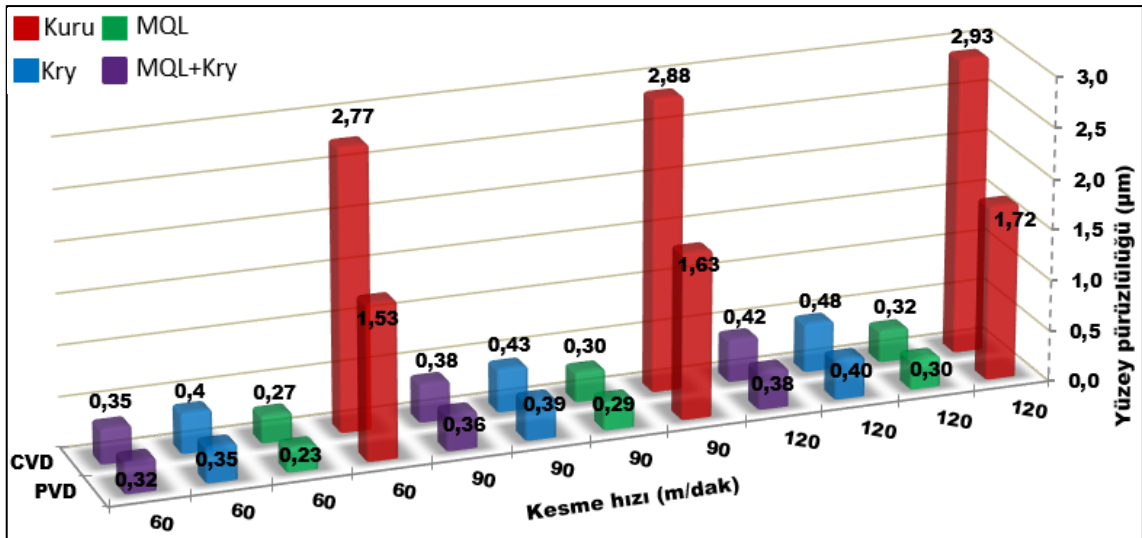
Grafiklerde, her iki takım türü için de kuru kesme ortamında gerçekleştirilen deneylerde elde edilen Ra değerleri ile diğer kesme ortamlarında elde edilen Ra değerleri arasında çok yüksek fark olduğu görülmektedir. Bilindiği üzere kesici takım titreşimi [123] ve kesici takım aşınması [122], [124] ve kesme derinliği [52] yüzey pürüzlülüğü üzerinde doğrudan etkilidir. Literatürde MQL tekniği ile kuru tormalamayı kıyaslayan çalışmalarda MQL tekniğinin farklı oranlarda yüzey pürüzlülüğünü düşürdüğü bildirilmiştir. 62 HRC sertliğinde AISI D2 soğuk iş takım çeliğininin CVD kaplama yöntemiyle TiCN-Al₂O₃-Ti kaplı 0,4 mm uç radyüslü TNMG tungsten kesici takım ile 0,5 mm kesme derinliğinde tormalanmasında MQL tekniği ile kuru tormalama yüzey pürüzlülüğü açısından

kıyaslanmıştır. MQL tekniği için kullanılan kesme sıvısı 5-20°C arasında 5 farklı sıcaklıkta kesme bölgesine ulaştırılmıştır. Bu farklı MQL tekniği uygulamasında kuru tornalamada yüzey pürüzlülüğü Ra değeri 1,6 µm iken 20°C sıcaklıktaki MQL kesme sıvısı kullanıldığında MQL tekniği için oldukça düşük sayılabilecek 1,5 µm Ra değeri ile %6 iyileşme elde edilirken 5°C sıcaklıkta MQL kesme sıvısı kullanıldığında kuru tornalamaya göre %50 iyileşme elde edildiği görülmektedir. [125]. Benzer şekilde başka bir çalışmada AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin tornalanmasında MQL tekniği kullanıldığında kuru tornalamaya göre yüzey pürüzlülüğü değerinin %55 oranında düştüğü bildirilmiştir [54]. 15 HRC sertliğinde AISI 4340 malzemesinin frezelenmesinde ise kuru tornalamaya göre MQL tekniği ile %30 iyileşme elde edildiği bildirilmiştir [126]. Tüm bu çalışmalarda uygulanan yöntem, nozul, kesme sıvısı, kesici takım, malzeme özellikleri yanında kesme parametrelerinde farklı olduğu ve tüm bu parametrelerin yüzey pürüzlülük değeri üzerine etkilerinin olduğu bilinmektedir.

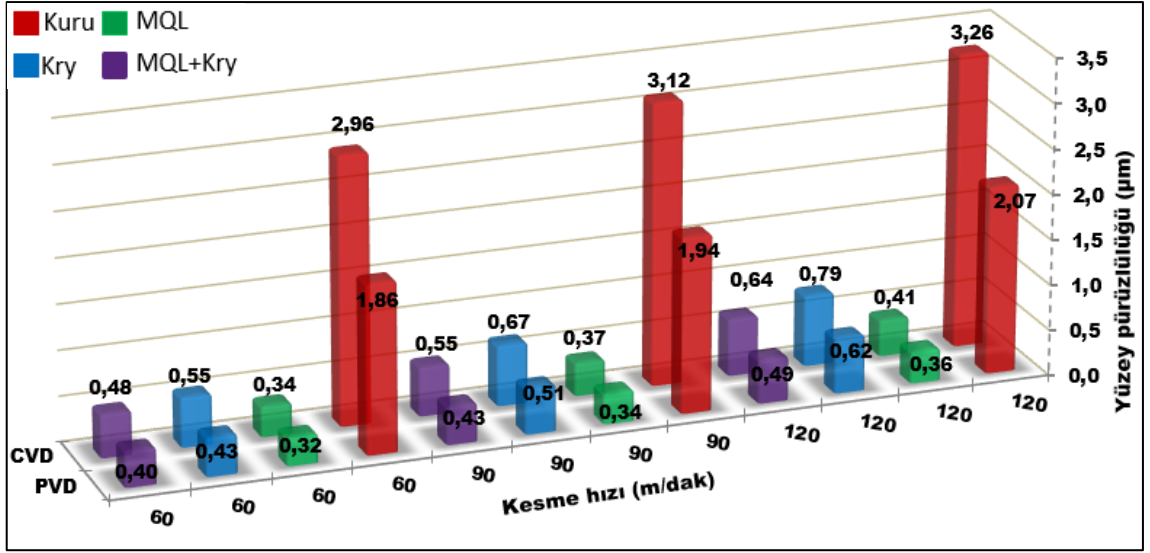
En düşük Ra değerleri MQL kesme ortamında elde edilmiştir. Ra değerlerinde, kuru kesme ortamına göre kıyaslandığında MQL kesme ortamı ile CVD kaplı takımlarla yapılan deneylerde %90,12'lere, PVD kaplı takımlarla yapılan deneylerde ise %84,77'lere varan oranlarda iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir. Kuru tornalama şartlarında Ra değerinin özellikle CVD kaplı takımda yüksek olması nedeni ile MQL, Kry ve MQL+Kry ortamlarında iyileşme oranları yüksek çıkmıştır. Literatürde yüzey pürüzlülüğü üzerine çalışmalarda benzer yüksek Ra değerleri bildirilmiştir [56], [71]. CVD kaplı takımın yüksek yüzey pürüzlülük değerine sahip olması yüksek kesici takım titreşimi ve yüksek aşınma değerlerine sahip olması ile ilişkilendirilmiştir. Kriyojenik soğutma ortamına kıyasla CVD kaplı takımlarda %48,09'lara, PVD kaplı takımlarda %42,05'lere varan oranlarda iyileşme sağlanmıştır. MQL+Kry kesme ortamına kıyasla ise CVD kaplı takımlarda %36,05'lere, PVD kaplı takımlarda %26,99'lara varan oranlarda daha düşük Ra değerleri elde edilmiştir.

Kriyojenik kesme ortamında gerçekleştirilen deneylerde, kuru tornalamaya kıyasla CVD ve PVD kaplı takımlarda %85,62 ve %76,98'lere varan oranlarda daha düşük Ra değerleri gözlenmiştir. MQL+Kry kesme ortamında ise; kuru tornalamadan CVD kaplı takımlarda %87,35'lere, PVD kaplı takımlarda %79,15'lere varan, Kry soğutma ile tornalamadan CVD kaplı takımlarda %18,83'lere, PVD kaplı takımlarda %28,09'lara varan oranlarda daha iyi Ra değerleri elde edildiği tespit edilmiştir.

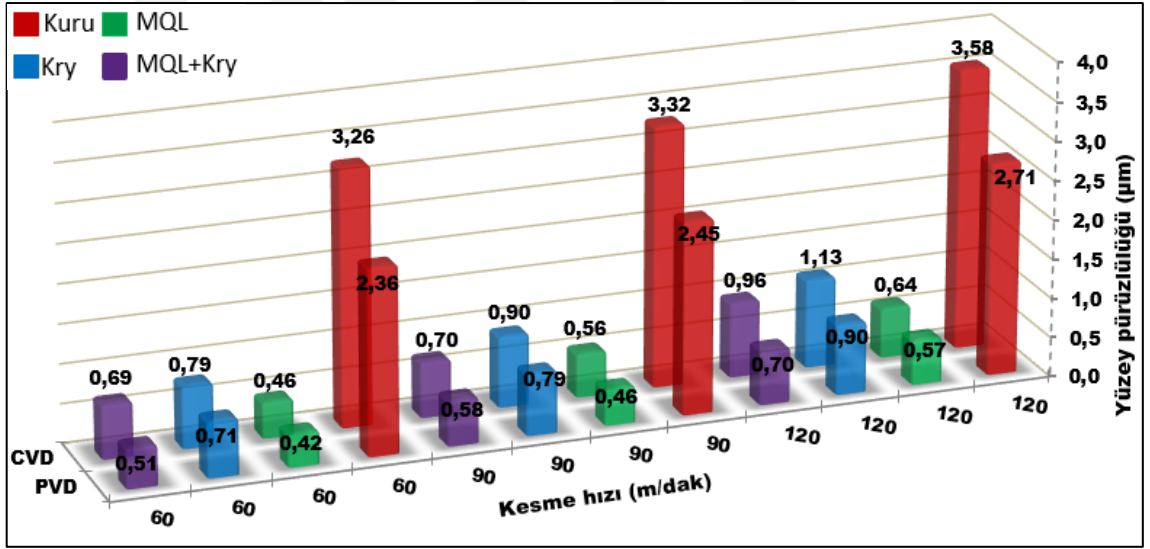
Kesme parametrelerine göre Ra değerlerinin değişimi incelendiğinde; her iki takım türü için artan kesme hızı ve ilerleme hızı ile Ra değerlerinin de arttığı görülmektedir. Bu durumun kesme hızı ve ilerleme hızının artması ile kesme bölgesi sıcaklıklarının, kesici takım titreşim genlik değerlerinin ve kesici takım aşınmasının artması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir [127], [128]. Tüm kesme ortamları göz önüne alınarak değerlendirildiğinde, kesme hızının 60 m/dak değerinden %50 oranda artırılarak 90 m/dak değerine çıkarılmasıyla Ra değerlerinde CVD kaplı takımlarla gerçekleştirilen tornalama deneylerinde %21,82, PVD kaplı takımlarla gerçekleştirilen tornalama deneylerinde %22,75'lere varan oranlarda artış olduğu tespit edilmiştir. Kesme hızının 60 m/dak değerinden %100 oranda artırılarak 120 m/dak değerine çıkarılmasıyla, Ra değerleri CVD kaplı takımlarda %42,91 ve PVD kaplı takımlarda %43,59'lara varan oranlarda artmıştır. İlerleme hızının Ra değerleri üzerine etkilerine bakıldığında; ilerleme hızının %50 oranda artırılmasıyla (0,06 mm/dev değerinden 0,09 mm/dev değerine artırılmasıyla) Ra değerlerinde CVD kaplı takımlarda %63,07 ve PVD kaplı takımlarda %54,77'lere varan oranlarda, ilerleme hızının %100 oranda artırılmasıyla (0,06 mm/dev değerinden 0,12 mm/dev değerine artırılmasıyla) Ra değerlerinde CVD kaplı takımlarda %134,02 ve PVD kaplı takımlarda %125,88'lere varan oranlarda artış olduğu görülmektedir. Tüm bu sonuçlara göre ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde ilerleme hızının kesme hızından daha fazla etkiye sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 4.32. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda Ra yüzey pürüzlülük değerleri (f=0,06 mm/dev).



Şekil 4.33. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda Ra yüzey pürüzlülük değerleri (f=0,09 mm/dev).



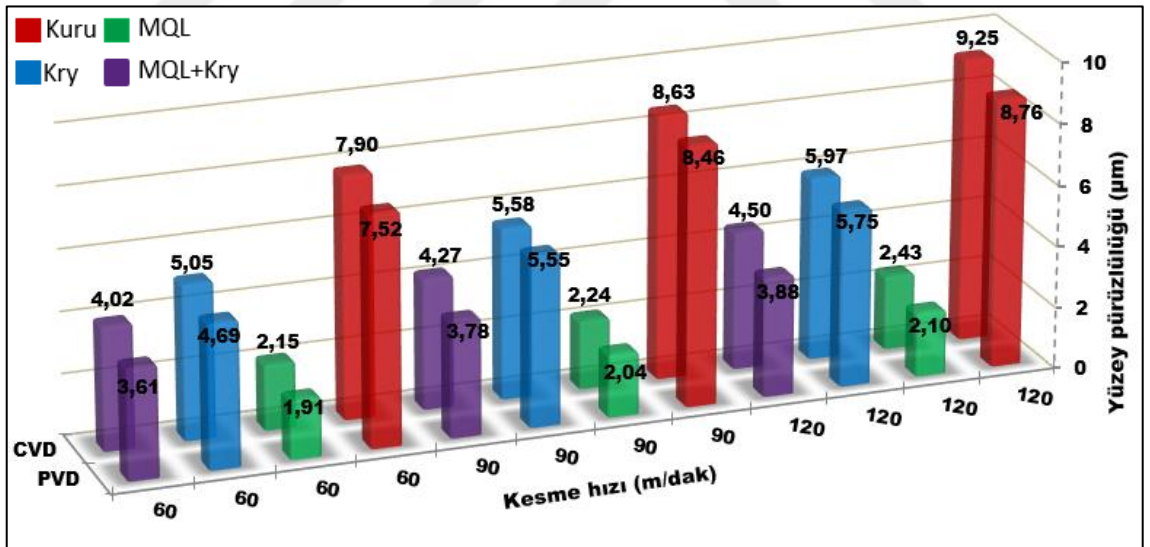
Şekil 4.34. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda Ra yüzey pürüzlülük değerleri (f=0,12 mm/dev).

Şekil 4.35 - Şekil 4.37 arasında verilen grafiklerde, deneylerde ölçülen Rz değerlerinin 1,91 – 16,87 µm aralığında olduğu görülmektedir. Ra değerlerinde olduğu gibi PVD kaplı takımlarla daha düşük Rz değerleri elde edilmiştir. En düşük Rz değerleri MQL kesme ortamında elde edilmiş ve bu kesme ortamını MQL+Kry daha sonrada Kry kesme ortamı takip etmiştir.

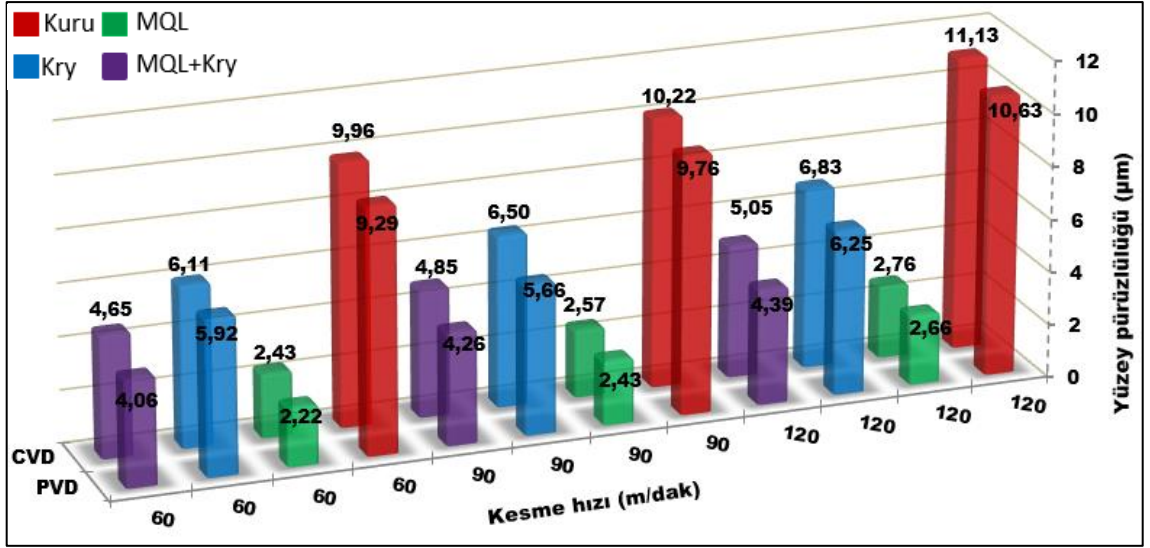
Kry kesme ortamı ile yapılan deneylerde kuru kesme ortamına göre CVD kaplı takımlarda %57,11, PVD kaplı takımlarda %56,27'lere varan oranlarda daha düşük Rz değerleri elde

edilmiştir. MQL+Kry kesme ortamında ise; kuru kesme ortamına kıyasla CVD kaplı takımlarda %66,72, PVD kaplı takımlarda %64,62'lere varan oranlarda, Kry kesme ortamına kıyasla CVD kaplı takımlarda %27,01, PVD kaplı takımlarda %32,46'lara varan oranlarda daha düşük Rz değerleri ölçülmüştür. En düşük Rz değerleri MQL kesme ortamında elde edilmiş ve bu iyileşmenin; kuru kesme ortamına kıyasla CVD kaplı takımlarda %78,5, PVD kaplı takımlarda %76,7'lere, Kry soğutma ortamına kıyasla CVD kaplı takımlarda %60,51, PVD kaplı takımlarda %63,48'lere, MQL+Kry soğutma ortamına kıyasla CVD kaplı takımlarda %47,7, PVD kaplı takımlarda ise %47'lere varan oranlarda olduğu tespit edilmiştir.

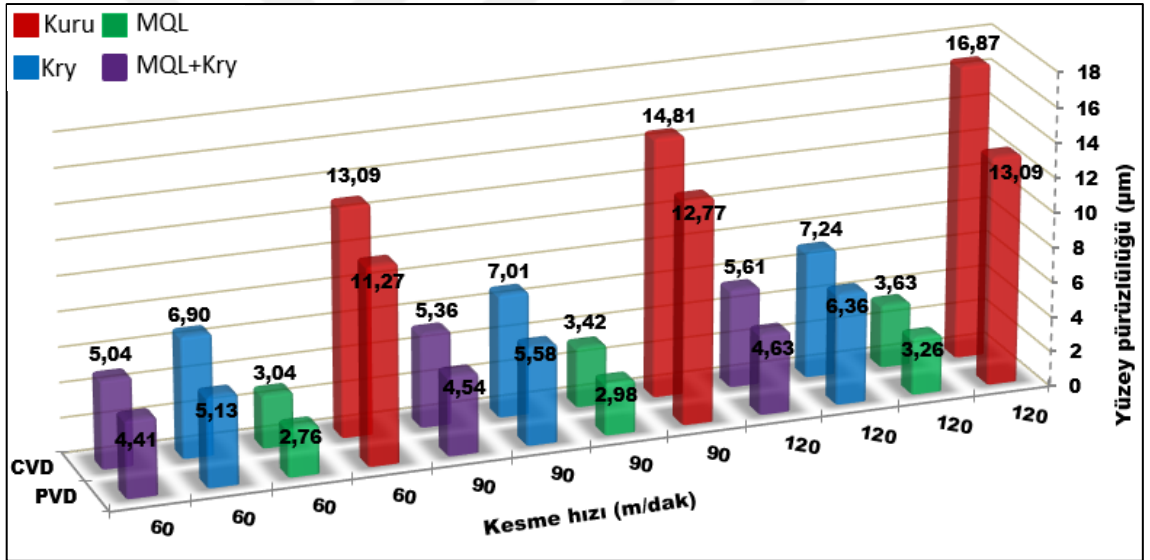
Artan kesme hızı ve ilerleme hızı Rz değerlerinde de artışa sebep olmuştur. CVD kaplı takımlarda kesme hızının %50 ve %100 oranda artırılmasıyla Rz değerlerinin de %13,08 ve %28,82'lere varan oranlarda arttığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde, PVD kaplı takımlarda da kesme hızının %50 ve %100 oranda artırılmasıyla Rz değerleri de %18,26 ve %23,91'lere varan oranlarda artmıştır. İlerleme hızının %50 ve %100 oranda artırılmasıyla; Rz değerlerinin CVD kaplı takımlarda %26,12 ve %82,4'lere, PVD kaplı takımlarda ise %26,67 ve %55,38'lere varan oranlarda arttığı görülmüştür.



Şekil 4.35. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda Rz yüzey pürüzlülük değerleri (f=0,06 mm/dev).



Şekil 4.36. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda Rz yüzey pürüzlülük değerleri (f=0,09 mm/dev).



