



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

**WASPALOY SÜPER ALAŞIMININ FARKLI SOĞUTMA
TEKNİKLERİ KULLANARAK FREZELEME YÖNTEMİ İLE
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

ÇAĞRI VAKKAS YILDIRIM

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. FEHMİ ERZİNCANLI**

DÜZCE, 2017

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

WASPALOY SÜPER ALAŞIMININ FARKLI SOĞUTMA
TEKNİKLERİ KULLANARAK FREZELEME YÖNTEMİ İLE
İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Çağrı Vakkas YILDIRIM tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Fehmi ERZİNCANLI

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Fehmi ERZİNCANLI

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Hasan ÖKTEM

Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Yahya ALTUNPAK

Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Doç. Dr. Turgay KIVAK

Düzce Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Oğuz KAYABAŞI

Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 05/07/2017

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.

05 Temmuz 2017

Çağrı Vakkas YILDIRIM



TEŐEKKÜR

Doktora öğrenimim ve bu tezin hazırlanması süresince gösterdiği her türlü destek ve yardımından dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. Fehmi ERZİNCANLI'ya, çok değerli katkılarını esirgemeyen tez izleme komitesi üyeleri Sayın Doç. Dr. Hasan ÖKTEM'e ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Oğuz KAYABAŞI'na, değerli görüşlerinden faydalandığım ve çalışma boyunca desteklerini hissettiğim Sayın Doç. Dr. Turgay KIVAK'a ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Serkan APAY'a saygı ve şükranlarımı sunarım.

Deneyler ve laboratuvar çalışmalarımnda emeklerini esirgemeyen Düzce Üniversitesi İmalat Mühendisliğı bölümünün değerli öğretim elemanlarına, çok değerli katkılarını esirgemeyen Sinop Üniversitesi Öğretim üyesi Yrd. Doç. Dr. Murat SARIKAYA'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2015.07.04.335 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir

Temmuz 2017

Çağırı Vakkas YILDIRIM

İÇİNDEKİLER

| | <u>Sayfa No</u> |
|--|-----------------|
| ŞEKİL LİSTESİ..... | XI |
| ÇİZELGE LİSTESİ..... | XV |
| KISALTMALAR..... | XVII |
| SİMGELER | XVIII |
| ÖZET | XIX |
| ABSTRACT | XX |
| EXTENDED ABSTRACT..... | XXI |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. TALAŞLI İMALAT VE FREZELEME | 5 |
| 2.1. KESME MEKANİĞİ | 5 |
| 2.1.1. Ortogonal (Dik) Kesme Mekanîği | 5 |
| 2.1.2. Oblique (Eğik) Kesme Mekanîği | 8 |
| 2.2. FREZELEME MEKANİĞİ..... | 10 |
| 2.2.1. Çevresel Frezeleme | 12 |
| 2.2.2. Alın Frezeleme..... | 12 |
| 2.2.2.1. Simetrik Frezeleme Yöntemi | 12 |
| 2.2.2.2. Asimetrik Frezeleme Yöntemi | 12 |
| 2.2.2.3. Aynı Yönlü ve Zıt Yönlü Frezeleme Yöntemi..... | 13 |
| 2.3. FREZEDE İŞLENEBİLİRLİĞE AİT TERMİNOLOJİ..... | 15 |
| 2.3.1. Kesme Kuvvetleri..... | 15 |
| 2.3.2. Yüzey Pürüzlülüğü | 18 |
| 2.3.2.1. Yüzey Pürüzlülük Şekli ve İlişkili İfadeler | 18 |
| 2.3.2.2. Yüzey Pürüzlülüğünün Birimi ve Dereceleri | 19 |
| 2.3.2.3. Yüzey Pürüzlülük Parametreleri..... | 20 |
| 2.3.2.4. Yüzey Pürüzlülüğünün Önemli Olduğu Durumlar..... | 22 |
| 2.3.2.5. Yüzey Pürüzlülüğüne Etki Eden Faktörler..... | 23 |
| 2.3.3. Takım Aşınması | 23 |
| 2.3.3.1. Mekanik Yük Faktörleri | 24 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.3.2. Termal (Isıl) Yük Faktörleri..... | 24 |
| 2.3.3.3. Kimyasal Yük Faktörleri..... | 24 |
| 2.3.3.4. Aşındırıcı Yük Faktörleri | 24 |
| 3. SÜPER ALAŞIMLAR | 26 |
| 3.1. SÜPER ALAŞIMLARIN SINIFLANDIRILMASI | 28 |
| 3.1.1. Kobalt Esaslı Süper Alaşımalar | 28 |
| 3.1.2. Demir Esaslı Süper Alaşımalar | 29 |
| 3.1.3. Nikel Esaslı Süper Alaşımalar | 30 |
| 3.1.3.1. Nikel Esaslı Süper Alaşımaların Kimyasal Bileşenleri..... | 31 |
| 3.1.3.2. Nikel Esaslı Süper Alaşımaların Güçlendirilmesi | 32 |
| 3.1.3.3. Nikel Esaslı Süper Alaşımaların Isıl İşlemleri..... | 33 |
| 3.1.3.4. Nikel Esaslı Süper Alaşımaların Uygulama Alanları..... | 34 |
| 3.1.4. Waspaloy..... | 35 |
| 4. KESME SIVILARI VE UYGULAMA YÖNTEMLERİ..... | 38 |
| 4.1. KESME SIVILARININ SINIFLANDIRILMASI | 40 |
| 4.1.1. İşlevlerine Göre Kesme Sıvıları..... | 40 |
| 4.1.1.1. Soğutucular..... | 41 |
| 4.1.1.2. Yağlayıcılar..... | 41 |
| 4.1.2. Kimyasal Bileşenlerine Göre Kesme Sıvıları..... | 42 |
| 4.1.2.1. Kesme Yağları (Saf Yağlar)..... | 43 |
| 4.1.2.2. Su Bazlı Kesme Sıvıları..... | 44 |
| 4.1.2.3. Gaz Esaslı Soğutma-Yağlama..... | 48 |
| 4.2. KESME SIVILARININ FONKSİYONLARI | 49 |
| 4.2.1. Soğutma Fonksiyonu | 49 |
| 4.2.2. Yağlama Fonksiyonu | 50 |
| 4.2.3. Talaşı Uzaklaştırma Fonksiyonu..... | 51 |
| 4.2.4. Kaynağı Önleme Fonksiyonu..... | 52 |
| 4.3. KESME SIVILARININ UYGULAMA YÖNTEMLERİ..... | 52 |
| 4.3.1. Islak İşleme Yöntemi | 52 |
| 4.3.1.1. Takım İçinden Uygulama..... | 52 |
| 4.3.1.2. Takım Dışından Uygulama | 53 |
| 4.3.2. Sis Püskürtme Yöntemi | 54 |
| 4.3.3. Yüksek Basınçla Soğutma Yöntemi | 55 |

| | |
|--|-----------|
| 4.4. KESME SIVILARININ SEBEP OLDUĞU HASTALIKLAR..... | 55 |
| 4.4.1. Dermatit..... | 56 |
| 4.4.2. Folliculitis | 56 |
| 4.4.3. Cilt Kanseri | 56 |
| 4.4.4. Solunum Rahatsızlıkları..... | 56 |
| 4.5. KESME SIVISI KULLANIMINA ALTERNATİF YÖNTEMLER..... | 57 |
| 4.5.1. Kuru İşleme | 57 |
| 4.5.2. Kriyojenik İşleme..... | 58 |
| 4.5.3. Minimum Miktarda Yağlama Sistemi ile İşleme | 58 |
| 4.5.3.1. Dâhili Minimum Miktarda Yağlama Sistemi | 60 |
| 4.5.3.2. Harici Minimum Miktarda Yağlama Sistemi | 61 |
| 5. DENEY TASARIMI VE TAGUCHİ METODU | 63 |
| 5.1. TAGUCHİ METODU | 63 |
| 5.2. TAGUCHİ FELSEFESİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ..... | 64 |
| 5.3. TAGUCHİ FELSEFESİ..... | 65 |
| 5.4. TAGUCHİ DENEY TASARIMI AŞAMALARI | 67 |
| 5.4.1. Faktör ve Etkileşimleri Belirleme | 67 |
| 5.4.2. Faktörlere Ait Seviyeleri Belirleme..... | 67 |
| 5.4.3. Uygun Ortogonal Dizini Belirleme..... | 68 |
| 5.4.4. Belirlenen Ortogonal Dizine Faktör ve Etkileşim Atama | 68 |
| 5.4.5. Deneyleri Yapma ve Sonuçları Kaydetme..... | 69 |
| 5.4.6. Deney Sonuçlarını Analiz Etme..... | 70 |
| 5.4.7. Varyans Analizi..... | 70 |
| 5.4.7.1. Kareler Toplamı..... | 71 |
| 5.4.7.2. Serbestlik Derecesi | 71 |
| 5.4.7.3. Varyans | 72 |
| 5.4.7.4. F Testi | 73 |
| 5.4.8. Doğrulama Deneylerinin Yapılması..... | 73 |
| 6. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI..... | 74 |
| 6.1. SÜPER ALAŞIMLAR VE WASPALOY'UN İŞLENEBİLİRLİĞİ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR..... | 74 |
| 6.2. MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR | 78 |

| | |
|---|------------|
| 6.3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ DEĞERLENDİRİLMESİ..... | 90 |
| 7. MATERYAL VE YÖNTEM..... | 92 |
| 7.1. DENEYLERDE KULLANILAN MATERYAL VE CİHAZLAR | 92 |
| 7.1.1. Malzeme | 92 |
| 7.1.2. Deney Numuneleri | 92 |
| 7.1.3. Kesici Takım ve Takım Tutucular | 93 |
| 7.1.4. Takım Tezgâhı..... | 95 |
| 7.1.5. Minimum Miktarda Yağlama Sistemi | 96 |
| 7.1.6. Deneylerde Kullanılan Diğer Soğutma-Yağlama Yöntemleri | 98 |
| 7.1.6.1. Konvansiyonel Soğutma-Yağlama Yöntemi | 98 |
| 7.2. DENEYSEL ÖLÇÜM VE ÖLÇÜM CİHAZLARI..... | 99 |
| 7.2.1. Kesme Kuvvetlerinin Ölçülmesi..... | 99 |
| 7.2.2. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi..... | 102 |
| 7.2.3. Takım Ömrünün Ölçülmesi..... | 105 |
| 7.2.3.1. Takım Ömrü Ön Deneyleri | 105 |
| 7.2.3.2. Esas Takım Ömrü Deneyleri..... | 106 |
| 7.3. DENEYSEL TASARIM VE KESME PARAMETRELERİ | 107 |
| 7.3.1. MMY Parametrelerinin Optimizasyonu İçin Deneysel Tasarım | 107 |
| 7.3.2. Karbür Takımlar ile İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu İçin Deneysel Tasarım | 109 |
| 7.3.3. Seramik Takımlar ile İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu İçin Deneysel Tasarım | 110 |
| 7.4. DENEY VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ | 112 |
| 8. BULGULAR VE TARTIŞMA | 114 |
| 8.1. MMY PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU | 114 |
| 8.1.1. Takım Ömrü..... | 114 |
| 8.1.1.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi | 117 |
| 8.1.1.2. ANOVA..... | 120 |
| 8.1.1.3. Regresyon Analizi | 120 |
| 8.1.1.4. Doğrulama Deneyleri | 121 |
| 8.1.2. Kesme Kuvveti | 123 |
| 8.1.2.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi | 125 |
| 8.1.2.2. ANOVA..... | 127 |

| | |
|--|------------|
| 8.1.2.3. Regresyon Analizi | 127 |
| 8.1.2.4. Doğrulama Deneyleri | 128 |
| 8.1.3. Yüzey Pürüzlülüğü | 130 |
| 8.1.3.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi | 131 |
| 8.1.3.2. ANOVA..... | 133 |
| 8.1.3.3. Regresyon Analizi | 133 |
| 8.1.3.4. Doğrulama Deneyleri | 134 |
| 8.1.4. Genel Değerlendirme | 136 |
| 8.2. KARBÜR KESİCİ UÇLARIN OPTİMİZASYONU | 136 |
| 8.2.1. Takım Ömrü..... | 137 |
| 8.2.1.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi | 139 |
| 8.2.1.2. Aşınmanın Karakterizasyonu | 144 |
| 8.2.1.3. ANOVA..... | 152 |
| 8.2.1.4. Regresyon Analizi | 153 |
| 8.2.1.5. Doğrulama Deneyleri | 154 |
| 8.2.2. Kesme Kuvveti | 155 |
| 8.2.2.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi | 157 |
| 8.2.2.2. ANOVA..... | 159 |
| 8.2.2.3. Regresyon Analizi | 160 |
| 8.2.2.4. Doğrulama Deneyleri | 161 |
| 8.2.3. Yüzey Pürüzlülüğü | 162 |
| 8.2.3.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi | 164 |
| 8.2.3.2. İşlenmiş Yüzeyin Karakterizasyonu | 166 |
| 8.2.3.3. ANOVA..... | 171 |
| 8.2.3.4. Regresyon Analizi | 171 |
| 8.2.3.5. Doğrulama Deneyleri | 173 |
| 8.2.4. Genel Değerlendirme | 174 |
| 8.3. SERAMİK KESİCİ UÇLARIN OPTİMİZASYONU | 175 |
| 8.3.1. Takım Aşınması | 176 |
| 8.3.1.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi | 178 |
| 8.3.1.2. Aşınmanın Karakterizasyonu | 182 |
| 8.3.1.3. ANOVA..... | 186 |
| 8.3.1.4. Regresyon Analizi | 187 |
| 8.3.1.5. Doğrulama Deneyleri | 188 |

| | |
|--|------------|
| 8.3.2. Kesme Kuvveti | 189 |
| 8.3.2.1. <i>Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi</i> | 191 |
| 8.3.2.2. ANOVA..... | 193 |
| 8.3.2.3. <i>Regresyon Analizi</i> | 193 |
| 8.3.2.4. <i>Doğrulama Deneyleri</i> | 194 |
| 8.3.3. Yüzey Pürüzlülüğü | 195 |
| 8.3.3.1. <i>Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi</i> | 197 |
| 8.3.3.2. <i>İşlenmiş Yüzeyin Karakterizasyonu</i> | 198 |
| 8.3.3.3. ANOVA..... | 202 |
| 8.3.3.4. <i>Regresyon Analizi</i> | 203 |
| 8.3.3.5. <i>Doğrulama Deneyleri</i> | 204 |
| 8.3.4. Genel Değerlendirme | 205 |
| 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 207 |
| 9.1. MMY DENEYLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ..... | 207 |
| 9.2. KARBÜR KESİCİ DENEYLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ..... | 208 |
| 9.3. SERAMİK KESİCİ DENEYLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ | 211 |
| 9.4. ÖNERİLER | 213 |
| 10. KAYNAKLAR | 215 |
| 11. EKLER | 233 |
| 11.1. EK 1: MALZEME SPESİFİKASYON RAPORU | 233 |
| ÖZGEÇMİŞ | 234 |

ŞEKİL LİSTESİ

| | <u>Sayfa No</u> |
|--|-----------------|
| Şekil 2.1. Ortogonal kesmenin şematik görünümü a) düzlem b) silinirik | 5 |
| Şekil 2.2. Talaş kaldırma esnasında oluşan deformasyon bölgeleri | 6 |
| Şekil 2.3. Ortogonal kesme mekaniği | 7 |
| Şekil 2.4. Eğik kesmenin şematik görünümü a) düzlem b) silinirik | 9 |
| Şekil 2.5. Eğik kesme geometrisi | 9 |
| Şekil 2.6. Eğik kesmede kuvvet, hız ve kayma diyagramları | 10 |
| Şekil 2.7. Frezeleme; aynı yönlü frezeleme (a) ve zıt yönlü frezeleme (b) | 13 |
| Şekil 2.8. Aynı yönlü çevresel frezeleme | 14 |
| Şekil 2.9. Zıt yönlü çevresel frezeleme | 14 |
| Şekil 2.10. Alın frezeleme işlemine kesici takım ve iş parçasına bağlı olarak kesme işlemi esnasında oluşan kesme kuvvetleri ve yönleri | 17 |
| Şekil 2.11. İşlenmiş yüzeyin yüzey karakteri | 19 |
| Şekil 2.12. Yüzey pürüzlülük dereceleri | 20 |
| Şekil 2.13. Referans çizgisi örneği | 21 |
| Şekil 2.14. Ortalama yüzey pürüzlülük değerinin grafiksel olarak elde edilmesi | 22 |
| Şekil 2.15. Tepe-çukur yükseklik parametreleri | 22 |
| Şekil 3.1. Jet motorunda kullanılan süper alaşımlar ve kullanım yerleri | 26 |
| Şekil 3.2. Süper alaşımların kullanım alanları | 27 |
| Şekil 3.3. Süper alaşımların işlenebilirlik sıralaması | 31 |
| Şekil 3.4. Waspaloy süper alaşımının mekanik özelliklere | 37 |
| Şekil 4.1. Kesme sıvısı kullanımının etkisi | 42 |
| Şekil 4.2. Kesme sırasında oluşan ısının kesme bölgesinden tahliye edilmesi | 50 |
| Şekil 4.3. Kesme sıvısının takım içinden uygulanması | 53 |
| Şekil 4.4. Kesme sıvısının takım dışından uygulanması | 54 |
| Şekil 4.5. Tek kanallı içten MMY sisteminin çalışma şeması | 60 |
| Şekil 4.6. Dâhili MMY sisteminin şematik gösterimi | 61 |
| Şekil 4.7. Harici püskürtmenin uygulanması | 62 |
| Şekil 5.1. Taguchi Metodunun Sistematiği | 66 |
| Şekil 5.2. Etkileşim grafik gösterimi | 68 |
| Şekil 7.1. Frezeleme deneylerinde kullanılacak numune boyutları | 93 |
| Şekil 7.2. Karbür uçlar için takım tutucu boyutları | 95 |
| Şekil 7.3. Seramik uçlar için takım tutucu boyutları | 95 |
| Şekil 7.4. Deney düzeneği | 96 |
| Şekil 7.5. Deneylerde kullanılan nozullar; 1 nolu nozul (a), 2 nolu nozul (b) | 98 |
| Şekil 7.6. KISTLER 9257B dinamometreye ait ölçüler | 100 |
| Şekil 7.7. Kesme kuvveti ölçümünde kullanılan deney numunesi ölçüleri | 101 |
| Şekil 7.8. Kesme kuvvetleri ölçmek için kurulan deney düzeneği | 102 |
| Şekil 7.9. Yüzey pürüzlülük ölçümü | 103 |
| Şekil 7.10. Optik profilometre ile ölçüm | 104 |
| Şekil 7.11. AM 4113ZT polarize dijital mikroskop ile ölçüm | 106 |
| Şekil 7.12. Frezeleme yönlerini gösteren şematik resim | 108 |
| Şekil 8.1. S/N oranları ana etki grafiği | 117 |
| Şekil 8.2. Giriş parametrelerine bağlı takım ömrü değişimi, a) Debi ve yağ tipi b) Frezeleme yönü ve püskürtme mesafesi c) Frezeleme yönü ve nozul tipi .. | 118 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 8.3. Eşit işleme süresi sonunda kesici takımlardaki aşınma durumu (x50)..... | 119 |
| Şekil 8.4. Ölçülen değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması. | 121 |
| Şekil 8.5. S/N oranları ana etki grafiği. | 125 |
| Şekil 8.6. Giriş parametrelerine bağlı kesme kuvvetleri, a) Debi ve yağ tipi b) Frezeleme yönü ve püskürtme mesafesi c) Frezeleme yönü ve nozul tipi... .. | 126 |
| Şekil 8.7. Ölçülen değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması. | 128 |
| Şekil 8.8. S/N oranları ana etki grafiği. | 131 |
| Şekil 8.9. Giriş parametrelerine bağlı yüzeydeki değişim, a) Debi ve yağ tipi b) Frezeleme yönü ve püskürtme mesafesi c) Frezeleme yönü ve nozul tipi... .. | 132 |
| Şekil 8.10. Ölçülen değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması. | 134 |
| Şekil 8.11. S/N oranları ana etki grafiği. | 139 |
| Şekil 8.12. Giriş parametrelerine bağlı olarak takım ömrü değişimi, a) Kesici takım tipi ve soğutma-yağlama yöntemi b) Kesme hızı ve ilerleme..... | 139 |
| Şekil 8.13. Karbür kesici uçların son aşınma fotoğrafları ve aşınma süreleri (x50)..... | 142 |
| Şekil 8.14. Aynı sürede karbür kesici uçların aşınma durumları (x50). | 143 |
| Şekil 8.15. Kuru işleme altında kaplama türünün aşınma üzerine etkisi (x50). | 144 |
| Şekil 8.16. Kaplama türü ve işleme zamanına bağlı aşınma miktarı. | 145 |
| Şekil 8.17. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve kuru işleme altında aşınmış kaplamasız karbür takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140. | 145 |
| Şekil 8.18. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve kuru işleme altında aşınmış kaplamasız karbür takıma ait EDX analizi. | 146 |
| Şekil 8.19. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve kuru işleme altında aşınmış PVD (TiAlN) kaplamalı karbür takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140. | 146 |
| Şekil 8.20. PVD (TiAlN) kaplamalı karbür takıma ait EDX analizi a)1 nolu bölge b)2 nolu bölge. | 147 |
| Şekil 8.21. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve kuru işleme altında CVD (TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN) kaplamalı karbür yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140. | 147 |
| Şekil 8.22. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve kuru işleme altında aşınmış CVD (TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN) kaplamalı karbür takıma ait EDX analizi a)1 nolu bölge b)2 nolu bölge c)3 nolu bölge. | 148 |
| Şekil 8.23. Farklı soğutma-yağlama yöntemleri altında kaplamasız karbür kesici uçların aşınma durumları (x50)..... | 149 |
| Şekil 8.24. Soğutma-yağlama yöntemi ve işleme zamanına bağlı aşınma miktarı..... | 149 |
| Şekil 8.25. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve kuru işleme altında aşınmış kaplamasız karbür takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140. | 150 |
| Şekil 8.26. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve kuru işleme altında aşınmış kaplamasız karbür takıma ait EDX analizi. | 151 |
| Şekil 8.27. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve ıslak işleme altında aşınmış kaplamasız karbür takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140. | 151 |
| Şekil 8.28. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve MMY sistemi altında aşınmış kaplamasız karbür takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140..... | 152 |
| Şekil 8.29. Ölçülen değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması. | 153 |
| Şekil 8.30. S/N oranları ana etki grafiği. | 157 |
| Şekil 8.31. Giriş parametrelerine bağlı olarak kesme kuvvetinin değişimi, a) Kesici takım tipi ve soğutma-yağlama yöntemi b) Kesme hızı ve ilerleme. | 157 |
| Şekil 8.32. Ölçülen değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması. | 161 |
| Şekil 8.33. S/N oranları ana etki grafiği. | 164 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 8.34. Giriş parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi, a) Kesici takım tipi ve soğutma-yağlama yöntemi b) Kesme hızı ve ilerleme. | 164 |
| Şekil 8.35. Kuru işleme ile elde edilmiş yüzeylerin iki boyutlu fotoğrafı, a) kaplamasız karbür, b) PVD (TiAlN) kaplamalı karbür c) CVD (TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN) kaplamalı karbür. | 167 |
| Şekil 8.36. Kuru işleme ile elde edilmiş yüzeylerin 3D yüzey topografyası, a) kaplamasız karbür, b) PVD (TiAlN) kaplamalı karbür c) CVD (TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN) kaplamalı karbür. | 168 |
| Şekil 8.37. Kaplamasız karbür takım ile elde edilmiş yüzeylerin iki boyutlu yüzey fotoğrafı, a) kuru işleme, b) ıslak işleme c) MMY ile işleme. | 169 |
| Şekil 8.38. Kaplamasız karbür takım ile elde edilmiş yüzeylerin 3D yüzey topografyası, a) kuru işleme, b) ıslak işleme c) MMY ile işleme. | 170 |
| Şekil 8.39. Ölçülen değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması. | 172 |
| Şekil 8.40. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve kuru işleme altında aşınmış farklı kaplamalı karbür takım yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Kaplamasız b) PVD (TiAlN) kaplama c) CVD (TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN) kaplama. | 174 |
| Şekil 8.41. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve soğutma-yağlama yöntemleri altında aşınmış kaplamasız karbür takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) kuru işleme b) ıslak işleme c) MMY sistemi ile işleme. | 175 |
| Şekil 8.42. S/N oranları ana etki grafiği. | 178 |
| Şekil 8.43. Giriş parametrelerine bağlı olarak aşınmanın değişimi, a) Kesici takım tipi ve soğutma-yağlama yöntemi b) Kesme hızı ve ilerleme. | 179 |
| Şekil 8.44. Seramik kesici uçların aşınma fotoğrafları ve aşınma miktarları (x50). | 181 |
| Şekil 8.45. Kuru işleme altında takviye türünün aşınma üzerine etkisi (x50). | 182 |
| Şekil 8.46. 700 m/dak kesme hızı, 0.06 mm/dev ilerleme ve kuru işleme ile aşınmış alümina esaslı takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140. | 183 |
| Şekil 8.47. 700 m/dak kesme hızı, 0.06 mm/dev ilerleme ve kuru işleme ile aşınmış whiskers takviyeli takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140. | 183 |
| Şekil 8.48. 700 m/dak kesme hızı, 0.06 mm/dev ilerleme ve kuru işleme ile aşınmış sialon esaslı takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140. | 184 |
| Şekil 8.49. Farklı soğutma-yağlama yöntemleri ile alümina esaslı seramik kesici uçların aşınma durumları (x50). | 184 |
| Şekil 8.50. 700 m/dak kesme hızı, 0.06 mm/dev ilerleme ve kuru işleme ile aşınmış alümina esaslı takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140. | 185 |
| Şekil 8.51. 700 m/dak kesme hızı, 0.06 mm/dev ilerleme ve ıslak işleme ile aşınmış alümina esaslı takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140. | 185 |
| Şekil 8.52. 700 m/dak kesme hızı, 0.06 mm/dev ilerleme ve MMY sistemi ile aşınmış alümina takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140. | 186 |
| Şekil 8.53. Aşınma için ölçülen değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması. | 188 |
| Şekil 8.54. S/N oranları ana etki grafiği. | 191 |
| Şekil 8.55. Giriş parametrelerine bağlı olarak kesme kuvvetinin değişimi, a) Kesici takım tipi ve soğutma-yağlama yöntemi b) Kesme hızı ve ilerleme. | 191 |
| Şekil 8.56. F _r için ölçülen değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması. | 194 |
| Şekil 8.57. S/N oranları ana etki grafiği. | 197 |
| Şekil 8.58. Giriş parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi, a) Kesici takım tipi ve soğutma-yağlama yöntemi b) Kesme hızı ve ilerleme. | 197 |
| Şekil 8.59. Kuru işleme altında elde edilmiş yüzeylerin iki boyutlu fotoğrafı, a) | |

| | | |
|-------------|---|-----|
| | alümina esaslı, b) whiskers takviyeli, c) sialon esaslı..... | 199 |
| Şekil 8.60. | Kuru işleme altında edilmiş yüzeylerin 3D yüzey topografyası, a) alümina esaslı, b) whiskers takviyeli, c) sialon esaslı..... | 200 |
| Şekil 8.61. | Alümina esaslı seramik takım ile elde edilmiş yüzeylerin fotoğrafı, a) kuru işleme, b) ıslak işleme c) MMY ile işleme..... | 201 |
| Şekil 8.62. | Alümina esaslı seramik takım ile elde edilmiş yüzeylerin 3D topografyası, a) kuru işleme, b) ıslak işleme c) MMY ile işleme..... | 202 |
| Şekil 8.63. | Ölçülen değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması. | 204 |
| Şekil 8.64. | 700 m/dak kesme hızı, 0.06 mm/dev ilerleme ve kuru işleme altında aşınmış takım yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Alümina b) Whiskers c) Sialon. | 205 |
| Şekil 8.65. | 700 m/dak kesme hızı, 0.06 mm/dev ilerleme ve soğutma-yağlama yöntemleri altında aşınmış alümina esaslı takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) kuru işleme b) ıslak işleme c) MMY sistemi ile işleme..... | 206 |



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

| | |
|--|-----|
| Çizelge 2.1. Kesici takımında görülen aşınma tipleri, nedenleri ve muhtemel sebepleri .. | 25 |
| Çizelge 3.1. Süper alaşımların sınıflandırılması..... | 28 |
| Çizelge 3.2. Ticari olarak bulunan nikel esaslı süper alaşımlar..... | 35 |
| Çizelge 3.3. Waspaloy süper alaşımının kimyasal bileşimi..... | 36 |
| Çizelge 3.4. Waspaloy süper alaşımının fiziksel özellikleri..... | 36 |
| Çizelge 3.5. Waspaloy'un sürünme kopmasına ait teknik özellikler..... | 37 |
| Çizelge 4.1. Kesme sıvılarının üretimdeki etkileri | 39 |
| Çizelge 4.2. Kesme sıvılarının sınıflandırılması..... | 43 |
| Çizelge 4.3. Kesme sıvılarının avantajları ve dezavantajları..... | 48 |
| Çizelge 6.1. MMY sisteminin kullanımı ile ilgili incelenen çalışmalar | 87 |
| Çizelge 6.1 (devam). MMY sisteminin kullanımı ile ilgili incelenen çalışmalar | 88 |
| Çizelge 6.1 (devam). MMY sisteminin kullanımı ile ilgili incelenen çalışmalar | 89 |
| Çizelge 7.1. Waspaloy alaşımının kimyasal bileşenleri. | 92 |
| Çizelge 7.2. Waspaloy alaşımının mekanik özellikleri..... | 92 |
| Çizelge 7.3. Waspaloy alaşımının fiziksel özellikleri..... | 92 |
| Çizelge 7.4. Karbür uçlar için kesici takım özellikleri. | 94 |
| Çizelge 7.5. Seramik uçlar için kesici takım özellikleri. | 94 |
| Çizelge 7.6. CNC dik işleme merkezinin özellikleri. | 95 |
| Çizelge 7.7. SKF marka MMY sisteminin teknik özellikleri. | 97 |
| Çizelge 7.8. Kesme yağlarının teknik özellikleri..... | 97 |
| Çizelge 7.9. Kistler 9257B dinamometrenin teknik özellikleri. | 101 |
| Çizelge 7.10. Yüzey pürüzlülük ölçümlerinin yapıldığı cihaza ait teknik özellikler. .. | 103 |
| Çizelge 7.11. Optik Profilometrenin Teknik Özellikleri. | 104 |
| Çizelge 7.12. AM 4113ZT polarize dijital mikroskobunun teknik özellikleri. | 107 |
| Çizelge 7.13. Deney girdi parametreleri..... | 108 |
| Çizelge 7.14. Taguchi L ₁₆ (4 ² 2 ³) dikey dizini..... | 108 |
| Çizelge 7.15. Çıktı parametrelerinin özeti. | 109 |
| Çizelge 7.16. Deney tasarımında kullanılan etkenler ve düzeyleri..... | 109 |
| Çizelge 7.17. Taguchi L ₂₇ dikey dizini..... | 110 |
| Çizelge 7.18. Çıktı parametrelerinin özeti. | 110 |
| Çizelge 7.19. Deney tasarımında kullanılan etkenler ve düzeyleri..... | 111 |
| Çizelge 7.20. Taguchi L ₂₇ dikey dizini..... | 112 |
| Çizelge 7.21. Çıktı parametrelerinin özeti. | 112 |
| Çizelge 8.1. Deney sonuçları ve S/N oranları..... | 116 |
| Çizelge 8.2. S/N yanıt tablosu. | 116 |
| Çizelge 8.3. Anova tablosu. | 120 |
| Çizelge 8.4. Takım ömrü için ortalama yanıt tablosu..... | 122 |
| Çizelge 8.5. Doğrulama deneyi sonuçları..... | 123 |
| Çizelge 8.6. Deney sonuçları ve S/N oranları..... | 124 |
| Çizelge 8.7. S/N yanıt tablosu. | 124 |
| Çizelge 8.8. Anova tablosu. | 127 |
| Çizelge 8.9. Kesme kuvveti için ortalama yanıt tablosu..... | 129 |
| Çizelge 8.10. Optimum sonuçlar ve doğrulama deneyleri..... | 130 |
| Çizelge 8.11. Deney sonuçları ve S/N oranları..... | 130 |

| | |
|---|-----|
| Çizelge 8.12. S/N yanıt tablosu. | 131 |
| Çizelge 8.13. Anova tablosu. | 133 |
| Çizelge 8.14. Yüzey pürüzlülüğü için ortalama yanıt tablosu. | 135 |
| Çizelge 8.15. Doğrulama deneyi sonuçları. | 136 |
| Çizelge 8.16. Deney sonuçları ve S/N oranları. | 138 |
| Çizelge 8.17. S/N yanıt tablosu. | 138 |
| Çizelge 8.18. Anova tablosu. | 152 |
| Çizelge 8.19. Takım ömrü için ortalama yanıt tablosu. | 154 |
| Çizelge 8.20. Doğrulama deneyi sonuçları. | 155 |
| Çizelge 8.21. Deney sonuçları ve S/N oranları. | 156 |
| Çizelge 8.22. S/N yanıt tablosu. | 156 |
| Çizelge 8.23. Anova tablosu. | 160 |
| Çizelge 8.24. Kesme kuvveti için ortalama yanıt tablosu. | 161 |
| Çizelge 8.25. Optimum sonuçlar ve doğrulama deneyi. | 162 |
| Çizelge 8.26. Deney sonuçları ve S/N oranları. | 163 |
| Çizelge 8.27. S/N yanıt tablosu. | 163 |
| Çizelge 8.28. Anova tablosu. | 171 |
| Çizelge 8.29. Yüzey pürüzlülüğü için ortalama yanıt tablosu. | 173 |
| Çizelge 8.30. Doğrulama deneyi sonuçları. | 174 |
| Çizelge 8.31. Deney sonuçları ve S/N oranları. | 177 |
| Çizelge 8.32. S/N yanıt tablosu. | 177 |
| Çizelge 8.33. Anova tablosu. | 187 |
| Çizelge 8.34. Takım aşınması için ortalama yanıt tablosu. | 188 |
| Çizelge 8.35. Doğrulama deneyi sonuçları. | 189 |
| Çizelge 8.36. Deney sonuçları ve S/N oranları. | 190 |
| Çizelge 8.37. Kesme kuvveti için S/N yanıt tablosu. | 190 |
| Çizelge 8.38. Anova tablosu. | 193 |
| Çizelge 8.39. Kesme kuvveti için ortalama yanıt tablosu. | 195 |
| Çizelge 8.40. Optimum sonuçlar ve doğrulama deneyi. | 195 |
| Çizelge 8.41. Deney sonuçları ve S/N oranları. | 196 |
| Çizelge 8.42. S/N yanıt tablosu. | 196 |
| Çizelge 8.43. Anova tablosu. | 203 |
| Çizelge 8.44. Yüzey pürüzlülüğü için ortalama yanıt tablosu. | 204 |
| Çizelge 8.45. Doğrulama deneyi sonuçları. | 205 |

KISALTMALAR

| | |
|--------------------------------|--|
| Al ₂ O ₃ | Alüminyum Oksit |
| ANOVA | Varyans Analizi / Analysis of Variance |
| ASTM | American Society for Testing and Materials (Amerika Test ve Malzeme Birliği) |
| BUE | Built Up Edge (Talaş Yapışması) |
| CBN | Cubic Bor Nitride (Kübik Bor Nitrür) |
| CI | Confidence Interval (Güven Aralığı) |
| CNC | Computer Numeric Control (Bilgisayarlı Sayısal Denetim) |
| CVD | Chemical vapour deposition (Kimyasal buhar biriktirme) |
| EDX | Energy Dispersive X-Ray Analysis |
| FY | Frezeleme Yönü |
| HSS | High Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği) |
| KT | Kesici Takım |
| MQL / MMY | Minimum Quantity Lubrication (Minimum Miktarda Yağlama) |
| NC | Numeric Control (Sayısal Denetim) |
| NT | Nozul Tipi |
| PAM | Plasma Assisted Milling |
| PVD | Physical Vapour Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme) |
| SEM / TEM | Scanning Electron Microscope (Tarama Elektron Mikroskobu) |
| SiC | Silisyum Karbür |
| Si ₃ N ₄ | Slikon Nitrit |
| S/N | Signal/Noise Rate (Sinyal/Gürültü Oranı) |
| SYT | Soğutma-Yağlama Yöntemi |
| TiAlN | Titanyum Alüminyum Nitrür |
| TiC | Titanyum Karbür |
| TiCN | Titanyum Karbon Nitrür |
| TiN | Titanyum Nitrür |
| TÖ | Takım Ömrü |
| YHK | Yüksek Hızda Kesme |
| YT | Yağ tipi |
| WC | Tungsten Karbür |

SİMGELER

| | |
|------------------------------------|--|
| a | Kesme derinliği, (mm) |
| Al | Alüminyum |
| B | Bor |
| C | Karbon |
| CFs | Yağ cinsi |
| Co | Kobalt |
| Cr | Krom |
| f | İlerleme hızı, (mm/dev) |
| F | Kesme kuvveti, (N) |
| F _a | Eksenele kuvvet, (N) |
| F _c , (F _y) | Teğetsel kuvvet, (N) |
| Fe | Demir |
| F _i , (F _x) | İlerleme kuvveti, (N) |
| F _r , (F _z) | Radyal kuvvet, (N) |
| HV | Vickers Sertliği |
| Mn | Manganez |
| Mo | Molibden |
| n | Devir sayısı, (dev/dak) |
| Ni | Nikel |
| P | Basınç, (kg/mm ²) |
| Pa | Pascal, (N/m ²) |
| Q | Debi, (ml/s) |
| R ² | Belirlilik katsayısı |
| Ra | Ortalama yüzey pürüzlülük değeri, (µm) |
| Rz | 5 en yüksek, 5 en alçak noktanın ortalaması (µm) |
| Ti | Titanyum |
| V | Kesme hızı, (m/dak) |
| V _B | Yan kenar aşınması, (mm) |
| Zr | Zirkonyum |
| µm | Mikron metre |
| γ | Talaş açısı, (°) |

ÖZET

WASPALOY SÜPER ALAŞIMININ FARKLI SOĞUTMA TEKNİKLERİ KULLANARAK FREZELEME YÖNTEMİ İLE İŞLENEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Çağrı Vakkas YILDIRIM

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Fehmi ERZİNCANLI

Temmuz 2017, 233 sayfa

Bu çalışmada, nikel esaslı Waspaloy süper alaşımının frezelenmesinde kesme parametrelerinin ve soğutma-yağlama tekniklerinin işlenebilirlik üzerindeki etkileri irdelenmiştir. İlk etapta kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği ve kesici takım sabit tutularak yağ tipi, debi, frezeleme yönü, püskürtme mesafesi ve nozul tipinin giriş parametresi seçildiği 16 deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sonucunda bitkisel yağ, 100 ml/s debi, zıt yönlü frezeleme, 25 mm püskürtme mesafesi ve 1 nolu nozul ile ana deneylerde kullanılacak minimum miktarda yağlama parametreleri belirlenmiştir. Ana deneyler için birinci grup kesici takım malzemesi olarak kaplamasız, PVD-TiAlN ve CVD - TiCN+Al₂O₃+TiN kaplamalı karbür seçilmiştir. Kesme parametresi; kesme hızı (30, 45, 60 m/dak), ilerleme (0.10, 0.15, 0.20 mm/dev) ve soğutma-yağlama yöntemi seçilmiştir. İkinci grup kesici takım malzemesi olarak alümina, whiskers ve sialon esaslı seramik uçlar belirlenmiştir. Kesme parametresi; kesme hızı (500, 600, 700 m/dak), ilerleme (0.02, 0.04, 0.06 mm/dev) ve soğutma-yağlama yöntemi seçilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen değerler için varyans analizi (ANOVA) yapılarak işleme parametrelerinin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü/aşınması üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda regresyon analizi aracılığı ile tahmin denklemleri oluşturularak gelecekte yapılması düşünülen benzer çalışmalar için tahmin modelleri elde edilmiştir. Sonuç olarak; karbür kesiciler için en yüksek takım ömrü ıslak işleme, PVD (TiAlN) kaplamalı karbür, 30 m/dak kesme hızı ve 0.1 mm/dev ilerleme ile çıkmıştır. En düşük kesme kuvveti değerini ıslak işleme, PVD (TiAlN) kaplamalı uç, 45 m/dak kesme hızı ve 0.1 mm/dev ilerleme vermiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü değerini ıslak işleme, PVD (TiAlN) kaplamalı uç, 45 m/dak kesme hızı ve 0.1 mm/dev ilerleme vermiştir. Seramik takımlar için en düşük aşınma değeri minimum miktarda yağlama (MMY), sialon uç, 700 m/dak kesme hızı ve 0.06 mm/dev ilerleme şartlarında gerçekleşmiştir. En düşük kesme kuvveti değerini MMY, sialon uç, 600 m/dak kesme hızı ve 0.02 mm/dev ilerleme şartları vermiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü değerini ise MMY, sialon uç, 700 m/dak kesme hızı ve 0.02 mm/dev ilerleme şartları vermiştir.

Anahtar sözcükler: Kesme Kuvveti, MMY, Takım Ömrü, Waspaloy, Yüzey Pürüzlülüğü.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MACHINABILITY OF WASPALOY SUPER ALLOY WITH MILLING METHOD USING DIFFERENT COOLING TECHNIQUES

Çağrı Vakkas YILDIRIM

Duzce University

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

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Fehmi ERZİNCANLI

July 2017, 233 pages

In this study, the effects of the cutting parameters and the cooling methods on the machinability in the milling of nickel based Waspaloy were investigated. In the first step, 16 experiments were carried out the input parameters of oil type, flow rate, milling direction, spray distance and nozzle type were selected while keeping the cutting speed, feed, depth of cut and cutting tool constant. As a result of these experiments, the minimum quantity of lubrication parameters which use for the main experiments with vegetable oil, 100 ml/h flow rate, up milling, 25 mm spray distance and 1 nozzle were determined. For the main experiments, Uncoated, PVD (TiAlN) and CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) coated carbide was selected as the first group cutting tool materials. As the cutting parameters; cutting speed (30, 45, 60 m/min), feed rate (0.10, 0.15, 0.20 mm/rev) and cooling method were selected. Alumina, whiskers and sialon based ceramic insert were determined as the second group of cutting tools. As a cutting parameter; cutting speed (500, 600, 700 m/min), feed rate (0.02, 0.04, 0.06 mm/rev) and cooling method were selected. The effects of cutting parameters on cutting force, surface roughness and tool life/wear were investigated by Variance analysis (ANOVA) was performed for values which obtained as a result of the experiments. As a result of the study, prediction equations are created through regression analysis and prediction models are obtained for similar studies that are thought to be done in the future. As a result; the highest tool life for carbide inserts was achieved with wet machining, PVD (TiAlN) coated carbide, 30 m/min cutting speed and 0.1 mm/rev feed rate. The lowest cutting force value was obtained by wet machining, PVD (TiAlN) coated tip, 45 m/min cutting speed and 0.1 mm/rev feed rate. The lowest surface roughness value was obtained by wet machining, PVD (TiAlN) coated carbide, 45 m/min cutting speed and 0.1 mm/rev feed rate. The lowest wear value for ceramic tools was obtained with Minimum Quantity Lubrication (MQL), sialon insert, 700 m/min cutting speed and 0.06 mm/rev feed rate. The lowest cutting force value obtained with MQL, sialon insert, cutting speed of 600 m/min and 0.02 mm/rev feed rate. The lowest surface roughness value was given with MQL, sialon insert, cutting speed of 700 m/min and 0.02 mm/rev feed rate parameters.

Keywords: Cutting Force, MQL, Surface Roughness, Tool Life, Waspaloy.

EXTENDED ABSTRACT

INVESTIGATION OF MACHINABILITY OF WASPALOY SUPER ALLOY WITH MILLING METHOD USING DIFFERENT COOLING TECHNIQUES

Çağrı Vakkas YILDIRIM

Duzce University

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

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Fehmi ERZİNCANLI

July 2017, 233 pages

1. INTRODUCTION:

Waspaloy, one of the nickel-based superalloys, is a super alloy having excellent high temperature resistance, wear resistance and oxidation resistance with the combination of nickel-cobalt-chromium-molybdenum alloys. Because of these superior mechanical properties, it is preferred intensively in industrial gas turbines, space vehicles, rocket engines, nuclear reactors, surgical applications and petrochemical industry. However, due to the mechanical properties that it possesses, it is in the difficult machinability materials class. For this reason, it is extremely important to use correct cutting parameters during machining of Waspaloy.

Increasing the quality of the parts to be produced and reducing the cost of them are only possible by optimizing the processing parameters. Implementation of experiment design methods provides significant advantages both in terms of time and cost. In this framework, the Taguchi method has emerged as a method that has achieved considerable success in solving problems. Through the Taguchi method, the variables used to reach the result were optimized and the number of experiments is significantly reduced. The cost of production resulting from the search for solutions through the trial and error method is significantly reduced in this way. It is aimed to increase the machining efficiency by using Taguchi method in this study. As a result of the optimization of the machining parameters of the nickel-based Waspaloy superalloy was obtained technological data that can be used by the industry regarding efficient machinability.

2. MATERIAL AND METHODS:

The way in which the machinability of Waspaloy is investigated and the way followed for making the assessment and conclusion were expressed detailed in step-by-step in the followings;

1. Materials for the experiments were prepared in dimensions of 150x100x21 mm.
2. Tests were carried out before starting the experiments and the most appropriate cutting parameters were determined.
3. Experiment design was prepared through Taguchi L_{16} orthogonal index in order to obtain minimum quantity lubrication (MQL) parameters. Whereas, in order to prepare the experimental procedure used in the main experiments, the L_{27} vertical index was chosen.
4. In order to determine optimum MQL parameters by means of the literature and preliminary experiments, cutting tool firm was determined in the form of uncoated carbide cutting tool, cutting speed (45 m/min), feed rate (0.1 mm/rev) and depth of cut (0.5 mm), during the experiments, and they were kept constant all the time.
5. Factors and levels in experiments that were conducted to find optimal MQL parameters were selected in a way as follows: Oil type (vegetable, synthetic, mineral, mineral-synthetic), Flow rate (25 ml/h, 50 ml/h, 75 ml/h, 100 ml/h), milling direction (down milling, up milling), spraying distance (25 mm, 50 mm) and nozzle type (type-1, type-2).
6. The main experiments were carried out separately on two different cutting tool materials as carbide cutting inserts and ceramic cutting inserts. As experimental input for carbide cutting tools, cutting speed (30 m/min, 45 m/min, 60 m/min), feed rate (0.1 mm/rev, 0.15 mm/rev, 0.2 mm/rev), cooling-lubrication method (dry, wet, MQL) and depth of cut (0.5 mm) were selected.
7. For ceramic cutting tools these conditions were selected in the form of cutting speed (500 m/min, 600 m/min, 700 m/min), feed rate (0.02 mm/rev, 0.04 mm/rev, 0.06 mm/rev), cooling method (dry, wet, MQL) and depth of cut (0.5 mm).
8. Cutting forces were measured by means of a dynamometer. The surface roughness of the treated surfaces was determined by surface roughness tester. After each pass, the microscope images of the cutting tool were taken and recorded.

9. The cutting tools used in the experiment are coded and the wear rates of their tips are illustrated by the scanning electron microscope (SEM) device.
10. An interpretative using multiple regression analysis technique was obtained by the help of experimental results. The interpretation results of this model were compared with the actual experimental results. In this way, the most appropriate forecasting model was put forward.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS:

The highest tool life for carbide cutters was achieved with a PVD (TiAlN) coated carbide tool with a cutting speed of 30 m/min and a feed rate of 0.1 mm/rev. The lowest cutting force value was obtained by wet machining, PVD (TiAlN) coated carbide tip, 45 m/min cutting speed and 0.1 mm/rev. feed rate. The lowest surface roughness value was obtained by wet machining, PVD (TiAlN) coated carbide tip, 45 m/min cutting speed and 0.1 mm/rev. feed rate. The lowest wear value for ceramic tools was realized with MQL, sialon-based tip, 700 m/min cutting speed and 0.06 mm/rev. feed rate. In the cutting force tests, the lowest cutting force value was achieved by MQL, sialon-based tip, 600 m/min cutting speed and 0.02 mm/rev. feed rate. The lowest surface roughness value was achieved by MQL, sialon-based tip, 700 m/min cutting speed and 0.02 mm/rev. feed rate parameters.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK:

The fact that vegetable oils more prone to form a thin oil film in the cutting zone than other types of oil, and thus reduces the friction and hence the wearing, provides to be more effective on tool life, cutting force and surface roughness than other oils. As long as the flow rate increases, it has a positive effect on machinability. Up milling gives better results than down milling. The effect of spray distance and nozzle type on machinability is very small. The best coating type was PVD-TiAlN coating according to the machinability tests with carbide tools. MQL provides close results with conventional machining for carbide tools. This indicates that the MQL system is an alternative to the conventional machining. MQL provided exceptionally good results in the chip removal process with ceramic tools on which conventional machining is not recommended. For this reason, the MQL system is definitely recommended for chip removal process with ceramic tools.

1. GİRİŞ

Kesici takımın kendi eksenini etrafında dönmeye karşılık iş parçasının doğrusal hareketi ile yapılan talaş kaldırma işlemlerine frezeleme denir [1]. Frezeleme, talaşlı imalat sektöründe kullanılan önemli bir talaş kaldırma yöntemidir ve otomotivden havacılığa, kalıpcılıktan savunma sanayine kadar endüstrisinin hemen her alanında yaygın olarak kullanılmaktadır [2]. Frezeleme yöntemi ile kanal açma, düzlem yüzey talaş kaldırma, dişli açma, cep işleme, delik büyütme, vida açma, helisel ve açılı yüzeyler elde etme, delik delme dâhil birçok talaş kaldırma işlemi yapılabilmektedir [3]. Frezeleme işleminde özellikle dayanımı yüksek süper alaşım türü malzemelerin işlenmelerindeki zorluklar nedeniyle kaplamalı takma uçlar yoğun kullanılmaktadır [4].

Yüksek sıcaklık alaşımları ya da süper alaşım diye adlandırılan malzemeler, yüksek dayanım-ağırlık oranı, yüksek sıcaklık altında özelliğini kaybetmeden çalışabilme ve korozyon dayanımı gibi özellikleri nedeniyle tercih edilmektedirler. Süper alaşımların tercih edildiği uygulamalar arasında jet motorları, türbin parçaları, fırın parçaları, cerrahi uygulamalar, kimyasal taşıma donanımları ve petrol rafineri elemanları gibi çalışma şartları ağır endüstri kolları bulunmaktadır. Tüm bu uygulamalar farklı ısı ve basınç altında gerçekleştirilmekte olup, bu şartlar altında özelliğini kaybetmeyecek malzemeye ihtiyaç duyulduğu için geliştirilmişlerdir [5], [6]. Süper alaşımlar, içeriğindeki element durumuna göre nikel, kobalt ve demir esaslı olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadırlar [7].

Nikel esaslı süper alaşımlar, başta nikel olmak üzere, önemli miktarlarda krom içeren alaşımlar olarak tanımlanmaktadır. Oksidasyon ve korozyon açısından yüksek dayanım ve direnç gerektiren uygulama alanlarında yaygın olarak tercih edilen nikel esaslı süper alaşımlar, temel alaşım elementi olarak kobalt, demir, molibden, tungsten ve tantal içerirler. Katı eriyik ve ikinci aşama intermetalik çökeltilme ile kuvvetlendirilmişlerdir. Alüminyum, titanyum ve niyobyum intermetalik oluşum elementleridir. Nikel esaslı süper alaşımlar, %30 ila %75 Ni ve %30'a kadar Cr içermektedirler. Nikel esaslı alaşımlar, dayanım veya korozyon direncini arttırmak için daha az miktarlarda alüminyum, titanyum, niyobyum, molibden ve tungsteni

bünyelerinde barındırmaktadırlar. Nikel ve krom kombinasyonu, bu alaşımlara önemli derecede oksidasyon dayanımı vermektedir. Nikel esaslı süper alaşımlar, özellikle 650°C'yi geçen sıcaklıklarda, mekanik dayanım açısından, paslanmaz çeliği geçmektedirler [8]. İmalat sanayinde geniş bir kullanım alanına sahip olan süper alaşımlar [9];

- Yüksek ısıl gerilim,
- Yüksek sertlik,
- Yüksek kesme kuvvetine gerek duyan işleme gerilmesi ve yüksek işleme sertliği,
- Yüksek ısılara sebebiyet veren düşük termal iletkenlik,
- Yüksek oranda aşındırıcı karbür partiküllerinin varlığı,
- Takım üzerine güçlü kaynama eğilimi ve yığıntı talaş(BUE) oluşumu

gibi özelliklere sahiptirler. Bu özellikleri nedeniyle de işlenebilirliği zor malzemeler arasında yer almaktadırlar [10].

İşlenebilirlik, talaş kaldırma işlemlerinde malzemeyi işlemedeki kolaylık ya da zorluk olarak ifade edilebilmektedir. Bir malzemenin işlenebilirliği, takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti gibi bileşenler ölçülerek tanımlanmaktadır. Çelik ya da paslanmaz çeliklerle karşılaştırıldıklarında süper alaşım malzemelerinin işlenebilirliği çok daha zordur [8], [11], [12]. Bu malzemelerde bulunan bazı elementler (Co, Ni, Cr, Ti) işlemeye karşı yüksek dayanım ve korozyon direnci oluşturmaktadırlar. Çünkü kobalt, nikel ya da titanyum bileşenleri parçaya sıcak sertlik eğilimi sağlamaktadır [13]. Ayrıca süper alaşımlar, sertlik ve yüksek sıcaklık dayanımı özelliklerinden dolayı kesme kuvvetini oldukça artırmaktadırlar. Bu nedenle, bu malzemelerin işlenirken kullanılan kesici takımlar ve kesme parametrelerine dikkat edilmesi gerekmektedir. Kaplamalı ve kaplamasız karbür kesici uçlar bu malzemelerin işlenmesinde kullanılabileceği gibi bazı uygulamalarda seramik veya CBN uçlar daha etkili sonuçlar verebilmektedir [5].

Kaliteli ve ekonomik üretimi etkileyen bir diğer unsur ise takım aşınmasıdır. Kesici takım malzemesi, kaplama malzemesi, kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme şartı gibi yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasını etkileyen birçok parametre vardır. Bu parametrelerin optimize edilerek minimum yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasının elde edilmesi işleme maliyetlerinin düşürülmesi adına büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle, son dönemde regresyon analizi, ANOVA ve Taguchi yöntemi gibi birçok istatistiksel model geliştirilmiştir. Bu modellerin amacı, işleme parametrelerinin analizini yapmak ve optimizasyonunu sağlamaktır [14].

Geliştirilen bu modellerden biri olan Taguchi, optimizasyon problemlerinin çözümünde yoğun olarak tercih edilen önemli bir tekniktir. Taguchi metodu, çözümü en az sayıda deneyle elde ederken yüksek kalitede proses ve ürün geliştirilmesini de sunmaktadır. Buna, ürünün üretim şartlarına ve faktörlere karşı minimum hassasiyeti göstermesi, gerekli toleransların en düşük maliyetle sağlanması ve Taguchi kayıp fonksiyonu sayesinde ürünün toplumda yol açtığı kaybı minimize ederek yeni bir kalite maliyeti anlayışı çerçevesinde değerlendirilmesi de dâhildir. Deneyleerde Taguchi metodu kullanılarak gereksiz yapılacak deneyleerden kaçınılmakta, böylece zaman ve maliyet tasarrufu sağlanmaktadır [15], [16].

Takım ömrü, ısı oluşumu, yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal doğruluk üzerinde önemli bir etkiye sahip olan bir başka unsur da kesme kuvvetleridir. Kesme kuvvetleri aynı zamanda takım tezgâhlarının, kesici takımların ve gerekli bağlama aparatlarının tasarımında da önemli bir etkendir [17], [18].

Talaş kaldırma işleminde kesme kuvvetlerinin belirlenmesi, aşağıda belirtilen nedenlerden dolayı büyük önem taşımaktadır;

- Takım tezgâhının talaş kaldırma sırasında harcadığı enerjinin tespit edilmesinde,
- Takım tezgâhının, takımların ve bağlama aparatlarının tasarımında ve boyutlandırılmasında,
- Tezgâh rijitliği ve boyutlarının hesaplanmasında,
- Kesme kuvvetlerine veya harcanan enerjiye bağlı olarak, talaş kaldırma sırasında optimizasyona dayalı adaptif bir kontrol sistemi oluşturmasında, kullanılmaktadır [19].