Şekil 4.37. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda Rz yüzey pürüzlülük değerleri (f=0,12 mm/dev).

4.4. KESİCİ TAKIM AŞINMASININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Şekil 4.38 - Şekil 4.40 arasında kesici takımların yanak aşınmalarının değişimlerini gösteren grafikler verilmiştir. Grafiklerde, tüm kesme şartlarında PVD kaplı takımın CVD kaplı takıma kıyasla daha iyi aşınma performansı sergilediği görülmektedir. Bu durum, PVD kaplı takımın CVD kaplı takımdan %19,6 oranda daha yüksek mikrosertliğe sahip olması ile ilişkilendirilmiştir (Şekil 3.3). Ayrıca kesici takımların kaplama

malzemelerinin de bu sonuca etki ettiği düşünülmektedir. CVD kaplı takımın orta katmanında bulunan Al_2O_3 kaplama malzemesi yüksek sıcaklıklarda düşük termal iletkenlik özelliği gösterir [115]–[117]. Böylece kesici takım ucunda oluşan sıcaklığın kesme bölgesinden uzaklaşması zorlaşır ve kesme bölgesinde hapsolan ısı kesici takım aşınmasını hızlandırır. Bununla birlikte daha kalın kaplama malzemesi kırılabilirliğe neden olur ve kaplama tabakasının kesici takımdan kolay ayrılması önemli bir sorun haline gelir. Daha ince bir takım kaplaması ise daha yüksek tokluk sağlar. Genellikle, CVD kaplamalar PVD kaplamalardan daha kalındır. CVD kaplamalar minimum 6-9 μm kalınlıkta, PVD kaplamalar ise 1-3 μm kalınlıktadır. Dolayısıyla kaplamanın kalkması sonucu aşınmanın artması CVD kaplı takımlarda daha sık görülmektedir. Bu sebeplerden dolayı yapılan aşınma deneylerinde tüm kesme şartlarında CVD kaplı takımın daha kötü aşınma performansı sergilediği düşünülmektedir.

Grafikler incelendiğinde, PVD kaplı takımın CVD kaplı takıma kıyasla %40,4'lere varan oranlarda daha az aşındığı görülmektedir. PVD kaplı takım CVD kaplı takımdan kuru kesme ortamında %31,2, MQL kesme ortamında %40,4, Kry kesme ortamında %36 ve son olarak MQL+Kry kesme ortamında ise %38,6'lara varan oranlarda daha az aşınmıştır. Deneyler sonrası elde edilen sonuçlardan iki takım arasındaki aşınma farkının kuru kesme ortamında daha az olduğu, diğer üç kesme ortamında daha fazla olduğu, MQL kesme ortamında ise maksimuma ulaştığı söylenebilir. Bunun sebebi olarak kriyojenik soğutma için kullanılan $-196^\circ C$ 'deki sıvı azotun ve MQL'de kullanılan kesme sıvısının kesme bölgesi sıcaklığını düşürmesi sonucu kesici takımların aşınmalarının düşmesi CVD takımın PVD takıma göre daha fazla kesme bölgesi sıcaklığına sahip olması nedeni ile de CVD takımın PVD takıma göre daha fazla aşındığı düşünülmektedir. Ayrıca her iki takımında üst yüzey kaplamalarının TiN kaplama olmasına rağmen daha sert olan PVD kaplı kesici takımın kesme kenarı formunu daha uzun süre koruyabildiği bu süreçte az aşınması nedeni ile de takım talaş arayüzü alanının CVD kaplı kesici takıma göre daha düşük olduğu dolayısıyla sürtünmenin özellikle soğutmanın yanında yağlama sağlayan MQL tekniğinde daha da düşmesi ile MQL tekniğinde aşınma farkının en yüksek değerlere ulaştığı düşünülmektedir.

Grafiklerde, her iki takım türü için de en yüksek yanak aşınması miktarları kuru kesme ortamında olduğu görülmektedir. Kuru tornalamayı sırası ile MQL ve Kry kesme ortamı izlemektedir. En düşük aşınma miktarları ise MQL+Kry kesme ortamında görülmüştür. MQL ile işlemede kesme ortamına püskürtülen yağ, kesici takım-iş parçası ara

yüzeyindeki sürtünmeyi azaltmakta ve kesme bölgesi sıcaklığını düşürmektedir. Böylece kesici takımın daha az aşınmasını sağlamaktadır.

Kriyojenik ile işlemede, kesme ortamına 15 bar basınç ile püskürtülen sıvı azotun -196°C olan düşük sıcaklığı kesici takım aşınmasını olumsuz etkileyen kesme bölgesi sıcaklığını azaltmaktadır. Ayrıca, kesme esnasında ortaya çıkan talaş sıvı azotun yüksek basınç ile püskürtülmesi sonucu daha kolay kırılarak kesme bölgesinden uzaklaşması sağlanmaktadır. MQL+Kry kesme ortamı ise, hem MQL ile işleminin hem de Kry ile işleminin avantajlarını bir araya getirdiği için en düşük yanak aşınması oluşmasını sağlamıştır. MQL+Kry kesme ortamında kesici takım ve iş parçası arasına nüfuz eden MQL kesme sıvısı damlacıklarının yağlama etkisi ile sürtünmeyi düşürdüğü, -196°C 'de sıvı azotun ise kesme bölgesi sıcaklığını düşürerek kesici takımın sertliğini koruduğu ve böylece daha az yanak aşınması görüldüğü çalışmada MQL+Kry kesme ortamının daha düşük aşınmaya sahip olduğu bildirilmiştir [21].

0,06 mm/dev ilerleme hızı ve 60 m/dak kesme hızında PVD kaplı kesici takımın yan yüzeyi, kuru kesme ortamında 0,086 mm aşınırken MQL kesme ortamında 0,077 mm, Kry kesme ortamında 0,071 mm ve MQL+Kry kesme ortamında 0,065 mm aşınmıştır (Şekil 4.38). Böylece kuru kesmeye kıyasla MQL, Kry ve MQL+Kry kesme ortamlarında sırasıyla %10,4, %17,4 ve %24,4 oranlarda daha düşük yanak aşınması olduğu tespit edilmiştir. Kesme ortamına göre olan bu farklar; 90 m/dak kesme hızında sırasıyla %15, %18,2 ve %24,7 oranlarda, 120 m/dak kesme hızında ise sırasıyla %22,2, %27,7 ve %34,2 oranlardadır. Benzer şekilde CVD kaplı takımında da kuru kesme ortamına kıyasla; MQL, Kry ve MQL+Kry kesme ortamında 60 m/dak kesme hızında sırasıyla %5,5, %10 ve %12,8 oranlarda, 90 m/dak kesme hızında sırasıyla %3,3, %6,7 ve %11,7 oranlarda, son olarak 120 m/dak kesme hızında ise sırasıyla %10,2, %25,4 ve %29,3 oranlarda daha az yanak aşınması meydana gelmiştir.

Şekil 4.39 incelendiğinde, 0,09 mm/dev ilerleme hızında yine her iki takım türü için de en yüksek aşınma miktarlarının kuru kesme ortamında olduğu ve diğer kesme ortamlarında kesici takımların aşınma miktarlarında azalma meydana geldiği görülmektedir. PVD kaplı takımında 60 m/dak kesme hızında kuru kesme ortamında 0,089 mm yanak aşınması oluşmuştur. Kuru kesme ortamına kıyasla; MQL, Kry ve MQL+Kry kesme ortamında sırasıyla yanak aşınmasında %11,2, %19,1 ve %21,3 oranlarda azalma meydana gelmiştir. 90 m/dak kesme hızında kuru kesme ortamına kıyasla MQL, Kry, MQL+Kry kesme ortamlarındaki bu aşınma farkları sırasıyla %17,1, %21,2, %27,2

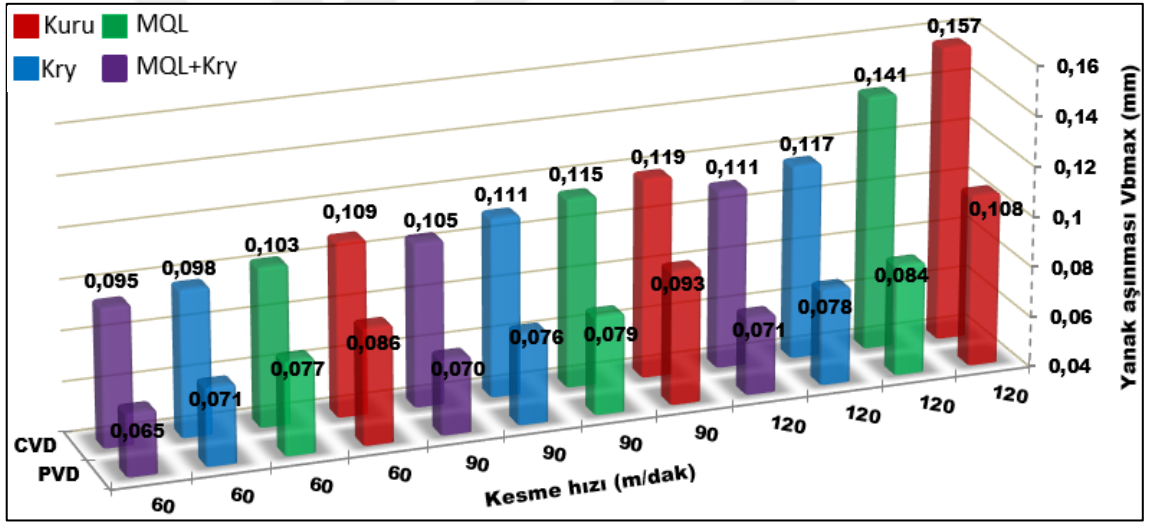
olarak hesaplanmıştır. 120 m/dak kesme hızında ise kuru kesme ortamına kıyasla MQL, Kry, MQL+Kry kesme ortamlarında kesici takımlarda sırasıyla %21,3, %30,7, %36,7 oranlarda daha düşük yanak aşınması oluşmuştur. Benzer şekilde, CVD kaplı takımında da kuru kesme ortamına kıyasla MQL, Kry ve MQL+Kry kesme ortamında 60 m/dak kesme hızında sırasıyla %8,4, %12,7 ve %14,4 oranlarda, 90 m/dak kesme hızında %10,7, %13,8 ve %17,7 oranlarda, 120 m/dak kesme hızında ise %8,1, %24,5 ve %29,5 oranlarda daha az yanak aşınması oluşmuştur.

Benzer değerlendirmeler 0,12 mm/dev ilerleme hızı için yapılacak olursa, kuru kesme ortamına kıyasla PVD kaplı takımın yanak aşınması miktarının MQL, Kry ve MQL+Kry kesme ortamlarında 60 m/dak kesme hızında sırasıyla %20, %22,8 ve %31,4 oranlarda, 90 m/dak kesme hızında sırasıyla %28,3, %30,8 ve %37,5 oranlarda, 120 m/dak kesme hızında sırasıyla %22,4, %30,4 ve %37,6 oranlarda daha az olduğu söylenebilir (Şekil 4.40). CVD kaplı takımında ise yine kuru kesme ortamına kıyasla MQL, Kry ve MQL+Kry kesme ortamında 60 m/dak kesme hızında sırasıyla %4,8, %8 ve %18,5 oranlarda, 90 m/dak kesme hızında sırasıyla %10, %12,2 ve %20,8 oranlarda, son olarak 120 m/dak kesme hızında ise sırasıyla %7,2, %17,5 ve %23 oranlarda daha düşük yanak aşınması miktarları ölçülmüştür.

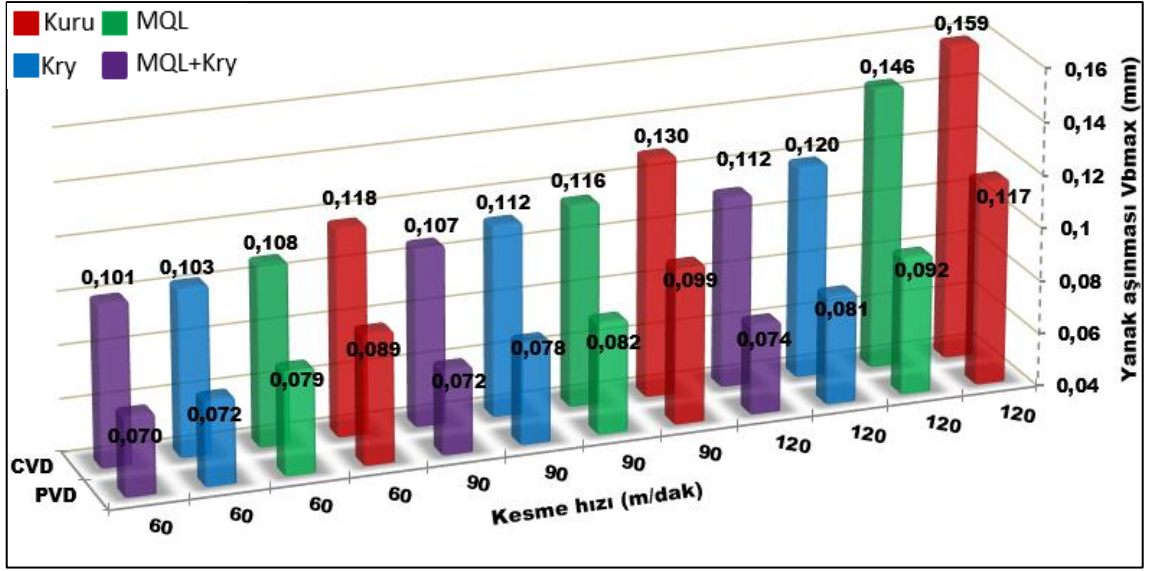
Tüm kesme hızı ve ilerleme hızları birlikte değerlendirildiğinde; CVD kaplı takımlarda Kry kesme ortamının MQL kesme ortamına kıyasla %2,4 ile %17,81 arasında değişen oranlarda daha düşük yanak aşınması olduğu tespit edilmiştir. MQL+Kry kesme ortamında ise, MQL kesme ortamına kıyasla %6,48 ile %23,29 arasında, Kry kesme ortamına kıyasla %1,94 ile %11,4 arasında değişen değerlerde daha az miktarda yanak aşınması oluşmuştur. Kesme ortamlarının birbirlerine olan farkları PVD kaplı takımlar için değerlendirildiğinde; Kry kesme ortamının MQL kesme ortamına kıyasla %3,49 ile %11,96 arasında, MQL+Kry kesme ortamında ise, MQL kesme ortamına kıyasla %11,39 ile %19,59 arasında, Kry kesme ortamına kıyasla %2,78 ile %11,11 arasında değişen oranlarda daha az yanak aşınması olduğu tespit edilmiştir.

Her iki kesici takım türü için de; kesme ortamı fark etmeksizin artan kesme hızı ve ilerleme hızı ile kesici takım aşınması da artmıştır. PVD kaplı takımında ilerleme hızı ve kesme ortamına bağlı olarak; yanak aşınması miktarının kesme hızının %50 oranda artırılmasıyla (60 m/dak'dan 90 m/dak'ya çıkarılmasıyla) %14,29, %100 oranda artırılmasıyla (60 m/dak'dan 120 m/dak'ya çıkarılmasıyla) %31,46'lara varan oranlarda arttığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde CVD kaplı takımında da kesme hızının %50 ve

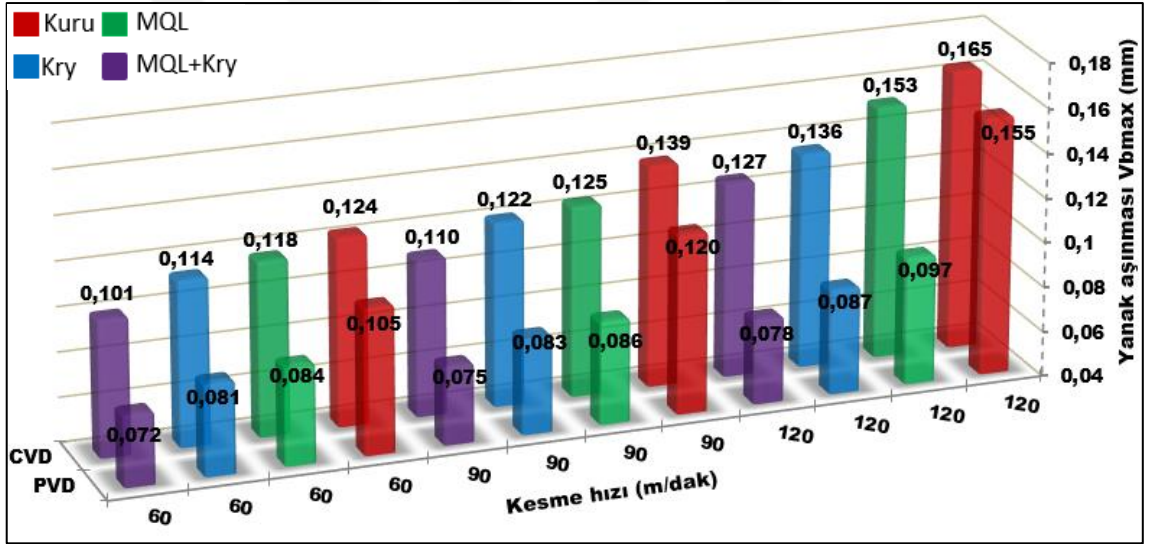
%100 oranlarda artırılmasıyla yanak aşınması miktarının %13,27 ve %44,04'lere varan oranlarda arttığı görülmüştür. İlerleme hızının kesici takım yanak aşınması üzerine etkilerine bakıldığında, PVD kaplı takımın yanak aşınmasının ilerleme hızının %50 oranda artırılmasıyla (0,06 mm/dev'den 0,09 mm/dev'e çıkarılmasıyla) %9,52, %100 oranda artırılmasıyla (0,06 mm/dev'den 0,12 mm/dev'e çıkarılmasıyla) %29,03'lere varan oranlarda arttığı görülmektedir. CVD kaplı takımında ise yanak aşınmasındaki bu artış; ilerleme hızının %50 ve %100 oranlarda artırılmasıyla %9,24 ve %16,81 oran olarak hesaplanmıştır. Kesme hızı ve ilerleme hızının takım aşınması üzerindeki bu olumsuz etkisinin; yüksek kesme hızı ve ilerleme hızlarının kesici takım üzerine gelen yüklerin artmasına ve kesme bölgesinde yüksek sıcaklıkların oluşmasına, böylece kesici takımın hızla aşınarak bozulmasına neden olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [13], [112]–[114]. Genel olarak, kesici takım aşınması üzerinde kesme hızının ilerleme hızından daha fazla etkiye sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 4.38. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda yanak aşınmasındaki değişim (f=0,06 mm/dev).



Şekil 4.39. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda yanak aşınmasındaki değişim ($f=0,09$ mm/dev).



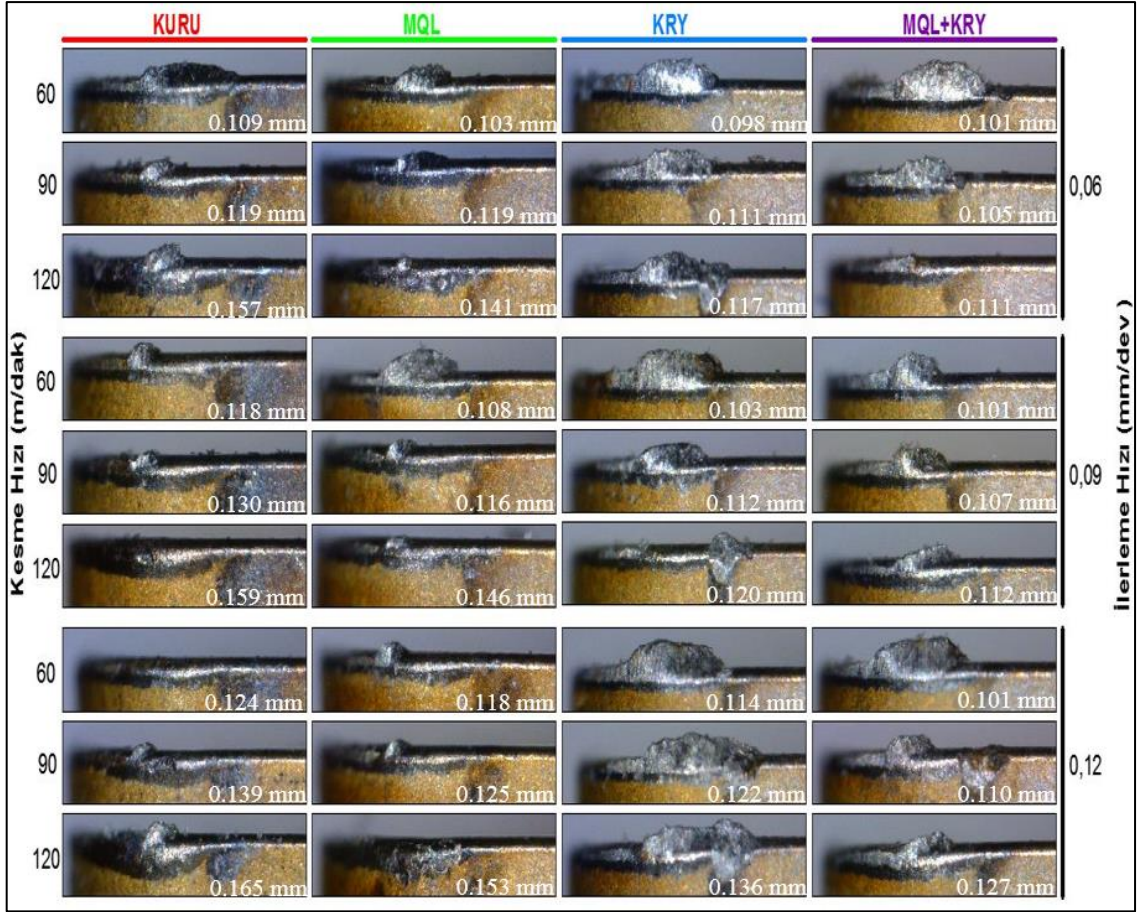
Şekil 4.40. Farklı soğutma şartlarında CVD ve PVD kaplı kesici takımlarda yanak aşınmasındaki değişim ($f=0,12$ mm/dev).

Şekil 4.41 ve Şekil 4.42’de CVD ve PVD kaplı takımlarla yapılan aşınma deneyleri sonucunda kesici takımların optik mikroskopla çekilmiş fotoğrafları verilmiştir. Fotoğraflarda tüm kesme şartlarında her iki kesici takımda yanak aşınması olduğu görülmektedir. Yanak aşınması; abrasiv aşınma mekanizması sonucu oluşan bir aşınma tipidir. Çoğunlukla iş parçası malzemesinden gelen sert parçacıklar iş parçası yüzeyi ile takım arasına geldiğinde taşlama işlemine benzer bir durum oluşur. Her iki kesici takım türünde de yanak aşınması miktarının kuru kesme şartında daha büyük olduğu fotoğraflarda net bir şekilde görülmektedir. Bununla birlikte, tüm kesme ortamlarında

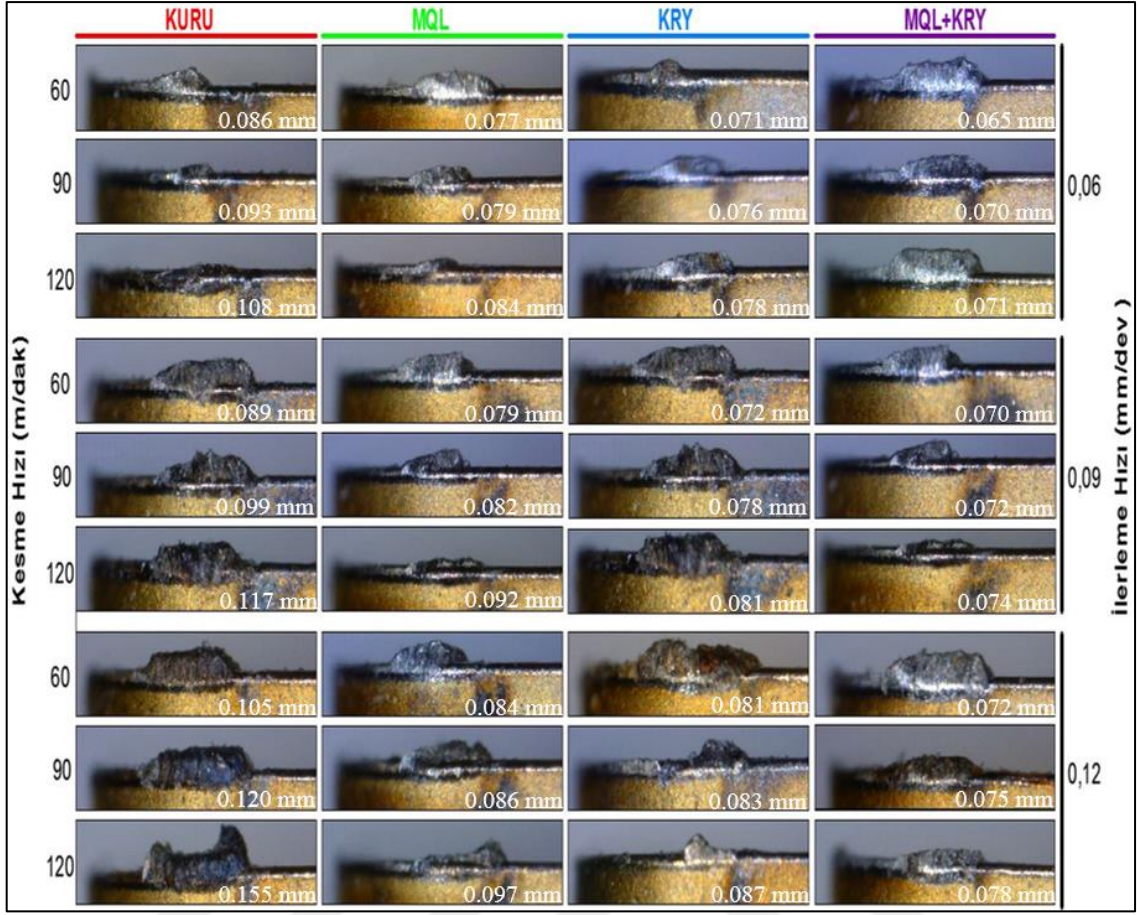
kesme hızı ve ilerleme hızının artması ile kesici takımların yanak aşınması miktarlarının da arttığı görülmektedir. Fotoğraflarda göze çarpan bir diğer aşınma türü de kesici takımların kesme kenarlarında yığıntı talaş oluşmasıdır. Kesme işleminde iş parçası malzemesinin, takımın talaş yüzeyine yapışması yığıntı talaş olarak bilinmektedir [129]. Yığıntı talaş, adhesiv aşınma mekanizması ile oluşur. Yığıntı talaş özellikle düşük kesme hızlarında daha büyük boyutlarda oluşurken, genel olarak kesme hızının artırılmasıyla yığıntı talaşın boyutu küçülmüştür. Literatürde, kesme hızının artmasının kesme bölgesinde oluşan sıcaklığı artırdığı ve bu artan sıcaklığın kesici takımda oluşan yığıntı talaşın sertlik ve dayanımını düşürdüğü, dolayısıyla artan kesme hızının yığıntı talaş oluşumunu azalttığı bildirilmiştir [130].

Genel olarak, PVD kaplı takıma kıyasla CVD kaplı takımlarda nispeten daha küçük boyutlarda yığıntı talaş oluştuğu söylenebilir. Bu durum, CVD kaplı takımlarla yapılan deneylerde kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın daha yüksek olması ile ilişkilendirilmiştir.

Şekil 4.41 incelendiğinde, CVD kaplı takımlarda Kry ve MQL+Kry kesme ortamlarında çok büyük boyutlarda yığıntı talaş oluşumu görülürken, kuru ve MQL kesme ortamlarında yığıntı talaşın çok daha küçük boyutlarda oluştuğu görülmektedir. MQL tekniğinin yığıntı talaş oluşumunu azalttığı bilinmektedir [38]. PVD kaplı takımlarda ise bu şekilde bir fark oluşmamakla birlikte, diğer kesme ortamlarına kıyasla nispeten MQL kesme ortamında daha küçük boyutlarda yığıntı talaş oluştuğu söylenebilir (Şekil 4.42). Diğer yandan CVD kaplı takımlarda bazı kesme şartlarında adhezyon ve oksidasyon aşınma mekanizmasının sebep olduğu çentik aşınması oluşmuştur.



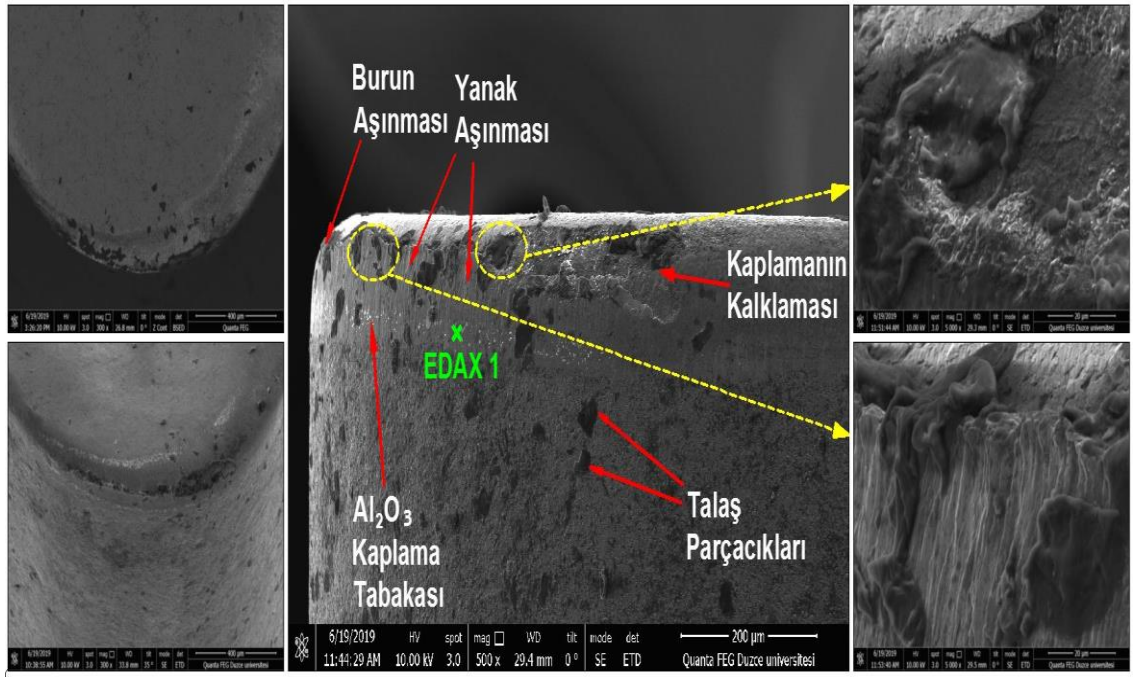
Şekil 4.41. CVD kaplı takımların farklı kesme ortamlarında yanak aşınmasındaki değişim fotoğrafları.



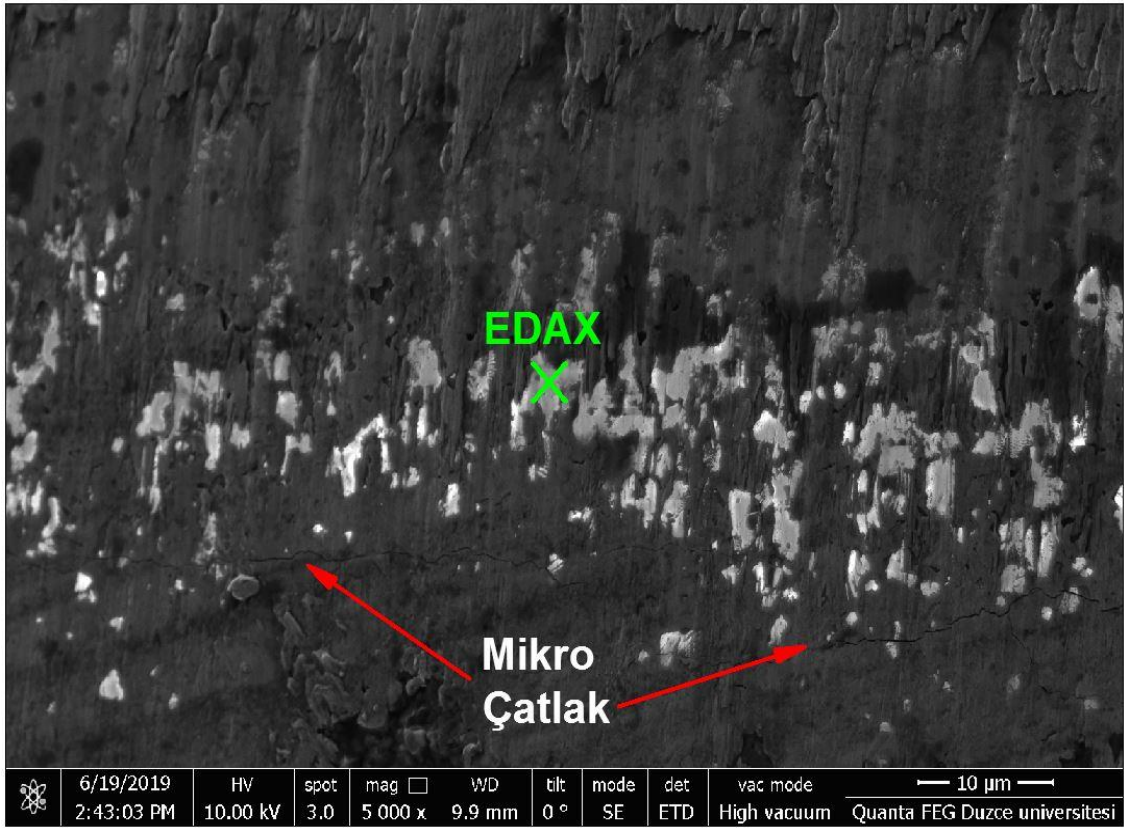
Şekil 4.42. PVD kaplı takımların farklı kesme ortamlarında yanak aşınmasındaki değişim fotoğrafları.

Şekil 4.43 - Şekil 4.52 arasında 0,09 mm/dev ilerleme hızı ve 120 m/dak kesme hızı kullanılarak dört kesme ortamında (kuru, MQL, Kry ve MQL+Kry) gerçekleştirilen aşınma deneyleri sonucu CVD ve PVD kaplı takımların farklı açılar ve büyütmelerde çekilen SEM fotoğrafları verilmiştir. SEM fotoğrafları incelendiğinde, kullanılan tüm kesici takımlarda oluşan yanak aşınması ve burun aşınmasının izleri net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca, kesici takımların kesme kenarlarında oluşan yığıntı talaş daha ayrıntılı olarak SEM fotoğraflarında ortaya konmuştur. Şekil 4.43'de CVD kaplı takımın kuru kesme ortamında tornalanması sonucunda kesici takım kaplama tabakasının bazı bölgelerde büyük oranda kalktığı tespit edilmiştir. Bu durum, daha önce de bahsedildiği gibi CVD kaplamanın daha kalın olması sebebi ile kırılganlığa ve kaplama tabakasının kesici takımdan kolay ayrılmasına neden olması ile ilişkilendirilmiştir. Burada da kaplamanın yalnızca CVD kaplı takımda kalkması bu durumu kanıtlamaktadır. Aynı kesme şartlarında PVD kaplı takımda kaplama tabakasında her hangi bir kalkma gerçekleşmemiş ve takım aşınması normal şekilde seyretmiştir (Şekil 4.46).

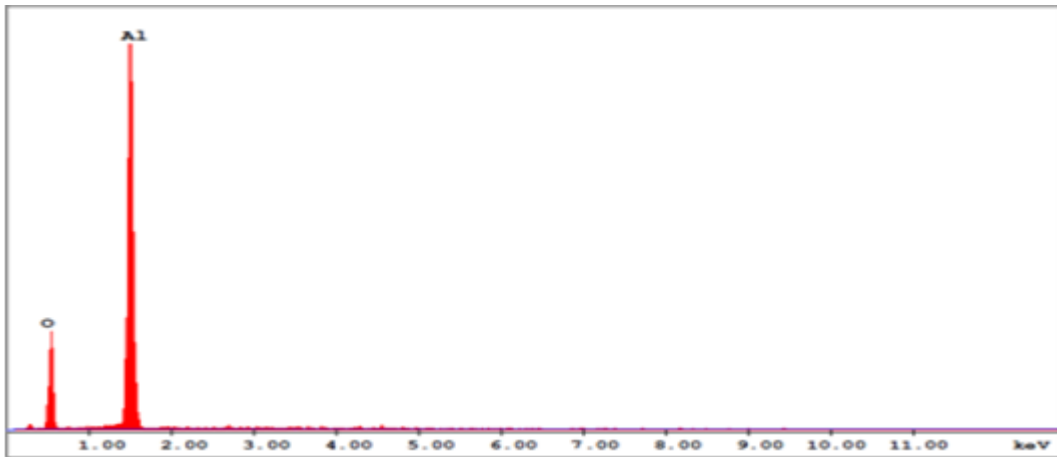
Tüm CVD kaplı takımların SEM fotoğraflarında (Şekil 4.43, Şekil 4.47, Şekil 4.49 ve Şekil 4.51) yanak aşınmasının alt sınırından başlayarak üst kaplama olan TiN kaplamanın kalkması sonucu altındaki Al_2O_3 kaplama tabakasının beyaz noktalar şeklinde ortaya çıktığı ve 40 mikron yüksekliğinde 400 mikron boyunca bir hat çizdiği görülmektedir. Şekil 4.44'de aşınan yüzeydeki açığa çıkan Al_2O_3 kaplama tabakasının 5000X büyütmedeki SEM fotoğrafı verilmiştir. Buradaki beyaz noktalardan alınan EDS analizi beyaz noktaların kesici takım kaplaması olan Al_2O_3 olduğunu ispatlamaktadır (Şekil 4.45). Ayrıca, SEM fotoğrafında CVD kaplı takımda kuru tornalama sonucu yüksek sıcaklık etkisi ile oluşan mikro çatlaklar görülmektedir.



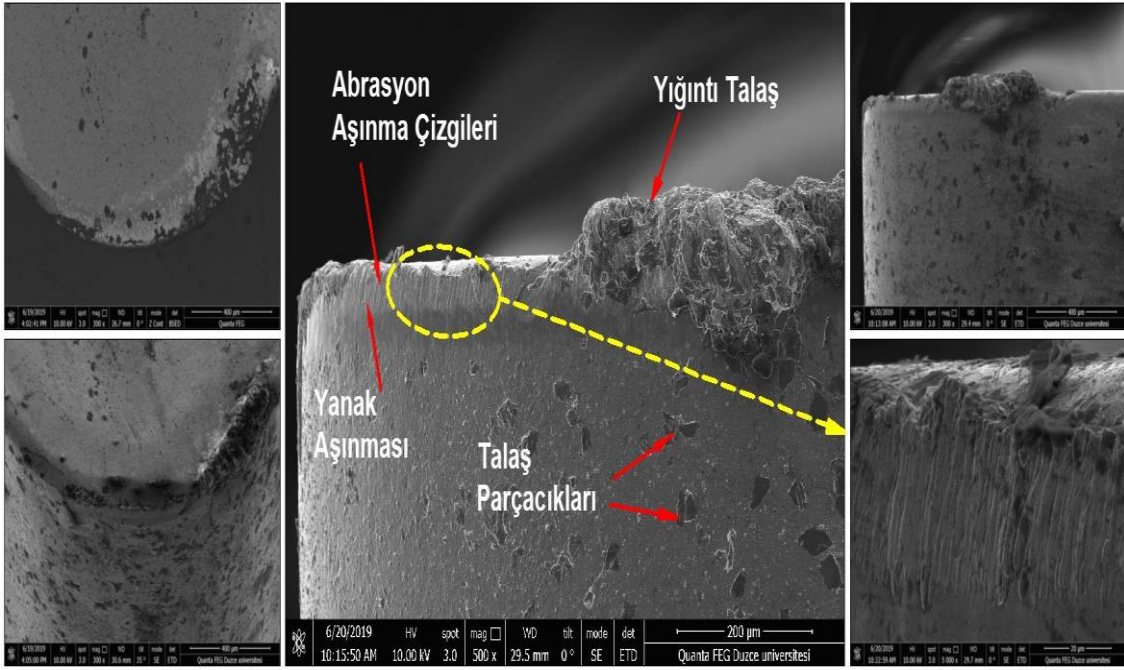
Şekil 4.43. CVD kaplı kesici takımın kuru işleme koşullarında SEM fotoğrafları (f=0,09 mm/dev, V=120 m/dak).



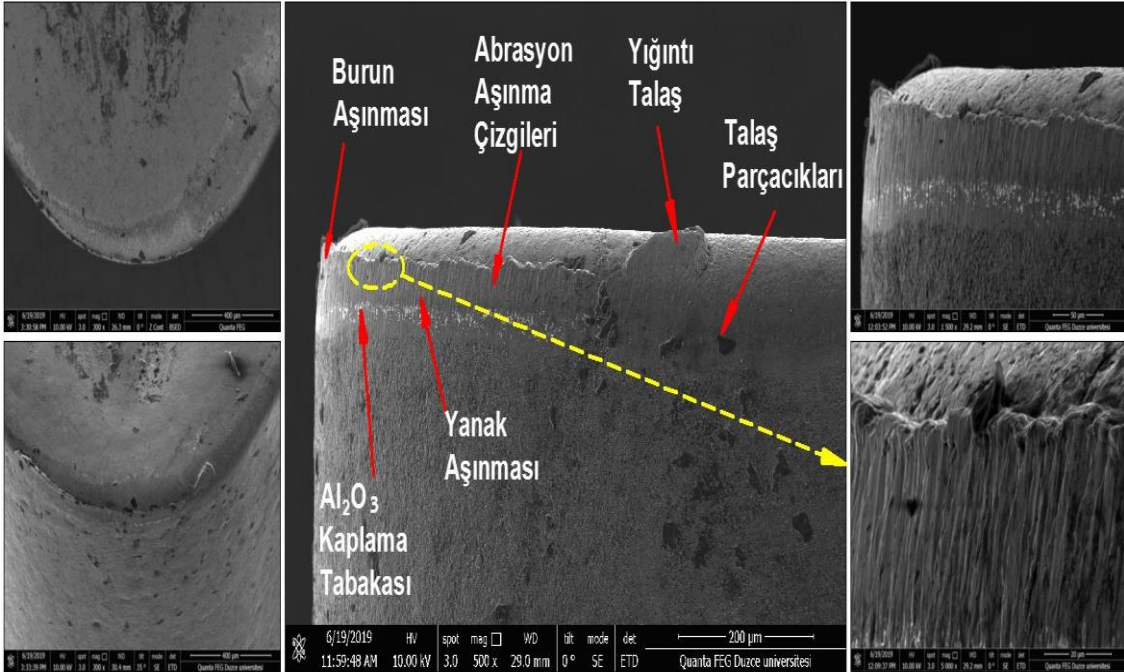
Şekil 4.44. CVD kaplı kesici takımların EDX analizi ve takım üzerindeki mikro çatlakların SEM fotoğrafı.