Yeni nesil malzemelerin ortaya çıkması ile birlikte imalat sürecini başarıya ulaştırmanın en önemli ayaklarından birisi de kesme sıvısı kullanımınıdır [20]. Klasik kesme sıvısı kullanımı, sıvı içerisinde bulunan kimyasalların doğaya zarar vermesi, insan sağlığını riske atması ve depolama, tedarik etme, atığı yok etme gibi safhalarından dolayı çevre, insan sağlığı ve üretim maliyetlerine olumsuz etkide bulunmaktadır. Avrupa otomotiv endüstrisinde yapılan araştırmalara göre işleme sürecinde kullanılan kesme sıvısı maliyeti toplam üretim maliyeti içerisinde önemli bir yer tutmaktadır [21].

İşletmeler üzerindeki üretim maliyetlerini düşürme baskısına çevre ve insan sağlığının korunma endişesi de eklenmesi araştırmacıları alternatif soğutma-yağlama yöntemi arayışına itmiştir. Kesme sıvısının miktarını azaltmak için kuru, kriyojenik, yüksek hızda

kesme (YHK) ve minimum miktarda yağlama (MMY) olmak üzere dört teknik kullanılmaktadır. Kuru kesme, çevre dostu bir imalat yöntemi olsa da yüksek işleme verimliliği, daha iyi yüzey kalitesi istendiği durumlarda ve zor kesme şartlarında etkinliğini kaybedebilmektedir [20]. Kriyojenik işleme de yüksek kesme hızlarında fark yaratacak sonuçlar verememektedir [22]. Bu nedenle kesme yağlarının çok küçük miktarda kullanıldığı yarı kuru kesme olarak da adlandırılan MMY sistemi pratik operasyonlar için çok önemli rol oynamaktadır.

MMY sistemi, çok az miktarda kesme yağının basınçlı hava yardımıyla kesme bölgesine püskürtülmesi prensibiyle çalışır ve kuruya yakın işleme yaptığı için çevre dostu bir teknik olarak bilinir. MMY sistemi, en genel tanımıyla çok az miktarda (10-150ml/s [23]) kesme sıvısının kesme bölgesine basınçlı hava desteği ve nozul yardımıyla püskürtülmesi olarak tanımlanabilir. Bir başka deyişle, konvansiyonel soğutma-yağlama sistemi ile arasında yaklaşık 1/10000 lik bir kesme sıvısı tasarrufu oluşmaktadır [24], [25].

Bu çalışmada, nikel esaslı Waspaloy süper alaşımının farklı kesme parametreleri, farklı kesici takım ve farklı soğutma-yağlama şartlarının kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkileri incelenerek optimum kesme şartlarının belirlenmesi hedeflenmektedir. Bu hedefler doğrultusunda kesme parametreleri olarak ilerleme, kesme hızı ve soğutma-yağlama yönteminin etkisi dikkate alınmıştır. Kesici takım olarak kaplamalı ve kaplamasız sementit karbür ve seramik takımlar kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kesici takımların aşınma miktarları taramalı elektron mikroskobu (SEM) aracılığıyla alınan görüntüler ile ortaya çıkarılmış ve deney sonucu elde edilen yüzeylerin pürüzlülük değerleri yüzey pürüzlülük cihazı ile ölçülmüştür. Bu bilgiler ile kesme hızı, ilerleme, kesici takım kalitesi ve soğutma-yağlama yöntemi arasındaki ilişki yorumlanmıştır. İşleme parametrelerinin optimizasyonunda Taguchi metodu esas alınmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen değerler için ANOVA yapılarak işleme parametrelerinin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca bağımlı değişkenler ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi ortaya koymak amacıyla regresyon analizi uygulanmıştır. Böylece nikel esaslı Waspaloy süper alaşımının frezelenmesinde optimum işleme şartları ortaya konulmuştur.

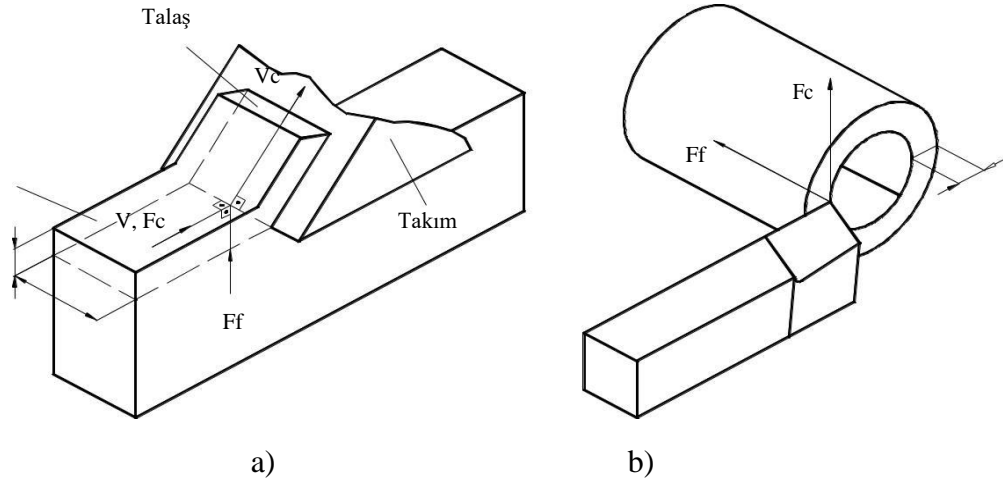
2. TALAŞLI İMALAT VE FREZELEME

2.1. KESME MEKANİĞİ

Metal kesme işlemlerinde kesme mekaniği ortogonal (dik) kesme ve oblik (eğik) kesme olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

2.1.1. Ortogonal (Dik) Kesme Mekaniği

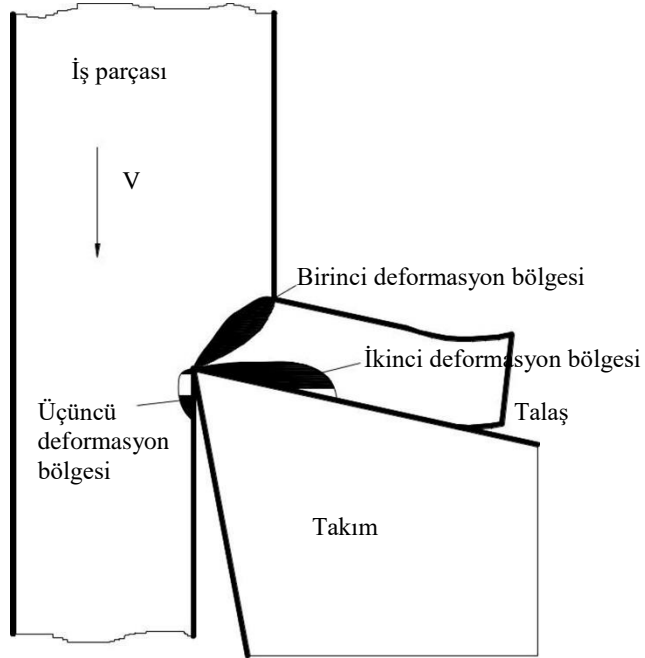
Talaş kaldırma işlemleri özünde üç boyutlu ve karmaşık bir yapıya sahip olmasına rağmen kesmenin mekaniğini açıklamak için iki boyutlu ortogonal kesme kullanılır. Ortogonal kesme işleminde kesme kenarı ile işlenen malzeme arasındaki açının dik olduğu ve talaşın bu şekilde kaldırıldığı kabul edilir. Daha karmaşık bir yapıya sahip olan üç boyutlu talaş kaldırma işlemlerinde kesme mekaniği ortogonal kesmenin temel alındığı, geometrik ve kinematik dönüşüm modelleri aracılığıyla elde edilir. Ortogonal kesme, kesme hızına dik bir kesici takımla talaş kaldırma işlemine benzer. Kesme işleminin kesme kenarı boyunca devam ettiği kabul edilir. Bu nedenle malzemenin kenarında yayılma meydana gelmez ve şekil değiştirme işlemi düz bir şekilde olur ve böylece kesme kuvvetleri sadece esas kesme kuvveti ve ilerleme kuvveti doğrultusunda ortaya çıkar. Şekil 2.1’de ortogonal kesme işleminin şematik görünümü verilmektedir [26].



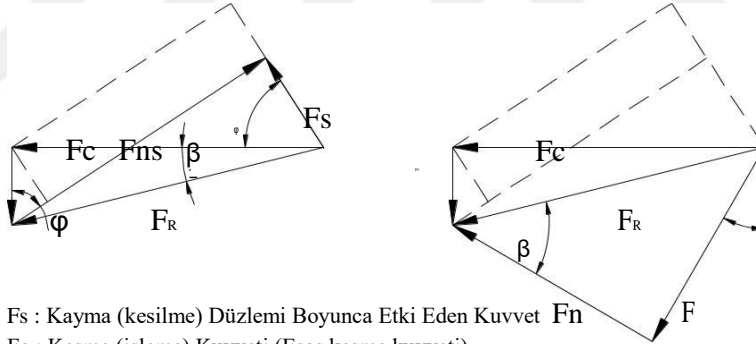
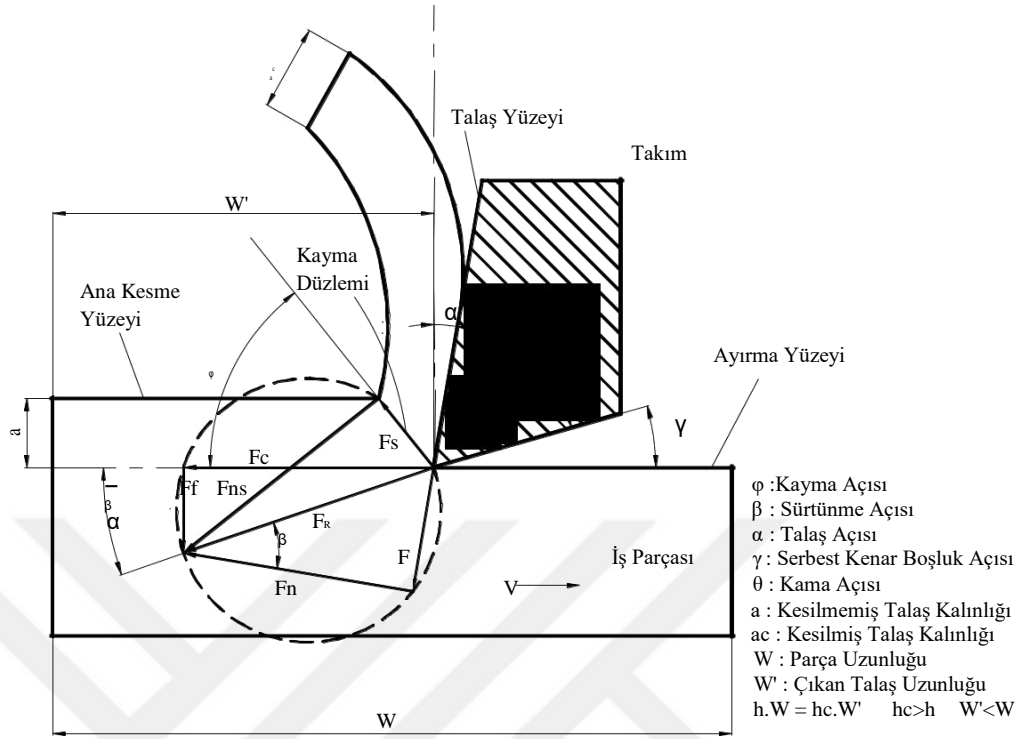
Şekil 2.1. Ortogonal kesmenin şematik görünümü a) düzlem b) silindirik [26].

Talaş kaldırma işleminde üç adet deformasyon bölgesi bulunmaktadır. Kesici uç iş

parçasına dalariken takımın malzeme içerisindeki hareketiyle talaş oluşmaya başlar ve böylece ilk kayma bölgesi meydana gelir. Kesme işlemi devam ettiğinde talaş kısmen şekil değiştirmeye başlar ve kesici takımın talaş yüzeyine sürtünmesiyle ikinci deformasyon bölgesi meydana gelir. Talaşın takıma yapışmasıyla bu bölgede bir yapışma meydana gelir. Bu bölgede devam eden ve sürekli olan kayma sürtünmesiyle talaş yüzeyinde talaş akması başlar. Sürecin sonunda talaş kesici takımdan ayrılır ve kesici takımla olan teması son bulur. Bu temasın uzunluğu kesme hızı, kesici takım geometrisi ve malzeme özelliklerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Günümüz talaş kaldırma teknolojisinde ana kesme bölgesini analiz etmek için iki tip yaklaşım bulunmaktadır. Bu yaklaşımlardan birincisi; Merchant'ın geliştirdiği ve ince tabakalar için kesme bölgesinin tahmin edilmesinde ortogonal kesme modelinin kullanıldığı yaklaşımdır. İkincisi ise Lee, Shaffer, Palmer ve Oxley'in kayma deformasyon bölgesinde "kayma açısı tahmini" yapabilmek için geliştirdikleri yaklaşımdır. Şekil 2.2'de talaş kaldırma esnasında ortogonal kesmede oluşan deformasyon bölgeleri şematik olarak verilirken Şekil 2.3'de ortogonal kesme mekaniği şematik olarak verilmiştir [26].



Şekil 2.2. Talaş kaldırma esnasında oluşan deformasyon bölgeleri [26].



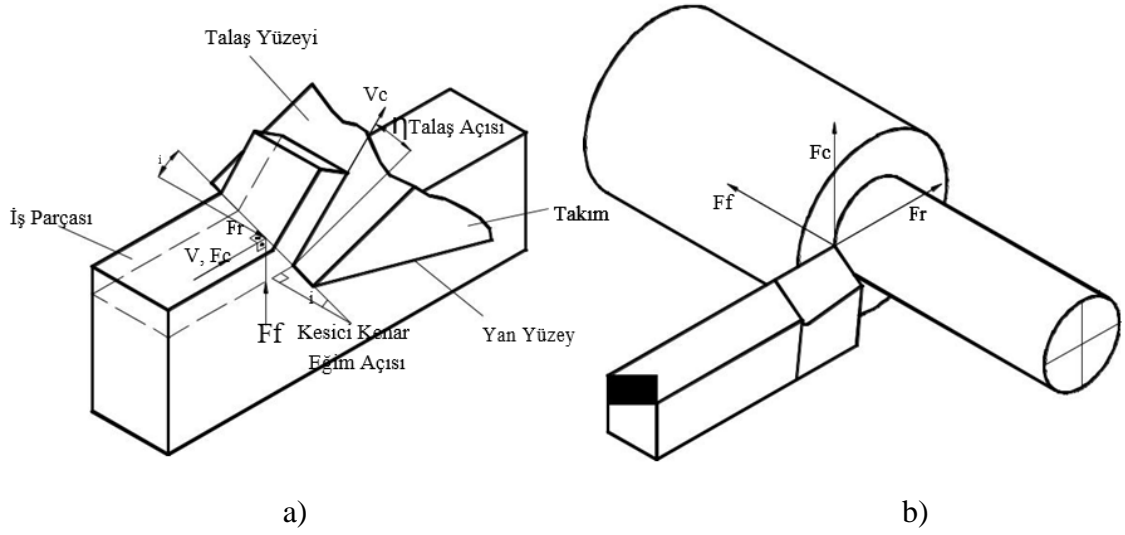
F_s : Kayma (kesilme) Düzlemi Boyunca Etki Eden Kuvvet F_n
 F_c : Kesme (işleme) Kuvveti (Esas kesme kuvveti)
 F_f : İlerleme Kuvveti
 F : Sürtünme Kuvveti
 F_R : F_c ile F_f Bileşke Kuvveti
 F_n : Sürtünme Vektörüne Dik Kuvvet
 F_{ns} : Kayma Kuvvetine Dik Kuvvet

Şekil 2.3. Ortogonal kesme mekaniği [26].

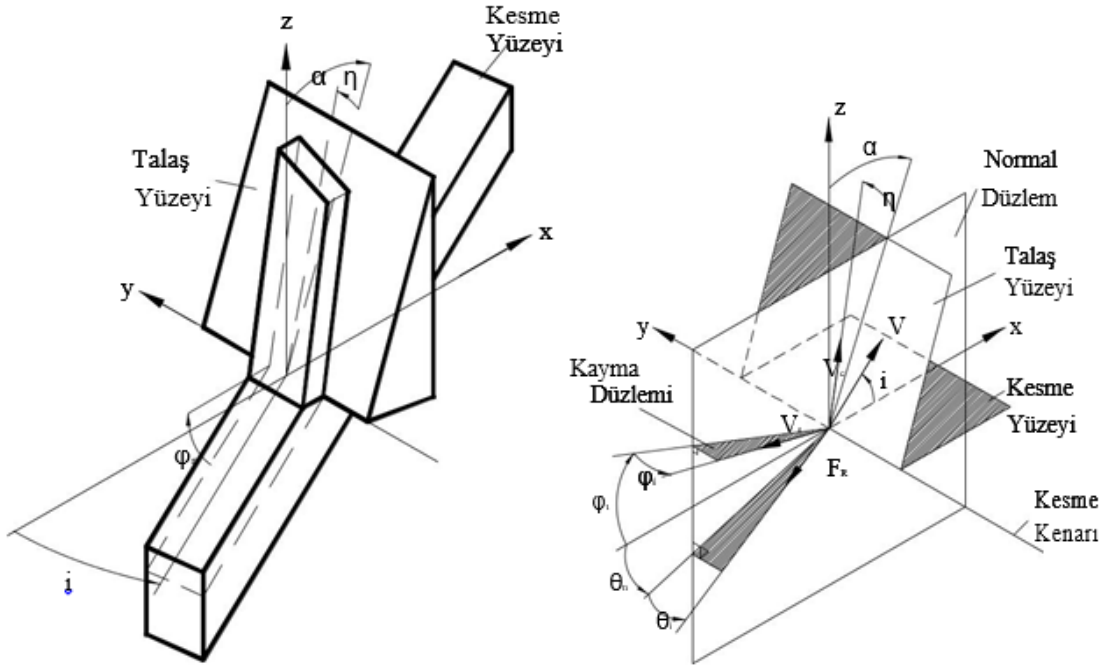
Şekil 2.3 incelendiğinde, deformasyonun kesme kenarının köşe olduğu, pay veya yarıçap bulundurmadığı ve kayma düzleminin son derece ince olduğu görülmektedir. Kayma gerilmesi ve normal gerilme kayma düzlemi boyunca devam etmektedir. Talaş üzerinde meydana gelen bileşke kuvvet kayma bölgesine uygulanmakta ve talaşın takım yüzeyine daimi sürtündüğü varsayılarak hesaplanmaktadır. Kesici takım kuvveti veya pasif kuvvet olarak adlandırılan kuvvet kaldırılmamış talaş doğrultusunda oluşurken esas kesme kuvveti kesme hızı doğrultusunda meydana gelmektedir [26].

2.1.2. Oblique (Eğik) Kesme Mekanığı

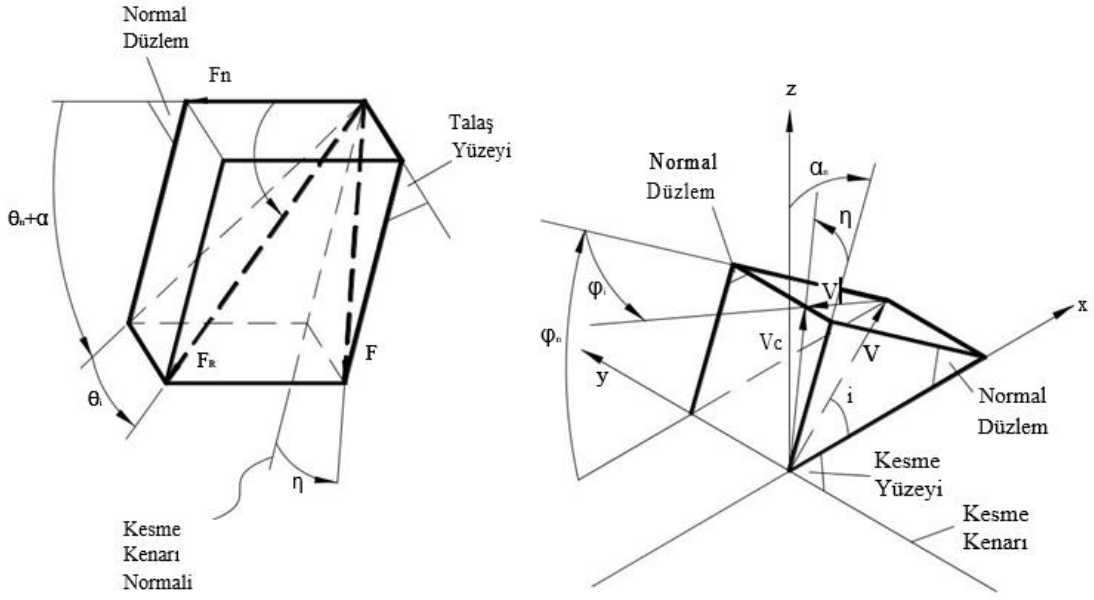
Ortogonal kesme işleminde kesme hızı kesme kenarına dik bir açı oluştururken eğik kesmede kesme kenarı ile normal düzlem arasında bir eğim bulunmaktadır (Şekil 2.4). Kesme kenarının normali ve kesme hızına paralel olan düzlem, normal düzlem veya P_n olarak belirlenebilir. Kesme esnasındaki talaş oluşumu, kesme hızına paralel devam eder ve kesme kenarına dik bir durum sergiler. Kesme hızının kesme kenarına dik olması kayma hızı ve talaş hızının da kesme kenarına dik olması demektir. Bileşke kuvvet ve kayma talaş yüzeyi bölgesindeki diğer kuvvetlerin tümü ortogonal kesmede aynı normal düzlemedir. Normal düzleme dik üçüncü doğrultuda bir kesme kuvveti yoktur. Eğik kesme işlemlerinde kesme hızı eğimlidir ve böylece kayma, sürtünme, talaş akışı ve bileşke kuvvet doğrultuları 3 kartezyen koordinatın bileşkeleridir. Eğik kesme geometrisinin gösterildiği Şekil 2.5 incelendiğinde x ekseninin kesme kenarına dik ve kesme yüzeyi üzerinde olduğu görülmektedir. Y eksenini kesme kenarıyla hizalıdır ve z eksenini xy düzlemine diktir. Eğik kesmede kuvvetler 3 doğrultunun tümünde de oluşmaktadır. Eğik kesmede önemli olan düzlemler kayma düzlemi, talaş yüzeyi, kesme yüzeyi xy, normal düzlem ise xz'dir. Normal düzlemdeki eğik kesmenin mekanığı ortogonal kesme ile aynıdır, dolayısıyla tüm hız ve kuvvet vektörleri normal düzlemde hesaplanır. Şekil 2.6'da kayma ve xy düzlemi arasındaki açı ϕ_n olarak isimlendirilmiştir. Kayma hızı kayma düzleminde oluşur, fakat normal düzlem üzerindeki kesme kenarının normal vektörüyle eğik kayma açısını (ϕ) oluşturur. Kesilen talaş, talaş akış açısı η ile talaş yüzeyi düzlemi üzerinden kalkar. Talaş, talaş yüzeyi arasındaki sürtünme kuvveti talaş akış doğrultusu ile aynı doğrultudadır. Z eksenini ile talaş yüzeyi üzerindeki normal vektör arasındaki açı normal talaş açısı α 'dır. Talaş yüzeyindeki sürtünme kuvveti ve normal kuvvet sürtünme açısı ile bileşke kuvveti oluşturur [26].



Şekil 2.4. Eğik kesmenin şematik görünümü a) düzlem b) silindirik [26].



Şekil 2.5. Eğik kesme geometrisi [26].



Şekil 2.6. Eğik kesmede kuvvet, hız ve kayma diyagramları [26].

2.2. FREZELEME MEKANİĞİ

Frezeleme işlemi, genel olarak dönme hareketi yapan çok sayıda kesici ağıza karşılık, iş parçasının öteleme hareketi yapmasıyla gerçekleştirilen bir talaş kaldırma yöntemi olarak tanımlanır. Bir başka tanıma göre de frezeleme işlemi, üzerinde kesici uçlar barındıran kesici takımın kendi eksenine etrafında dönmesi hareketine karşılık iş parçasının X, Y ve Z ekseninde ilerlemesi ile iş parçası üzerinden talaş kaldırma yöntemidir [26]. Frezeleme işlemi, diğer talaşlı imalat yöntemlerinden farklı olarak kesici takımda bulunan diş sayısına bağlı olarak verimliliği oldukça yüksek bir talaşlı imalat yöntemidir. İş parçası yüzeyinin işlenmesine göre frezeleme işlemleri, çevresel ve alın frezeleme olarak iki genel grupta incelenir. Bir torna takımında bulunan temel kesme açılarının aynısı, freze takımında da bulunur. Esasen bir freze çakısı; bir anlamda, silindirik bir bloğun çevresine, eşit aralıklarla monte edilmiş olan çok sayıda torna uçlarından başka bir şey değildir [27]. Bu nedenle işlem sırasında talaş kesit alanı devamlı değişir. Bunun için tornalama işlemine göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir [28]. Farklı frezeleme metodlarının bulunması münasebetiyle ilerleme yönleri takımın dönme eksenine göre değişiklik göstermektedir [29].

Freze tezgâhları, takımı taşıyan malafanın konumuna göre yatay, dikey ve universal freze tezgâhları olmak üzere üç ana grupta toplanmaktadır. Universal freze tezgâhları,

malafanın konumunun değişebilme özelliğinden dolayı hem dikey hem de yatay olarak kullanılabilen freze tezgâhlarıdır. Bir başka sınıflandırma yöntemi olan kumanda sistemine göre ise freze tezgâhları NC ve CNC freze tezgâhları olmak üzere ikiye ayrılırlar [30].

Frezeleme, düzgün yüzey ortaya çıkarmak için en yoğun olarak kullanılan yöntemler arasında günümüzde bile ilk sıradaki yerini korumaktadır [31]. Frezeleme yöntemi ile her çeşit kanal açma, düzlem yüzeylerden talaş kaldırma, dişli açma, cep işleme, delik büyütme, büyük adımlı vida açma, helisel ve açılı yüzeyler elde etme, kör delik delme, delik delme vb. birçok işlem son derece hızlı ve hassas olarak yapılabilmektedir [32], [33].

Farklı frezeleme metotlarının bulunması münasebetiyle ilerleme yönleri takımın dönme eksenine göre değişiklik göstermektedir [29]. Bu ilerleme yönlerine bağlı olarak frezeleme yöntemi, alın frezeleme, çevresel frezeleme veya aksenal yönde frezeleme şeklinde sınıflandırılabilir [35]. Frezeleme işlemi, iş parçasında yapılacak talaşlı işlemin şekline ve kesici takımın şekline göre çevresel veya alın frezeleme olarak isimlendirilmektedir [36].

Frezeleme ile yapılan talaş kaldırma işlemi, kesici takım ağız sayısının birden fazla olması, kesici takım çeşitliliği ve karmaşık kesme mekaniği nedeniyle oldukça zor bir talaş kaldırma yöntemidir. Freze tezgâhında talaş kaldırma işlemi, kullanılan kesici takımın çeşidine ve frezeleme yönüne göre adlandırılırlar. Genel olarak frezeleme işlemi ile talaş kaldırma yöntemini dört ana başlık altında incelenebilir:

- i. Silindirik vals freze çakısı ile çevresel frezeleme
 - Aynı yönlü çevresel frezeleme
 - Zıt yönlü çevresel frezeleme
- ii. Takma uçlu alın freze çakısı ile düzlem yüzeylerin frezelenmesi
 - Simetrik frezeleme
 - Asimetrik frezeleme
- iii. Form ve biçim freze çakısı ile frezeleme
 - Modül freze çakısı ile frezeleme
 - Değişik geometrilere sahip iç bükey ve dış bükey yüzeylerin frezelenmesi
- iv. Saplı freze çakısı ile frezeleme
 - Parmak uçlu freze çakısı ile frezeleme

- Küresel uçlu freze çakısı ile frezeleme [29].

2.2.1. Çevresel Frezeleme

Çevresel frezeleme, freze çakısı çevresinde yer alan kesici uçlar aracılığıyla yapılan frezeleme işlemidir. Bu yöntemle yapılan frezeleme sonucu ortaya çıkan talaşlar kıvrık ve virgül biçiminde olup talaş kesiti de sürekli değişmektedir. Bu yöntemde kesici takımın dönme eksenini ile kesilecek yüzey paralel konumdadır [31].

2.2.2. Alın Frezeleme

Alın frezeleme, işlenen yüzey eksenini ile kesici takım ekseninin birbirine dik olduğu hallerde yapılan frezeleme işlemidir. Bu yöntemde kesme işlemi, kesici takımın alın ve yan yüzeylerinde bulunan kesici ağızlar aracılığıyla gerçekleşir. Alın frezelemede kullanılan kesici uçlar yüksek hız çeliğinden (HSS) bir bütün olarak imal edilebildiği gibi sert maden takma uçlu kesiciler de kullanılabilir.