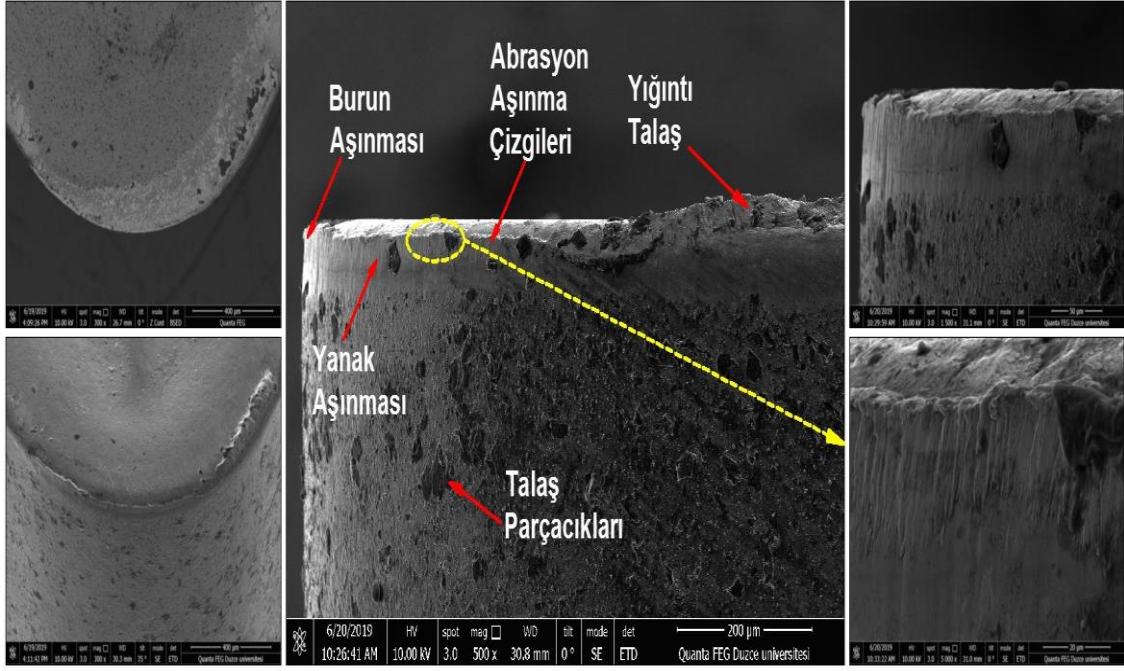
Şekil 4.45. CVD kaplı kesici takımların EDX analizi.



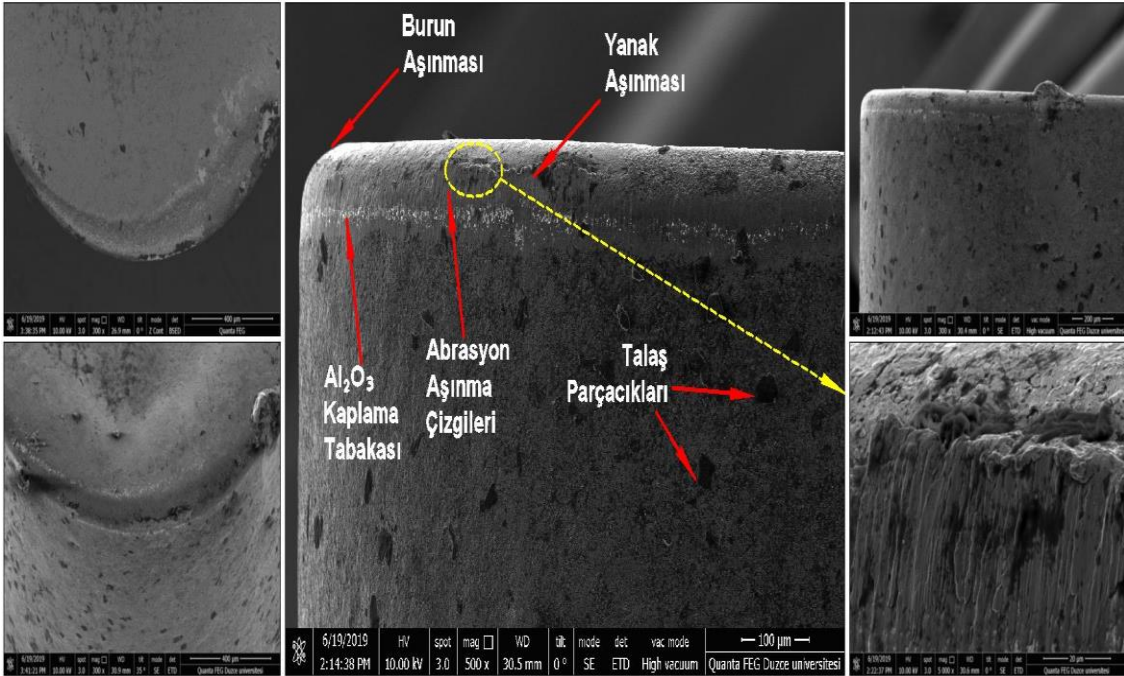
Şekil 4.46. PVD kaplı kesici takımların kuru işleme koşullarında SEM fotoğrafları (f=0,09 mm/dev, V=120 m/dak).



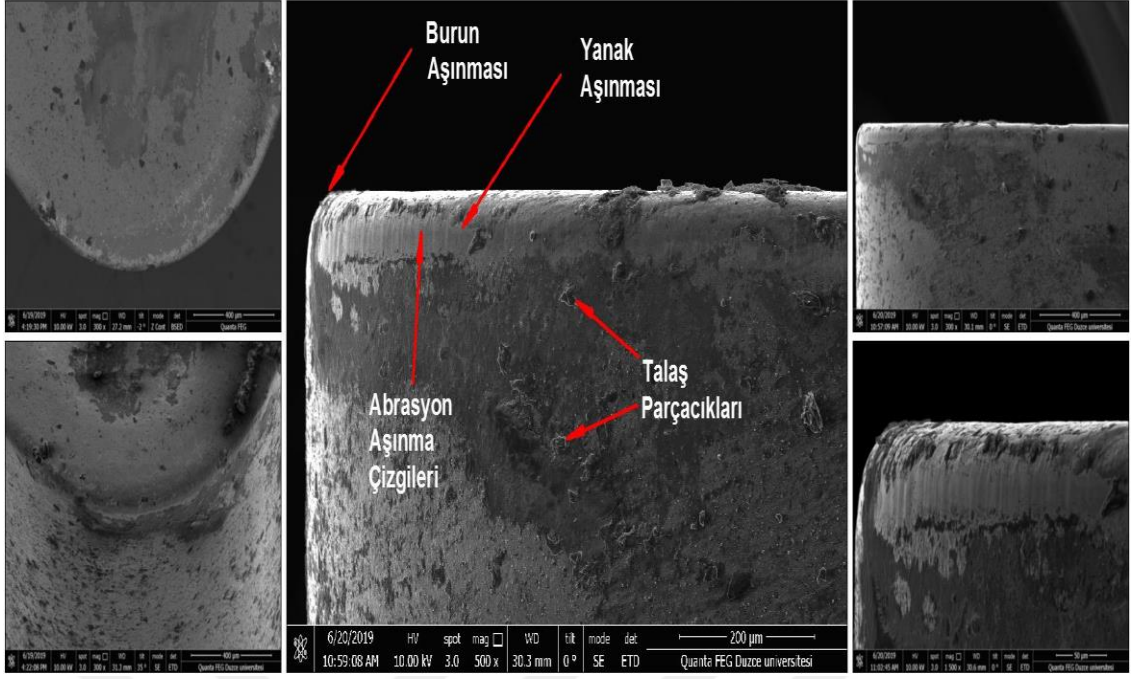
Şekil 4.47. CVD kaplı kesici takımların MQL işleme koşullarında SEM fotoğrafları (f=0,09 mm/dev, V=120 m/dak).



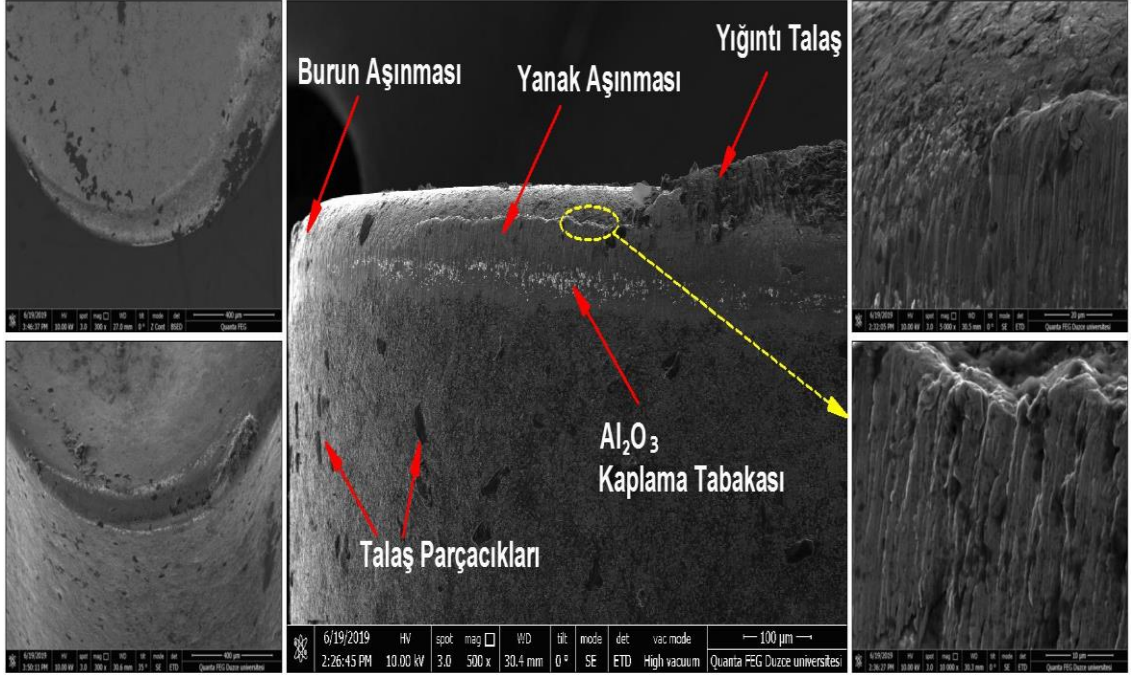
Şekil 4.48. PVD kaplı kesici takımların MQL işleme koşullarında SEM fotoğrafları (f=0,09 mm/dev, V=120 m/dak).



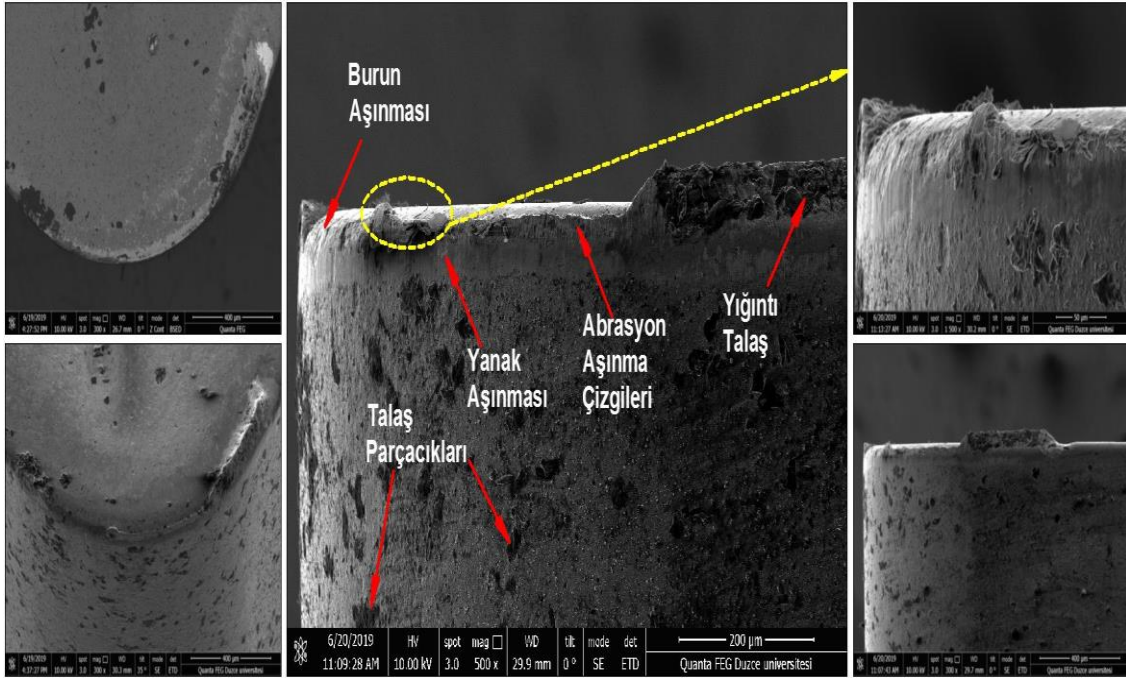
Şekil 4.49. CVD kaplı kesici takımların kriyojenik soğutma ile işleme koşullarında SEM fotoğrafları (f=0,09 mm/dev, V=120 m/dak).



Şekil 4.50. PVD kaplı kesici takımların kriyojenik soğutma ile işleme koşullarında SEM fotoğrafları (f=0,09 mm/dev, V=120 m/dak).



Şekil 4.51. CVD kaplı kesici takımların MQL+Kry işleme koşullarında SEM fotoğrafları (f=0,09 mm/dev, V=120 m/dak).



Şekil 4.52. PVD kaplı kesici takımların MQL+Kry işleme koşullarında SEM fotoğrafları (f=0,09 mm/dev, V=120 m/dak).

4.5. KESİCİ TAKIM ÖMRÜNÜN DEĞERLENDİRİLMESİ

Takım aşınmasının yüzey pürüzlülüğü, üretim zamanı ve maliyeti üzerine doğrudan etkisi vardır. Takım ömrü ve takım aşınması işlenebilirlik ölçüsü olarak değerlendirildiğinden işlenebilirlik çalışmalarının önemli konularındandır [131]. Yapılan çalışmalarda; termal çatlaklar, yığıntı talaşın kopması gibi ani değişimler nedeniyle takımın ucunun kırılması ya da aşınmadaki ani artış sonrası takım kullanılamaz hale gelmiştir. Bu nedenle bu tez çalışmada takım ömrü deneylerinde, kesici takımların yanak aşınması miktarları 0,2 mm'ye ulaşıncaya kadar talaş kaldırılmaya devam edilmiş ve 0,2 mm yanak aşınmasına ulaşan takımın ömrünü tamamladığı kabul edilmiştir.

Kesici takımların dört farklı kesme ortamında 0,09 mm/dev ilerleme hızı ve 90 m/dak kesme hızında yapılan takım ömrü deneyleri sonucu aşınma grafikleri Şekil 4.53 (CVD kaplı takım için) ve Şekil 4.54'de (PVD kaplı takım için) verilmiştir. Şekil 4.53 incelendiğinde, her üç kesme ortamının da (MQL, Kry ve MQL+Kry) kuru kesme ortamından daha uzun takım ömrü sağladığı göze çarpmaktadır. CVD kaplı takımında, kuru kesme ortamında daha ilk kesme işleminin sonucunda 0,6 dak (5000 mm³) 0,121 mm yanak aşınması oluşmuştur. Talaş kaldırma işleminin 1,8 dakikaya kadar devam etmesi ile birlikte aşınma miktarında ani artışlar meydana gelmiş ve yanak aşınması 0,196

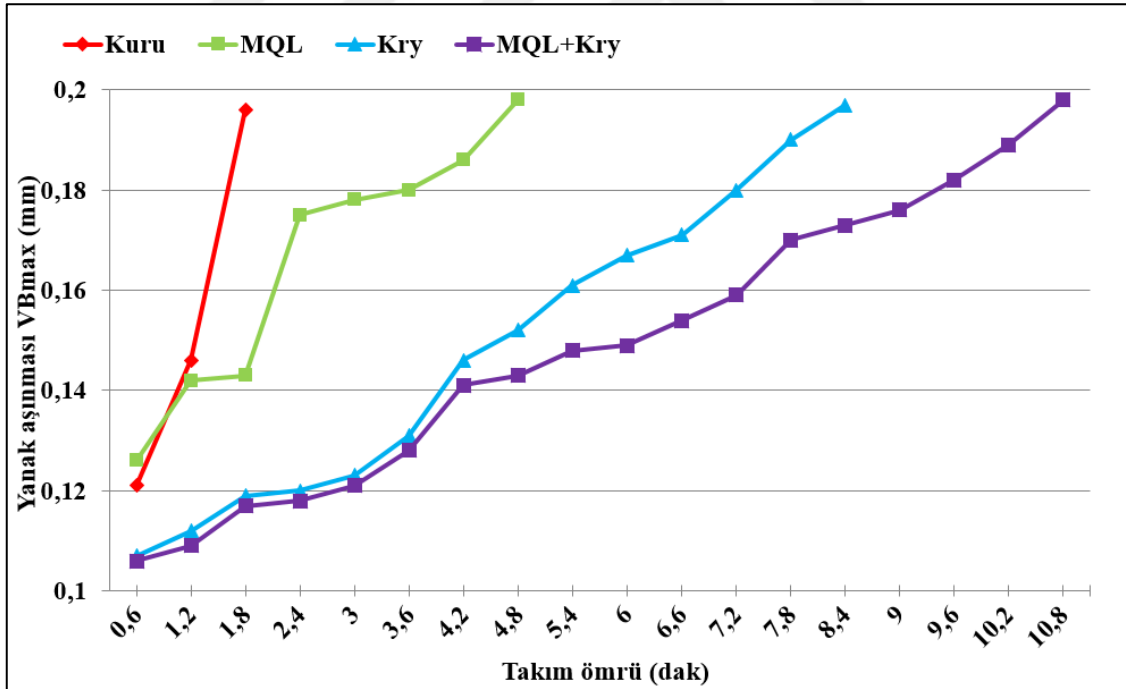
mm'ye ulaşmıştır. MQL ile kesme ortamında ise, ilk kesme işleminin sonucunda 0,126 mm yanak aşınması oluşmuştur. 2,4 dakikaya kadar kaldırılan talaş miktarında yanak aşınması miktarlarında kısmen ani artış meydana gelmiş ve artan talaş hacminde aşınma miktarı düzgün bir şekilde artmaya devam etmiştir. Kry ve MQL+Kry kesme ortamında ise; ilk kesme işleminin sonucunda Kry kesme ortamında 0,107 mm ve MQL+Kry kesme ortamında 0,106 mm yanak aşınması oluşmuş, artan talaş hacmiyle birlikte kesici takımların aşınma miktarları birbirine yakın değerlerde ve düzgün bir şekilde artmıştır. Talaş kaldırma işleminin sonunda kesici takım; Kry ile işlemede 0,197 mm ve MQL+Kry ile işlemede ise 0,198 mm yanak aşınmasına ulaşmıştır.

CVD kaplı takım kuru kesme ortamında 1,8 dakikada ömrünü tamamlarken, MQL ile işlemede 4,8 dakika, Kry ile işlemede 8,4 dakika ve MQL+Kry ile işlemede ise 10,8 dakikada ömrünü tamamlamıştır. CVD kaplı kesici takımın takım ömrünün; kuru kesmeye kıyasla, MQL ile işlendiğinde %166,6 oranında arttığı görülmektedir. MQL ile işlemede kesme ortamına püskürtülen yağ, kesici takım-iş parçası ara yüzeyindeki sürtünmeyi azaltmakta ve kesme bölgesi sıcaklığını düşürmektedir. Böylece kesici takımın daha az aşınmasını sağlayarak takım ömrünü artırmıştır. İş parçası malzemesi Kry ile işlendiğinde ise; kuru kesmeye kıyasla %366,6, MQL ile işlemeye kıyasla %75 oranında takım ömrü artışı gözlenmiştir. Bu durum kriyojenik ile işlemede kesme ortamına püskürtülen sıvı azotun -196 °C ile kesme bölgesi sıcaklığını düşürmesi sebebiyle aşınma miktarında azalma ve takım ömründe artış sağlamasıyla ilişkili olduğu düşünülmektedir. MQL+Kry ile işleme, kuru kesmeye kıyasla %500 oranda, MQL ile işlemeye kıyasla %125 ve Kry ile işlemeye kıyasla %28,57 oranlarında takım ömrü artışı sağlamıştır. MQL+Kry kesme ortamı, hem MQL ile işleminin hem de Kry ile işleminin avantajlarını bir araya getirdiği için en fazla takım ömrünü sağlayan kesme ortamı olmuştur.