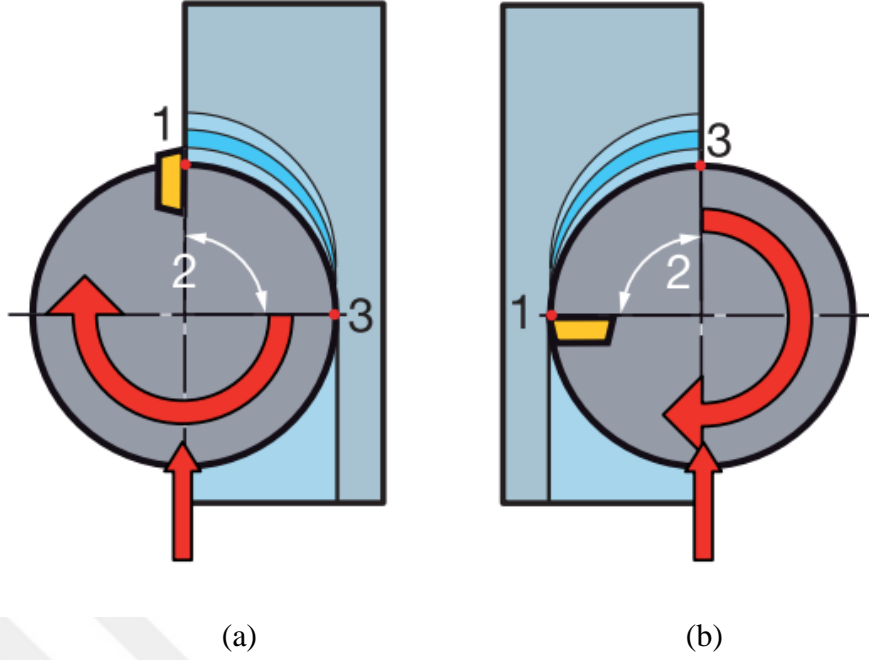
Alın frezeleme işleminde, işlenen yüzeyin genişliğine göre takımın konumu simetrik veya asimetric olabilir. Simetrik alın frezelemede frezenin yatay eksenini işlenen yüzeyin orta çizgisi ile çakışır. Asimetric alın frezelemede ise frezenin yatay eksenini, işlenen yüzeyin orta çizgisi ile çakışmaz [32]. Simetrik alın frezelemenin asimetric alın frezelemeden farkı, talaş oluşumu sırasında talaşta kalınlık farkı olmamasıdır. Buda aynı yönlü ve zıt yönlü frezeleme yönteminin uygulamasını ortadan kaldırır.

2.2.2.1. Simetrik Frezeleme Yöntemi

Simetrik frezeleme, kesici takım eksenini ile iş parçası ekseninin çakışması durumunda yapılan talaş kaldırma olayıdır. Bir başka deyişle, kesici takımın talaş kaldırdığı esnada iş parçasının tam ortasından hareket ettirilmesidir [37].

2.2.2.2. Asimetric Frezeleme Yöntemi

Kesici takımın dönme eksenini ile iş parçasının ilerleme yönündeki eksenini çakışmadığı durumlarda ortaya çıkan frezeleme yöntemine “asimetric frezeleme yöntemi” denir. Şekil 2.7’de aynı ve zıt yönlü asimetric frezeleme görülmektedir. Kesici takımın çapı iş parçasının işlenen yüzey genişliği (iş parçasının genişliği) ile aynı ise işlem tam kavramalı, eğer iş parçası genişliği daha küçük ise kısmi kavramalı frezeleme adı verilir [37].

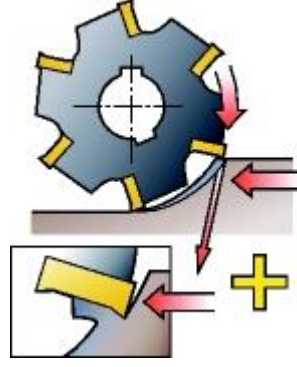


Şekil 2.7. Frezeleme; aynı yönlü frezeleme (a) ve zıt yönlü frezeleme (b) [33].

2.2.2.3. Aynı Yönlü ve Zıt Yönlü Frezeleme Yöntemi

Aynı yönlü frezeleme; talaş kaldırma sırasında freze çakısının kesme yönü ve iş parçasının ilerleme yönünün aynı olduğu durumlara denir. Bu tip frezelemede, daha az ısı oluşumu ve minimum deformasyon sertleşmesi eğilimi sayesinde, ezme etkisi oluşmaz. Kesme kuvvetleri iş parçasını kesici uca doğru çekerek kesici uç ile iş parçasının sürekli temasta kalmasını sağlar [35]. Talaş kalınlığının en yüksek olduğu an freze çakısının iş parçasına ilk battığı andır. Oluşan talaşın virgül şeklinde olması münasebetiyle azalan talaş kalınlığıyla birlikte kesme kuvvetinde de azalma görülür. Aynı yönlü frezeleme işlemi zıt yönlü frezeleme işleminden daha ekonomiktir. Ancak bu yöntemi uygulayabilmek için gerekli olan ilk şart, boşluksuz bir tabla miline sahip tezgâhtır [38].

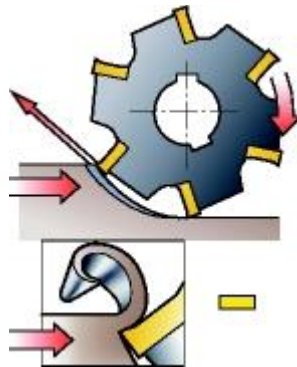
Aynı yönlü frezelemede, kesici uçlar veya dişler talaşı üstten kavradığı için iş parçasını bağlı olduğu tablaya doğru itmeye çalışacaktır. İlerleme esnasında, kesici dişlerin kaldıracağı bir devirdeki talaş miktarı bellidir. Bu miktar işlenmemiş yüzeyde maksimumken işlenmiş yüzeyde sıfıra düşer. Freze çakısı, bu mantıkla kesme yapacağından başlangıçta çok talaşa dalacak daha sonra talaş miktarı azalarak sıfıra inecektir. Başlangıçta bağlı olduğu mili esnetmeye çalışsa da talaş azalarak bittiğinden düzgün olarak dönen çakı pürüzsüz bir yüzey çıkarır. Şekil 2.8’de aynı yönlü çevresel frezeleme yöntemi gösterilmektedir [39].



Şekil 2.8. Aynı yönlü çevresel frezeleme [39].

Zıt yönlü frezeleme; talaş kaldırma sırasında freze çakısının kesme yönü ve iş parçasının ilerleme yönünün zıt olduğu durumlara denir. Kesici takım talaş kaldırma işlemine tabandan başlar ve en kalın talaş kesiti kesici uç iş parçası yüzeyine ulaştığında meydana gelir. Bu nedenle, en çok görülen kesici takım aşınma tiplerinden biri serbest yüzey aşınmasıdır. Kesici ağızların malzemeyi kavrama yolu üzerinde talaşın kalınlığı ve kesme kuvveti büyür. Oluşan talaş tipi yine virgül şeklindedir [39].

Zıt yönlü frezeleme yönteminin uygulanması sırasında çakı iş parçasını boyuna itmeye ve tabladan yukarıya doğru kaldırmaya çalışır. Kesme esnasındaki talaş kalınlığı parçanın üst yüzeyine doğru, düzgün olarak artacağından freze çakısında bir zorlanma meydana gelir. Bir başka deyişle, sıfır talaş kalınlığı ile başlayan zıt yönlü frezeleme işleminde, freze ile iş parçasını birbirinden ayırmaya çalışan, yüksek kesme kuvvetleri söz konusudur ve bu yüksek kesme kuvvetleri freze çakısını ciddi anlamda zorlayacaktır. Freze çakısındaki bu zorlanma malafa milini esnetmeye çalışır. Dolayısı ile iş parçasının yüzeyi, ilk bakışta görülmeyecek kadar dalgalı olur [39]. Şekil 2.9’da zıt yönlü çevresel frezeleme gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Zıt yönlü çevresel frezeleme [39].

Aynı yönlü ve zıt yönlü frezelemenin karşılaştırıldığında, aynı ve zıt yönlü frezeleme yöntemi ile talaş kaldırma işleminin, takım ömrü yüzey pürüzlülüğü, enerji sarfiyatı ve iş parçası bağlama kolaylığı gibi koşulları dikkate aldığımızda birbirlerine göre avantajlı ve dezavantajlı yönleri bulunmaktadır. Bu farklılıkları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz [32];

1. Zıt yönlü frezelemede kesme kuvveti ile iş parçasının karşı koyma kuvveti zıt olduğundan meydana gelen kesme kuvveti bileşkesi büyüdüğünden tezgâhın enerji sarfiyatı artmaktadır.
2. Kesme kuvvetinin başlangıçta en yüksek olması, aynı yönde frezeleme yöntemi için bir mahzurdur. Parçayı tablaya bastırmaya çalışması ise bir üstünlüktür. Bu sayede iş parçasının titreşimi azalacak ve yüzey kalitesi yükselecektir.
3. Döküm yoluyla elde edilen parçaların yüzeylerinde sert tabaka olduğundan aynı yönlü frezeleme yönteminde kesme dişi başlangıçta sert tabakaya nüfuz etmeye çalışır. Bu nedenle takım daha çabuk aşınır ve takım azalır.
4. Zıt yönlü frezeleme yönteminde diş daha yumuşak olan işlenmiş yüzeye nüfuz edecektir. Ancak kesme ağzının ucu çok azda olsa yuvarlatılmış olması nedeniyle diş ilkin kayacak ve daha sonra malzemeye nüfuz edecektir. Bu kayma takım aşınmasına ve takım ömrünün azalmasına neden olmaktadır.
5. Zıt yönlü frezeleme yönteminde talaş kaldırma esnasında iş parçasının yüzeyinde oluşan elastik ve plastik deformasyon etkisinden dolayı işlenen iş parçasının yüzey kalitesi iyi değildir.

2.3. FREZEDE İŞLENEBİLİRLİĞE AİT TERMİNOLOJİ

2.3.1. Kesme Kuvvetleri

Talaşlı imalat işlemlerinde kesme kuvvetinin tespiti ve analizi üretilen iş parçasının kalitesinin artması ve işleme maliyetlerinin düşürülmesi açısından oldukça önemlidir [40], [41]. Frezeleme işleminde talaş kaldırma esnasında ortaya çıkan kesme kuvvetleri talaş kalınlığının farklı olması ve devir sayısının değişken olması nedeniyle değişken ve geometrik olarak karmaşıktır. Bu nedenle kesme kuvvetlerinin kolay hesaplanabilmesi için pratikte ortalama talaş kalınlığına karşılık gelen ortalama kesme kuvvetleri dikkate alınır. Dolayısıyla kesme kuvvetleri, ortalama kesme kuvveti (F_c), ortalama radyal kuvvet (F_r) ve ortalama ilerleme kuvveti (F_f) olmak üzere üç bileşene ayrılır [42].

Aynı anda parçadan talaş kaldıran kesici uç sayısı;

$$Z_e = Z \cdot \frac{\varphi_s}{360} \quad (2.1)$$

Kesici takımlara ait ortalama kesme kuvvetleri;

$$F_c = Z_e \cdot F_{cz} \quad (2.2)$$

$$F_f = Z_e \cdot F_{fz} \quad (2.3)$$

$$F_r = Z_e \cdot F_{rz} \quad (2.4)$$

bağıntıları ile bulunur.

Helisel silindirik frezelemede F_c , F_r , F_f kuvvetlerine ek olarak eklesnel kuvvet olan F_a meydana gelir ve aşağıdaki bağıntıya göre hesaplanır;

$$F_a = F_c \cdot \tan \lambda \quad (2.5)$$

Alın frezeleme işleminde kesme kuvvetlerinin durumu, ortalama talaş kaldırma kuvvetinin (F_z) bileşenleri, ortalama kesme kuvveti (F_c) ve normal kuvvettir (F_n). F_n normal kuvvetin bileşenleri ise ilerleme kuvveti (F_f) ve radyal kuvvettir (F_r). Burada bir kesici uca karşılık gelen ortalama kesme kuvveti (F_{cz});

$$F_{cz} = A_s \cdot k_s = B \cdot h_m \cdot k_s \quad (2.6)$$

Bağıntısı ile bulunur. Kesici takıma karşılık gelen toplam ortalama kesme kuvveti ise;

$$F_c = Z_e \cdot F_{cz} = Z_e \cdot B \cdot h_m \cdot k_s \quad (2.7)$$

Bağıntısı ile bulunur. Burada;

Z_e : Aynı anda talaş kaldıran kesici uç sayısı,

B : Kesme derinliği,

h_m : Ortalama talaş kalınlığı,

k_s : Özgül kesme kuvveti'dir.

Teorik hesaplamalarda, ortalama radyal kuvvet (F_r) ve ortalama ilerleme kuvveti (F_f) deneylere dayanan aşağıdaki bağıntılara göre bulunabilir [42];

Simetrik frezelemede;

$$F_f = (0,3 \dots 0,4) \cdot F_c \quad (2.8)$$

$$F_r = (0,85 \dots 0,95) \cdot F_c \quad (2.9)$$

$$F_a = (0,5 \dots 0,55) \cdot F_c \quad (2.10)$$

Zıt yönlü asimetrik frezelemede;

$$F_f = (0,6 \dots 0,9) \cdot F_c \quad (2.11)$$

$$F_r = (0,45 \dots 0,7) \cdot F_c \quad (2.12)$$

$$F_a = (0,5 \dots 0,55) \cdot F_c \quad (2.13)$$

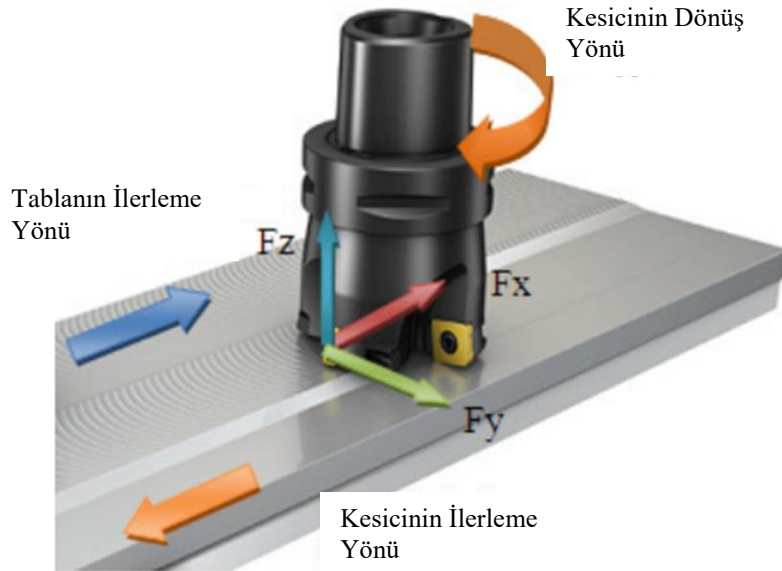
Aynı yönlü asimetrik frezelemede;

$$F_f = (0,15 \dots 0,3) \cdot F_c \quad (2.14)$$

$$F_r = (0,9 \dots 1) \cdot F_c \quad (2.15)$$

$$F_a = (0,5 \dots 0,55) \cdot F_c \quad (2.16)$$

Alın frezeleme işlemine kesici takım ve iş parçasına bağlı olarak kesme işlemi esnasında oluşan kesme kuvvetleri ve yönleri Şekil 2.10'da görülmektedir [41].



Şekil 2.10. Alın frezeleme işlemine kesici takım ve iş parçasına bağlı olarak kesme işlemi esnasında oluşan kesme kuvvetleri ve yönleri [41].

Kesme kuvvetlerini etkileyen faktörleri aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür [42];

- Frezeleme tipi
- Kesici takımın konumu
- İş parçası malzemesi
- Kesici takım geometrisi
- Talaş kalınlığı
- Kesici takım aşınma tipi
- Kesme parametreleri

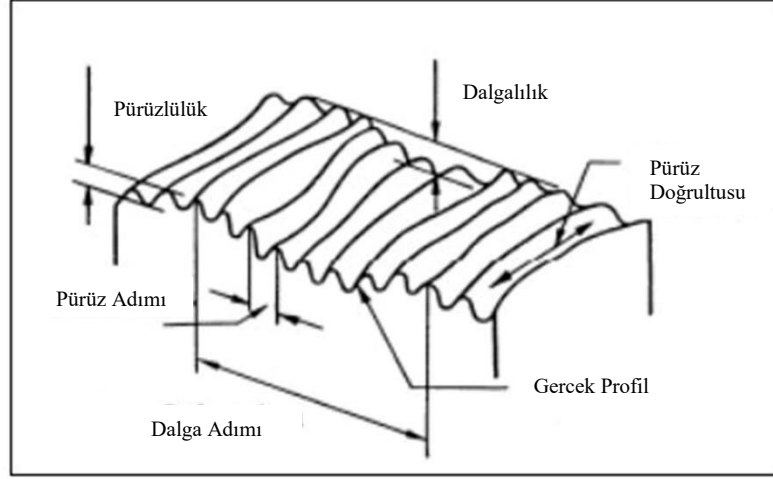
Frezeleme işleminden istenilen sonucu elde etmek için kesme kuvvetlerinin hesaplanması ve buna bağlı olarak da iş mili ve iş bağlama aparatının boyutlandırılması gerekmektedir. Kesme kuvveti ölçümleri iki farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bu sistemlerinden birincisi, adaptif kuvvet ölçme olarak adlandırılan, tezgâh kontrol sistemi veya kesicinin bağlı bulunduğu motordan alınan akım veya elektrik sinyallerinin analizi ile kuvvet ölçümünün gerçekleştirilmesidir. İkinci ölçme sistemi ise, iş parçası veya kesici üzerine yerleştirilen dönüştürücüler (gerinim ölçerler, yük hücreleri, dinamometreler) sayesinde kuvvet ölçümünün gerçekleştirilmesidir [41]-[43].

2.3.2. Yüzey Pürüzlülüğü

Talaş kaldırma işlemlerinde boyutsal doğruluğun yanında işlenmiş yüzeyin kalitesi de önemli bir yer teşkil etmektedir. İşlenmiş yüzeyin kalitesinin ölçülme kriteri olan yüzey pürüzlülüğü, kullanılan imalat yöntemleri veya başka etkenlerle ortaya çıkan mutad tarzda ve genellikle başka düzensizliklerle sınırlanan oldukça küçük aralıklı yüzey düzensizlikleridir. En uygun takım geometrisi ve kesme hızı ile sağlanabilen en iyi yüzey pürüzlülüğü ideal yüzey pürüzlülüğünü verir. Kesici takımda BUE oluşumu, titreşim ve takımın hatalı bağlanması gibi etkenler azaltılırsa ideal yüzey pürüzlülüğü sağlanabilir. Yüzey pürüzlülüğünün önem arz ettiği durumlarda pürüzlülük ölçümünün yapılması gerekir. Bunun için hem ülkemizde hem de uluslararası alanda standartlar belirlenmiş ve yüzey pürüzlülüğü ölçümü standartlara bağlanmıştır [44].

2.3.2.1. Yüzey Pürüzlülük Şekli ve İlişkili İfadeler

Yorulma ömrü, yataklık etme özelliği ve aşınma yüzey pürüzlülüğünün kontrolünde önem arz eden üç ana faktördür. Şekil 2.11'de işlenmiş bir yüzeyin bileşenleri görülmektedir.



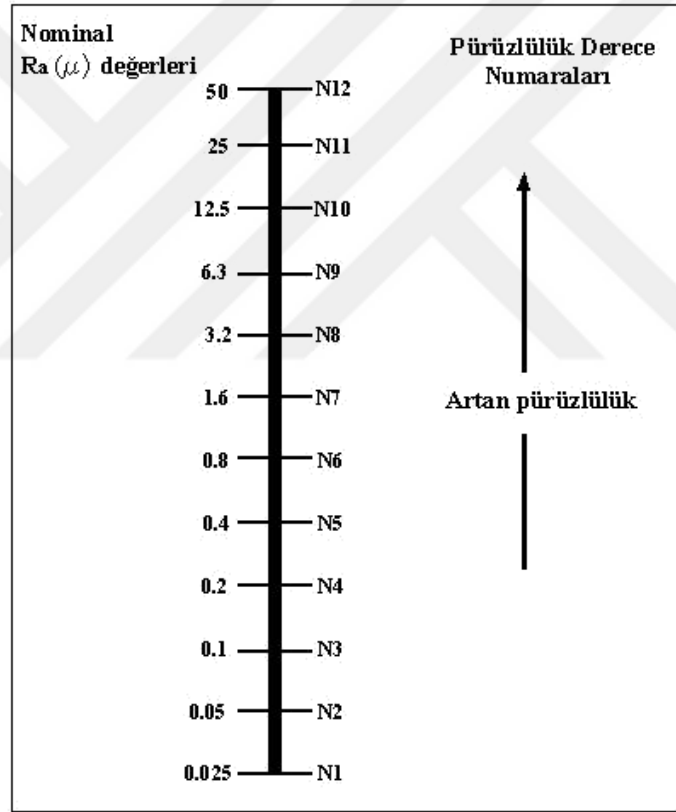
Şekil 2.11. İşlenmiş yüzeyin yüzey karakteri [44].

- Pürüzlülük: Başlangıç yüzey dokusudur ve yüzeyi oluşturan temel bileşendir. Bir başka deyişle, imalat işlemi sonucunda yüzeyde kalan izlerdir.
- Dalgalılık: Yüzey dokusunun ikinci bileşeni olup orta kısımda yer alır. Talaş kaldırma sırasında ortaya çıkan makine sapmaları, titreşim, salınım, gürültü ve malzemedeki kaynaklı olarak oluşur.
- Form: Yüzeyin bitiş dokusu olup en alt kısımda yer almaktadır. Yüzeyin genel şeklidir ve pürüzlülük ile dalgalılıktan dolayı meydana gelen form değişimlerinden çok fazla etkilenmemektedir. Ayrıca, yüzeylere ait ölçüsel doğruluğun kontrol edilmesinde kullanılmaktadır.
- Cepler: Yüzey dokusunda yer alan desenlerin yönünü belirleyen akış çizgileridir. Ceplerin yönü oldukça önemlidir, çünkü pürüzlülük ölçümü ceplerin yönüne göre belirlenir.
- Pürüzlülük aralığı: Yüzey dokusu içindeki en yüksek tepeler arasındaki kabul edilebilir paralel boşluklardır
- Dalga boşluğu: Ölçüm uzunluğu içindeki en yüksek tepeler arasındaki kabul edilebilir paralel boşluklardır [45].

2.3.2.2. Yüzey Pürüzlülüğünün Birimi ve Dereceleri

Yüzey pürüzlülüğünün ölçüsü “ μm ” ya da “ $\mu\text{inç}$ ” dir. Literatürde yaygın olarak “ μm ” (mikron metre) kullanılmaktadır. İşlenmiş bir yüzeye ait ortalama yüzey pürüzlülük değeri (R_a) performansı önemli ölçüde etkilemeksizin değişebilir, bundan dolayı uygun

olmayan bir tasarım dokusu üzerindeki çizimlerin adlandırılması için bilinen en iyi yöntem “yüzey pürüzlülük” derecelerinin oluşturulmasıdır. Bu bilgiye dayanarak, tolerans bantları ve “N” harfiyle Şekil 2.12’de gösterilen pürüzlülük dereceleri oluşturulmuştur. Pürüzlülük derecesi arttıkça yüzeyin kaba olma durumu artmaktadır. Her pürüzlülük derecesi Ra’nın iki katını göstermektedir ve bu değerler performansla uyum sağlayan geometrik işlemin sonucudur. Pürüzlülük derecelerinin her biri birçok uygulamada karşılaşılan işlemlerin performansını sergileyen en üst sınır değeridir. Örnek olarak, Ra değeri 0.6 μm olan bir yüzeyin pürüzlülük derecesi N5 ile N6 arasındadır ve bu değer N5 pürüzlülük derecesine ait olduğu Şekil 2.12’den görülebilir. Ayrıca, pürüzlülük derecelerinin kullanımı Ra’nın μm veya μm birimleriyle ölçüsel hale getirilmesinde de önemlidir [45].

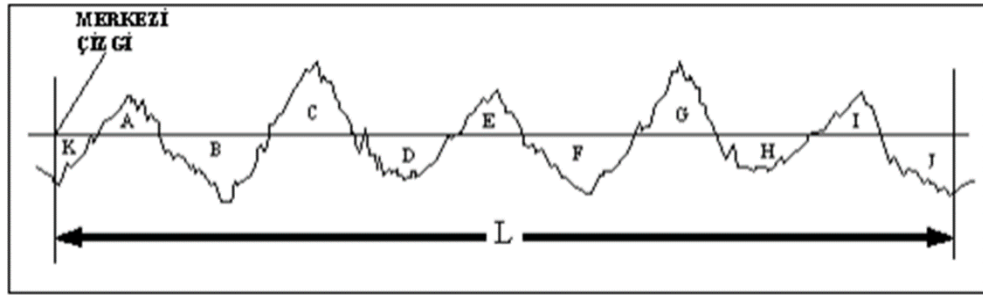


Şekil 2.12. Yüzey pürüzlülük dereceleri [44].

2.3.2.3. Yüzey Pürüzlülük Parametreleri

Yüzey pürüzlülük değeri sayısal olarak ifade edildiğinde yüzey profili yüzey profilinin karakteristiği ve fonksiyonelliğine göre, genlik parametreleri, boşluk-aralık parametreleri ve karma parametreler olmak üzere üçe ayrılmaktadır [45]. Bu üç kategori içerisinde yaklaşık olarak 45 yüzey pürüzlülük parametresi bulunmaktadır. Bunlardan bazıları;

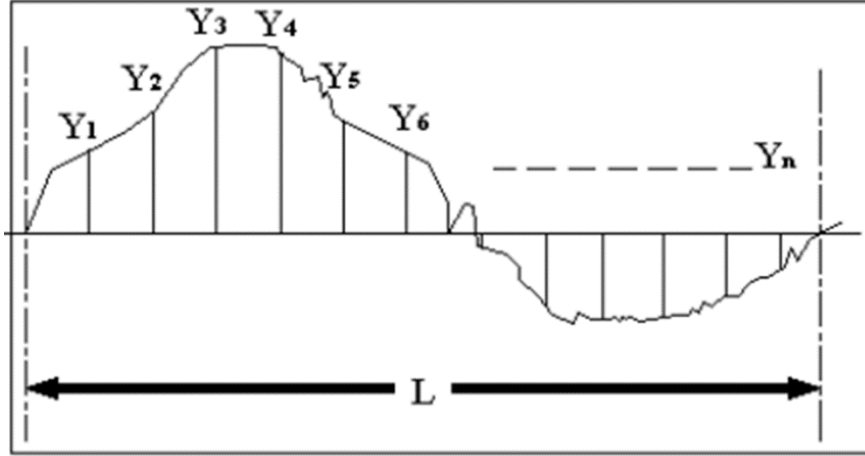
Referans çizgisi; yüzey pürüzlülük profilinin oluşturduğu olduğu tepe ve çukurları alanların toplamına eşit olarak bölen ortalama bir çizgidir. Yüzey pürüzlülüğünün niceliksel hale getirilmesi için ölçümlerin elde edildiği profil içindeki bazı düzlemlerin oluşturulması gereklidir. Yüzey metalürjisinde ağır metallerin ölçülmesi zordur, fakat gerçek şekilden elde edilen sapmalar ölçülebilir. Şekil 2.13’de referans çizgisinin çıkarılmasına ait bir örnek görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi referans çizgisi matematiksel olarak bir “L” numune uzunluğu boyunca mevcut profilin ürettiği tepe-çukur alanlarının eşit olarak ikiye ayrılmasını sağlar.



Şekil 2.13. Referans çizgisi örneği [45].

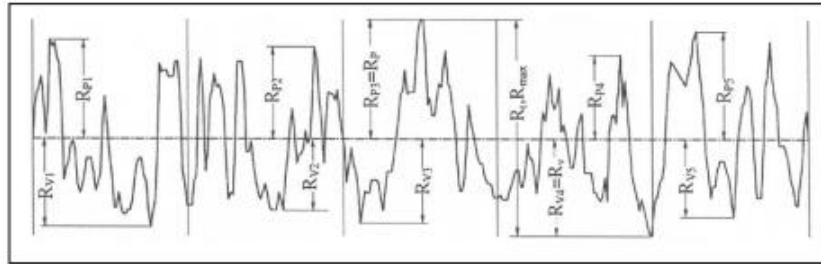
Ortalama pürüzlülük; ortalama pürüzlülük “Ra” ile gösterilir ve yüzey pürüzlülüğünün en önemli parametresidir. DIN/ISO 4287 uluslararası ölçüm standartlarına göre Ra sembolüyle ve “ μm ” birimiyle birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Ortalama pürüzlülük değeri ortalama merkez çizgi adıyla da literatürde yer alabilmektedir. Ortalama yüzey pürüzlülük parametresi numune uzunluğu boyunca profili referans çizgisinden ayıran pürüzlülük düzensizliklerinin ortalama mutlak değeridir [46].

Ortalama yüzey pürüzlülüğü, ölçüm uzunluğuyla birlikte kullanılmadığı sürece kendi başına anlamsızdır. Pürüzlülük değerinin tespit edilmesinde, 0.25 μm -0.8 μm -2.5 μm ’lik ölçüm aralıkları seçilebilir. Yüzey pürüzlülük değeri elde edilirken yapılan ölçüm, kesme yönüne daima dik olmalıdır. Şekil 2.14’de ortalama yüzey pürüzlülük değerinin elde edilmesinde kullanılan grafik verilmektedir.



Şekil 2.14. Ortalama yüzey pürüzlülük değerinin grafiksel olarak elde edilmesi [46].

Ortalama pürüzlülük; tepe-çukur yükseklik parametreleri, yüzey pürüzlülük profili içinde yer alan ve genellikle birlikte gösterilen temel parametrelerdir. Bu parametrelerden, R_p parametresi, Şekil 2.15'teki numune uzunluğunda yer alan ortalama çizgi üzerindeki profilin maksimum yüksekliğidir. R_v parametresi; Şekil 2.15'teki değerlendirme uzunluğunda yer alan ortalama çizginin altındaki profilin maksimum derinliğidir. R_y parametresi, değerlendirme uzunluğunda boyunca maksimum tepe-çukur yükseklik parametrelerinin en büyük değeridir. R_{3y} parametresinin hesaplanmasında; en yüksek üç tepe ile en düşük üç çukur arasındaki mesafe her numune uzunluğunda için hesaplanır ve daha sonra en yüksek üç mesafe üç noktalı yükseklik olarak kabul edilir [47].



Şekil 2.15. Tepe-çukur yükseklik parametreleri [47].

2.3.2.4. Yüzey Pürüzlülüğünün Önemli Olduğu Durumlar

Yüzey pürüzlülüğü birçok alanda önemlidir. Aşağıda bu alanlardan bazılarında değinilmiştir [44];

- Sürtülmeli yataklar,
- Korozyonlu ortamda çalışan parçalar,

- Yuvarlamalı yataklar,
- Boyanmış ve kaplanmış yüzeyler,
- Sızdırmazlık yüzeyleri,
- Plastik enjeksiyon kalıp yüzeyleri,
- Masterlar

2.3.2.5. Yüzey Pürüzlülüğüne Etki Eden Faktörler

Yüzey Pürüzlülüğüne etki eden faktörler [48];

- Kesici takımdaki titreşimler,
- Kesici takım geometrisi,
- İşlenen iş parçasında meydana gelen titreşim ve balans,
- İlerleme miktarı,
- Kesme hızı,
- Talaş derinliği,
- Kesici ucun üzerine talaş yapışması (BUE),
- İşlenen malzemenin süreksiz talaş vermesi,
- Bir önceki yüzey kalitesi,

Şeklinde sıralanabilir.

2.3.3. Takım Aşınması

ASTM G40-93 standartlarında aşınma, kullanılan malzemelerin, başka malzemelerle (katı, sıvı, gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulması olarak tanımlanmaktadır [49]. Bütün kesici takımlar talaş kaldırma işlemleri sırasında aşınır ve bu aşınma, kesici takımın ömrü tamamlanıncaya kadar devam eder. Kesici takım ömrü genellikle dakika cinsinden ifade edilir ve günümüzde takım ömrü eskiye nazaran daha azdır ve genellikle 15 dakika civarındadır [50]. Takım ömrü ilk başlarda sadece takımın daha fazla kesme yapmaması gibi genel bir ifade ile tanımlanmaktaydı. Günümüz teknolojisinde bu tanım yüzey dokusu, hassasiyet, takım aşınma biçimi, talaş oluşumu önceden kestirilebilir güvenli takım ömrü gibi yaygın parametrelerin toplamı olarak ifade edilmektedir [50].

Kesici takım ömrü takım geometrisini değiştirmeye çalışan çeşitli yüklerle belirlenir. Aşınma denilen olgu takım, iş parçası ve işleme şartları arasındaki karşılıklı etkileşimin

bir sonucu olarak görülmektedir. Aşınmanın ana nedeni olan yükler dörde ayrılmaktadır;

2.3.3.1. Mekanik Yük Faktörleri

Mekanik yüklerin statik bileşenlerinden başka talaş oluşum sürecinde oluşan çeşitli dinamik yüklerde oluşumu söz konusudur. Bunların en önemlileri değişen talaş derinliğinden, kesintili işlemeden kaynaklananlar ve frezelemede görülenlerdir [50].

2.3.3.2. Termal (Isıl) Yük Faktörleri

Talaş kaldırma işlemi talaş yüzeyi ve kesici uç yan yüzeyinde yüksek miktarlarda ısı oluşmasına sebep olur. Termal yük önemli ölçüde takım malzemesi üzerinde meydana gelir ve frezeleme işlemlerde kesici kenarlar iş parçasından ayrılırken ve tekrar girerken ortaya çıkan dinamik bir faktördür [50].

2.3.3.3. Kimyasal Yük Faktörleri

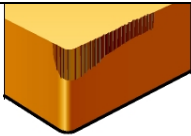
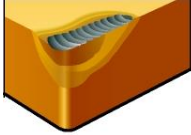
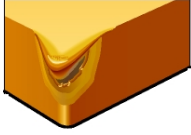
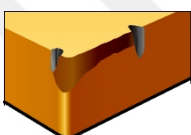
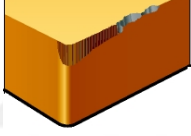
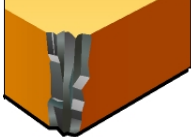
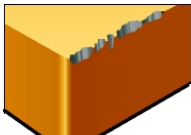
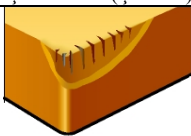
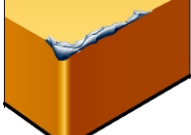
Talaş oluşumu-biçimlenmesi süreci devamlı olarak yeni bir metal ara yüzeyi oluşturulması anlamı taşır ve talaş biçimlenmesi sırasında takım malzemesi boyunca oldukça yüksek sıcaklık ve basınç altında zorlama vardır. Oluşan bölgeler metallerin kimyasal reaksiyonları ve difüzyon için oldukça uygun bir ortam hazırlar [50].

2.3.3.4. Aşındırıcı Yük Faktörleri

Pek çok iş parçası malzemesinin işlenmesi sırasında sertlikleri takım malzemesi ile karşılaştırılabilir kadar yüksek çeşitli tipte oldukça sert partiküller görülür. Daha sonra bunlar takım üzerinde taşlamadan daha çok aşındırma etkisi yapan bir sınır oluştururlar. Bu kalıntılar veya kabuk parçacıkları malzeme miktarının çok büyük kısmını oluşturmasalar bile işleme sırasında tüm işlenecek malzemenin kesici kenardan geçmesiyle hemen hemen daima değişen miktarlarda aşındırma görülür [50].

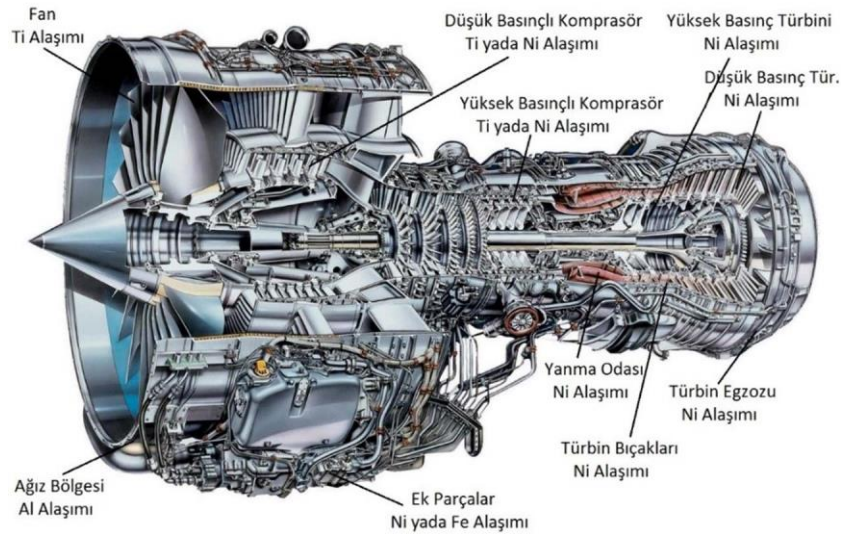
Bütün bunların ışığında aşınma, talaş yüzeyinde, yanakta ve serbest yüzeyde veya her üçünde de meydana gelebilir. Çizelge 2.1'de kesici takımında görülen aşınma tipleri, muhtemel sebepleri ve uygulanabilecek çözüm önerileri görülmektedir.

Çizelge 2.1. Kesici takımda görülen aşınma tipleri, nedenleri ve muhtemel sebepleri [41].

| Aşınma Tipleri | Muhtemel Sebepler | Çözüm Önerileri |
|---|---|--|
|  Yan Yüzey Aşınması | <ul style="list-style-type: none"> -Kesme hızı çok yüksek -Aşınma direnci yetersiz -Çok düşük ilerleme -Oksidasyon | <ul style="list-style-type: none"> -Kesme hızını azaltmak - Aşınma direnci daha yüksek olan bir kesici uç seçmek -İlerlemeyi artırmak |
|  Krater Aşınması | <ul style="list-style-type: none"> -Talaş yüzeyinde çok fazla işleme sıcaklarından kaynaklanan difüzyon | <ul style="list-style-type: none"> -Alüminyum oksit kaplı bir kesici uç seçmek - Pozitif uç geometrisine sahip bir kesici uç seçmek -Uygun sıcaklıklara ulaşıncaya kadar önce kesme hızını sonra da ilerlemeyi azaltmak |
|  Plastik Deformasyon | <ul style="list-style-type: none"> -Yüksek işleme sıcaklığı ile yüksek basıncın kombinasyonu | <ul style="list-style-type: none"> - Plastik deformasyona karşı dirençli bir kesici uç seçmek - Kesme hızı artırmak - İlerlemeyi azaltmak |
|  Çentik Aşınması | <ul style="list-style-type: none"> -Kesici uç geometrisi gevrek - Uç geometrisi çok zayıf - BUE oluşması | <ul style="list-style-type: none"> - Daha tok bir uç seçmek - Daha sağlam geometriye sahip bir uç seçmek - Kesme hızını artırmak veya pozitif bir geometri seçmek - Talaş kaldırma sürecinin başında ilerlemeyi azaltmak - Rijitliği artırmak |
|  Mekanik Yorulma Çatlakları | <ul style="list-style-type: none"> - Kesici kenarda aşırı yük değişimleri - Yüksek darbe veya titreşimle talaş kaldırmaya başlama | <ul style="list-style-type: none"> -Daha tok kalitede bir uç seçmek -İlerlemeyi azaltmak -Kesici ucun yanaşma şeklini değiştirmek -Rijitliği artırmak |
|  Kırılma | <ul style="list-style-type: none"> -Çok gevrek uç kalitesi -Uç üzerinde aşırı yük -Çok zayıf uç geometrisi -Çok küçük uç | <ul style="list-style-type: none"> -İlerleme ve talaş derinliğini azaltmak -Daha sağlam bir uç seçmek -Daha kalın ve geniş bir uç seçmek -Rijitliği artırmak |
|  Çentikleme (Çıtlama) | <ul style="list-style-type: none"> - Gevrek uç kalitesi - Çok zayıf uç kalitesi - BUE oluşması | <ul style="list-style-type: none"> -Daha tok kalitede uç seçmek -Daha sağlam bir uç kesmek -Kesme hızını artırmak -Yüksek ilerlemeyle talaş kaldırmaya başlamak -Rijitliği artırmak |
|  Termal Çatlaklar | <ul style="list-style-type: none"> -Kesikli işleme şartları -Değişen soğutma şartlarında meydana çıkan aşırı sıcaklık değişimlerinden kaynaklı termal çatlaklar | <ul style="list-style-type: none"> - Daha tok bir uç seçmek - Bol ve sürekli soğutma uygulanması veya hiç uygulanmaması -Kesme hızını artırmak -İlerlemeyi azaltmak |
|  Talaş Yığılması (BUE) | <ul style="list-style-type: none"> -Çok sünek iş parçası malzemelerinin kesici uca kaynaklanması -Düşük kesme hızı -Düşük ilerleme | <ul style="list-style-type: none"> -Daha uygun geometriye sahip uç seçmek - Pozitif uç geometrisine sahip uç seçmek - Kesme hızını artırmak -İlerlemeyi artırmak |

3. SÜPER ALAŞIMLAR

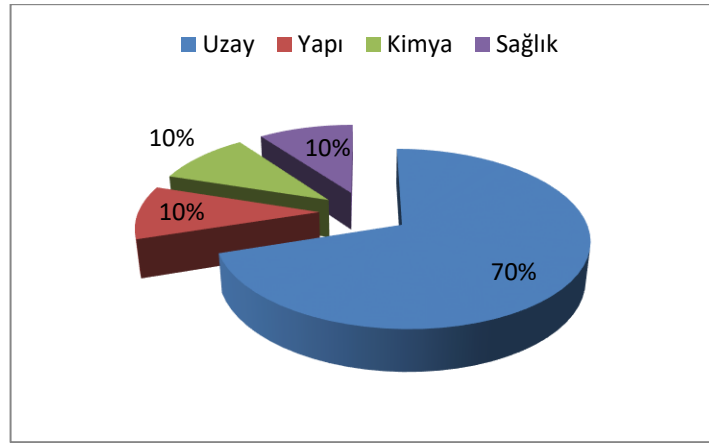
“Süper alaşım” terimi, yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet, yüksek korozyon direnci ve mükemmel aşınma direnci gösteren malzeme gruplarına verilen genel bir isimdir. Süper alaşım, bünyesinde yoğun olarak barındırdıkları element durumuna göre nikel esaslı, kobalt esaslı ve demir esaslı olmak üzere üç ana gruba ayrılırlar. Süper alaşım içerisinde genellikle, demir, nikel, kobalt ile bunlara nazaran daha az miktarlarda tungsten, molibden, tantal, niyobyum, titanyum ve alüminyum alaşımlarını içerirler. Süper alaşımların en önemli özellikleri 650°C'nin üstündeki sıcaklıklara uzun süre dayanmaları ve sıcaklığa bağlı korozyon ve aşınmaya karşı gösterdikleri yüksek dirençtir. Nikel ve kobalt esaslı süper alaşım yüksek sıcaklıklarda (1500-1650°C) yüksek mukavemete sahiptirler [7]. İlk nikel esaslı süper alaşım süper şarjlı turbo motorlar için 1940'larda üretilen Nimonic 80A'dır. Bu süper alaşım bir derecede ani sertleşme sağlayan titanyum takviyesi ile birlikte 80Ni-20Cr şeklinde geliştirilmiştir. Bugün modern bir jet motorunun ağırlıkça yaklaşık %50'si dövme ve döküm süper alaşımlardan oluşmaktadır [51]. Şekil 3.1'de bir jet motorunun bölümleri ve bu bölümlerde kullanılan süper alaşımlar verilmiştir [52].



Şekil 3.1. Jet motorunda kullanılan süper alaşımlar ve kullanım yerleri [52].

Süper alaşımlar, yüksek mukavemeti ve yapısal kararlılığı nedeniyle yüksek çalışma sıcaklıklarının büyük sorun teşkil ettiği havacılık sanayi ve nükleer enerji santrallerinde

ağırlıklı olarak kullanılsa da korozyon direnci, yüksek sıcaklık dayanımı, düşük ısıl genleşme, elektriksel direnç ve termal şoklara gösterdiği direnç gibi özelliklerden dolayı endüstriyel alanlarda geniş bir yelpazede kullanılmaktadır [53]. Eğer sektör sektör saymak gerekirse süper alaşımlar, jet türbin kanatçıkları, türbin diskleri, egzoz valfleri, zincir kancaları, ısı dönüştürücülerin başlıkları, valflerin ve pompaların gövdeleri, uzay araçları, nükleer teknolojiler, enerji sistemleri, gaz türbin motorları, cam sanayisi, sıcak takımlar ve kalıpların yapımı gibi birçok sektörde kullanılırlar [10]. Şekil 3.2’de süper alaşımların sektörlere göre kullanımına dair grafik verilmiştir [12]. Bu sektörlerde kullanılan süper alaşımlar, artan bilgi ve teknoloji sayesinde bugün 80’den fazla çeşittedirler [53].



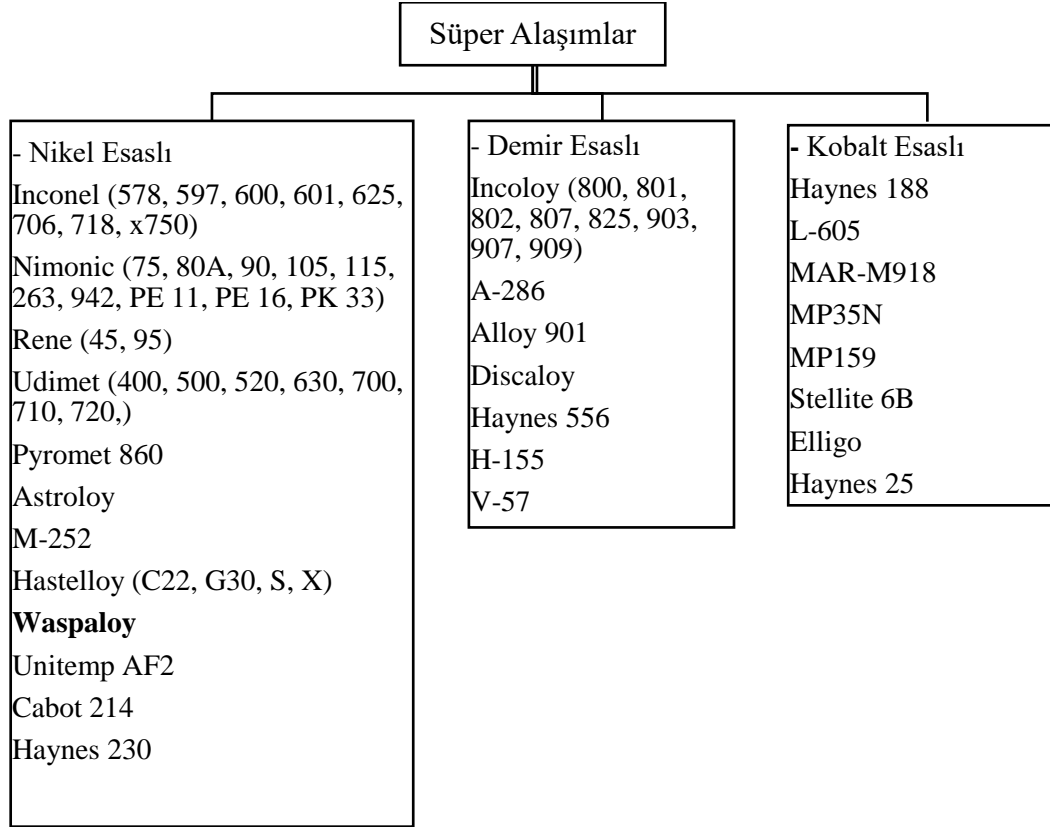
Şekil 3.2. Süper alaşımların kullanım alanları [12].

1960’ların sonuna gelindiğinde süper alaşımlardaki mukavemeti artırmak adına yapılan titanyum ve alüminyum takviyesinin daha fazla yapılamayacağı anlaşılmıştır. Bu durumla beraber katı eriyik malzemenin mukavemetini artırmak için titanyum-alüminyum oranlarının düşük tutulup yerine yüksek miktarda molibden-tantal içeren B-1900 döküm alaşımı geliştirilmiştir. Martin Metals firması, alaşımlarında molibden yerine tungsten kullanarak Mar-M 200 alaşımını geliştirmiştir. Fakat bu alaşımda orta düzey sıcaklıklarda yetersiz sürünme ve kopma mukavemetleri problemleri yaşanmıştır. 1969 yılına gelindiğinde Martin Metals firması Mar-M 200’deki bu problemi döküm alaşımı içeriğine yaklaşık %2 oranında hafniyum katarak aşmış ve ürünün patentini almıştır. Sonrasında hafniyumun yararlı etkisi Inco 713LC ve B1900 gibi birçok döküm alaşımda kullanılmıştır. Yüksek mukavemeti olan IN-100’ün ve sıcak korozyon direnci yüksek olan Udimet 500’ün birleştirilmesi ile IN-792 ve Mar-M 432 alaşımları oluşturulmuştur [54].

3.1. SÜPER ALAŞIMLARIN SINIFLANDIRILMASI

Süper alaşımlar, bünyelerinde barındırdıkları elementin yüzde olarak ağırlıklarına göre üç ana başlıkta toplanırlar.

Çizelge 3.1. Süper alaşımların sınıflandırılması [54].



3.1.1. Kobalt Esaslı Süper Alaşımlar

Ana bileşeni kobalt olan kobalt esaslı süper alaşımlar içerisinde önemli miktarda krom (%50-60) ve tungsten daha az miktarlarda ise molibden, niyobyum, tantalyum, titanyum ve demir içeren alaşımlar olarak tanımlanmaktadır. Bu alaşımların mukavetlendirme aşamaları katı solüsyon ve karbür olarak bilinmektedir [54].

Kobalt eriyik alaşımlar, kullanım yerine göre üç ana gruba ayrılırlar;

- Çalışma sıcaklıkları 650 ila 1150°C arasında olanlar (Haynes 25, Haynes 188, UMCo-50, S-816 gibi)
- 650°C civarında kullanılan MP-35N ve MP-259 bağlayıcı alaşımları
- Aşınma dirençli (Stellite 6B)

Kobalt bazlı süper alaşımların ikinci karbür safhaları veya intermalik bileşikler içerdiklerinden tam bir katı eriyik alaşımı sayılmazlar. Haynes 25, yaygın olarak gaz türbin motorlarının sıcaklığa maruz kalan kısımlarında, nükleer reaktör araçlarında ve soğuk çalışma şartlarında kullanılan iyi bilinen bir işlenmiş kobalt bazlı alaşımdır. Haynes 188, özellikle gaz türbinlerindeki yaprak tabaka halindeki parçalar için tasarlanmıştır. Lantan, silikon, alüminyum ve manganez içeriklerini kontrol eden basit oluşum 1100°C'ye kadar olan sıcaklıklarda oksidasyon mukavemeti olarak mükemmel kalite sunar. Yaklaşık olarak %21 Fe içeren UMCo- 50, Haynes 25 ve Haynes 188 kadar güçlü değildir [54].

Yüksek sıcaklığa ait son grup olan, katı solüsyon takviyeli kobalt alaşımlar Stellite 6B denilen tek bir element içerir. Bu alaşım yüksek sıcaklık sertliği ve oksidasyona nispeten iyi mukavemet gösterir. Sıcaklık sertliği, karmaşık karbür oluşumlarının sayesinde, yüksek krom içeriğinden türetilmiştir. Stellite 6B buhar türbinlerinde aşınma kalkanı olarak, gaz türbinlerinde aşınma pedleri olarak ve yüksek sıcaklık ve yüksek hızlarda partikül taşıyan tüp sistemlerinde bağlantı parçası şeklinde yaygın olarak kullanılmıştır. X-40, WI-52, MAR-M 302 ve MAR-M 509 gibi karbür safha takviyeli süper alaşımlar öncelikle statik pervane uygulamaları olmak üzere baskın olarak türbin motor hava folyolarında kullanılmıştır. Bu alaşımlar yeterli derecede yüksek sıcaklık mukavemetine, oksidasyon mukavemetine ve kaynakla tamir edilebilme yeteneğine sahiptir [7].

3.1.2. Demir Esaslı Süper Alaşımlar

Demir esaslı süper alaşımlar, içerisinde demir (%15-60), nikel (%25-45), yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direnci sağlaması için krom (%15-28) ve katı eriyik mukavetlenmesi için molibden (%1-6) gibi elementleri barındıran süper alaşımlardır [55]. Bunların yanında, çökeltme sertleştirilmesi işlemi ile sertleştirilebildiklerinden dolayı alüminyum, titanyum ve niyobyum mukavemet artırıcı çökelti oluşturmak için demir esaslı süper alaşımların bünyesinde bulunurlar. Kübik yüzey merkezli kafes yapısına sahip matriste alaşım elementlerine bağlı olarak çökelen fazlar, malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde etkin rol oynarlar [56].

Dayanımları nikel esaslı süper alaşımlara göre daha düşük olan demir esaslı süper alaşımlar, diğer süper alaşımlarla kıyaslandıklarında maliyetleri daha düşüktür ve pek çok gaz türbin motorlarında, kanatlarında, diskler ve şaftlar ile buhar türbinlerindeki bazı parçaların imalatında kullanılmaktadırlar [56].

Demir bazlı kategorisine girmeyen birçok süper alaşım önemli miktarlarda demir bulundurur. Çünkü bileşikleri demir, nikel, krom ve muhtemelen kobalt ile daha düşük miktarlarda molibden, tungsten veya duruma göre niyobyum bileşiklerinin karmaşık bir kombinasyonudur. Bazı örneklerde, demir-nikel oranları alaşımların nikel bazlı olarak adlandırılmasını gerektirmektedir. Bunun örnekleri, %16 Fe ve %49 Ni içeren katı eriyik takviyeli Hastelloy X ve %28.5 Fe ve %52 Ni içeren γ^1 takviyeli INCO 718 dir. Bu iki örnekte, alaşımlar bir alaşım katkısı olarak demir içeren nikel bazlı süper alaşımlar olarak sınıflandırılmışlardır. Bu tip diğer alaşımlar tam olarak tanımlanmamıştır [7].

3.1.3. Nikel Esaslı Süper Alaşımlar

Nikel esaslı süper alaşımlar genellikle nikel yoğunluğu yüksek (%30-75) olmakla beraber önemli miktarda krom (%30) içeren alaşımlar olarak tanımlanmaktadır. Bu iki elementin yanında kobalt, demir, molibden, tungsten ve tantal içerebilmektedirler. Katı eriyik ve ikinci aşama intermalik çöktürme ile kuvvetlendirilmişlerdir. Nikel ve krom elementlerinin kombinasyonu nikel esaslı alaşımların önemli derecede oksidasyon direnci verir. Özellikle 650°C'yi geçen yüksek sıcaklıklarda düşük alaşımlı çelikler ve paslanmaz çeliklerle kıyaslandığında daha iyi mekanik özellikler sergilemektedirler. Nikel esaslı süper alaşımlar, oksidasyon ve korozyona yüksek dayanım gereken yerlerde yaygın olarak kullanılan alaşımlardır [8]. Havacılık endüstrisinde türbin nozul uçlarında, türbin bıçaklarında, disklerinde ve diğer motor parçalarında yoğun olarak kullanılmaktadır [57], [58].

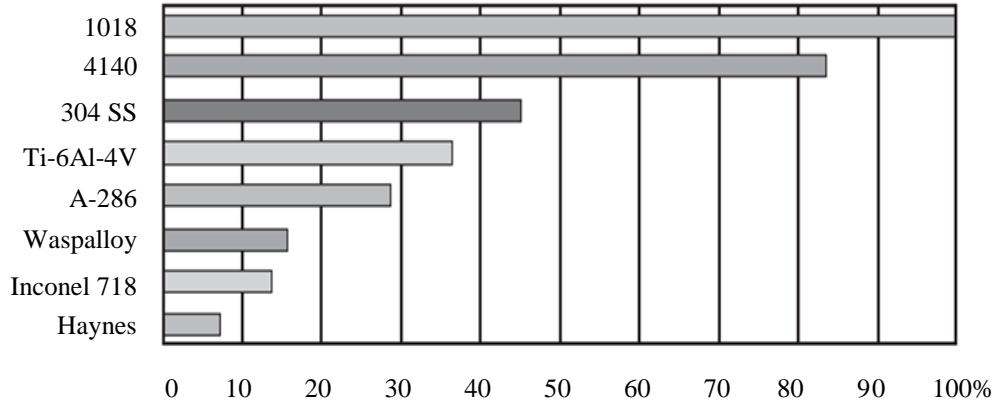
Nikel esaslı alaşımlar, içerisindeki elementlerin miktarlarına göre 7.8 ila 8.9 gr/cm³ arasında bir yoğunluğa sahiptirler. Nikel esaslı süper alaşımların içindeki alüminyum ve titanyum yoğunluk azaltıcı elementlerken atomik ağırlığı nikelden daha yüksek olan tungsten, molibden ve tantal yoğunluk artırıcı elementlerdir. Nikel esaslı süper alaşımlar erime sıcaklığına kadar alotropik dönüşümlere uğramayan istikrarlı bir östenitik, yüzey merkezli kübik yapıya sahiptirler [59].