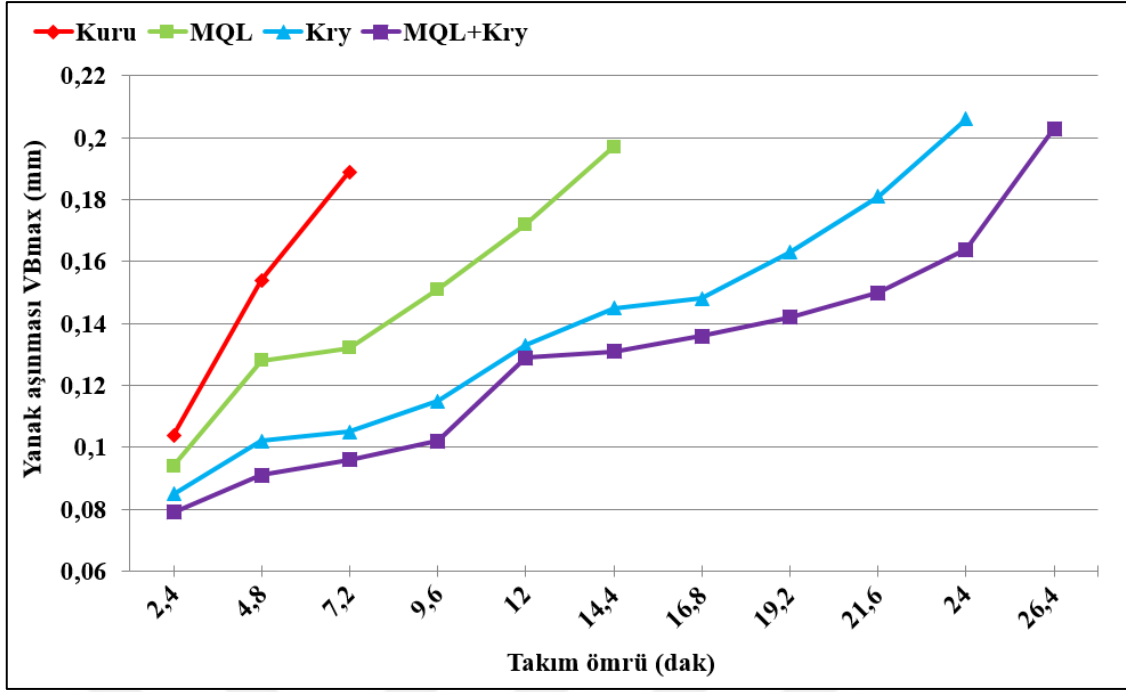
CVD kaplı takımların takım ömrü deneylerinde olduğu gibi PVD kaplı takımlarda da MQL, Kry ve MQL+Kry kesme ortamlarının kuru kesmeye kıyasla daha uzun takım ömrü sağladığı görülmektedir (Şekil 4.54). PVD kaplı kesici takım, kuru tornalama şartlarında 7,2 dakikada ömrünü tamamlarken, MQL ile işleme şartlarında bu değer %100 artış göstererek 14,4 dakikaya ulaşmıştır. Kriyojenik soğutma ile işleme şartlarında 24 dakikada takım ömrünü tamamlamıştır. Bu değer kuru kesme şartları ile kıyaslandığında takım ömrünün %233,3 oranında MQL ile tornalama şartları ile kıyaslandığında ise %66,6 oranlarında artış sağladığını göstermektedir. Takım ömrü açısından en iyi sonucun

alındığı MQL+Kry soğutma ile tornalama şartlarında 26,4 dakika talaş kaldırılmıştır. Böylece, MQL+Kry soğutma ile tornalama şartlarında kaldırılan bu talaş hacmi kuru tornalama şartları ile kaldırılan 7,2 dakikalık takım ömrü ile kıyaslandığında takım ömrünün %266,6 oranında arttığı tespit edilmiştir. MQL ile tornalama şartlarında kaldırılan 14,4 dakikalık takım ömrü ile kıyaslandığında %83,3 oranında, Kry soğutma ile tornalama şartları ile kıyaslandığında ise takım ömrünün %10 oranında artış sağladığı gözlemlenmiştir.

PVD ve CVD kaplı takımlar kendi aralarında kıyaslandığında, tüm kesme ortamlarında PVD kaplı takımın daha uzun takım ömrü sergilediği görülmektedir. Kuru kesme ortamında CVD kaplı takım 1,8 dakikada ömrünü tamamlarken PVD kaplı takım 7,2 dakikada ömrünü tamamlamıştır. Böylece PVD kaplı takımın CVD kaplı takıma kıyasla %300 oranında daha fazla takım ömrüne sahip olduğu ortaya çıkmaktadır. Diğer kesme ortamlarına bakıldığında, PVD kaplı takımın CVD kaplı takımdan MQL kesme ortamında %200, Kry kesme ortamında %185,7 ve MQL+Kry kesme ortamında ise %144,4 oranda daha uzun takım ömrü sergilediği görülmektedir.



Şekil 4.53. CVD kaplı kesici takımların farklı ortamlarda takım ömrü değişimi ($f=0,09$ mm/dev ve 90 m/dak).

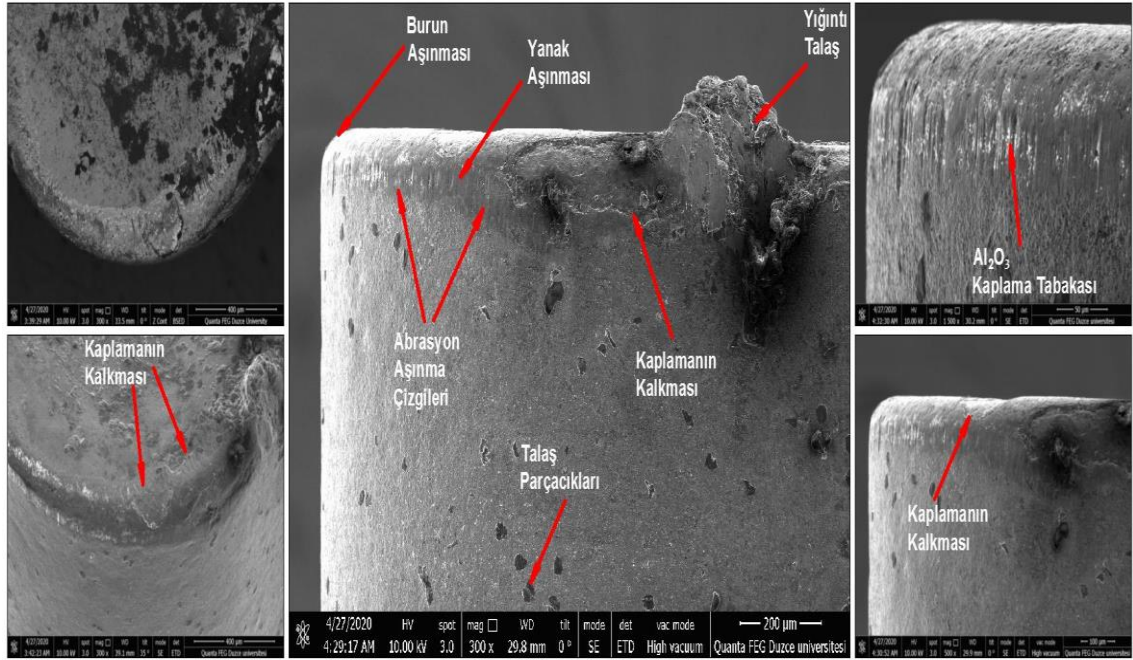
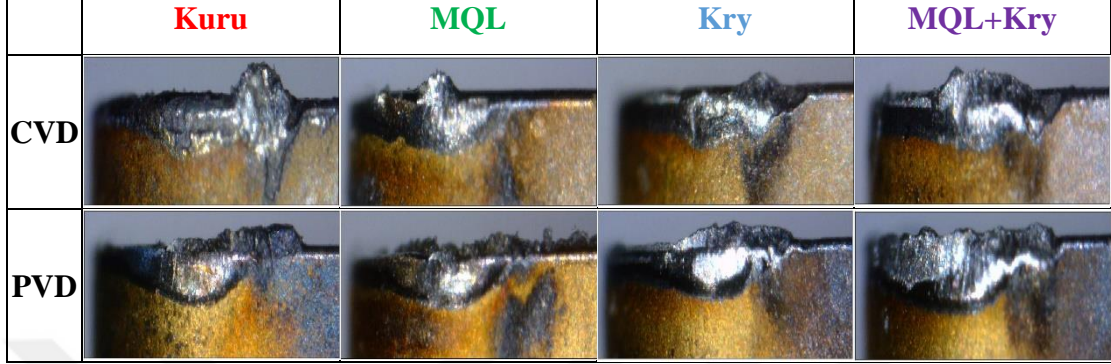


Şekil 4.54. PVD kaplı kesici takımların farklı ortamlarda takım ömrü değişimi ($f=0,09$ mm/dev ve 90 m/dak).

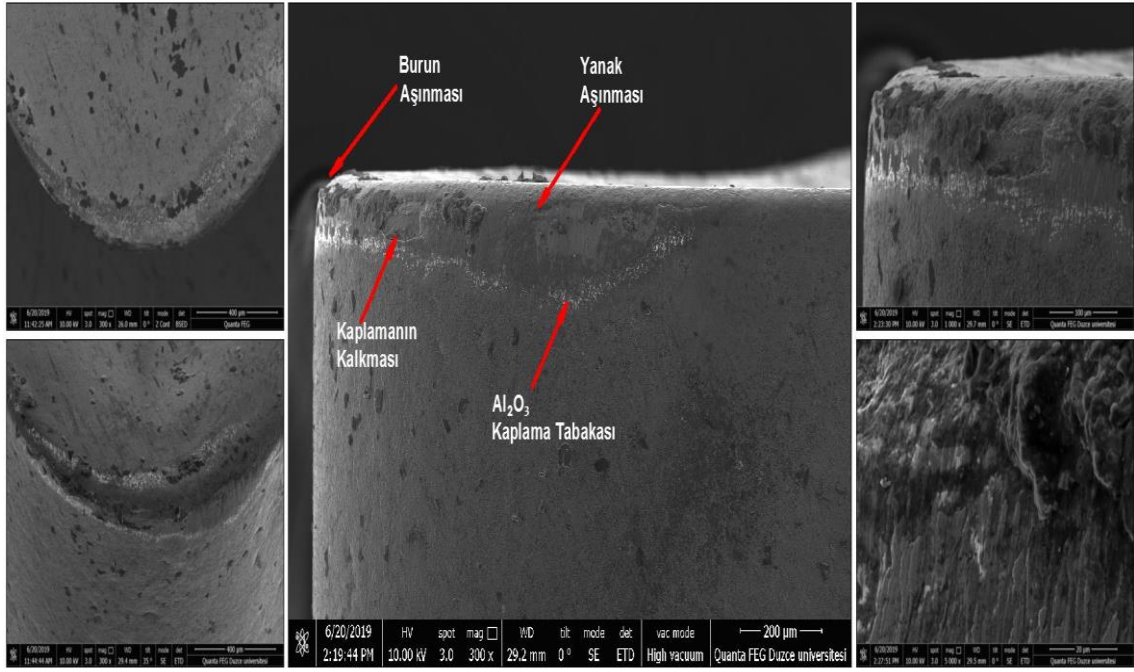
Çizelge 4.1’de ömür deneyleri sonrası kesici takımların optik mikroskopla çekilmiş yanak aşınması fotoğrafları görülmektedir. Fotoğraflarda, tüm kesme ortamlarında her iki kesici takımın kesme kenarlarında oluşan yığıntı talaş ve yanak aşınmaları göze çarpmaktadır. Diğerlerinden farklı olarak kuru kesme ortamında CVD kaplı takımda büyük miktarda çentik aşınması olduğu görülmektedir. Kesici takımlardaki aşınma mekanizmalarının daha iyi anlaşılabilmesi için çekilen SEM fotoğrafları Şekil 4.55 - Şekil 4.63 arasında verilmiştir. CVD kaplı takımlarla yapılan ömür deneyleri sonrası çekilen SEM görüntülerinde ilk dikkati çeken kuru, MQL ve Kry şartlar altında gerçekleştirilen deneylerde kaplamanın kalktığıdır. Ayrıca PVD kaplı takımlarla yapılan ömür deneylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde kaplama kalkmasının sadece kuru şartlarda yapılan deneylerde gerçekleştiği görülmüştür. Özellikle CVD kaplı takımda üç farklı şartta da kaplama tabakasının kalkması kaplama kalınlığının daha fazla olması ile ilişkilendirilmiştir. Hem CVD hem de PVD kaplı takımların ömür deneylerinde kuru şartlarda karşılaşılan kaplama tabakasının kalkmasının; kuru şartlarda gerçekleşen deneylerde kesme bölgesi sıcaklığının yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. SEM görüntülerinde, PVD kaplı takımlarla yapılan ömür deneylerinde tüm şartlarda krater aşınmasının olduğu görülmektedir. Kuru ve kriyojenik kesme ortamlarında üzerine biriken yığıntı talaş nedeniyle görülmesi zor olsa da MQL ve

MQL+Kry şartlarda gerçekleştirilen ömür deneylerinde krater aşınması açıkça görülmektedir (Şekil 4.63).

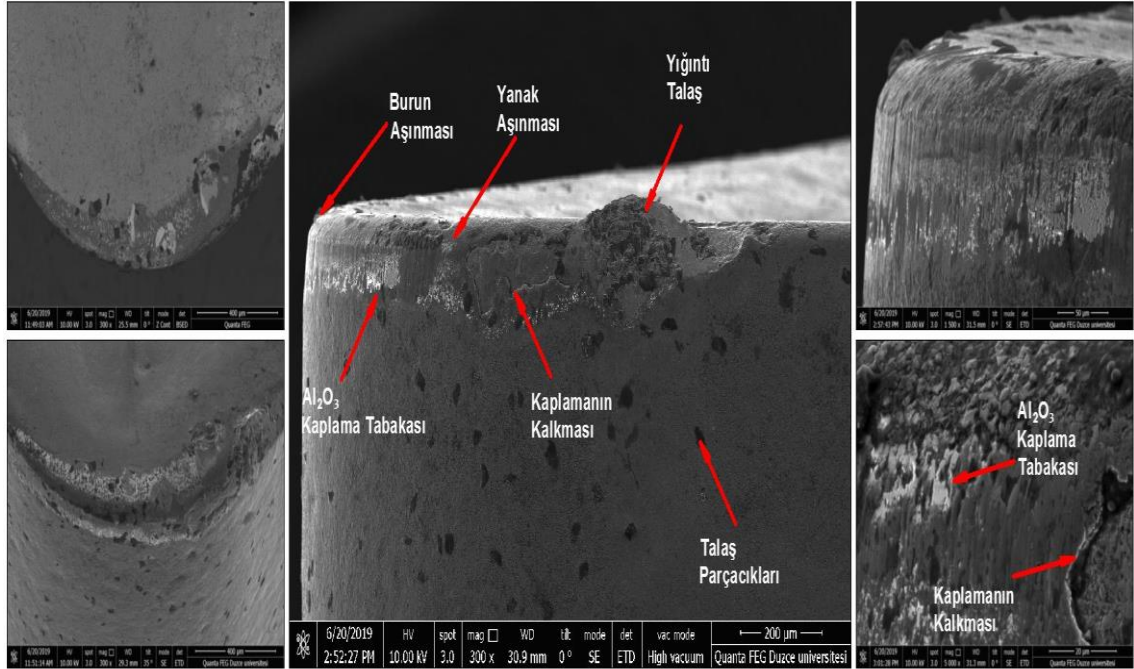
Çizelge 4.1. Farklı kesme ortamlarında gerçekleştirilen ömür deneyleri sonrası kesici takımlardaki yanak aşınmalarının fotoğrafları.



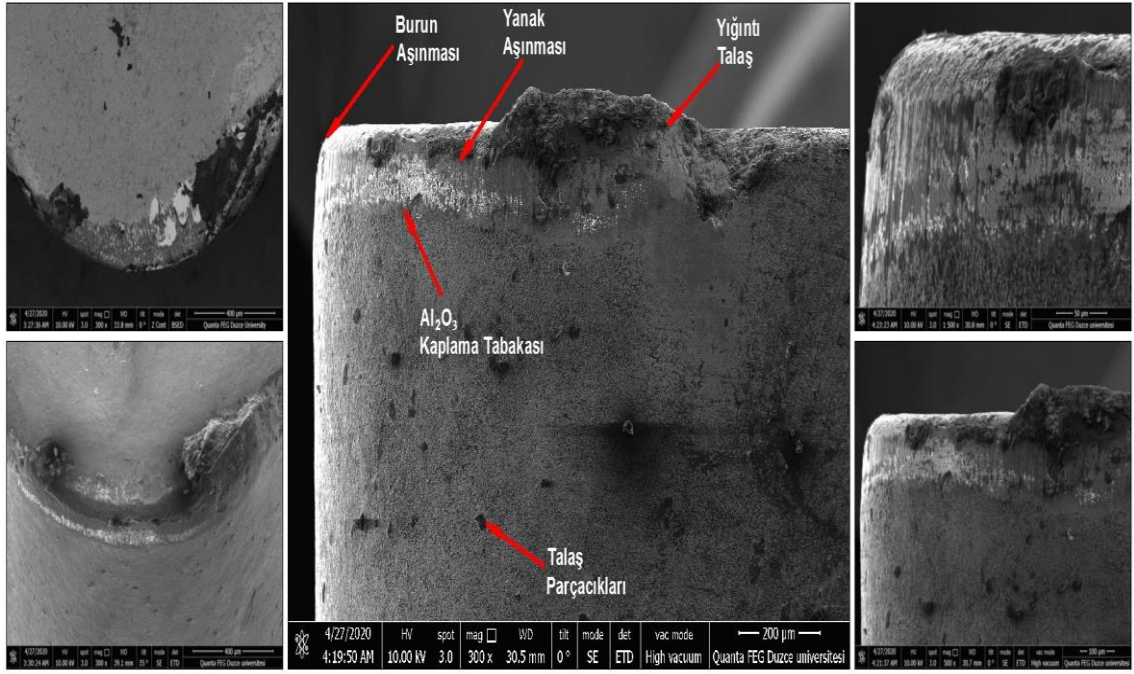
Şekil 4.55. CVD kaplı kesici takımın Kuru işleme koşullarında ömür deneyleri sonrası SEM fotoğrafları.



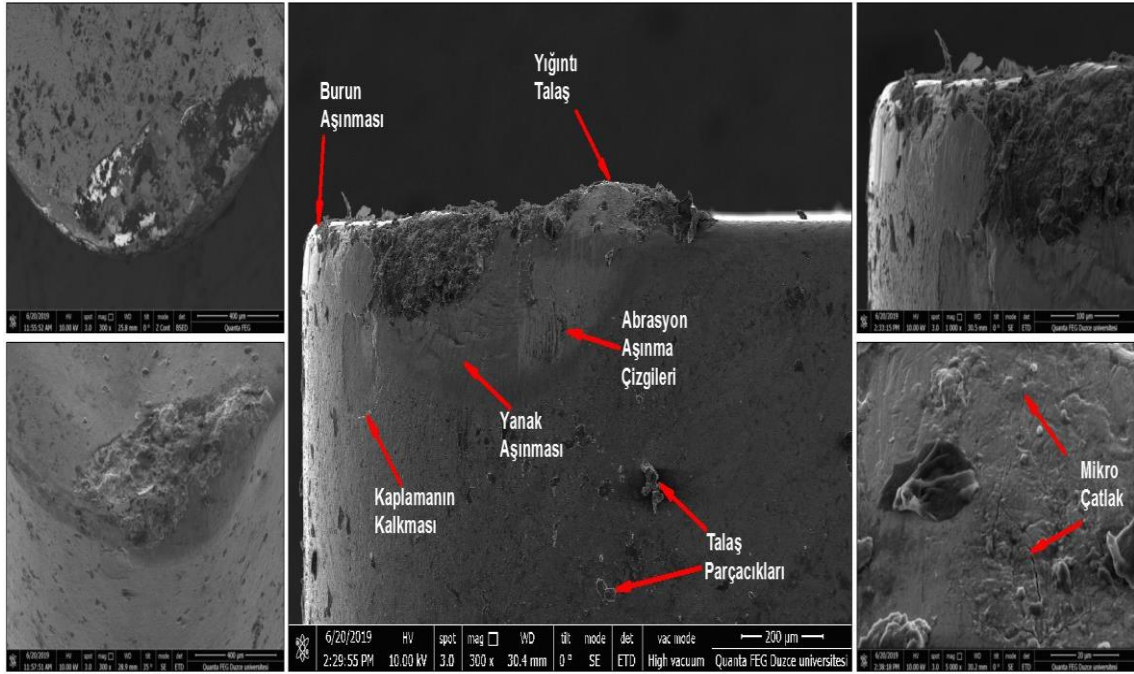
Şekil 4.56. CVD kaplı kesici takımın MQL işleme koşullarında ömür deneyleri sonrası SEM fotoğrafları.