Nikel esaslı süper alaşımlar aşağıdaki nedenlerden dolayı işlenebilirliği zor bir malzemedir [60];

- a) Takım aşınmasında önemli bir faktör olan ani sertleşmenin çalışma esnasında meydana gelmesi
- b) Alaşımlarındaki sert aşındırıcı maddelerin işleme esnasında kesici takımında abrasif aşınmaya neden olması

- c) Yüksek kesme sıcaklıklarında işlemede, kimyasal yapılarından dolayı alaşımla kesici takım arasında kimyasal reaksiyon meydana gelmesi ve bunun difüzyon aşınmasına neden olması
- d) Kesici takım malzemesiyle nikel esaslı süper alaşım arasında kaynak olma ihtimalinin yüksek olması
- e) Kontrol edilmesi zor olan sert ve sürekli talaş tipi nedeniyle kesici takımda krater aşınması oluşması
- f) Nikel esaslı alaşımların ısıl iletiminin düşük olmasından dolayı kesme bölgesinde yüksek sıcaklık oluşması

Bazı süper alaşımların işlenebilirlik sıralaması Şekil 3.3'te verilmiştir. Şekil incelendiğinde bir 4140 çeliğinin işlenebilirlik %80 üstü iken kobalt alaşımlarının yapısal özelliği nedeniyle Waspaloy süper alaşımlarının işlenebilirlik oranı %15 civarında kalarak işlenebilirliği en zor malzeme grubunda yer almaktadır [13].



Şekil 3.3. Süper alaşımların işlenebilirlik sıralaması [13].

3.1.3.1. Nikel Esaslı Süper Alaşımların Kimyasal Bileşenleri

Nikel esaslı süper alaşımların bileşenleri incelendiğinde genellikle %38-%76 oranında nikel, %27'ye kadar krom ve %20'ye kadar kobalt olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, mukavemet ve oksidasyon dayanımını artırmak için sıcaklığa karşı dayanımı olan tantal, tungsten ve molibden de eklenmektedir. Nikel esaslı alaşımlar dövme ve döküm olmak üzere iki şekilde üretilirler [61].

Dövme yöntemiyle üretilen nikel esaslı süper alaşımlar; içerisinde %80 nikel, %20 krom bulunduran dövme yöntemiyle üretilen nikel esaslı süper alaşımlar, elli yıldan uzun bir süredir elektrik direncinin gerektiği uygulamalarda kullanılmaktadır. 1940'lı yılların başında içerisine az miktarda alüminyum ve titanyum eklenerek korozyon ve oksidasyon

direnci artırılan bu süper alaşımlar türbin bıçak malzemesi olarak kullanılmışlardır. Daha sonra içerisine yaklaşık %20 kobalt eklenerek üretilen Nimonic 90'ın Nimonic 80A'ya çalışma sıcaklığında göre yaklaşık 50°C bir iyileşme elde edilmiştir [61].

Rene' 41 ve 95 yüksek mukavemetli ani sertleştirilmiş nikel esaslı süper alaşımlar, kaynaklı imalatlarda kullanılırlar. Demir içeriği de yüksek olan Inconel 718, orta sıcaklık mukavemetinin yanı sıra kaynaktaki gerilimlere iyi direnç sağlar. Incoloy 901 de demir ağırlığı olan nikel esaslı süper alaşımlardan biridir. Nikel ağırlığı yüksek olan Waspaloy ve Astroloy gibi alaşımlar türbin disklerinin imalatı sırasında ortaya çıkan yüksek sıcaklıklara iyi direnç gösterdikleri için bu alanda çok yoğun olarak kullanılmaktadırlar [60].

Döküm yöntemiyle üretilen nikel esaslı süper alaşımlar; döküm yöntemiyle nikel esaslı süper alaşımların imalatı vakum altında eritme ve döküm teknolojisinin gelişmemesi nedeniyle 1950'lerin sonuna kadar yaygın olarak uygulanamamıştır. Vakum altında eritme ile üretilen ilk nikel esaslı süper alaşım Inco 713C'dir [57], [58]. Süper alaşımların kimyasal bileşenleri, bileşen türüne göre sıcaklık kapasiteleri üzerinde farklı etkiler yaratmaktadır [8] .

3.1.3.2. Nikel Esaslı Süper Alaşımların Güçlendirilmesi

Nikel esaslı süper alaşımların güçlendirilmesi katı eriyik güçlendirmesi, çökelterek sertleştirme ve dağılım sertleştirme yöntemleriyle olmaktadır [8].

Katı eriyik güçlendirmesi; östenitik süper alaşımlar, içerdikleri sağlam alaşım ilaveleri nedeniyle katı eriyikte güçlendirme, sürünme dayanımı ve yüzey bozulmalarına karşı dayanım gösterirler. Bunun yanında, termo-mekanik işlem ve ısıl alaşım sonucu intermetalik bir yapının küçük ve uyumlu partiküllerini oluşturacak elementler içeren daha güçlü alaşımlar da bulunmaktadır. Bu nedenden dolayı, nikel esaslı süper alaşımlar östenitik nikel-krom-tungsten matrisinin çeşitleridir. Yararlı bir katı eriyik güçlendirmesi için alaşım elementinin aşağıdaki maddeleri sağlaması gerekir [8];

- a) Matris, içinde büyük ölçüde katı çözünebilme özelliğine sahip olmalıdır
- b) Matris ile atomik boyutta büyük farklılık olmalıdır
- c) Erime noktası yüksek olmalıdır

Katı eriyik elementleri, γ fazında bulunurlar ve alüminyum, krom, demir, titanyum, tungsten, vanadyum, kobalt ve molibden elementleri içerirler. Bu elementlerin nikelde göre atom çaplarındaki farklılık + %1 kobalt ve + %13 tungsten arasında değişir [8].

Çökeltme sertleşmesi; nikel esaslı süper alaşımlarda çökeltme sertleşmesi γ' çökeltmesi aracılığıyla meydana gelir. Düşük sıcaklıklarda düşük hacim oranları nedeniyle borit ve karbür gibi diğer fazlar az miktarda güçlendirme sağlamalarına rağmen nikel esaslı süper alaşımlarının sürünme ve kopma ömürlerini etkilerler [8].

Güçlendirmedeki artış dislokasyon ve γ' çökeltmesi arasındaki etkileşim ile sağlanır ve bu etkileşim de aşağıdaki faktörlere bağlıdır[8];

- a) Mevcut γ' fazının hacim oranı
- b) γ' fazının tanecik büyüklüğü
- c) Anti faz sınır enerjisi

Anti-faz sınır enerjisi çökeltme düzenleme derecesinin fonksiyonudur. Eğer bir uygun düzenlenmiş γ' taneciği dislokasyon nedeniyle bölünürse, bu bir yüksek enerji alanına sebep olur ve dislokasyonun ilerlemesine engel olur. Böylelikle aynı kayma düzleminde dislokasyonun devamı için geçiş anti-faz sınır enerjisi yok edilene kadar engellenir. Genel etki kesme mukavemetine eklenir [8].

Dağılım sertleşmesi; yüksek sıcaklıklarda mukavemeti sağlamak ve γ' taneciğinin eriyik olduğu sıcaklığın üstüne çıkabilmenin en etkili yolu, matris içinde çözünmeyen, farklı ve kararlı metal olmayan bir dağılım fazı eklemektir. Toryum dioksit, itriyum oksit, lantan oksit gibi yüksek serbest enerjili oluşumları olan elementlerin oksitleri yüksek sıcaklarda çalışmak için en iyi dağılım malzemeleridir. Dağılım fazının büyüklüğü ve dağılımı etkinliği ve mukavemetlendiriciliği yönetir. Tanecikler ufak ve üniform dağılımlı olmalıdır. Erişilebilecek mukavemetlendirme oranı sünekliği sağlarken eklenen oksitin düşük hacim oranı ile limitlidir [8].

3.1.3.3. Nikel Esaslı Süper Alaşımların Isıl İşlemleri

Nikel esaslı süper alaşımların özelliklerinin iyileştirilmesi için yapılan ısıl işlemler tavlama veya yumuşatma, ergitme işlemi ve yaşlandırma / çökeltme sertleşmesi şeklinde üç ana grupta olmaktadır [8].

Tavlama veya yumuşatma; bu tip ısıl işlemler yalnızca çalışma esnasında sertleşen malzemeler için gereklidir. Tavlama işlemi genellikle katı eriyikle sertleştirilmiş malzemelerde tercih edilir. Yumuşatma işlemi ise çökeltme ile sertleştirilebilen alaşımların üretimi sırasında da kullanılabilen bir yöntemdir ve bu operasyon için kullanılan zaman ve sıcaklık değerlerinin çökeltme ile sertleştirilmiş fazları tam anlamıyla eritemeyebileceğinin hatırlanması önemlidir [8].

Ergitme işlemi; ergitme işleminin ana amacı γ' ve bazı durumlarda karbürlerin tekrar ısıtma/yaşlandırma anındaki çökelmelerinin kontrolü veya özel durumlarda soğutma esnasında çökeltilebilir fazların eritilmesidir. Ergitme işlemi sıcaklığının seçimi mevcut olan çeşitli fazların erime sıcaklığına ve tane irileşme sıcaklığına bağlıdır. Bu nedenle daha küçük tane boyutu, daha düşük sıcaklıkta gerilme ve yorulma özellikleri, sonuç olarak düşük ergitme işlemi sıcaklığı tercih edilir. Diğer taraftan yüksek ergitme sıcaklığıyla elde edilen iri taneler sayesinde yüksek sıcaklıklarda sürünme ve kopma özellikleri geliştirilir [8].

Yaşlandırma/çökeltme sertleşmesi; bu ısıl işlemin amacı sertleştirme fazlarını belli bir istenen mekanik özellikleri geliştirecek bir yapıyı oluşturacak şekilde çökeltmektir. Optimum sertleştirmenin 700 °C'de 128 saatten sonra veya 650 °C'de 500 saatten sonra elde edilebileceği bellidir. Fakat bu süreler ticari ve ekonomik olarak kabul görmemekte ve ayrıca belirtilen maksimum sertliğe ihtiyaç duyulmamaktadır. Bunu yerine istenen oranları sağlayacak kadar ısıl işlem uygulanmaktadır [8].

3.1.3.4. Nikel Esaslı Süper Alaşımların Uygulama Alanları

Nikel esaslı süper alaşımlar, gaz türbinleri başta olmak üzere jet motorlarında kullanılan alaşımların ağırlıkça %50'sini kapsayan alaşımlardır. Diğer uygulama alanları liman donanımları, nükleer reaktörler, petrokimya fabrikaları, buhar jeneratörü tesisatı ve reaktörün yapısal parçaları şeklinde sıralanmaktadır [12]. Bu alaşımlar ayrıca, fosil yakıtlı tesislerde, süper ısıtıcı tesisatında, atık sistemlerinde, gaz depolama ünitelerinde, sıcaklığa veya korozyona dayanım gerektiren parçalarda kullanılmaktadır [7]. Endüstride geniş bir kullanım alanına sahip olan nikel esaslı süper alaşımlar, yüksek ısıl gerilim, yüksek sertlik, yüksek kesme kuvvetine gerek duyan işleme gerilmesi ve yüksek işleme sertliği, yüksek ısılara sebebiyet veren düşük termal iletkenlik, yüksek oranda aşındırıcı karbür partiküllerinin varlığı, takım üzerine güçlü kaynama eğilimi ve yığıntı talaş oluşumu gibi özelliklere sahiptirler [9]. Çizelge 3.2'de ticari olarak kullanılan nikel esaslı alaşımlar gösterilmektedir [12].

Çizelge 3.2. Ticari olarak bulunan nikel esaslı süper alaşımlar.

| |
|---|
| İnconel (587, 597, 600, 601, 617, 625, 706, 718, X750, 901) |
| Nimonic (75, 80A, 90, 105, 115, 263, 942, PE11, PE16, PK33, C263) |
| Rene (41, 95) |
| Udimet (400, 500, 520, 630, 700, 710, 720) |
| Pyromet 860 |
| M-252 |
| Waspaloy |
| Unitemp AF2-IDA6 |
| Cabot 214 |

3.1.4. Waspaloy

Waspaloy süper alaşımı, nikel esaslı bir süper alaşım olup oksidasyon direnci, mükemmel yüksek sıcaklık mukavemeti ve iyi korozyon direnci nedeniyle tercih edilen yaşlandırılabilir bir malzeme türüdür [62]. Kritik uygulamalarda çalışma sıcaklığı 650 °C olan Waspaloy 870 °C’de bile özelliklerini koruyabilir. Alaşımın yüksek sıcaklık dayanımı, bünyesinde bulunan molibden, kobalt ve krom elementleri sayesinde meydana gelirken yaşlandırma, alüminyum ve titanyum elementleri sayesinde [63]. Yapı olarak İnconel 718’e benzeyen Waspaloy’un gücü ve kararlılığı İnconel 718’den daha yüksektir. Waspaloy, vakum indüksiyon ergitme ve vakumlu ark arıtma veya vakum indüksiyon eritme ve elektro arıtma tarafından yapılan bir süper alaşım çeşididir [64]. Waspaloy, eşsiz kompozisyonu nedeniyle çok daha zorlu uygulamalarda kullanılabilen bir süper alaşımdır. Ayrıca oksidasyon direnci, yoğun termal çevrim altında sıcaklığa sürekli maruz kaldığı durumlarda 1038 °C’ye kadar özelliğini kaybetmemektedir [65]. Waspaloy süper alaşımının kimyasal özellikleri Çizelge 3.3’de fiziksel özellikleri ise Çizelge 3.4’de verilmiştir [66].

Çizelge 3.3. Waspaloy süper alaşımının kimyasal bileşimi.

| Alaşım Türü | Alaşım Miktarı, % |
|----------------|-------------------|
| Krom..... | 18.00-21.00 |
| Bor..... | 0.003-0.01 |
| Zirkonyum..... | 0.02-0.12 |
| Alüminyum..... | 1.20-1.60 |
| Titanyum..... | 2.75-3.25 |
| Molibden..... | 3.50-5.00 |
| Kobalt..... | 12.00-15.00 |
| Bakır..... | 0.50 mks. |
| Demir..... | 2.00 mks. |
| Sülfür..... | 0.030 mks. |
| Silikon..... | 0.75 mks. |
| Manganez..... | 1.00 mks. |
| Karbon..... | 0.02-0.10 mks. |
| Fosfor..... | 0.030 maks. |
| Nikel..... | Geriye kalan |

Çizelge 3.4. Waspaloy süper alaşımının fiziksel özellikleri [66].

| | |
|---------------------------|--------------------------------|
| Yoğunluk | 8.19 gr/cm ³ |
| Erime Aralığı | 1130-1360 °C |
| Termal Genleşme Katsayısı | |
| 21-93 °C'de | 6.8X10 ⁻⁶ in/in/°F |
| 21-538 °C'de | 7.7X10 ⁻⁶ in/in/°F |
| 21-1093 °C'de | 10.4X10 ⁻⁶ in/in/°F |
| Elastiklik Modülü | |
| 21°C'de | 211 GPa |
| 1000 °C'de | 184 GPa |
| 1600 °C'de | 157 GPa |
| Manyetik Geçirgenlik | 1.004 |
| H=200 oersted | |

Waspaloy yüksek sıcaklarda özelliğini kaybetmeden çalışması ve korozyon direnci nedeniyle gaz türbinli motor parçalarının imalatında tercih edilmektedir. Güncel ve potansiyel kullanım alanları arasında kompresör ve rotor diskleri, miller, vidalar, keçeler, bilezik ve muhafazaları, bağlantı elemanları, uçak gövdesi, kimyasal tesis ekipmanları, petrokimya ekipmanları, füze sistemleri ve çeşitli motor parçaları vardır [67]. Waspaloy süper alaşımına ait sürünme kopmasına ait teknik özellikler Çizelge 3.5'te verilirken Şekil 3.4'de de Waspaloy'a ait mekanik özellikler verilmiştir. Waspaloy süper alaşımına istenen iki özelliği için çözündürme işlemi, stabilizasyon ve yaşlandırmayı kapsayan üç aşamalı bir ısı işlem uygulanır. İstenen özelliklere göre uygulanan bu üç ısı işlem ve özellikleri şu şekildedir [66];

- Optimum yüksek sıcaklık ve gerilme-kopma özellikleri için;

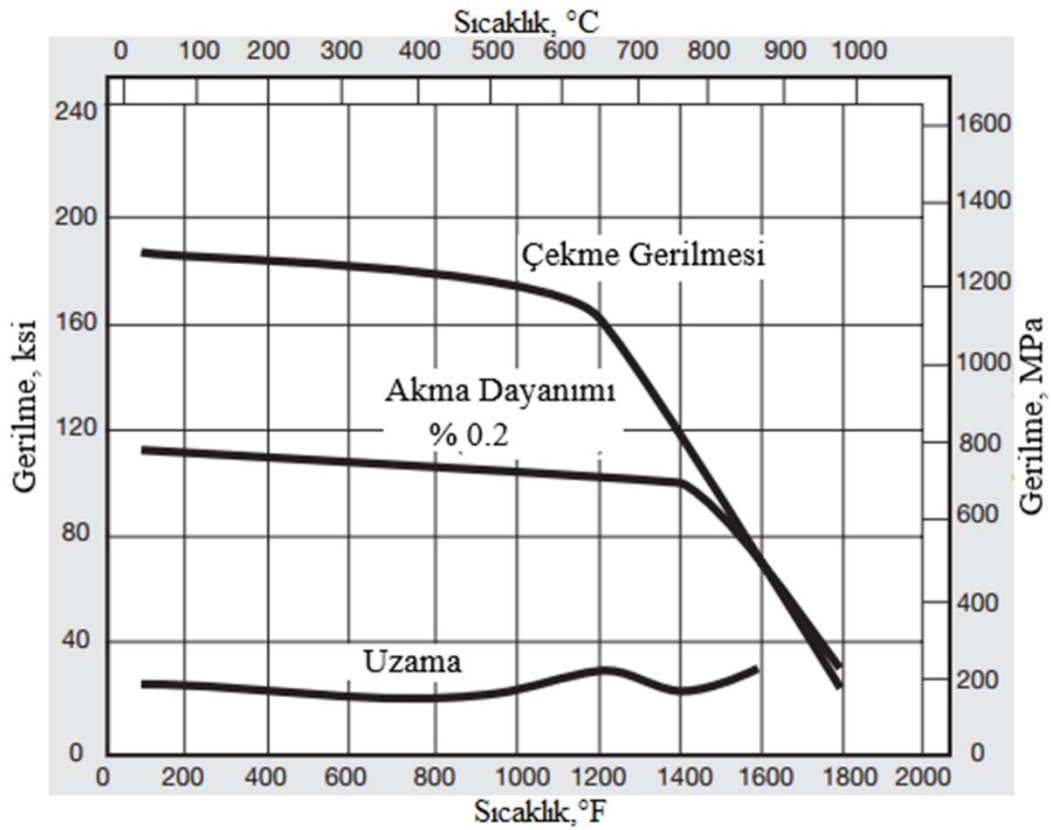
1080 °C'de 4 saat ısıtılarak 20-25 Rockwell C sertlikte ürün elde etmeye çözündürme işlemi, 845 °C'ye kadar 24 saat ısıtılarak ürün elde etmeye stabilizasyon, 760 °C'de 16 saat ısıtılarak 34-40 Rockwell C sertlikte ürün elde etmeye ise yaşlandırma işlemi denir.

- Optimum oda ve yüksek sıcaklık çekme özellikleri için;

995-1035 °C'de 4 saat ısıtılarak 20-25 ürün elde etmeye çözündürme işlemi, 845 °C'ye kadar 4 saat ısıtılarak ürün elde etmeye stabilizasyon, 760 °C'de 16 saat ısıtılarak 34-44 Rockwell C sertlikte ürün elde etmeye ise yaşlandırma işlemi denir.

Çizelge 3.5. Waspaloy'un sürünme kopmasına ait teknik özellikler [66].

| Sıcaklık | | Kopma Dayanımı (1000 s) | |
|----------|-----|-------------------------|-----|
| °F | °C | Ksi | MPa |
| 1200 | 649 | 89 | 615 |
| 1300 | 704 | 65 | 450 |
| 1400 | 760 | 42 | 290 |
| 1500 | 816 | 26 | 180 |
| 1600 | 860 | 16 | 110 |



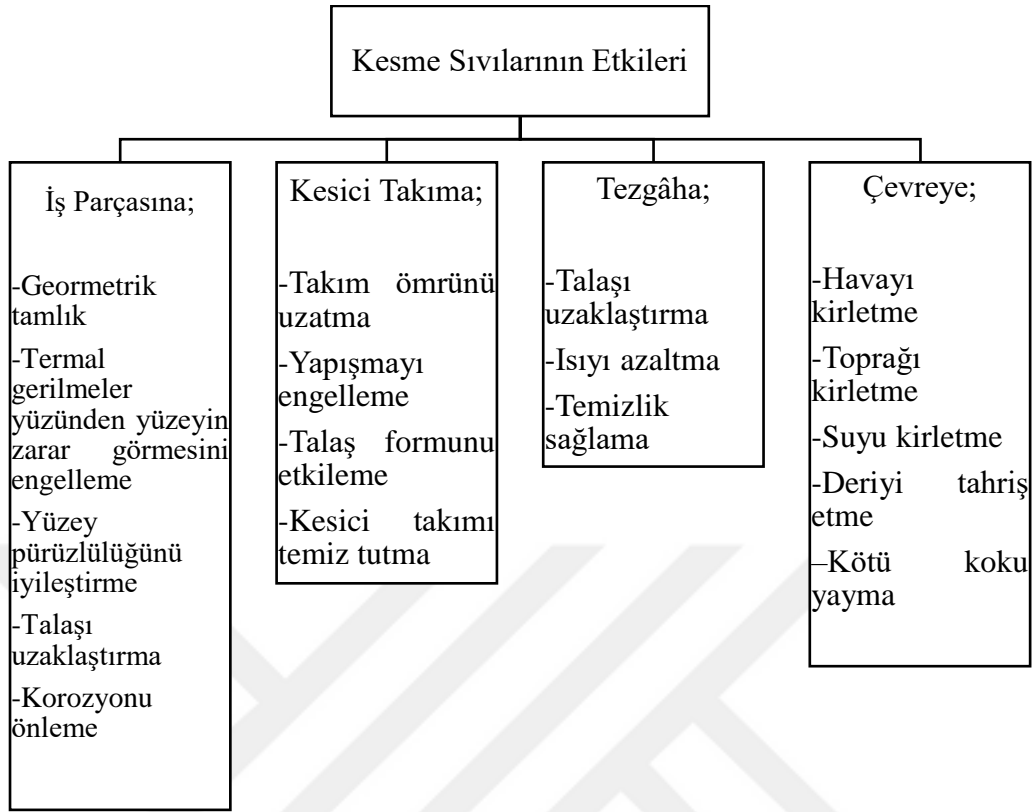
Şekil 3.4. Waspaloy süper alaşımının mekanik özelliklere [66].

4. KESME SIVILARI VE UYGULAMA YÖNTEMLERİ

Gelişen işleme teknolojisiyle birlikte kesme işlemlerinde, özellikle takım ömrünün artırılması ve yüzey kalitesinin iyileştirilmesi için soğutma-yağlama uygulaması önemli bir gereklilik olmuştur [20]. Doğrudan doğruya yükle bağlantılı olan sürtünmenin neden olduğu zararı en aza indirmek veya yok etmek için soğutma-yağlama işleminin kullanımı kaçınılmaz bir zorunluluktur [68]. Buna örnek olarak 1907 yılında F.W. Taylor'un takım çelikleriyle yapmış olduğu çalışmalarda az miktarda su kullanarak kesme hızını %40'ın üzerinde arttırmayı başarması verilebilir [69]. Ancak, su mükemmel derecede soğutma sağlamasına rağmen kötü derecede yağlama yapmasından dolayı iş parçası ve kesici takımında ciddi korozyon problemleri ortaya çıkmıştır. Bundan dolayı daha sonraki çalışmalarda soğutmanın yanı sıra yağlamayı da sağlayabilecek yeni kesme sıvısı formülleri üzerinde çalışmalar başlamıştır. Kesme sıvıları yaklaşık 200 yıldır kesme operasyonlarında kullanılmaktadır [70].

Kesme sıvısı kullanımı, kesme esnasında verimliliği artırmak için kullanılan yardımcı bir operasyondur. Kesme sıvılarının başlıca görevleri soğutma ve yağlamayı sağlamaktır. Böylece kesme esnasında iyi bir yüzeyin ortaya çıkması için sürtünmeyi ve yapışmayı azaltıcı etkisi kullanılmış olur. Kesme sıvılarının soğutma ve yağlama gibi görevlerinin yanında talaşı kesme bölgesinden uzaklaştırmak gibi faydaları da vardır [71]. Genel olarak bakıldığında, takım ömrünü iyileştirme, iş parçasındaki termal deformasyonu azaltma ve talaşı kesme bölgesinden uzaklaştırma gibi ana görevleri bulunan kesme sıvılarının iş parçası, kesici takım, tezgâh ve çevre açısından etkileri Çizelge 4.1'de sıralanmıştır.

Çizelge 4.1. Kesme sıvılarının üretimdeki etkileri [72].



Parça yüzeyini iyi derecede ıslatarak yüzeye yayılması istenen kesme sıvıları, bu işlem sonucunda kesme bölgesindeki gerilimi düşürerek sistem için gerekli olan enerjiyi azaltır. Ayrıca kesme sıvısı, içinde bulunan bazı kimyasallar aracılığıyla malzeme ile reaksiyona girerek kesme bölgesinde sürtünmeyi azaltan bir film tabakası oluşturmaktadır [73].

Kesme sıvılarında istenen özellikler şu şekilde olmalıdır;

- Soğutma işlemini yapabilmeleri
- Yağlama işlemini yapabilmeleri
- Özelliklerini uzun süre koruyabilmeleri
- Korozyon etkilerinin az olması
- İnsan sağlığına zararsız olmaları
- Teçhizata zarar vermemeleri
- Isı transfer yeteneklerinin iyi olması
- Uçucu olmamaları
- Köpürmemeleri
- Parlama tehlikesi taşımamaları

Kesme sıvıları kesme bölgesine doğru bir şekilde yönlendirildiği takdirde sağladığı ekonomik ve diğer faydaları ise şu şekilde özetlenebilir [74];

- Kesici takım ömrünü uzatarak takım maliyetini azaltır, bileme ve tekrar bağlama zamanını kısaltır.
- Kesme sıvıları, sürtünme ve ısı oluşumunu azalttığından talaş kaldırma işlemlerinde daha yüksek kesme hızı kullanımına olanak verir ve böylece üretim hızını artırır.
- Takım ömrü uzayıp bileme işçiliği ve zamanı azalacağından işçilik maliyetini azaltır.
- Sürtünme azaldığından daha az güç sarfiyatı ortaya çıkacaktır ve böylece güç maliyeti azalacaktır.

4.1. KESME SIVILARININ SINIFLANDIRILMASI

Metal kesme işlemlerinde genellikle klasik kesme yağları, çözünebilir yağlar, sentetik ve yarı sentetik kesme sıvıları başta olmak üzere birçok kesme sıvısı kullanılmaktadır [75]. Kesme sıvıları yapısal olarak temel sıvı ve katkıları olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır [76]. Temel kesme sıvısı ya su bazlıdır ya da su bazlı olmayan bir sıvıdır. Su bazlı kesme sıvıları emülsiyonlar ve dilüsyonlardan oluşmaktadır. Emülsiyonlar, suya katılan mineral yağ, bitkisel yağ esteri veya hayvansal yağ esteri emülsifikasyon ile oluşturulabilir. Dilüsyon, organik veya organik olmayan maddelerin su içerisinde seyreltilmesi ile oluşturulan ve genellikle kimyasal olarak kararlı davranan bir sıvıdır. Su bazlı olmayan kesme sıvıları genellikle mineral yağdan oluşmasıyla birlikte alternatif olarak sentetik bitkisel yağ esteri veya hayvansal yağ esterinden oluşur. Bu katkı maddeleri korozyon, köpüklenme, oksidasyon ve aşınma gibi istenmeyen durumların ortaya çıkmaması için kesme sıvısına eklenir [77]. Geleneksel kesme sıvıları, uygulama alanlarına göre değişiklik göstermekte olup işlevlerine ve kimyasal kompozisyonlarına göre sınıflandırılmaktadır.

4.1.1. İşlevlerine Göre Kesme Sıvıları

Kesme sıvıları işlevlerine göre sınıflandırıldığında soğutucu ve yağlayıcı olmak üzere iki bölümde incelenmektedirler.

4.1.1.1. Soğutucular

Talaş kaldırma işlemlerinde kesme sıvıları, öncelikle iş parçası ve kesici takımını soğutmakla görevli olan çeşitli kimyasalların karışımı ile ortaya çıkan bir sıvı olarak tanımlanabilir. Talaş kaldırma esnasında kesici takım-iş parçası temas noktasında meydana gelen sürtünme ve talaşta meydana gelen dezanformasyon sonucu yüksek sıcaklıklar ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan bu yüksek sıcaklık kesici takımını ısıtmakta ve buna bağlı olarak da aşınma artarak takım ömrü azalmaktadır. Bu olumsuzlukların önüne geçmek için kesme sıvısı kullanımı önem arz etmektedir. Bunlara ek olarak, kesme sıvısı kullanımı işlenmiş yüzey kalitesini iyileştirme ve çıkan talaşı uzaklaştırma gibi temel görevleri de yerine getirmektedir [73].

Soğutucu görevi gören kesme sıvıları kesme esnasında ortaya çıkan ısıyı kesme bölgesinden olabildiğince uzaklaştırarak takım-talaş ara yüzeyindeki ısıyı azaltmak ve takım ömrünü uzatmak için tasarlanmışlardır. Bu kesme sıvıları genellikle %80 ila %99 arasında su ile karmaşık yağ bileşenlerinin karışımından oluşmaktadırlar [78].

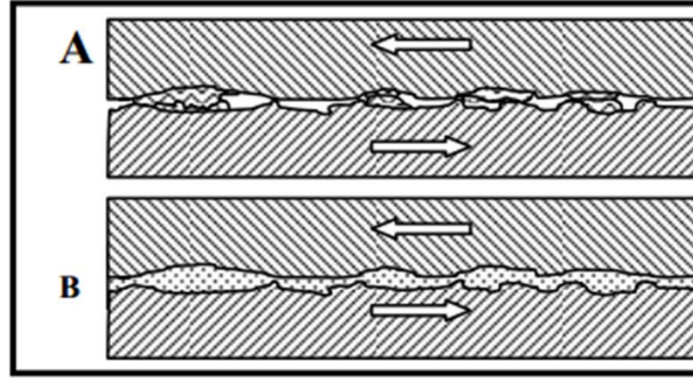
Kesme sıvılarının sıcaklığı azaltma kapasiteleri ısıl özelliklerine bağlıdır. Özgül ısı ve ısıl iletkenlik en önemli iki özelliktir. Suyun özgül ısı ve ısıl iletkenliği diğer sıvılara göre yüksektir, bu da suyun soğutucu özellikteki kesme sıvılarında esas olarak kullanılmasının nedenini açıklamaktadır [78]. Yüksek sıcaklıkların oluştuğu ve bu sıcaklıkların problem teşkil ettiği durumlarda soğutucu kesme sıvıları kullanılmaktadır. Örneğin; ısıl hasara maruz kalmaya müsait malzemelerden olan yüksek hız çeliklerinin kesici takım olarak kullanıldığı operasyonlarda soğutucu özelliklere sahip kesme sıvıları önem arz etmektedir [79].

4.1.1.2. Yağlayıcılar

Yağlayıcı görevi gören kesme sıvılarının en temel özelliği, takım, talaş ve iş parçası arasındaki kesme bölgesini yağlayarak sürtünmeyi azaltmaktır. Yağlama işlemi, kesme esnasında iki yüzey arasında ince bir sis tabakası oluşturarak sürtünmeyi azaltmak ve yüzeylerin birbirini üzerinde hareketi esnasındaki sürtünmeyi azaltmak olarak tanımlanabilmektedir [80]. Sürtünme, doğrudan kesme kuvvetleriyle orantılı olup yüzey alanına bağlı değildir. Dolayısıyla yüzey alanından bağımsız olan sürtünmeyi en aza indirmek veya yok etmek için yağlayıcı özelliği olan kesme sıvısının kullanımı oldukça önemlidir [81].

Beraber çalışan iki yüzey bu eylemi yağlamanın olmadığı bir ortamda yaparsa yüzeydeki

mikro partiküller birbirine sürtmektedir (Şekil 4.1A). Bu sürtme esnasında iki yüzey arasındaki kesme sıvısının yağlayıcı özelliği ile takım-iş parçası arasında oluşturacağı ince bir sis tabakası ile aşınma azalır (Şekil 4.1B) [82],[83].



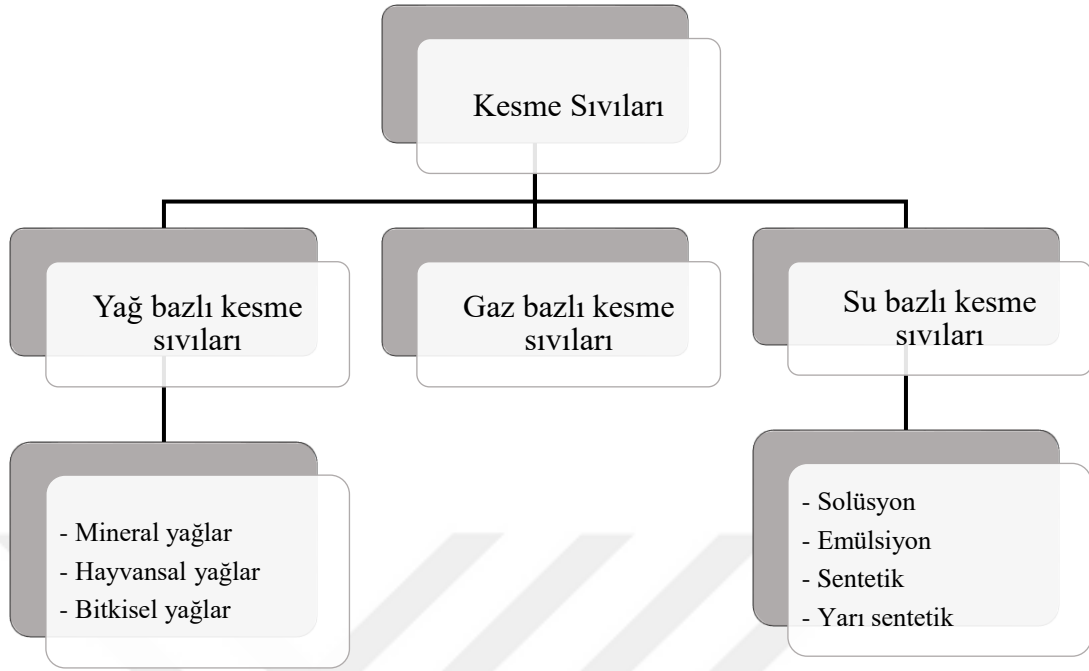
Şekil 4.1. Kesme sıvısı kullanımının etkisi [82].

Yağlayıcı özelliğe sahip kesme sıvıları, etkilerini düşük kesme hızlarında gösterirler. Yüksek hızlardaki talaş hareketi kesme sıvısının takım-talaş ara yüzeyine ulaşmasına engel olduğu için yağlayıcı özelliğe sahip kesme sıvıları yüksek kesme hızlarında etkilerini kaybederler. Dahası, yüksek kesme hızlarında yağlayıcı işlemi görmesi beklenen kesme sıvıları görevlerini tam anlamıyla yerine getirmeden buharlaşırlar. Genellikle yağlayıcı özellik ağız birikintisi oluşumunu geciktirmesi ve takım üzerindeki momenti düşürdüğü için delme ve kılavuz çekme işlemlerinde daha etkilidir [84].

4.1.2. Kimyasal Bileşenlerine Göre Kesme Sıvıları

Çizelge 4.2’de de görüldüğü üzere kimyasal bileşenlerine göre kesme sıvıları, kesme yağları, su bazlı kesme sıvıları ve gazlar olmak üzere üç ana başlıkta incelenmektedir. Yağ bazlı kesme sıvıları kendi içerisinde mineral yağlar, hayvansal yağlar ve bitkisel yağlar olmak üzere üçe ayrılırken su bazlı kesme yağları ise kendi içerisinde çözülebilen yağlar, emülsiyon, sentetik ve yarı sentetik kesme sıvıları olmak üzere dörde ayrılmaktadır [85].

Çizelge 4.2. Kesme sıvılarının sınıflandırılması [85].



4.1.2.1. Kesme Yağları (Saf Yağlar)

Aynı zamanda saf yağ diye de anılan kesme yağları, mineral, hayvansal, bitkisel ve sentetik yağlardır. Petrol esaslı yağ olarak bilinen mineral yağlar, kendine özgü yüksek yağlama özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılırlar. Mineral yağların uygulanması esnasında özellikleri daha da iyileştirmek adına bazı katkı maddeleri kullanılmaktadır. Örneğin, naftenik mineral yağlar ve parafinik mineral yağların özellikleri genellikle yağlı yağlama, aşırı basınç katığı, koku, kalınlık değiştiricileri ve kutup katkı eklenmesi ile geliştirilmiştir. Mineral yağlar, takım-talaş ara yüzeyini yağlamak ve dolayısıyla ısı ve sürtünmeyi azaltmak için kullanılırlar. Bununla birlikte işleme bölgesinde korozyon oluşumunu engellemektedirler [85]. Bütün bunlara rağmen mineral yağların petrol ürünü olmasından dolayı yanma eğilimleri yüksektir ve kesme esnasında duman oluşumuna neden olmaktadır [86]. Ayrıca, yağlama özelliği yüksek olmasına rağmen düşük soğutma özelliğine sahip olmalarından dolayı mineral yağlar başta pirinç ve dökme demir olmak üzere hafif alaşımların işlenmesinde tercih edilmektedirler [73].

Hayvansal yağlar genellikle bileşik oluşturmak için kullanılmaktadır. Hayvansal yağlar, organik oldukları için çevre duyarlı çalışmalarda tercih edilirler ve yağlama işlemi için uygun alternatiflerdir. Ancak, kolay bozulabilmeleri, yüksek maliyetleri, bakteri üretmeye olan eğilimleri ve yüksek sıcaklıklarda ortaya çıkan kokudan dolayı pek tercih edilmezler [87]. Bitkisel yağlar mineral yağlara nazaran üç ila beş kat daha maliyetli

olmasına rağmen özellikle Avrupa'daki çevreye duyarlı bazı çalışmalarda tercih edilmektedirler [88]. Bitkisel yağların kanserojen etkilerinin olmamasının yanında mineral ve sentetik yağların aksine doğal kaynaklara zarar vermemektedir. Yani bitkisel yağlar kendini sürekli yenilemektedir. Yağlayıcı özellikleri mineral yağlara yakın olan bitkisel yağlar bitki tohumlarından elde edilir ve içerisinde doğal feti asitlerini ve bileşiklerini bulundururlar. Çoğu doymamış çözelti halinde bulunan bitkisel yağlar, yüksek polar özellikleri nedeniyle metal yüzeylere yapışır ve ince bir sis tabakası oluştururlar [89].

Genellikle birkaç tip yağ karıştırılarak yüksek yağlayıcılık elde edilir. Bununla beraber polar ve kimyasal katkı maddeleri aracılığıyla da yağlama kalitesi artırılır. Genellikle hayvansal yağlardan domuz yağı bitkisel yağlardan ise hurma yağı ve hint yağı polar katkılardandır. Bu katkı maddelerinden yüzde 10-14 civarında eklenmesi kesme yağının ıslatma kabiliyetini ve etki kapasitesini arttırmaktadır [90].

4.1.2.2. Su Bazlı Kesme Sıvıları

Su bazlı kesme sıvıları genellikle, belli bir oranda mineral yağın su içerisinde çözülmesiyle elde edilen kesme sıvılarıdır. Su bazlı kesme sıvılarındaki temel amaç, suyun mükemmel soğutma yeteneği ile mineral yağların yağlama özelliğinin birleştirilerek hem soğutma hem de yağlama işleminin aynı anda yapılmasıdır. Su bazlı kesme sıvıları, özellikle yüksek işleme hızı gerekli olan durumlarda sıklıkla tercih edilirler. Su bazlı kesme sıvıları, çözülebilen yağlar, sentetik ve yarı sentetik olmak üzere üç başlık altında toplanmıştır [91].

Çözülebilen yağlar; 30:1 oranında emülsiyon maddesinin (genellikle mineral yağ) su içerisinde çözülmesiyle elde edilir [85]. Bor yağı olarak da bilinen bu kesme sıvıları, içerisinde emülsiyonu kolaylaştıracak katkı maddeleri barındıran su-yağ karışımıdır. Soğutma kabiliyeti yüksek olan bu sıvılara polar aditifler veya EP aditifleri eklenirse yağlama özellikleri önemli derecede artmaktadır. Genellikle süt renginde olan bu kesme sıvıları aşağıdaki özellikleri taşımaktadırlar;

- Yüksek soğutma kabiliyeti,
- Temiz çalışma ortamı,
- Düşük maliyet,
- Ateşlenme tehlikesinin olmaması,
- İnsan sağlığına olumsuz etkisinin daha az olması

Sayılan bu nedenlerden dolayı çözülebilen yağlar, çok ağır talaş kaldırma işlemleri hariç hemen hemen bütün hız ve işlemlerde kullanılabilirler [92]. Bu kesme sıvıları, bitkisel ve hayvansal yağların ya da bunların esterlerinin ilave edilmesi ile yağlayıcılığı artan ve hafif-orta ağırlıktaki talaş kaldırma işlemlerinde tercih edilen bir kesme sıvısıdır [87].

Çözülebilen kesme sıvıları konsantre olarak temin edilirler. Daha sonrasında belirli bir oran dâhilinde (bu oran genelde 30:1) konsantre-su karışımıyla kesme yağı emülsiyonu hazırlanır. Bu işlem sonucunda yağın yağlama ve korozyon önleyici özelliği ile suyun soğutma özelliği tek bir kesme sıvısında toplanmış olacaktır [35]. Uygulama esnasında kesme sıvılarının fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirerek daha iyi özellikler elde etmek için bazı katkı maddeleri kullanılır. Bunlar [93];

- Yağ filmi oluşturan aşınmayı önleyici katkıları
- Yüksek basınç altında çalışmayı kolaylaştıran EP katkıları
- Korozyon önleyici katkıları
- Köpüklenmeyi önleyici katkıları
- Sis önleyici katkıları
- Dağıtıcı maddeler
- Yüzey aktif maddeler

Kesme sıvısının kararlı hale gelebilmesi için yağ emülsiyonu hazırlama işleminin doğru olarak yapılması çok önemlidir. Doğru yağ emülsiyonu hazırlama işlemi için aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir [35];

- Yağ konsantresi suya eklenmelidir
- Emülsiyon hazırlanırken karışım sürekli olarak karıştırılmalıdır
- Yağ-su karışım oranı hassas bir şekilde ölçülmelidir
- Temiz kap ve tanklar kullanılmalıdır
- Su, uygun pH değeri ve sertlikte olmalıdır
- Yağ konsantresi emülsiyona dönüşme hızından daha hızlı ilave edilmemelidir.

Genelde kalsiyum, magnezyum ve demir olan çözülmemiş tuzların miktarı suyun sertliğini etkiler. Suya soda eklenmesi daha yumuşak bir suyun elde edilmesini kolaylaştırır. Suyun sertliği, suyu tamamıyla yumuşak kılmak için gerekli olan, suda serbest halde bulunan sodyum karbonat sayısının 1.000.000'a oranı ile ifade edilir. Çözülmemiş tuzlar emülgatörlerle reaksiyona girebilir. Böyle bir durum ortaya çıktığında emülsiyon çabuk bozulacağı gibi kesme sıvısı tezgâhta boruları, pompaları ve filtreyi

tıkayan bir köpük oluşumu ortaya çıkar. Bunun yanında, 200 ppm'den fazla sodyum karbonat barındıran su korozyon önleyici etkileri azaltabilir. Sudaki düşük pH değeri korozyon eğilimi ve bakteri oluşumunu artırır. Yüksek pH değerleri ise cilde zarar verebilir. Bütün bunların ışığında emülsiyonların pH değeri 8.5 ile 9.3 arasında olması en uygun durumdur [35].

Emülsiyonların avantajları arasında parlama tehlikesinin olmaması ve buğulanma oranının düşük olması gösterilebilir. Ayrıca, suya karıştırıldığı için kesme sıvısı maliyetini de önemli ölçüde azaltır. Dezavantajlarına bakıldığında ise bakteri oluşumu, mayalanma ve mantar oluşumu emülsiyonların öne çıkan olumsuzluklarıdır. Bakterilerin ortaya çıkması emülsiyonların ayrışmasına neden olabilmektedir. Bunun sonucu olarak, emülsiyonun korozyon önleyici özelliği zayıflayacağı için metal yüzeyinde hoş olmayan bir görüntü ortaya çıkacaktır [85].

Çözeltinin görünüşünü genelde emülsiyon parçacıkları belirlemektedir. 2-50 µm çapları arasında değişiklik gösteren partikül boyutlarına sahip olan emülsiyonlar süt kıvamındadır. Boyutları 0.1-0.2 µm arasında olan emülsiyon parçacıkları şeffaf bir görünüme sahiptirler. Parçacık boyutu küçük olan kesme sıvıları büyük olanlarla karşılaştırıldığında-aynı hacme daha fazla parçacık yerleşeceğinden-kesme bölgesine daha iyi nüfuz eder ve bu nedenle daha çok tercih edilmektedirler. Büyük parçacık içeren kesme sıvıları ise süt kıvamındadır ve daha az köpük oluştururlar. Ayrıştırılmaları daha kolay olduğu için kesme sıvısı olarak kullanımından ziyade form verme işlemlerinde daha çok tercih edilirler [94].

Sentetik kesme sıvıları; katkılı ve katkısız olmak üzere iki gruba ayrılmaktadırlar. Katkılı olan sentetik kesme sıvıları, yüksek soğutma özelliğine sahip olmalarının yanında yağlayıcılık ve korozyona karşı koruyuculuk özelliklerine sahiptirler. Kullanım alanları arasında frezeleme, broşlama, raybalama ve testere ile kesme işlemleri bulunmaktadır. Katkısız olan sentetik kesme sıvıları iyi soğutma ve korozyon direnci göstermesine rağmen yağlayıcılık özellikleri iyi olmadığından sadece taşlama işlemlerinde tercih edilirler [95]. Katkı maddeleri ile oluşturulmuş kimyasalların su ile seyreltilmesi sonucu oluşturulan sentetik kesme sıvıları mineral yağ içermemektedir [96]. Sentetik kesme sıvıları, suya benzer bir görünüme sahip olma eğiliminde olduklarından berrak yeşil veya sarı renkli bir sıvı haline getirmek için katkı maddeleri ilave edilir. Sentetik kesme sıvıları organik veya inorganik kimyasal solüsyonların eklenip karıştırılması ile su yumuşatılarak korozyon direnci, yağlama ve yüzey gerilim direnci özelliklerinin artması sağlanır. Bu

kesme sıvıları iyi bir soğutucu olmalarına rağmen diğer kesme sıvılarıyla kıyaslandığında yağlayıcılık özellikleri zayıftır [78]. Bu nedenden ötürü daha çok düşük kesme hızlarında yapılan kesme işlemlerinde tercih edilirler [85].

Yüksek ısı dağılımı, iyi temizleme özelliği ve kolay hazırlanabilme gibi özelliklere sahip olan ve korozyona karşı yüksek direnç gösteren sentetik kesme sıvıları yağ esaslı kesme sıvılarıyla karşılaştırıldıklarında ekonomik açıdan daha avantajlıdır. Bunun yanında, şeffaf olmalarından ötürü operatörün işlemi takip etmesini kolaylaştırır. Ağır işleme koşullarında yeterli yağlama özelliği gösteremediklerinden sürtünmeyi ve dolayısıyla da aşınmayı önlemede yetersiz kaldıkları söylenebilir [35].

Sentetik kesme sıvıları, su ile tam bir çözelti oluştururlar. Kesme işlemi esnasında oluşan ısı nedeniyle su buharlaştığından çözelti konsantrasyonu uygulama esnasında artış gösterir. Etkili temizleme ve alkalın özelliği göstermelerinden dolayı konsantrasyon değeri sık sık kontrol edilmelidir. Bu kontrol pH değerinin insan sağlığına zarar verecek pH düzeyine ulaşmasına engel olur [35].

Yarı sentetik kesme sıvıları; çözülebilen yağlar gibi su bazlı olan yarı sentetik kesme sıvıları, sentetik sıvılara nazaran daha iyi bir yağlama özelliği elde etmek için %10 ile %50 arasında değişen oranlarda mineral yağın suda çözünmesi sonucu elde edilirler [97]. Bir başka deyişle, bu kesme sıvılarında yağlamayı daha etkili hale getirmek için yağ tanelerinin boyutunu azaltmak amacıyla mineral yağlar bazı katkı maddelerinin suda seyreltilmesi ile oluşturulan bir kimyasal olarak tanımlanabilir [96]. Bir bütün olarak sentetik kesme sıvılarıyla aynı özellikleri taşıyan yarı sentetik kesme sıvıları daha iyi yağlama özelliğine sahiptirler. Kesme sıvıları içerisinde bulunan yağ işleme esnasında taşın aşırı yüklenmesine neden olduğundan-daha az yağ içermelerinden dolayı-yağ emülsiyonlarına oranla taşlama işlemi için daha uygundur [35].

Yarı sentetik kesme sıvılarının ıslatma kabiliyetlerinin yüksek olmasının yanında ısıyı hızla kesme bölgesinden uzaklaştırma ve kendisinin de kesme bölgesinden kolayca uzaklaşması gibi bazı özellikleri vardır. Ayrıca, küçük emülsiyon taneleri ve düşük mineral yağ oranına sahip olmalarından dolayı bakteri oluşumuna karşı da dayanıklıdır. Bütün bu olumlu özelliklerinin aksine suyun pH değeri bu kesme sıvılarının kararlılığını etkilemektedir ve bu da çökelti oluşumuna neden olabilmektedir. Ayrıca, içerisinde barındırdıkları kimyasala katkı maddelerinden ötürü köpürme daha fazla görülmektedir [90].

Çizelge 4.3. Kesme sıvılarının avantajları ve dezavantajları.

| Kesme Sıvısı Tipi | Avantajları | Dezavantajları |
|--------------------|---|--|
| Düz Yağlar | Mükemmel yağlama ve paslanmaya karşı koruma | Düşük soğutma, yangın tehlikesi, duman oluşumu, düşük hızlarda ve ağır kesme koşullarında sınırlı kullanım |
| Çözülebilir Yağlar | İyi yağlama ve soğutma | Paslanmaya karşı koruması düşük, bakteri oluşum riski, buhar kaybı |
| Yarı Sentetik | İyi soğutma, paslanmaya karşı koruma ve mikrobiyal kontrol | Köpüklenme, su sertliğinden etkilenme, diğer kesme sıvılarıyla karışma riski |
| Sentetik | Mükemmel soğutma, yanmaz, duman oluşumu olmaz, iyi korozyon kontrolü, köpüklenmez | Kötü yağlama ve diğer kesme sıvılarına karışma riski |

4.1.2.3. Gaz Esaslı Soğutma-Yağlama

Gaz esaslı soğutucular, çevre dostu bir işlem sergilemekle birlikte genellikle oda sıcaklığında gaz halinde bulunan maddelerin kullanılması anlamına gelebilmektedir. Ayrıca, kesme işlemlerinde gazların yanında basınç altında soğutulmuş sıvılar da kullanılabilir. Hava, helyum, karbondioksit, argon ve nitrojen kullanılan gazlardan bazılarıdır. Bu gazlar, inert gaz sayıldığından yüksek kesme sıcaklıklarında oksidasyon direnci ve korozyon direncine sahiptir. Ayrıca, geleneksel kesme sıvıları ile birlikte kullanılarak yağlama işlemini de yapmaya yardımcı olurlar [85]. Özellikle havacılık ve uzay gibi iş parçası üzerinde sıvı kalıntısı istenmeyen bazı sektörlerde kesme sıvısı yerine soğutucu olarak gaz kullanılmaktadır [90].

Gazların kötü termal iletkenliği ve düşük soğutma kapasitesi nedeniyle gaz esaslı soğutma-yağlama işleminin performansını geliştirmek amacıyla sıkıştırarak sıvılaştırma ve soğutma işlemi uygulanmaya başlanmıştır. Gaz esaslı soğutucular, geleneksel kesme sıvılarının takım-iş parçası ara yüzüne etki etmekte zorlandığı ağır işleme şartlarında tercih edilmektedir. Ayrıca, orta ağırlıktaki kesme işlemlerinde sıkıştırılmış havanın kullanılması takım ömrünü artırma ve kesme için harcanan güç sarfiyatını düşürmede yardımcı olmaktadır [98]. Bu olumlu özelliklerine rağmen içten soğutmalı takım teknolojisinin gelişmesiyle birlikte uygulama alanları oldukça daralmıştır [99].

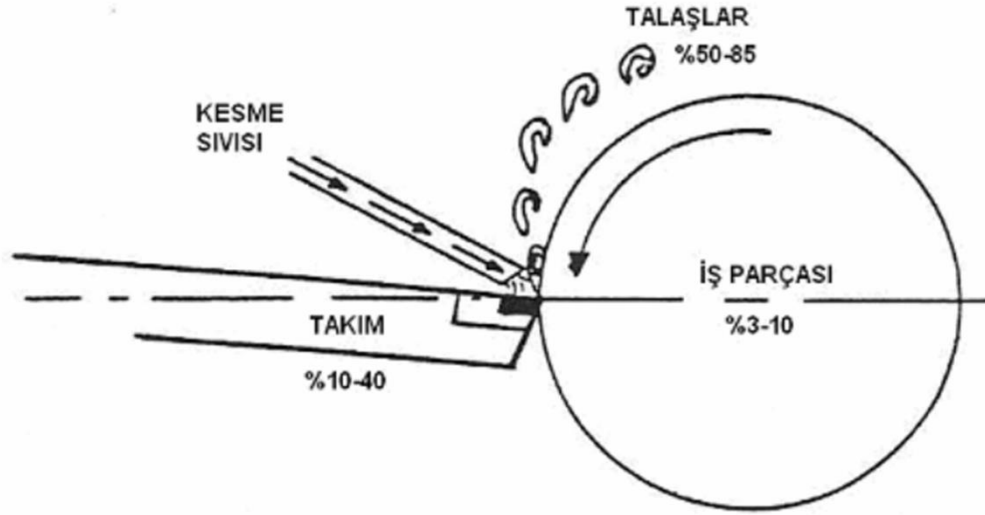
4.2. KESME SIVILARININ FONKSİYONLARI

Kesme sıvılarının, soğutma özelliği ile kesme bölgesinde oluşan ısıyı azaltma, yağlayıcı özelliği ile sürtünmeyi azaltması ve talaşı kesme bölgesinden tahliye etmesi istenmektedir. Bu bölümde bu üç temel özelliğiyle birlikte kesme sıvılarının görevleri incelenecektir.

4.2.1. Soğutma Fonksiyonu

Talaş kaldırma işlemlerinde, takım-iş parçası temas noktasında sürtünmeden kaynaklanan yüksek sıcaklıklar oluşmaktadır. Oluşan bu sıcaklık kesici takımın ısınmasına, aşınmasına ve dolayısıyla da ömrünü tamamlamasına neden olur. Bu olumsuzlukların önüne geçebilmek için kesme sıvısının soğutma görevini iyi görmesi gerekmektedir [73].