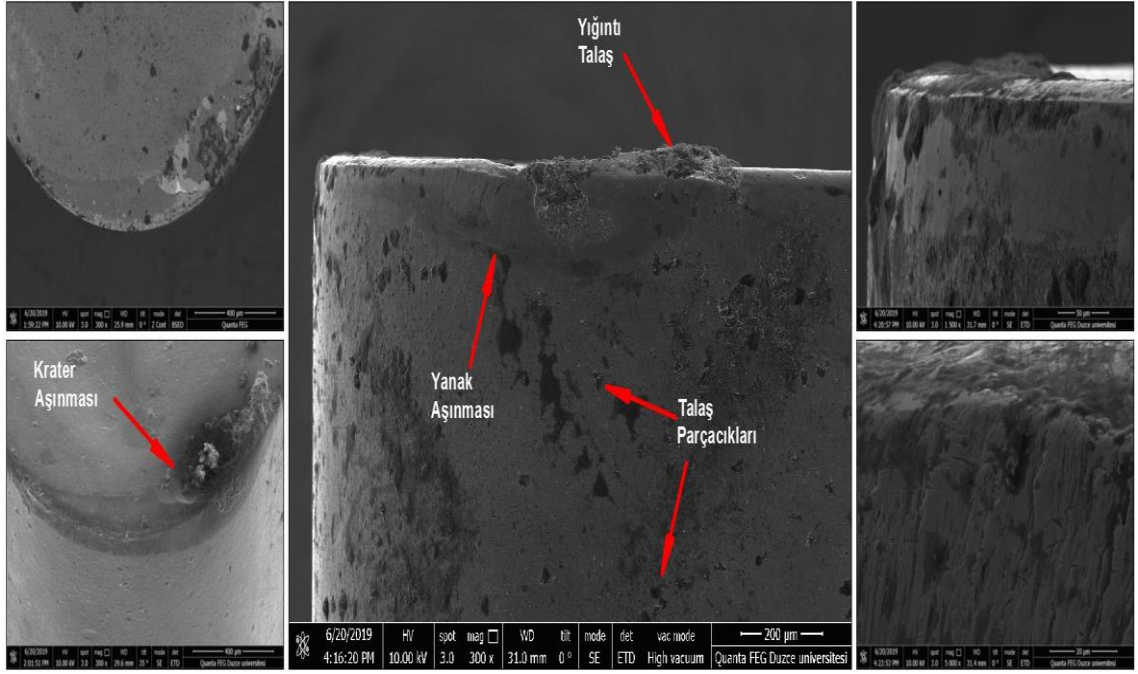
Şekil 4.57. CVD kaplı kesici takımın Kryo işleme koşullarında ömür deneyleri sonrası SEM fotoğrafları.



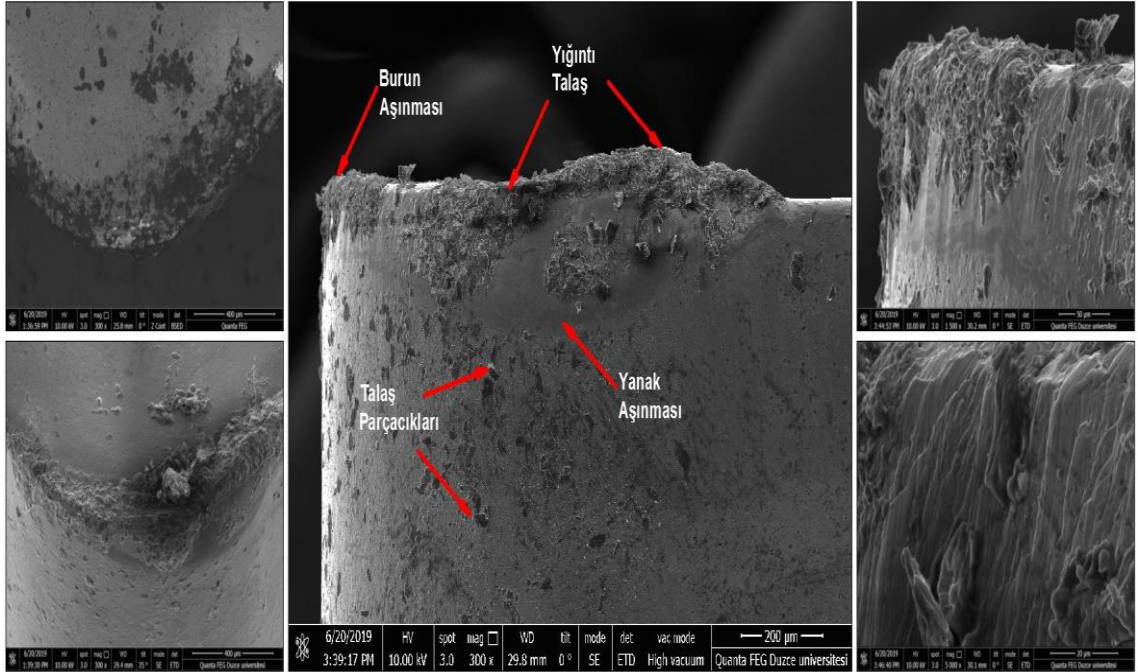
Şekil 4.58. CVD kaplı kesici takımın MQL+Kry işleme koşullarında ömür deneyleri sonrası SEM fotoğrafları.



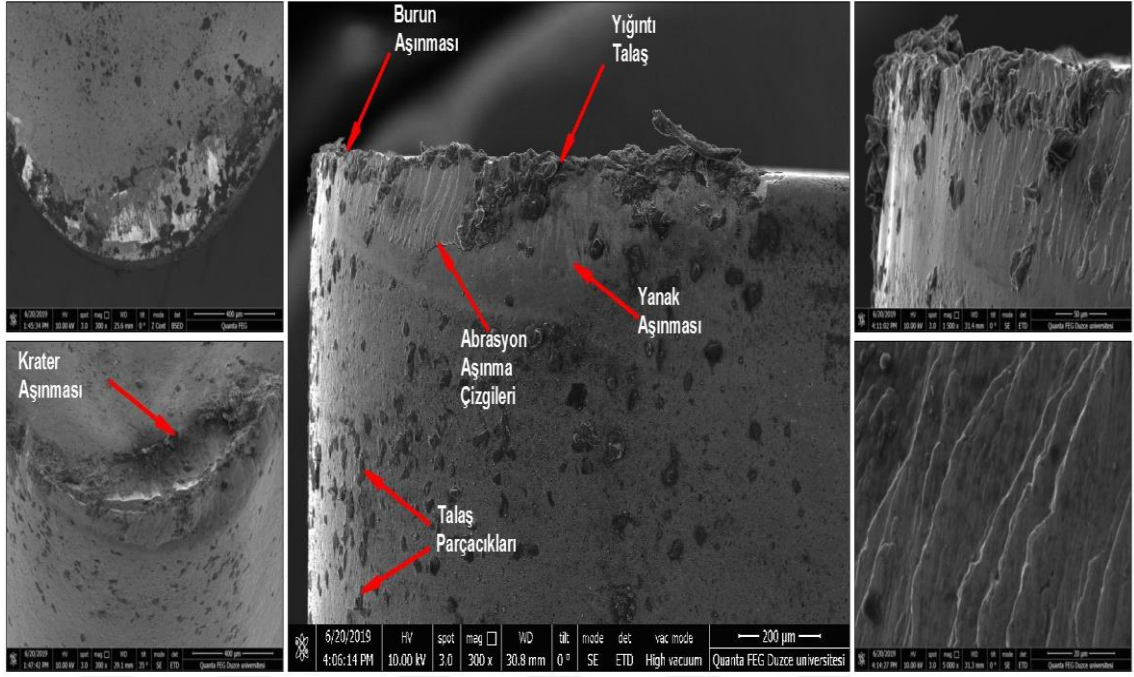
Şekil 4.59. PVD kaplı kesici takımın Kuru işleme koşullarında ömür deneyleri sonrası SEM fotoğrafları.



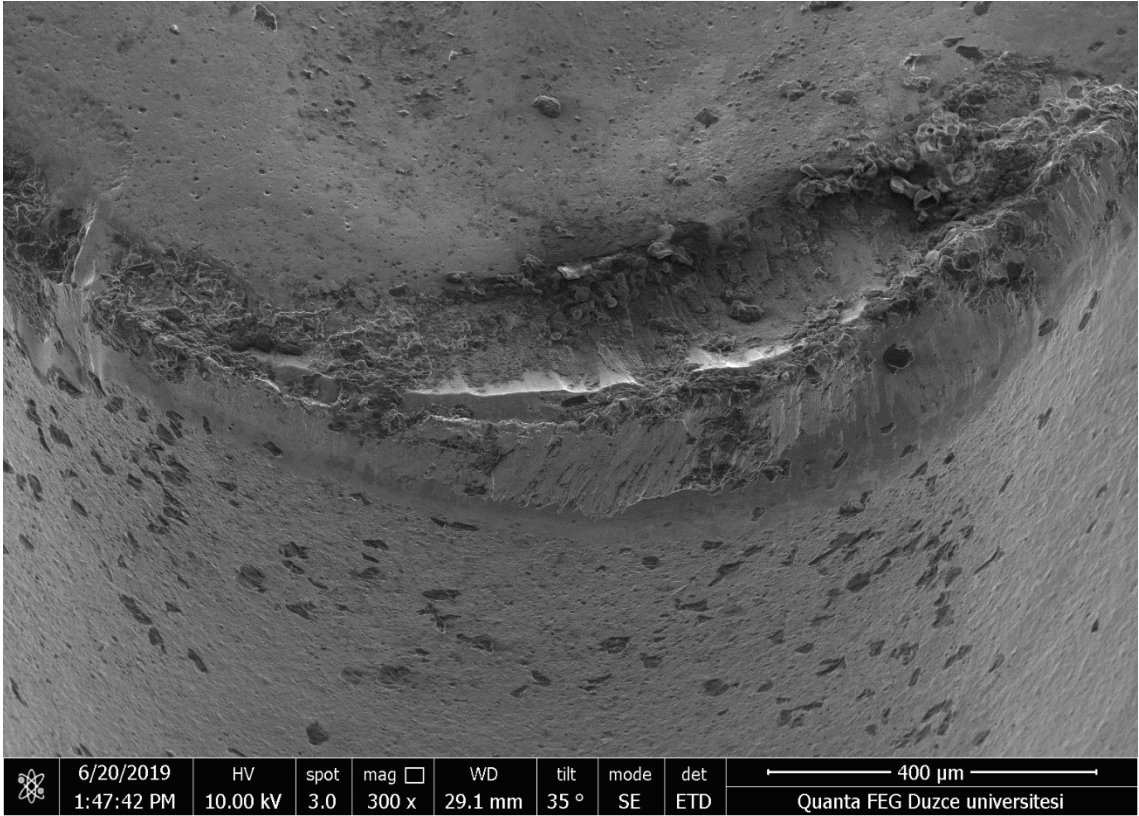
Şekil 4.60. PVD kaplı kesici takımın MQL işleme koşullarında ömür deneyleri sonrası SEM fotoğrafları.



Şekil 4.61. PVD kaplı kesici takımın Kry işleme koşullarında ömür deneyleri sonrası SEM fotoğrafları.



Şekil 4.62. PVD kaplı kesici takımın MQL+Kry işleme koşullarında ömür deneyleri sonrası SEM fotoğrafları.



Şekil 4.63. PVD kaplı kesici takımın MQL+Kry işleme koşullarında ömür deneyleri sonrası oluşan krater aşınmasının SEM fotoğrafı.

4.6. TALAŞ ŞEKİLLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Tüm kesme parametreleri için gerçekleştirilen tornalama deneylerinden toplanan talaşların şekilleri Şekil 4.64 ve Şekil 4.65'te verilmiştir. Deneylerden elde edilen talaşların boyutlarının kesme hızı, ilerleme hızı, kesici takım kaplama yöntemi ve kesme ortamına göre değişiklik gösterdiği görülmektedir.

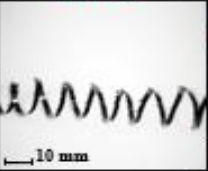



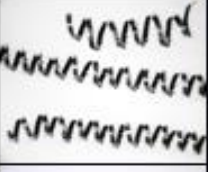
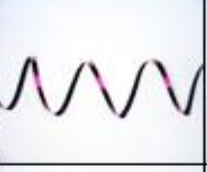
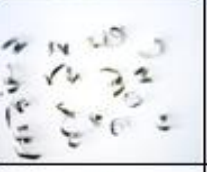

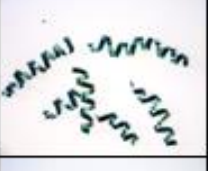
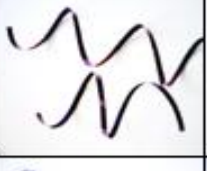

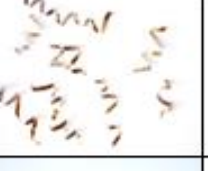




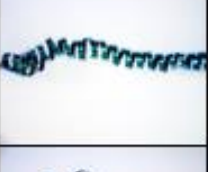




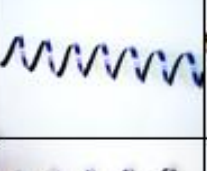






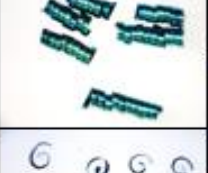







Talaş şekilleri kesici takım kaplama türüne göre incelendiğinde CVD kaplı takımlar ile yapılan deneylerde elde edilen talaşların, PVD kaplı takımlar ile yapılan deneylerden elde edilen talaşlara göre kıvrılma yarıçaplarının ve talaşların bolarının daha küçük olduğu göze çarpmaktadır. Bunun nedeni olarak her iki takım türünün üst katmanın TiN olduğu düşünülürse kaplamanın sürtünme katsayısından ziyade CVD kaplı takımın PVD kaplı takıma göre kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıklar olduğu düşünülmektedir. Yüksek sıcaklığın etkisi ile talaş boyları küçülmüştür. Talaş şekilleri kesme hızına göre değerlendirildiğinde kesme hızının artışının genel olarak talaş boyunu düşürdüğü görülmektedir. Kesme hızının artışının ayrıca talaş kalınlığını da düşürdüğü bilinmektedir [132]. Ayrıca kesme hızının artışı ile talaşların kıvrılma yarıçaplarının düşerek daha küçük talaşlar boyutta elde edildiği görülmektedir. Talaş şekilleri ilerleme hızına göre değerlendirildiğinde ilerleme hızı ile birlikte talaş kalınlığının arttığı bilinmektedir [133].

Alüminyum alaşımları ve paslanmaz çelikler gibi sünek malzemelerin işlenmesinde talaşın kırılıp uzaklaşmasının çok önemli olduğu bilinmektedir. Kesme ortamının talaş şekilleri ve kesme bölgesinden talaşın uzaklaştırılması üzerine etkileri bilindiği için MQL tekniği, kriyojenik soğutma gibi uygulamalara sıklıkla başvurulmaktadır. Ayrıca MQL tekniğinde kesme sıvısının miktarının da talaş kırılabilirliğini etkilediği bilinmektedir [134]. Bu çalışmada da özellikle yüksek basınç ve soğutmanın etkisi ile Kry ve MQL+Kry kesme ortamlarında kuru tornalamaya kıyasla talaşların boyutlarının çok küçüldüğü görülmektedir. Kuru tornalamada oluşan sürekli talaş şekli, Kry ve MQL+Kry yöntemleri ile kırıklı talaş şekline dönüşmüştür. Sıvı azotun kesme bölgesine 15 bar basınçla verilmesi talaşın uzaklaşmasını kolaylaştırdığı ayrıca -196°C'de kesme bölgesine püskürtülen sıvı azotun talaşın gevrekliğini artırdığı ve kırılmasını sağladığı düşünülmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklık nedeniyle kuru tornalamada talaş rengi mavi renkte iken MQL tekniği kullanıldığında kesme yağının etkisi ile talaş rengi mavi ile turuncu arasında olurken -196°C sıvı azotun etkisi ile düşen kesme sıcaklığında Kry ve MQL+Kry ortamlarında talaş rengi iş parçasının rengine kalmıştır. Bu durumun yüksek




























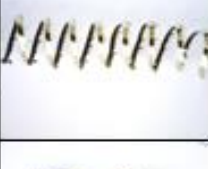
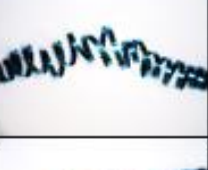
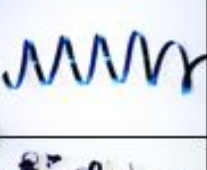






sıcaklıklarda demirin oksijen ile tepkimeye girerek renginin değişmesinden kaynaklandığı düşünölmektedir [39], [50], [56]. Oksijenle tepkimeye giren demirin renk değişimi üzerine yapılan çalışmada, kuru tornalamada yakın sıcaklık tahminleri olsada soğutma ve yağlama uygulamalarında kesme bölgesi sıcaklığının, sürtünme nedeniyle ortaya çıkan ısı ile kesme yağları ve demirin kimyasal tepkimesi sonucu sıcaklığın tahmin edilemediği bildirilmiştir [44].

Kry ve MQL+Kry kesme ortamlarında düşük kesme sıcaklığı etkisi ile küçölen talaş, kesme bölgesinden Kry soğutma için kullanılan tankın 15 bar basınç ve MQL tekniği için kullanılan 5 bar basıncın etkisi ile kesme ortamından hızla uzaklaşmaktadır. Kesme esnasında ortaya çıkan ve kesici takım aşınmasını hızlandıran kesme bölgesi sıcaklığının büyük bir kısmı talaş ile uzaklaştırıldığından talaş şekli, talaş ebatları ve ortamdan talaşın hızlı uzaklaşması kesici takım aşınması için önemlidir. Bu çalışmada özellikle kesici takım aşınmasının Kry ve MQL+Kry kesme ortamlarında düşük çıkmasının nedenlerinden birinin de talaş ile kesme bölgesinden uzaklaştırılan kesme bölgesi sıcaklığından kaynaklandığı düşünölmektedir.



		KURU	MQL	KRY	MQL+KRY		
Kesme hızı (m/dak)	0,06	60					0,06
		90					
		120					
	0,09	60					0,09
		90					
		120					
	0,12	60					0,12
		90					
		120					

Şekil 4.64. CVD kaplı kesici takımın farklı kesme ortamlarında gerçekleştirilen deneyler sonrası oluşan talaşların fotoğrafları.

		KURU	MQL	KRY	MQL+KRY		
Kesme hızı (m/dak)	0,06	60					İlerleme hızı (mm/dev)
		90					
		120					
	0,09	60					
		90					
		120					
	0,12	60					
		90					
		120					

Şekil 4.65. PVD kaplı kesici takımın farklı kesme ortamlarında gerçekleştirilen deneyler sonrası oluşan talaşların fotoğrafları.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında AISI D2 soğuk iş takım çeliği sürdürülebilir imalat için farklı soğutma ve yağlama teknikleri ile tornalanmış ve bu tekniklerin kesme bölgesi sıcaklığı, kesici takım titreşim genliği, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve takım ömrü üzerine etkileri araştırılmıştır. İşlenebilirlik deneyleri için üç farklı kesme hızı, üç farklı ilerleme hızı ve iki farklı kaplama yöntemi ile kaplanmış tungsten karbür kesici takımlar kullanılmıştır. Yapılan tez çalışması sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmış ve bazı önerilerde bulunulmuştur.

5.1. SONUÇLAR

- Her iki kesici takım türü için de en yüksek kesme bölgesi sıcaklığı kuru kesme ortamında oluşmuştur. Kullanılan tüm kesici takımlar için MQL sistemi tüm kesme şartlarında kesme bölgesi sıcaklığını azaltmada etkili olmuştur. Diğer yandan -196°C 'deki sıvı azotun kesme bölgesine ulaştırılması ile kesme bölgesi sıcaklığında önemli ölçüde düşüşler sağlanmıştır. En düşük kesme bölgesi sıcaklıkları MQL+Kry kesme ortamında oluşmuştur. MQL+Kry kesme ortamında kuru kesmeye kıyasla kesme bölgesi sıcaklığı, CVD kaplı takımlarda %39,4 ile %53,59 arasında değişen oranlarda, PVD kaplı takımlarda %38,8 ile %51,87 arasında değişen oranlarda azalmıştır. Uygulanan tüm kesme şartlarında CVD kaplı takımlara kıyasla PVD kaplı takımlarla daha düşük kesme bölgesi sıcaklığı olduğu görülmüştür. Kesme hızı ve ilerleme hızının artışı ile birlikte kesme bölgesi sıcaklığı da artmıştır.
- Kesme ortamı göz önüne alındığında, en yüksek kesici takım titreşim genlik değerleri hem CVD hem de PVD kaplı takımlarda kuru kesme ortamında ölçülmüştür. Her üç eksendeki titreşim genlik değerleri kendi aralarında değerlendirildiğinde, ilerleme yönündeki Z eksenindeki titreşim genlik değerlerinin diğerlerine göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Diğer tüm kesme ortamlarında daha düşük titreşim genlik değerleri oluşmakla birlikte en düşük kesici takım titreşim genlik değerleri MQL+Kry kesme ortamında oluşmuştur. En yüksek titreşim genlik değerlerinin ölçüldüğü Z ekseninde MQL+Kry kesme ortamında, kuru tornalamaya kıyasla CVD kaplı takımlarda

%45,06 ve PVD kaplı takımlarda %52,41'lere varan oranlarda daha düşük titreşim genlik değerleri olduğu görülmüştür. CVD kaplı takıma kıyasla PVD kaplı takımlarla çoğu kesme şartında daha düşük kesici takım titreşim genlik değerleri ölçülmüştür. Kesme hızı ve ilerleme hızının artışı ile tüm kesici takımların titreşim genlik değerleri artmıştır.

- Her iki kesici takım türünde de en yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri kuru kesme ortamında gözlemlenmiştir. Kuru kesme ortamına kıyasla MQL, Kry ve MQL+Kry kesme ortamlarında Ra değerlerinde çok önemli miktarlarda azalma görülmüştür. En düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri MQL kesme ortamında elde edilmiştir. Ra değerlerinde, kuru kesme ortamına göre kıyaslandığında MQL kesme ortamı ile CVD kaplı takımlarla yapılan deneylerde %90,12'lere, PVD kaplı takımlarla yapılan deneylerde ise %84,77'lere varan oranlarda iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir. PVD kaplı takımlar CVD kaplı takımlara kıyasla tüm kesme şartlarında daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri sergilemiştir. Kesme hızı ve ilerleme hızının artması ile yüzey pürüzlülük değerleri de artmıştır.
- En yüksek kesici takım aşınması kuru kesme ortamında gözlenmiş, diğer tüm kesme ortamlarında (MQL, Kry ve MQL+Kry) daha düşük aşınma meydana gelmiştir. En düşük aşınma MQL+Kry soğutma sisteminin kullanıldığı kesme ortamında oluşmuştur. Tüm kesme şartlarında PVD kaplı takımlar CVD kaplı takımlara nazaran daha iyi aşınma performansı sergilemiştir. PVD kaplı takım CVD kaplı takıma kıyasla %40,4'lere varan oranlarda daha az aşınmıştır. Tüm kesme ortamlarında kesme hızı ve ilerleme hızının artması ile kesici takım aşınması da artmıştır.
- Yapılan ömür deneylerinde en düşük takım ömrü her ki kesici takım türü için de kuru kesme ortamında görülmüştür. MQL, Kry ve MQL+Kry kesme ortamları kesici takım ömrünü artırmada etkili olmuştur. Hem CVD hem de PVD kaplı takımlarda en uzun takım ömrü MQL+Kry kesme ortamında elde edilmiştir. MQL+Kry ile işlemede, kuru kesmeye kıyasla CVD kaplı takımda %500 oranda, PVD kaplı takımda %266 oranında ömür artışı sağlanmıştır. PVD kaplı kesici takımlar CVD kaplı kesici takımlara göre tüm işleme şartlarında daha yüksek takım ömrü sergilemiştir.
- Yüksek basınç ve soğutmanın etkisi ile Kry ve MQL+Kry kesme ortamlarında

kuru tornalamaya kıyasla talaşların boyutları ve talaş kıvrılma yarıçapları küçülmüştür.

5.2. ÖNERİLER

- Bu tez çalışmasında sürdürülebilir imalat için farklı soğutma ve yağlama yöntemleri ile AISI D2 soğuk iş takım çeliği tornalanmıştır. Kesme bölgesi sıcaklığını düşürmek için sıvı azot kullanılmıştır. Soğutma sıvısı, karbondioksit ve yüksek basınçlı hava ile soğutma yapılarak sıvı azot ile kesme bölgesi sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü, kesici takım titreşimi, takım aşınması ve takım ömrü gibi çıktılar karşılaştırılabilir.
- Termal kamera ölçülen kesme bölgesi sıcaklığı yerine termokupl ile takım talaş arayüzeyi sıcaklığı ölçülebilir.
- Deneylerde farklı özelliklere sahip malzemeler kullanılarak kriyojenik soğutmanın ve karma yöntemin takım aşınması ve ömrü değişimleri incelenebilir.
- Farklı kesme derinliklerinde deneyler gerçekleştirerek yüzey pürüzlülüğünün değişimi incelenebilir.
- Kesme kuvvetleri ve kesici takım titreşim değerleri ölçülerek bu değerlerin yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması üzerine etkileri karşılaştırılabilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] I. S. Jawahir, F. Badurdeen, ve K. E. Rouch, “Innovation in sustainable manufacturing education”, *11th Global Conference on Sustainable Manufacturing*, 2013, ss. 9–16.
- [2] R. R. Srikant ve V. S. N. V. Ramana, “Performance evaluation of vegetable emulsifier based green cutting fluid in turning of American Iron and Steel Institute (AISI) 1040 steel – an initiative towards sustainable manufacturing”, *Journal of Cleaner Production*, c. 108, ss. 104–109, 2015.
- [3] I. S. Jawahir vd., “Cryogenic manufacturing processes”, *CIRP Annals Manufacturing Technology*, c. 65, sayı 2, ss. 713–736, 2016.
- [4] K. A. Osman, H. Ö. Ünver, ve U. Şeker, “Application of minimum quantity lubrication techniques in machining process of titanium alloy for sustainability: a review”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 100, sayı 9–12. ss. 2311–2332, 2019.
- [5] D. P. Adler, W. S. Hii, D. J. Michalek, ve J. W. Sutherland, “Examining the role of cutting fluids in machining and efforts to address associated environmental/health concerns”, *Machining Science and Technology*, c. 10, sayı 1, ss. 23–58, 2006.
- [6] J. Sharma ve B. S. Sidhu, “Investigation of effects of dry and near dry machining on AISI D2 steel using vegetable oil”, *Journal of Cleaner Production*, c. 66, ss. 619–623, 2014.
- [7] M. K. Gupta vd., “Machining characteristics based life cycle assessment in eco-benign turning of pure titanium alloy”, *Journal of Cleaner Production*, c. 251, 2020.
- [8] F. Kara ve A. Takmaz, “Optimization of cryogenic treatment effects on the surface roughness of cutting tools”, *Materials Testing*, c. 61, sayı 11, ss. 1101–1104, 2019.
- [9] F. Kara, A. Cicek, ve H. Demir, “Multiple regression and ANN models for surface quality of cryogenically-treated AISI 52100 bearing steel”, *Journal of the Balkan Tribological Association*, c. 19, sayı 4, ss. 570–584, 2013.
- [10] G. Byrne, D. Dornfeld, ve B. Denkena, “Advancing cutting technology”, *CIRP Annals Manufacturing Technology*, c. 52, sayı 2, ss. 483–507, 2003.
- [11] F. Klocke ve G. Eisenblaetter, “Dry cutting”, *CIRP Annals Manufacturing Technology*, c. 46, sayı 2, ss. 519–526, 1997.
- [12] H. Gökkaya, M. Nalbant, ve U. Şeker, “Talaş kaldırma sırasında açığa çıkan ısının kesme bölgesinde oluşturduğu sıcaklıkların ölçülmesinde kullanılan yöntemler”, *Politeknik Dergisi*, c. 7, sayı 4, ss. 297–305, 2004.
- [13] C. Çakır, *Modern Talaşlı İmalatın Esasları*, Bursa, Türkiye: Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı Yayınları, 1999, ss. 267.
- [14] N. R. Dhar ve M. Kamruzzaman, “Cutting temperature, tool wear, surface

- roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 47, sayı 5, ss. 754–759, 2007.
- [15] R. M. Mortier, M. F. Fox, ve S. T. Orszulik, *Chemistry and technology of lubricants*: Springer Netherlands, 2010.
- [16] T. K. Nguyen, “Fundamental tool wear study in turning of Ti-6Al-4V alloy (Ti64) and nano-enhanced minimum quantity lubrication (MQL) milling”, Doctoral dissertation, Michigan State University, Michigan, USA, 2015.
- [17] E. Yücel, M. Günay, M. Ayyıldız, Ö. Erkan, ve F. Kara, “Talaşlı imalatta kullanılan kesme sıvılarının insan sağlığına etkileri ve sürdürülebilir kullanımı”, *International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 2011, ss. 116–121.
- [18] F. J. da Silva, S. D. Franco, Á. R. Machado, E. O. Ezugwu, ve A. M. Souza, “Performance of cryogenically treated HSS tools”, *Wear*, c. 261, sayı 5–6, ss. 674–685, 2006.
- [19] V. Braic vd., “TiAlN/TiAlZrN multilayered hard coatings for enhanced performance of HSS drilling tools”, *Surface and Coatings Technology*, c. 204, sayı 12–13, ss. 1925–1928, 2010.
- [20] N. Altan Özbek, “AISI 316 östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmesinde kesici takıma uygulanan kriyojenik işlemin takım ömrü üzerine etkilerinin araştırılması, Doktora tezi”, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2013.
- [21] H. Lin, C. Wang, Y. Yuan, Z. Chen, Q. Wang, ve W. Xiong, “Tool wear in Ti-6Al-4V alloy turning under oils on water cooling comparing with cryogenic air mixed with minimal quantity lubrication”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 81, sayı 1–4, ss. 87–101, 2015.
- [22] N. A. Özbek, A. Çiçek, M. Gülesin, ve O. Özbek, “AISI 316 çeliğinin tornalanmasında kaplamalı karbür takımlara uygulanan kriyojenik işlemin takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri”, *7. Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS)*, 2016.
- [23] E. O. Ezugwu, Z. M. Wang, ve C. I. Okeke, “Tool life and surface integrity when machining Inconel 718 with PVD-and CVD-coated tools”, *Tribology Transactions*, c. 42, sayı 2, ss. 353–360, 1999.
- [24] P. Baldissera ve C. Delprete, “Effects of deep cryogenic treatment on static mechanical properties of 18NiCrMo5 carburized steel”, *Materials and Design*, c. 30, sayı 5, ss. 1435–1440, 2009.
- [25] A. Akhbarizadeh, A. Shafyei, ve M. A. Golozar, “Effects of cryogenic treatment on wear behavior of D6 tool steel”, *Materials and Design*, c. 30, sayı 8, ss. 3259–3264, 2009.
- [26] N. A. Özbek, A. Çiçek, M. Gülesin, ve O. Özbek, “Investigation of the effects of cryogenic treatment applied at different holding times to cemented carbide inserts on tool wear”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 86, 2014.
- [27] N. A. Özbek, A. Çiçek, M. Gülesin, ve O. Özbek, “Effect of cutting conditions on wear performance of cryogenically treated tungsten carbide inserts in dry turning of stainless steel”, *Tribology International*, c. 94, ss. 223–233, 2016.

- [28] N. A. Özbek, A. Çiçek, M. Gülesin, ve O. Özbek, “Application of Deep Cryogenic Treatment to Uncoated Tungsten Carbide Inserts in the Turning of AISI 304 Stainless Steel”, *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, c. 47, sayı 12, 2016.
- [29] S. S. Gill, J. Singh, H. Singh, ve R. Singh, “Investigation on wear behaviour of cryogenically treated TiAlN coated tungsten carbide inserts in turning”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 51, sayı 1, ss. 25–33, 2011.
- [30] R. R. Srikant, D. N. Rao, M. S. Subrahmanyam, ve P. V. Krishna, “Applicability of cutting fluids with nanoparticle inclusion as coolants in machining”, *Journal of Engineering Tribology*, c. 223, sayı 2, ss. 221–225, 2009.
- [31] M. B. G. Jun, S. S. Joshi, R. E. DeVor, ve S. G. Kapoor, “An experimental evaluation of an atomization-based cutting fluid application system for micromachining”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, c. 130, sayı 3, 2008.
- [32] I. Deiab, S. W. Raza, ve S. Pervaiz, “Analysis of lubrication strategies for sustainable machining during turning of titanium Ti-6Al-4V alloy”, *Procedia CIRP*, c. 17, ss. 766–771, 2014.
- [33] K. K. Wika, P. Litwa, ve C. Hitchens, “Impact of supercritical carbon dioxide cooling with Minimum Quantity Lubrication on tool wear and surface integrity in the milling of AISI 304L stainless steel”, *Wear*, c. 426–427, ss. 1691–1701, 2019.
- [34] R. P. Zeilmann ve W. L. Weingaertner, “Analysis of temperature during drilling of Ti6Al4V with minimal quantity of lubricant”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 179, sayı 1–3, ss. 124–127, 2006.
- [35] T. Tawakoli, M. J. Hadad, M. H. Sadeghi, A. Daneshi, S. Stöckert, ve A. Rasifard, “An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication-MQL grinding”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 49, sayı 12–13, ss. 924–932, 2009.
- [36] U. Heisel *vd.*, “Application of minimum quantity cooling lubrication technology in cutting processes”, *Production Engineering*, c. 2, sayı 1, ss. 49–54, 1994.
- [37] Á. R. Machado ve J. Wallbank, “The effect of extremely low lubricant volumes in machining”, *Wear*, c. 210, sayı 1–2, ss. 76–82, 1997.
- [38] T. Wakabayashi, H. Sato, ve I. Inasak, “Turning using extremely small amounts of cutting fluids”, *Machine Elements and Manufacturing*, c. 41, sayı 1, ss. 143–148, 1998.
- [39] M. Rahman, A. Senthil Kumar, ve Manzoor-Ul-Salem, “Evaluation of minimal quantities of lubricant in end milling”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 18, sayı 4, ss. 235–241, 2001.
- [40] D. U. Braga, A. E. Diniz, G. W. A. Miranda, ve N. L. Coppini, “Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum-silicon alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 122, sayı 1, ss. 127–138, 2002.
- [41] A. E. Diniz, J. R. Ferreira, ve F. T. Filho, “Influence of refrigeration/lubrication condition on SAE 52100 hardened steel turning at several cutting speeds”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 43, sayı 3, ss. 317–

326, 2003.

- [42] N. R. Dhar, M. W. Islam, S. Islam, ve M. A. H. Mithu, “The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 171, sayı 1, ss. 93–99, 2006.
- [43] N. R. Dhar, M. Kamruzzaman, ve M. Ahmed, “Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 172, sayı 2, ss. 299–304, 2006.
- [44] T. Obikawa, Y. Kamata, ve J. Shinozuka, “High-speed grooving with applying MQL”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 46, sayı 14, ss. 1854–1861, 2006.
- [45] M. M. A. Khan ve N. R. Dhar, “Performance evaluation of minimum quantity lubrication by vegetable oil in terms of cutting force, cutting zone temperature, tool wear, job dimension and surface finish in turning AISI-1060 steel”, *Journal of Zhejiang University: Science*, c. 7, sayı 11, ss. 1790–1799, 2006.
- [46] Y. K. Hwang, W. J. Chung, J. Y. Jung, ve C. M. Le, “A study on the improvement of cutting force and surface roughness in MQL turning”, *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, c. 15, sayı 4, ss. 83–91, 2006.
- [47] S. U. Gunjal ve N. G. Patil, “Experimental investigations into turning of hardened AISI 4340 steel using vegetable based cutting fluids under minimum quantity lubrication”, *Procedia Manufacturing*, c. 20, ss. 18–23, 2018.
- [48] A. Uysal, F. Demiren, ve E. Altan, “Applying minimum quantity lubrication (MQL) method on milling of martensitic stainless steel by using nano MoS₂ reinforced vegetable cutting fluid”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, c. 195, ss. 2742–2747, 2015.
- [49] Y. Kamata ve T. Obikawa, “High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 192–193, ss. 281–286, 2007.
- [50] M. M. A. Khan, M. A. H. Mithu, ve N. R. Dhar, “Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 209, sayı 15–16, ss. 5573–5583, 2009.
- [51] M. Z. A. Yazid, G. A. Ibrahim, A. Y. M. Said, C. H. CheHaron, ve J. A. Ghani, “Surface integrity of Inconel 718 when finish turning with PVD coated carbide tool under MQL”, *Procedia Engineering*, c. 19, ss. 396–401, 2011.
- [52] M. Hadad ve B. Sadeghi, “Minimum quantity lubrication-MQL turning of AISI 4140 steel alloy”, *Journal of Cleaner Production*, c. 54, ss. 332–343, 2013.
- [53] S. Chinchankar ve S. K. Choudhury, “Hard turning using HiPIMS-coated carbide tools: Wear behavior under dry and minimum quantity lubrication (MQL)”, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, c. 55, ss. 536–548, 2014.
- [54] J. Sharma ve B. S. Sidhu, “Investigation of effects of dry and near dry machining on AISI D2 steel using vegetable oil”, *Journal of Cleaner Production*, c. 66, ss. 619–623, 2014.

- [55] P. Sharma, B. S. Sidhu, ve J. Sharma, “Investigation of effects of nanofluids on turning of AISI D2 steel using minimum quantity lubrication”, *Journal of Cleaner Production*, c. 108, ss. 72–79, 2015.
- [56] A. K. Sharma, A. K. Tiwari, R. K. Singh, ve A. R. Dixit, “Tribological investigation of TiO₂ nanoparticle based cutting fluid in machining under minimum quantity lubrication (MQL)”, *Materials Today: Proceedings*, c. 3, sayı 6, ss. 2155–2162, 2016.
- [57] M. Mia vd., “Effect of time-controlled MQL pulsing on surface roughness in hard turning by statistical analysis and artificial neural network”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 91, sayı 9–12, ss. 3211–3223, 2017.
- [58] A. M. Khan vd., “Energy-based cost integrated modelling and sustainability assessment of Al-GnP hybrid nanofluid assisted turning of AISI52100 steel”, *Journal of Cleaner Production*, c. 257, 2020.
- [59] O. Özbek ve H. Saruhan, “The effect of vibration and cutting zone temperature on surface roughness and tool wear in eco-friendly MQL turning of AISI D2”, *Journal of Materials Research and Technology*, c. 9, sayı 3, ss. 2762-2772, 2020.
- [60] N. Suresh Kumar Reddy ve P. Venkateswara Rao, “Experimental investigation to study the effect of solid lubricants on cutting forces and surface quality in end milling”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 46, sayı 2, ss. 189–198, 2006.
- [61] Y. Sun, B. Huang, D. A. Puleo, ve I. S. Jawahir, “Enhanced machinability of Ti-5553 alloy from cryogenic machining: Comparison with MQL and flood-cooled machining and modeling”, *Procedia CIRP*, c. 31, ss. 477–482, 2015.
- [62] N. A. Raof, J. A. Ghani, J. Syarif, C. H. C. Haron, ve M. A. Hadi, “Comparison of dry and cryogenic machining on chip formation and coefficient of friction in turning AISI 4340 alloy steel”, *Applied Mechanics and Materials*, c. 554, ss. 7–11, 2014.
- [63] A. Bordin, S. Sartori, S. Bruschi, ve A. Ghiotti, “Experimental investigation on the feasibility of dry and cryogenic machining as sustainable strategies when turning Ti6Al4V produced by Additive Manufacturing”, *Journal of Cleaner Production*, c. 142, sayı 2017, ss. 4142–4151, 2017.
- [64] A. D. Jayal, F. Badurdeen, O. W. Dillon, ve I. S. Jawahir, “Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels”, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, c. 2, sayı 3, ss. 144–152, 2010.
- [65] F. Pusavec, P. Krajnik, ve J. Kopac, “Transitioning to sustainable production - Part I: application on machining technologies”, *Journal of Cleaner Production*, c. 18, sayı 2, ss. 174–184, 2010.
- [66] F. Pusavec, D. Kramar, P. Krajnik, ve J. Kopac, “Transitioning to sustainable production - Part II: Evaluation of sustainable machining technologies”, *Journal of Cleaner Production*, c. 18, sayı 12, ss. 1211–1221, 2010.
- [67] S. Y. Hong ve Z. Zhao, “Thermal aspects, material considerations and cooling strategies in cryogenic machining”, *Clean Technologies and Environmental Policy*, c. 1, sayı 2, ss. 107–116, 1999.
- [68] S. Y. Hong ve Y. Ding, “Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic

- machining of Ti-6Al-4V”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 41, sayı 10, ss. 1417–1437, 2001.
- [69] S. Y. Hong, Y. Ding, ve W. C. Jeong, “Friction and cutting forces in cryogenic machining of Ti-6Al-4V”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 41, sayı 15, ss. 2271–2285, 2001.
- [70] S. Y. Hong, I. Markus, ve W. C. Jeong, “New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti-6Al-4V”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 41, sayı 15, ss. 2245–2260, 2001.
- [71] Z. Y. Wang, K. P. Rajurkar, J. Fan, ve G. Petrescu, “Cryogenic machining of tantalum”, *Journal of Manufacturing Processes*, c. 4, sayı 2, ss. 122–127, 2002.
- [72] Z. Y. Wang, K. P. Rajurkar, J. Fan, S. Lei, Y. C. Shin, ve G. Petrescu, “Hybrid machining of Inconel 718”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 43, sayı 13, ss. 1391–1396, 2003.
- [73] Z. Zurecki, R. Ghosh, ve J. H. Frey, “Finish-turning of hardened powder metallurgy steel using cryogenic cooling”, *International Journal of Powder Metallurgy*, c. 40, sayı 1, ss. 19–31, 2004.
- [74] N. Ben Fredj, H. Sidhom, ve C. Braham, “Ground surface improvement of the austenitic stainless steel AISI 304 using cryogenic cooling”, *Surface and Coatings Technology*, c. 200, sayı 16–17, ss. 4846–4860, 2006.
- [75] N. R. Dhar, S. Islam, M. Kamruzzaman, ve S. Paul, “Wear behavior of uncoated carbide inserts under dry, wet and cryogenic cooling conditions in turning C-60 steel”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, c. 28, sayı 2, ss. 146–152, 2006.
- [76] K. A. Venugopal, S. Paul, ve A. B. Chattopadhyay, “Growth of tool wear in turning of Ti-6Al-4V alloy under cryogenic cooling”, *Wear*, c. 262, sayı 9–10, ss. 1071–1078, 2007.
- [77] M. Strano, E. Chiappini, S. Tirelli, P. Albertelli, ve M. Monno, “Comparison of Ti6Al4V machining forces and tool life for cryogenic versus conventional cooling”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, c. 227, sayı 9, ss. 1403–1408, 2013.
- [78] S. Sartori, L. Moro, A. Ghiotti, ve S. Bruschi, “On the tool wear mechanisms in dry and cryogenic turning Additive Manufactured titanium alloys”, *Tribology International*, c. 105, ss. 264–273, 2017.
- [79] A. Gharibi, ve Y. Kaynak, “Kesme derinliğinin sertleştirilmiş çelik malzemenin kriyojenik talaşlı imalat performansına etkisi”, *Journal of the Faculty of Engineering Architecture of Gazi University*, c. 34, sayı 2, ss. 581–596, 2019.
- [80] A. A. Khan ve M. I. Ahmed, “Improving tool life using cryogenic cooling”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 196, sayı 1–3, ss. 149–154, 2008..
- [81] M. Dhananchezian, M. P. Kumar, ve T. Sornakumar, “Cryogenic turning of AISI 304 stainless steel with modified tungsten carbide tool inserts”, *Materials and Manufacturing Processes*, c. 26, sayı 5, ss. 781–785, 2011.
- [82] F. Pusavec, P. Krajnik, M. Nicolescu, ve J. Kopac, “Residual stresses, plastic work, and microhardness in cryogenic machining of Inconel 718”, *The 4th International Swedish Production Symposium*, 2011, ss. 283–288.

- [83] A. Shokrani, V. Dhokia, S. T. Newman, ve R. Imani-Asrai, “An initial study of the effect of using liquid nitrogen coolant on the surface roughness of Inconel 718 nickel-based alloy in CNC milling”, *Procedia CIRP*, c. 3, sayı 1, ss. 121–125, 2012.
- [84] Z. W. Pu, S. Caruso, D. Umbrello, O. W. Dillon, D. A. Puleo, ve I. S. Jawahir, “Analysis of surface integrity in dry and cryogenic machining of AZ31B Mg alloys”, *Advanced Materials Research*, c. 223, ss. 439–448, 2011.
- [85] Z. Pu, J. C. Outeiro, A. C. Batista, O. W. Dillon, D. A. Puleo, ve I. S. Jawahir, “Enhanced surface integrity of AZ31B Mg alloy by cryogenic machining towards improved functional performance of machined components”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 56, ss. 17–27, 2012.
- [86] Z. Pu, D. A. Puleo, O. W. Dillon, ve I. S. Jawahir, “Controlling the biodegradation rate of magnesium-based implants through surface nanocrystallization induced by cryogenic machining”, *Magnesium Technology 2011*, ss. 635–642, 2011.
- [87] Z. Pu, O. W. Dillon, I. S. Jawahir, ve D. A. Puleo, “Microstructural changes of AZ31 magnesium alloys induced by cryogenic machining and its influence on corrosion resistance in simulated body fluid for biomedical applications”, *International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC)*, 2010, c. 1, ss. 271–277.
- [88] M. Biček, F. Dumont, C. Courbon, F. Pušavec, J. Rech, ve J. Kopač, “Cryogenic machining as an alternative turning process of normalized and hardened AISI 52100 bearing steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 212, sayı 12, ss. 2609–2618, 2012.
- [89] V. García Navas, D. Fernández, A. Sandá, C. Sanz, S. Suzon, ve T. F. De Mendiola, “Surface integrity of AISI 4150 (50CrMo4) steel turned with different types of cooling-lubrication”, *Procedia CIRP*, c. 13, ss. 97–102, 2014.
- [90] Y. Kaynak, H. E. Karaca, ve I. S. Jawahir, “Surface integrity characteristics of NiTi shape memory alloys resulting from dry and cryogenic machining”, *Procedia CIRP*, c. 13, ss. 393–398, 2014.
- [91] F. Ambrosy, F. Zanger, V. Schulze, ve I. S. Jawahir, “An experimental study of cryogenic machining on nanocrystalline surface layer generation”, *Procedia CIRP*, c. 13, ss. 169–174, 2014.
- [92] S. Magadum, A. K. S, V. G. Yoganath, ve C. K. Srinivasa, “Cryogenic machining of SS304 steel”, *All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR)*, 2016.
- [93] M. Sarıkaya ve A. Güllü, “Examining of tool wear in cryogenic machining of cobalt-based Haynes 25 superalloy”, *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, c. 9, sayı 8, ss. 984–988, 2015.
- [94] B. Huang, Y. Kaynak, C. Arvin, ve I. S. Jawahir, “Improved surface integrity from cryogenic machining of Al 7050-T7451 alloy with ultrafine-grained structure”, *Advances in Materials and Processing Technologies*, c. 1, sayı 3–4, ss. 361–374, 2015.
- [95] Y. Kaynak, “Cryogenic cooling-induced machining performance of AISI 1045 steel”, *In 2nd International Iron and Steel Symposium (IISS’15)*, 2015.
- [96] S. Sriram, V. Vignesh, K. S. Vijay Sekar, ve M. Pradeep Kumar, “Finite element

- modelling of orthogonal cryogenic machining process”, *Applied Mechanics and Materials*, c. 852, ss. 248–254, 2016.
- [97] A. R. Natasha, J. A. Ghani, C. H. Che Haron, J. Syarif, ve A. H. Musfirah, “Temperature at the tool-chip interface in cryogenic and dry turning of AISI 4340 using carbide tool”, *International Journal of Simulation Modelling*, c. 15, sayı 2, ss. 201–212, 2016.
- [98] Ç. V. Yıldırım, “Experimental comparison of the performance of nanofluids, cryogenic and hybrid cooling in turning of Inconel 625”, *Tribology International*, c. 137, ss. 366–378, 2019.
- [99] S. S. Abuthakker, P. V Mohanram, ve G. Mohankumar, “The effect of spindle vibration on surface roughness of workpiece in dry turning using ANN”, *International Journal of Lean Thinking*, c. 2, sayı 2, ss. 1–16, 2011.
- [100] D. Carou, E. M. Rubio, C. H. Lauro, ve J. P. Davim, “The effect of minimum quantity lubrication in the intermittent turning of magnesium based on vibration signals”, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, c. 94, ss. 338–343, 2016.
- [101] V. Sivaraman, L. Vijayaraghavan, ve S. Sankaran, “Effect of vibration on surface texture during machining multiphase microalloyed steel”, *Procedia Manufacturing*, c. 10, ss. 429–435, 2017.
- [102] B. Fnides, M. A. Yallese, ve H. Aouici, “Hard tuning of hot work steel AISI H11: Evaluation of cutting pressures, resulting force and temperature”, *Mechanika*, c. 72, sayı 4, ss. 59–63, 2008.
- [103] F. Kara, M. Karabatak, M. Ayyildiz, ve E. Nas, “Effect of machinability, microstructure and hardness of deep cryogenic treatment in hard turning of AISI D2 steel with ceramic cutting”, *Journal of Materials Research and Technology*, c. 9, sayı 1, ss. 969–983, 2020.
- [104] Anonim, (2020, 6 Haziran). [Online]. Erişim: <http://www.imccompanies.com/TaeguTec/ttkCatalog/Item.aspx?cat=5523126&fn um=41&map=IS&GFSTYP=M>.
- [105] Anonim, (2020, 6 Haziran). [Online]. Erişim: <http://www.imccompanies.com/TaeguTec/ttkCatalog/Item.aspx?cat=3607290&fn um=10110&mapp=IS&GFSTYP=M>.
- [106] J. Saedon, “Micromilling of Hardened (62 Hrc) AISI D2 Cold Work”, Doctoral dissertation, Birmingham University, Birmingham, United Kingdom, 2011.
- [107] E. A. Almond, “Towards improved tests based on fundamental properties”, *In Proceedings of the International Conference on Improved Performance of Tool Materials*, 1981.
- [108] Ç. V. Yıldırım, T. Kıvak, ve F. Erzincanlı, “Tool wear and surface roughness analysis in milling with ceramic tools of Waspaloy: a comparison of machining performance with different cooling methods”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, c. 41, sayı 2, ss. 1–15, 2019.
- [109] N. Dhar ve S. Islam, “Improvement in machinability characteristics and working environment by minimum quantity lubrication”, *BUET, Dhaka, Bangladesh*, 2005.
- [110] L. D.V, “Performance evaluation of minimum quantity lubrication (MQL) Using

- CBN tool during hard turning of AISI 4340 and its comparison with dry and wet turning”, *International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, c. 3, sayı 3, ss. 102–106, 2013.
- [111] P. Sivaiah ve D. Chakradhar, “Effect of cryogenic coolant on turning performance characteristics during machining of 17-4 PH stainless steel: A comparison with MQL, wet, dry machining”, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, c. 21, ss. 86–96, 2018.
- [112] H. Aouici, M. A. Yallese, B. Fnides, ve T. Mabrouki, “Machinability investigation in hard turning of AISI H11 hot work steel with CBN tool”, *Mechanika*, c. 86, sayı 6, ss. 71–77, 2010.
- [113] L. B. Abhang ve M. Hameedullah, “Chip-tool interface temperature prediction model for turning process”, *International Journal of Engineering Science and Technology*, c. 2, sayı 4, ss. 382–393, 2010.
- [114] K. V. B. S. Kalyan Kumar ve S. K. Choudhury, “Investigation of tool wear and cutting force in cryogenic machining using design of experiments”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 203, sayı 1–3, ss. 95–101, 2008.
- [115] W. Grzesik, “Experimental investigation of the cutting temperature when turning with coated indexable inserts”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 39, sayı 3, ss. 355–369, 1999.
- [116] T. V. S. Reddy, T. Sornakumar, M. V. Reddy, R. Venkatram, ve A. Senthilkumar, “Turning studies of deep cryogenic treated P-40 tungsten carbide cutting tool inserts- Technical communication”, *Machining Science and Technology*, c. 13, sayı 2, ss. 269–281, 2009.
- [117] I. S. Jawahir ve C. A. van Luttervelt, “Recent developments in chip control research and applications”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, c. 42, sayı 2, ss. 659–693, 1993.
- [118] A. K. Balaji ve V. S. Mohan, “An ‘Effective cutting tool thermal conductivity’ based model for tool–chip contact in machining with multi-layer coated cutting tools”, *Machining Science and Technology*, c. 6, sayı 3, ss. 415–436, 2007.
- [119] D. E. Dimla, “The impact of cutting conditions on cutting forces and vibration signals in turning with plane face geometry inserts”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 155–156, sayı 1–3, ss. 1708–1715, 2004.
- [120] W. Zhong, D. Zhao, ve X. Wang, “A comparative study on dry milling and little quantity lubricant milling based on vibration signals”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 50, sayı 12, ss. 1057–1064, 2010.
- [121] S. Paul, N. R. Dhar, ve A. B. Chattopadhyay, “Beneficial effects of cryogenic cooling over dry and wet machining on tool wear and surface finish in turning AISI 1060 steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 116, sayı 1, ss. 44–48, 2001.
- [122] N. R. Dhar, S. Paul, ve A. B. Chattopadhyay, “Machining of AISI 4140 steel under cryogenic cooling - Tool wear, surface roughness and dimensional deviation”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 123, sayı 3, ss. 483–489, 2002.
- [123] Y. Deshpande, A. Andhare, ve N. K. Sahu, “Estimation of surface roughness using cutting parameters, force, sound, and vibration in turning of Inconel 718”, *Journal*

of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, c. 39, sayı 12, ss. 5087–5096, 2017.

- [124] E. Nas ve N. Altan Özbek, “Optimization of the machining parameters in turning of hardened hot work tool steel using cryogenically treated tools”, *Surface Review and Letters*, c. 27, sayı 5, 2020.
- [125] S. W. M. A. I. Senevirathne ve H. K. G. Punchihewa, “Reducing surface roughness by varying aerosol temperature with minimum quantity lubrication in machining AISI P20 and D2 steels”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 94, sayı 1–4, ss. 1009–1019, 2018.
- [126] S. B. Kedare, D. R. Borse, ve P. T. Shahane, “Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on surface roughness of mild steel of 15HRC on universal milling machine”, *Procedia Materials Science*, c. 6, ss. 150–153, 2014.
- [127] N. A. Özbek, “Effects of cryogenic treatment types on the performance of coated tungsten tools in the turning of AISI H11 steel”, *Journal of Materials Research and Technology*, 2020.
- [128] M. C. Cakir, C. Ensarioglu, ve I. Demirayak, “Mathematical modeling of surface roughness for evaluating the effects of cutting parameters and coating material”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 209, sayı 1, ss. 102–109, 2009.
- [129] Y. Ozcatalbas, “Chip and built-up edge formation in the machining of in situ Al4C3-Al composite”, *Materials and Design*, c. 24, sayı 3, ss. 215–221, 2003.
- [130] İ. Çiftçi, “Östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmesinde kesici takım kaplamasının ve kesme hızının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 20, sayı 2, 2013.
- [131] V. Varghese, A. K., M. R. Ramesh, ve D. Chakradhar, “Investigation on the performance of AlCrN and AlTiN coated cemented carbide inserts during end milling of maraging steel under dry, wet and cryogenic environments”, *Journal of Manufacturing Processes*, c. 43, ss. 136–144, 2019.
- [132] M. Özkütük, “Ti-5553 alaşımın talaşlı imalat sürecinin ve yüzey bütünlüğünün deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle analizi”, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2018.
- [133] E. Oyman, “Kaplama türünün ve kesme parametrelerinin talaş şekli üzerindeki etkisinin araştırılması”, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye, 2012.
- [134] J. Kouam, V. Songmene, M. Balazinski, ve P. Hendrick, “Effects of minimum quantity lubricating (MQL) conditions on machining of 7075-T6 aluminum alloy”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 79, ss. 1325–1334, 2015.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Onur ÖZBEK
Doğum Tarihi ve Yeri : 09.10.1982 ÇANKIRI
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : onurozbek@duzce.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Makine Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2020
Lisans	Makine Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2018
Y. Lisans	Makine Eğitimi	Afyon Kocatepe Üniversitesi	2008
Lisans	Talaşlı Üretim Öğretmenliği	Dumlupınar Üniversitesi	2005
Lise	Makine	Çankırı Teknik Lisesi	1999

YAYINLAR

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

- Özbek, O. ve Saruhan, H. (2020). The effect of vibration and cutting zone temperature on surface roughness and tool wear in eco-friendly MQL turning of AISI D2. Journal of Materials Research and Technology.
- Özbek, N. A. Çiçek, A., Gülesin, M., ve Özbek, O. (2016). Application of deep cryogenic treatment to uncoated tungsten carbide inserts in the turning of AISI 304 stainless steel. Metallurgical and Materials Transactions A, 47(12), 6270-6280.
- Özbek, N. A., Çiçek, A., Gülesin, M. ve Özbek, O. (2016). Effect of cutting

conditions on wear performance of cryogenically treated tungsten carbide inserts in dry turning of stainless steel. *Tribology International*, 94, 223-233.

4. Özbek, N. A., Çiçek, A., Gülesin, M. ve Özbek, O. (2014). Investigation of the effects of cryogenic treatment applied at different holding times to cemented carbide inserts on tool wear. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 86, 34-43.
5. Aslantas, K., Özbek, O., Uçun, İ. ve Büyüksağış, İ. S. (2009). Investigation of the effect of axial cutting force on circular diamond sawblade used in marble cutting process. *Materials and Manufacturing Processes*, 24(12), 1423-143

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings)

basılan bildiriler :

1. Nas E., Kara F. ve Özbek O., “DIN 1.2344 sıcak iş takım çeliğinin elektro erozyon tezgâhında işlenmesinde en uygun parametrelerin taguchi metodu ile belirlenmesi istatistiksel olarak araştırılması”, *2018-Winter2nd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies (ISAS)*, c. 3, 371-377, 2018.
2. Nas E., Kara F. ve Özbek O., “Determination of the most suitable parameters for the processing of DIN 1.2344 hot work tool steel on electro erosion machine by Taguchi method”, *2nd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies (ISAS)*, 2018.
3. Özbek, N. A., Özbek O. ve Kara F., “Investigation of the effects of cryogenic treatment on AISI H11 steel”, *International Marmara Science and Social Sciences Congress (IMASCON)*, 2018.
4. Kara F., Özbek O. ve Özbek, N. A., “Determination of the best cutting tool coating method and cutting parameters for the low surface roughness in the machining of mold steel”, *International Marmara Science and Social Sciences Congress (IMASCON)*, 2018.
5. Kara F., Özbek O. ve Özbek, N. A., “Investigation of the effect of cutting tool coating on surface roughness and tool wear”, *International Marmara Science and Social Sciences Congress (IMASCON)*, 2018.
6. Özbek, N. A., Özbek O. ve Kara F., “Optimization of cutting parameters for tool wear and surface roughness when machining AISI H11 steel with cryogenic

treatment tools” *International Academic Research Congress (INES)*, 2018.

7. Kara F., Özbek, N. A. ve Özbek O., “Determination of cutting parameters which give optimum noise values in machining of plastic mold steel by Taguchi method”, *International Academic Research Congress (INES)*, 2018.
8. Kara F., Özbek, N. A. ve Özbek O., “Optimization of the most suitable parameters in turning of DIN 1.2365 steel with cryogenic treated cutting tools”, *International Academic Research Congress (INES)*, 2018.
9. Kara F., Özbek, N. A. ve Özbek O., “Optimization of average vibration values for turning of Nimax steel with CVD and PVD coated carbide tools”, *International Academic Research Congress (INES)*, 2018.
10. Özbek, N. A, Saraç E., Özbek O.ve Kara F., “Investigation of the effects of heat treatment temperatures on AISI 1020 steel” *International Academic Research Congress (INES)*, 2018
11. Kara F., Karabatak M., Özbek, N. A ve Özbek O., “DIN 1.2379 takım çeliğinin işlenmesinde optimum tornalama şartlarının Taguchi metodu ile belirlenmesi” *International Academic Research Congress (INES)*, ss. 1193-1199, 2017.
12. Özbek, N. A., Çiçek A., Gülesin M. ve Özbek O., “AISI 316 çeliğinin kriyojenik işlem uygulanmış TiCN kaplı takımlarla işlenmesinde kesme şartlarının optimizasyonu” *II. INES Uluslararası Akademik Araştırmalar Kongresi (INES)*, 2017.
13. Özbek, N. A, Çiçek A., Gülesin M. ve Özbek O. “AISI 316 çeliğinin kriyojenik işlem uygulanmış TiCN kaplı takımlarla işlenmesinde kesme şartlarının optimizasyonu” International academic research congress (INES), ss. 1200-1208, 2017.
14. Özbek, N. A, Özbek O. ve Kara F. “Sertleştirilmiş AISI 420 çeliğinin tornalanmasında Taguchi yöntemi kullanılarak takım aşınması için kesme parametrelerinin optimizasyonu” *International Academic Research Congress (INES)*, ss. 1209-1215, 2017.
15. Özbek, N. A. ve Özbek O. (2017). “Tungsten karbür takımlarda kriyojenik işlem sıcaklığının takım aşınması üzerine etkileri” *II. INES Uluslararası Akademik Araştırmalar Kongresi (INES)*, 2017.

16. Özbek, N. A, Özbek O. ve Kara F., “Sertleştirilmiş AISI 420 çeliğinin tornalanmasında taguchi yöntemi kullanılarak takım aşınması için kesme parametrelerinin optimizasyonu”, *International Academic Research Congress (INES)*, 2017.
17. Özbek, N. A, Kara F. ve Özbek O. “AISI 4140 çeliğinin tornalanmasında takım aşınması için kesme parametrelerinin optimizasyonu” *Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu (UMAS)*, ss. 137-146, 2016.
18. Kara F., Takmaz A., Özbek, N. A. ve Özbek O., “AISI O2 soğuk iş takım çeliğinin tornalanmasında optimum kesme parametrelerinin Taguchi yöntemi ile belirlenmesi”, *Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu (UMAS)*, ss. 96-96 2016.
19. Özbek, N. A, Kara F. ve Özbek O., “AISI 4140 çeliğinin tornalanmasında takım aşınması için kesme parametrelerinin optimizasyonu” *Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu (UMAS)*, 2016.
20. Özbek, N. A, Çiçek A., Gülesin M. ve Özbek O., “AISI 316 çeliğinin tornalanmasında kaplamalı karbür takımlara uygulanan kriyojenik işlemin takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri”, *7. Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS)*, 2016.
21. Özbek, N. A, Çiçek A., Gülesin M. ve Özbek O., “Investigation of the effects of holding times at cryogenic temperatures on surface roughness and cutting forces in machining of stainless steel”, *17. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi (UMTİK)*, 2016.
22. Özbek, N. A, Çiçek A., Gülesin M. ve Özbek O., “Kriyojenik işlem uygulanmış kaplamasız WC Co takımlarla AISI 304 paslanmaz çeliğin işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerinin incelenmesi”, *International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences (ICETAS)*, 2016.

Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. Özbek, N. A, Çiçek A., Gülesin M. ve Özbek O., “AISI 304 ve AISI 316 östenitik paslanmaz çeliklerin işlenebilirliğinin değerlendirilmesi” *Politeknik Dergisi*, c. 20 sayı. 1, ss. 43-49, 2017.

2.  zbek O. ve  zbek, N.A., “Sertleştirilmiş AISI 4140 eliğinin tornalanmasında taguchi yöntemi kullanılarak yüzey pürüzlülüğü için kesme parametrelerinin optimizasyonu” *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, c. 5 sayı. 3, ss. 41-48, 2016.