Talaş kaldırma esnasında oluşan ısı kesici takım, iş parçası ve talaş arasında belirli oranlarda paylaşılmaktadır (Şekil 4.2). Bu paylaşım esnasında iş parçasının fazla ısı alması parçanın genleşmesi ve dolayısıyla da boyutsal değişikliklere uğramasına neden olabilir. Ayrıca iş parçasının yüzeyinde ısıdan kaynaklı zararların oluşmasına da neden olabilir. Kesici takımın fazla ısı alması ise kesici ucun bozulmasına ve takım ömrünün azalmasına neden olabilir. İdeal kesici takım, kesme bölgesinden ısıyı çabuk transfer edendir yani ısıl iletkenliği yüksek olandır. İşlemin genelinde ideal olan ise oluşan ısının talaş tarafından kesme bölgesinden uzaklaştırılmasıdır. Soğutma sıvısı kullanımı takım-talaş ara yüzeyinde oluşan ısının tahliye edilmesini kolaylaştırır. Uygun kesme sıvısı kullanılması durumunda kesme bölgesinde oluşan ısının en az %50'si talaşla birlikte kesme bölgesinden uzaklaştırılır [30].



Şekil 4.2. Kesme sırasında oluşan ısının kesme bölgesinden tahliye edilmesi [30].

Kesme sıvılarının soğutma fonksiyonları aracılığıyla kesme bölgesinde oluşan ısıyı azaltarak takım ömrünü uzattığı yapılan deneysel çalışmalarla ortaya konulmuştur [30]. Kesme sıvıları kesme bölgesindeki ısıyı düşürerek takım ömrünü uzatmalarının yanında tezgâhın yıkanmasına da yardım ederler. Bu şekilde sistemin ısıl kararlılığı korunmuş olur ve bu da istenilen boyutların elde edilmesine yardımcı olur [73].

Kesme esnasında takım-iş parçası-talaş arasındaki sürtünmeden dolayı ortaya çıkan ısı soğutucu özelliğe sahip olan kesme sıvılarıyla tahliye edilmeye çalışılır. Bu işlem esnasında ısıyı emen kesme sıvısı da ısınacağından belirli bir süre sonunda soğutma kabiliyetini kaybetmeye başlar. Bundan ötürü kesme bölgesine uygulanan kesme sıvısı miktarı sürekli ve bol olmalıdır. Kesme bölgesindeki ısıyı düşürmek boyutsal doğruluk açısından da son derece önemlidir [89].

4.2.2. Yağlama Fonksiyonu

Kesme işlemi esnasında kesici takım, iş parçası ve talaşın bulunduğu yerde yüksek sürtünme meydana gelmektedir. Yağlama özelliği bulunan kesme sıvıları takım-iş parçası ve takım-talaş ara yüzeylerine nüfuz ederek sürtünmenin azalmasına yardımcı olurlar [89]. Bir başka deyişle kesme sıvısı kesme bölgesindeki sürtünmeyi azaltarak kesme esnasında oluşan ısıyı azaltmaktadır [100]. Ancak, kesme sıvısının bu fonksiyonu yerine getirebilmesi için yağlayıcı özelliğinin iyi olması gerekir. Kesme sıvılarının yağlayıcı özelliği sürtünmenin meydana geldiği yüzeylerde birkaç molekül kalınlığında bir sıvı tabakası oluşturmak gerekir. Kesme sıvılarının bu özelliğine yapışma kabiliyeti

denilmektedir ve kesme sıvısının kimyasal yapısıyla doğrudan ilgilidir [101]. Yapışma kabiliyeti bütün sıvılarda görülen bir özellik değildir. Ancak molekülleri polar gruplara sahip sıvılar, yapışmış bir tabaka meydana getirirler. Buna en önemli örnek yağlardır. Kesme sıvılarında yapışma kabiliyetini artırmak için aditif denilen katkı maddelerinden katılmaktadır [95].

Kesme işlemi esnasında ortaya çıkan ısı sürtünmenin ve dolayısıyla plastik deformasyonun getirmiş olduğu bir sonuçtur. Plastik deformasyon ise kayma düzlemi boyunca oluşan bir mekanizmadır. Dolayısıyla kayma düzleminin uzunluğunun azaltılması demek kesme esnasında oluşan sürtünmenin ve ısının azalması demektir.

Yüksek yerel kesme kuvveti oluşturan düşük kesme hızlarında çalışmak ağız birikintisi oluşumuna neden olabilir. Çalışma esnasında ortaya çıkan basınç kesici takımın iş parçasına kaynamasına neden olacak noktalara ulaşırsa ağız birikintisi gittikçe büyüyecektir. Bu noktadan sonra sürtünmeler artacak ve birikinti bir noktadan sonra talaşın da etkisiyle kopacak ve kesici takımdan ayrılacaktır. Bunun sonucu olarak da takım geometrisinde değişimler olacağı için iş parçası boyutu ve yüzeyinde bozulmalar olacaktır. Düşük kesme hızlarında kesme sıvısının soğutucu özelliğinden çok yağlayıcı özelliklerinden faydalanılmak istenir. Kesme hızının artması ağız birikintisinin azalacağı anlamına gelmektedir. Kesme hızının artması ile kesme bölgesinde oluşan ısı artacağından kesme sıvılarının soğutma özelliğine duyulan ihtiyaç yağlama özelliğine duyulan ihtiyacın önüne geçer. Ancak iyi yüzey kalitesi oluşumu yağlama ile oluşacağından kesme sıvısı olarak yağlama özelliği daha iyi olan yağ soğutma özelliği daha iyi olan suya nazaran daha çok kabul görür [90].

4.2.3. Talaşı Uzaklaştırma Fonksiyonu

Kesme sıvılarının en temel görevleri arasında kesme bölgesinde oluşan ısıyı optimum seviyeye çekmek, kesici takım-iş parçası temas bölgesine yağlayıcı etkide bulunmanın yanında talaşı uzaklaştırmak da vardır. Bunun en önemli sebebi de kesme bölgesinde tahliye edilmeyen talaşın bitmiş yüzeyin kalitesine doğrudan olumsuz etki yapacak olmasıdır. Kesme sıvısının talaşı kesme bölgesinden uzaklaştırması sayesinde işlenmiş yüzeylerde meydana gelebilecek deformatik çizikleri engelleyerek yüzey kalitesi korunmuş olur [102].

4.2.4. Kaynağı Önleme Fonksiyonu

Kesme sıvıları üç temel fonksiyonu olan soğutma, yağlama ve talaşı kesme bölgesinden uzaklaştırma görevini yerine getirmiş olsa bile bazı bölgelerde kesici takım-iş parçası-talaş teması her zaman mevcuttur. Bu bölgelerde ortaya çıkan ısı, talaşın kesici takım veya iş parçasına kaynamasına neden olabilmektedir. Böyle durumlarda kesme sıvısına sülfür, klorür gibi kimyasallar ilave edilerek temas bölgelerinde kaygan bir yüzey elde edilir ve partiküllerin kaynak olması önlenmiş olur [103].

4.3. KESME SIVILARININ UYGULAMA YÖNTEMLERİ

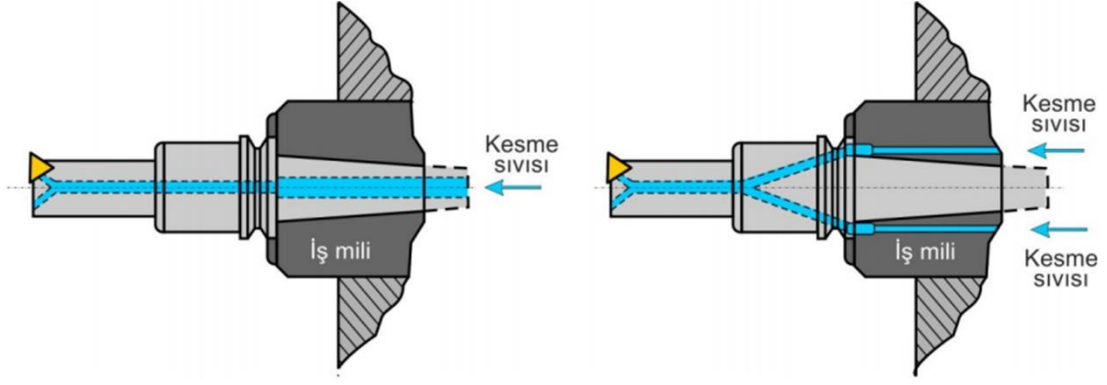
Talaş kaldırma esnasında oluşan sürtünme ve bu sürtünmenin oluşturduğu ısı, işlenmiş yüzey kalitesi ve kesici takım üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Kesme bölgesinde ortaya çıkan ısı miktarındaki küçük bir azalma bile kesici takım ömrü ve işlenmiş yüzey kalitesini artırmada son derece önemli olabilir. Kesme sıvısının uygulama yöntemlerinin iyi anlaşılması ve uygulanması bu ısı oluşumunu önemli ölçüde azaltabilir. Son yıllarda kesme bölgesinde oluşan ısıyı azaltmak ve kesme etkinliğini daha efektif hale getirmek için kesme sıvısının kullanımına yönelik bir takım yöntemler geliştirilmiştir [22].

4.3.1. Islak İşleme Yöntemi

Genellikle soğutucu özelliği yüksek olan kesme sıvıları kullanılarak yapılan ve en yaygın kullanılan yöntemdir. Yüksek miktarda kesme sıvısının kesici takım-iş parçası ara bölgesine (kesme bölgesi) püskürtülmesi olarak tanımlanabilir [78]. Islak işleme yönteminde akış hızı genellikle takımın bir noktasına 10 l/dak gibi bir sıvı iletimi şeklinde olmaktadır. Bu oran frezeleme gibi çok ağızlı kesicilerin kullanıldığı işleme yöntemlerinde 225 l/dak kadar çıkmaktadır [96]. Islak işleme yöntemi takım içinden uygulama ve takım dışından uygulama olarak ikiye ayrılmaktadır.

4.3.1.1. Takım İçinden Uygulama

Kesme sıvısının takım içinden kesme bölgesine iletiildiği uygulamalarda, kesme sıvısı mil içinden takımdaki soğutucu kanallara yüksek basınç ile iletilir. Birçok tezgâh için uygulama basıncı 13 bar olarak standartlaşmıştır. Kesme sıvısının takım içinden uygulanması genellikle delme gibi kapalı alanlarda kesme yapılan uygulamalarda tercih edilmektedir. (Şekil 4.3.) [99].

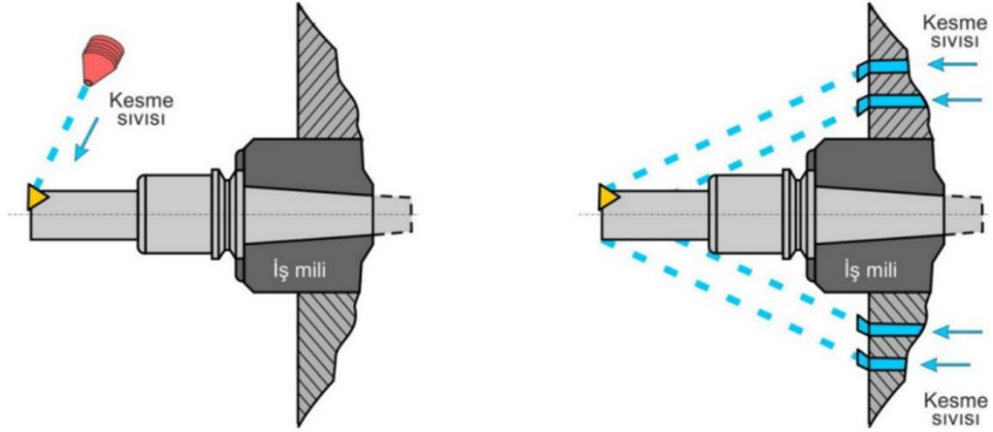


Şekil 4.3. Kesme sıvısının takım içinden uygulanması [104].

Delik işlemlerinde talaşı uzaklaştırmada, kesme kenarı soğutma ve taşlama işlemlerinde taşı soğutmada çok etkili bir uygulamadır. Sızdırmazlığı sağlamak için genellikle takım tezgâhına sızdırmazlık elemanları ve pompa koymak gerekir. Kesme sıvısının yeniden kullanıldığı uygulamalarda filtreleme sistemi kullanımı sıvının temizlenmesi için önemlidir. Ayrıca sızdırmazlık elemanlarının, pompanın ve döner bağlantıların bakımının yapılması bu yöntem için önem arz etmektedir. Bakım yapmanın önemli olduğu bu yöntemde diğer dezavantajlar da duman oluşumu ve köpüklenme olarak sıralanabilir [104].

4.3.1.2. Takım Dışından Uygulama

Kesme sıvısının takım dışından iletiildiği bu yöntemde, kesme sıvısı kesme bölgesine düşük basınçla akıtıldığı gibi yüksek basınçla da fişkırtılabilir. Bu yöntemlerin her ikisinde de kesme sıvısı nozullar aracılığıyla kesme bölgesine ilettirilir. Bu yöntemin uygulanmasında dikkat edilmesi gereken en önemli husus, nozullar yeterli miktarda sıvıyı kesme bölgesine uygulayacak ve iş parçasını ve kesici takımın önünü bu sıvıyla kapatacak şekilde yönlendirilmiş olmalıdır (Şekil 4.4.) [99].



Şekil 4.4. Kesme sıvısının takım dışından uygulanması [104].

Takım dışından kesme sıvısının düşük basınçta uygulandığı yöntemde talaşı kesme bölgesinden uzaklaştırma ve iş parçasının boyutsal toleranslarını sağlayacak etkili bir soğutma yapılması için kesme bölgesine aktarılan kesme sıvısı miktarının yeterli olması gerekmektedir. Yüksek basınçta fişkırtma uygulamasında ise soğutucu, nozullar vasıtasıyla yüksek basınçta kesici takımın önüne çarpacak şekilde yönlendirilmelidir [104].

Nozul iç basıncı kullanılan borunun çapına göre değişiklik gösterse de genelde 5-50 bar arasındadır. Ancak bazı taşlama işlemleri ve talaş kırıcı jet sistemlerinde daha yüksek basınçlar kullanılabilir. Delik delme ve frezeleme işlemlerinde kesme sıvısı, çoğu zaman iş milinin çevresindeki bir halkaya monte edilmiş nozullar vasıtasıyla rijit bir boru içinden geçirilerek uygulanır. Tornalamada bu nozullar takım tutucuya; taşlamada ise taşın önündeki bir boruya monte edilir. Yüksek basınç uygulaması daha etkin bir yağlama ve talaşı uzaklaştırma işlevi görürken; eğer düzgün bir toplama ve filtreleme sistemi yoksa operatöre zarar verebilecek duman oluşumuna neden olur. Ayrıca soğutucu bu uygulamada havayla temas etmeye ve köpürmeye daha meyilli olur [104], [105].

4.3.2. Sis Püskürtme Yöntemi

Sis püskürtme yöntemi genellikle su bazlı kesme sıvılarının uygulanması esnasında tercih edilen bir yöntemdir. Kesme sıvıları yüksek hızlı bir siste basınçlı hava aracılığıyla uygulanır. Havada bulunan sıvı damlacıklarının buharlaşması sonucu etkili bir soğutma sağlar [106]. Bu şekilde kesme esnasında diğer soğutma sistemlerinin ulaşamadığı alanlara daha kolay ulaşır ve böylece bitmiş yüzey kalitesinin artmasına yardımcı olur [85]. Etkili bir soğutma ortaya çıkması için uygulanması gereken basınç miktarı işleme

durumuna göre değişiklik gösterse de genellikle 70 ila 600 kPa arasında değişmektedir. Ancak, sis veya buhar insan sağlığını olumsuz etkileme özelliğine sahip olduğu için operatörler solunum konusunda dikkatli olmalı ve iyi bir havalandırma altında uygulanmalıdır. Eğer dikkat edilmezse sis veya buhar bazı solunum problemlerine ve/veya cilt problemlerine neden olabilir [107]. Sis püskürtme yöntemi, yüksek kesme hızlarındaki işleme uygulamalarından ziyade delme gibi düşük kesme hızlarındaki uygulamalarda tercih edilmelidir. Böylece düşük hızlarda daha az sis veya buhar oluşacağından cilt problemleri ve/veya solunum problemleri yaşama riski daha az olur [108].

4.3.3. Yüksek Basınçla Soğutma Yöntemi

Yüksek basınçla soğutma yöntemi daha çok yüksek güç ve hız nedeniyle kesme bölgesinde oluşan ısının kesme bölgesinden uzaklaştırılma hızının yüksek olmasının istendiği yerlerde tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde kesme sıvısı, kesici takım ucuna ya da kesme bölgesine yüksek hızla iletilmesini sağlayan özel olarak tasarlanmış nozullar aracılığıyla iletilir. Kesme sıvısı 5.5 ila 35 MPa arasında değişen bir basınçla ve 350 ila 500 km/h arasında değişen bir hızla çarpar. Bu yüksek hızla takım-iş parçası ve takım-talaş ara yüzeyine iletilen kesme sıvısı daha etkin bir kesme yapılmasına yardımcı olur. Bu yöntem kesici takım-iş parçası-talaş üçlüsünde temas yüzeyini azalttığı için daha efektif bir soğutma sağlar ve takım ömrünü uzatır [22]. Ancak, yüksek basınçla kesme bölgesine iletilen kesme sıvısı partiküllerinin işlenmiş yüzeye zarar vermesini önlemek için etkin bir filtreleme yöntemi kullanmak gerekir [96]. Bunun yanında, kesici uç aşınmasına olan eğilimlerinden dolayı kübik bor nitrür ve seramik takımlarla titanyum alaşımları gibi sert talaşlı malzemelerin işlenmesinde tavsiye edilen bir yöntem değildir [22], [85].

4.4. KESME SIVILARININ SEBEP OLDUĞU HASTALIKLAR

Kesme sıvıları kesme işlemlerini önemli ölçüde kolaylaştırmalarına rağmen insan sağlığına ve çevreye zararlı olabilmektedirler. Kesme sıvılarının neden olduğu sağlık problemleri; kesme sıvısına maruz kalma süresi ve seviyesi, kirliliğin çeşidi, derecesi ve sıvının tipi gibi çeşitli faktörlere bağlıdır [109]. Kesme sıvısına maruz kalınması dermatit, folliculitis, cilt kanseri ve solunum rahatsızlıkları gibi bir takım ciddi rahatsızlıkların nedeni olabilmektedir.

4.4.1. Dermatit

Kesme sıvısı kullanımının en yaygın olarak doğurduğu cilt rahatsızlığı denilebilir. Cildin tahriş olarak pullanması, kabuklanması veya çatlaması olarak tanımlanmaktadır. Bu hastalık esansında deride kabarcık, kırmızılık ve kaşıntılı deri oluşumu görülür.

Dermatit, tahriş edici etkenlerin yoğun olduğu veya maruz kalma süresinin uzun olduğu durumlarda görünen bir cilt hastalığı türüdür. Derinin dış tabakasına zarar vererek derinin koruyucu fonksiyonunun zarar görmesine neden olmaktadır. Bu sürecin sonunda, çoğunlukla avuç içlerinde; iltihaplı, kuru ve pullu bir cilt oluşumu gözlenir. Tahriş edici dermatit kızarıklık, derinin, tahriş edici maddeyle temas ettiği bölgeyle sınırlıdır [89].

4.4.2. Folliculitis

Saf kesme yağlarının meydana getirdiği özel bir cilt rahatsızlığıdır. Genellikle kesme sıvısı ile kirlenmiş elbiselerin temas ettiği yerlerde gözükür. Yağ ve içine karışan maddeler, deri gözeneklerini tıkayarak yara veya sivilce gibi oluşumlara sebebiyet verebilmektedir [89].

4.4.3. Cilt Kanseri

Kesme sıvılarının etkisinde uzun süre kalarak meydana gelen sağlık sorunlarının ilerlemiş hali olarak tanımlanabilir. Ayrıca yağla ıslanmış bez parçaları ve giysilerle uzun süreli temas da kansere neden olabilmektedir. Kesme sıvıları cilt kanserinin ana etkeni olmasa bile cilt kanserini tetikleyici etkiye sahip olduğu bugün bilinen bir gerçektir [89].

4.4.4. Solunum Rahatsızlıkları

Kesme bölgesine iletilen kesme sıvısı burada oluşan ısının etkisiyle buharlaşmakta ve solunum aracılığıyla vücuda girerek çeşitli sağlık sorunlarına neden olmaktadır. Meydana gelen sağlık sorunları ilk başta önemsenmese de zamanla ilerleyerek kronik bronşit, astım ve akciğer yetmezliği gibi çok daha ciddi sorunlara yol açabilmektedir [109]. Bu rahatsızlıkların ortaya çıkmasında kullanılan kesme sıvısı kadar işlem türü de önem taşımaktadır. Örneğin; broşlama operasyonunda daha fazla yağlama gerekir ve burada kullanılan yağlar klor ve yüksek basınç katkıları içerdiklerinden daha fazla tahriş edicidir. Taşlama ve torna tezgâhlarında da cilt hastalıklarına rastlama oranı yüksektir [89].

Kesme sıvılarının getirdiği rahatsızlıklardan kaçınmak adına eldiven, kesme sıvısının deriyle temasını önleyici krem ve sık sık derinin sabunlu su ile yıkanması gibi bir takım

kişisel önlemler alınabilir. Ayrıca, operatörün tezgâha çok yakın çalışmaması, çalışma ortamındaki havalandırmanın etkin olması, çalışma ortamının temiz tutulması, kesme sıvılarının kimyasal özelliklerinin çalışılabilir seviyede olması da alınacak önlemler arasında sayılabilir [109].

Kesme sıvılarının olumsuz etkilerini en aza indirmek için alınan kişisel önlemlerin haricinde bir takım kanun ve yönetmeliklerle zorunluluklar da getirilmiştir. Occupational Safety and Healthy Administration çalışma ortamında bulunan metal işleme sıvısı yoğunluğunun personelin maruz kalma seviyesini maksimum 5 mg/m³ olarak standartlaştırmıştır. National Institute for Occupational Safety and Healthy'ye göre ise bu oran 0,5 mg/m³'tür [23]. Ülkemizde ise İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Tüzüğü'nün 72. Maddesi ve 165. Maddesi'nde soğutucu sıvılar ile uygulamalar bildirilmiştir [110].

4.5. KESME SIVISI KULLANIMINA ALTERNATİF YÖNTEMLER

Günümüzde önem kazanan işçi sağlığı, çevre bilinci ve endüstrideki üretim maliyetlerini düşürme isteği araştırmacıları imalat esnasındaki soğutma işlemi için farklı alternatifleri ortaya çıkarma yoluna itmiştir. Kesme esnasında soğutma ve yağlama üzere bir takım nedenlerden dolayı kullanılan kesme sıvısının miktarını azaltmak için üç teknik kullanılmaktadır.

4.5.1. Kuru İşleme

Kuru işleme, herhangi bir kesme sıvısı kullanmadan yapılan işleme sürecine verilen isimdir. Bu yöntem, kirlenme, sağlığa zararlı bileşenlerden kaçınma ve üretim maliyetini düşürmek için uygulanır. Kuru işleme hava veya su kaynaklarını kirlenmesine etkide bulunmaz. Bunun yanında soğutma-yağlama sisteminin getirdiği maliyetlerden de kaçındığı için üretim maliyetlerini düşürür. Kaplamalı karbür kesiciler ve bazı karbür kesiciler kuru işlemede kullanılmak üzere geliştirilmişlerdir. Takım ömrünü uzatmak için düşük ilerleme ve düşük kesme hızlarında talaş kaldırmak gerekir [78]. Bununla birlikte, kuru işleme kesici takımların aşırı ısınması gibi bir takım sorunların da ana kaynağıdır. Takım-iş parçası temas yüzeyinde meydana gelen sürtünme kuru kesme esnasında yüksek ısıların oluşmasına neden olur ve bu da kesici takım üzerinde abrasyon, difüzyon ve oksidasyon aşınmalarının ana kaynağını oluşturur. Ortaya çıkan bu yüksek ısıdan iş parçası da etkilenir ve boyutsal toleranslarının etkilenmesi, malzeme yapısında değişiklik ortaya çıkması gibi bir takım ciddi problemlerle karşı karşıya kalır [111]. Buna ek olarak,

talaş kesme bölgesinden uzaklaşmadığı için işlenmiş yüzeyin kalitesinin bozulmasına da neden olur [112]. Kuru işleme, torna, freze ve dişli alüminyum alaşımları dışında çelikler, çelik alaşımları ve dökme demirlerin kesilmesi işlemlerinde uygulanmaktadır. İş parçası malzemesinin yüksek sünekliği nedeniyle alüminyum sliikon alaşımlarının delinmesinde kesinlikle tavsiye edilmez [113].

4.5.2. Kriyojenik İşleme

Kriyojenik işleme, soğutucu gaz olarak azot ve helyum gibi kriyojenik gazların kullanıldığı yeni nesil bir işleme türüdür. Azot, atmosferin %78'ini oluşturan, havadan daha hafif bir soy gazdır. Kriyojenik gazlar herhangi bir atık üretmeden sorunsuz olarak havaya karıştığı için ıslak işlemeye çevre dostu bir alternatif olabilir. Bu yöntemde, sıvı haldeki azot küçük çaplı nozullar aracılığıyla kesme bölgesine iletilir. Bu esnada uygulanan sıcaklık -200°C civarındadır. Sıvı azot kesme bölgesindeki ısıyı emer ve hızlıca buharlaşır. Buharlaşmadan önce kesme bölgesinde yağlama işlevi de görür [96]. Buna ek olarak talaş üzerinde herhangi bir kesme sıvısı kalıntısı olmadığından ek bir işlem gerekmeksizin geri dönüşümde kullanılabilir. Debi ve basınç açısından azotun sıvı olarak iletilmesi çok önemlidir. İş parçası aşırı soğuduğundan kesme için gerekli olan kuvvet düşebilir. Kriyojenik soğutma düşük kesme hızlarında daha etkili bir sonuç vermektedir. Kesme hızının artması kriyojenik soğutmanın da soğutma kabiliyetini azaltmaktadır. Yüksek kesme hızlarında ortaya çıkan yüksek plastik deformasyon kriyojenik soğutmanın etkinliğini azaltmaktadır [22], [85].

4.5.3. Minimum Miktarda Yağlama Sistemi ile İşleme

Kesme sıvıları, fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle kesme esnasında ortaya çıkan termal veya mekanik arızaların azaltılmasında önemli rol oynamaktadırlar. Kesme sıvıları, soğutma işlemini yapmalarının yanında yağlama yaparak kesici takım-ış parçası ara yüzeyindeki sürtünmeyi azaltarak takım ömrünün uzamasına ve işleme kalitesinin artmasına yardımcı olurlar. Ancak, bazı durumlarda soğutma-yağlama sisteminin maliyeti önemli seviyelere çıkmaktadır. Örneğin; Avrupa otomotiv endüstrisinde yapılan araştırmalara göre işleme sürecinde kullanılan kesici takım maliyeti toplam üretim maliyetinin %2 ila 4'üne denk gelirken kesme sıvısı maliyeti toplam üretim maliyetinin yüzde 8 ila 18'sini oluşturmaktadır [21], [114]. Bir başka örnekte, bir yıllık ortalama kesme sıvısı tüketimi Almanya'da 70000 ton civarındayken bu rakam Amerika Birleşik Devletleri'nde 300000 tondan fazladır [115]. Yine bir başka araştırmaya göre,

Amerika’da her yıl ortalama 1,2 milyon çalışan bu sıvıların getirdiği sağlık sorunlarıyla karşı karşıya kalmaktadır [116].

Gerek maliyet gerekse de çevresel etkilerden dolayı kesme sırasında kullanılan kesme sıvılarının miktarını azaltmanın bir gereklilik olduğu ortaya çıkmaktadır. Örneğin; Ford Motor Şirketi tarafından sunulan rapora göre, MMY sisteminin kullanılmasından itibaren takım ömrü, bakım maliyetlerinde değişiklik göstermekle birlikte toplam üretim maliyetlerinde %13 gibi bir azalma görülmüştür [117]. Kesme sıvılarının miktarını azaltarak üretim maliyetlerini aşağı çekmek için kuru, kriyojenik, YHK ve MMY olmak üzere dört teknik kullanılmaktadır. Kuru işleme, çevre dostu ve düşük maliyetli olmasının yanında kurumsal açıdan ekonomi ve çevre dostu üretim süreçlerinin tercih edilmesi pazarda iyi bir görüntüye yol açmakta ve bu da iyi bir reklam anlamına gelmekte olduğundan son derece faydalı bir yöntemdir. Ancak, daha yüksek işleme verimi ve daha iyi yüzey kalitesinin istendiği ağır kesme koşullarında kuru kesmenin olumlu etkileri çok daha azdır [20]. Kriyojenik işleme de yüksek kesme hızlarında fark yaratacak sonuçlar verememektedir [22]. Bu nedenle kesme yağlarının çok küçük miktarda kullanıldığı yarı kuru kesme olarak da adlandırılan MMY sistemi pratik operasyonlar için çok önemli rol oynamaktadır.

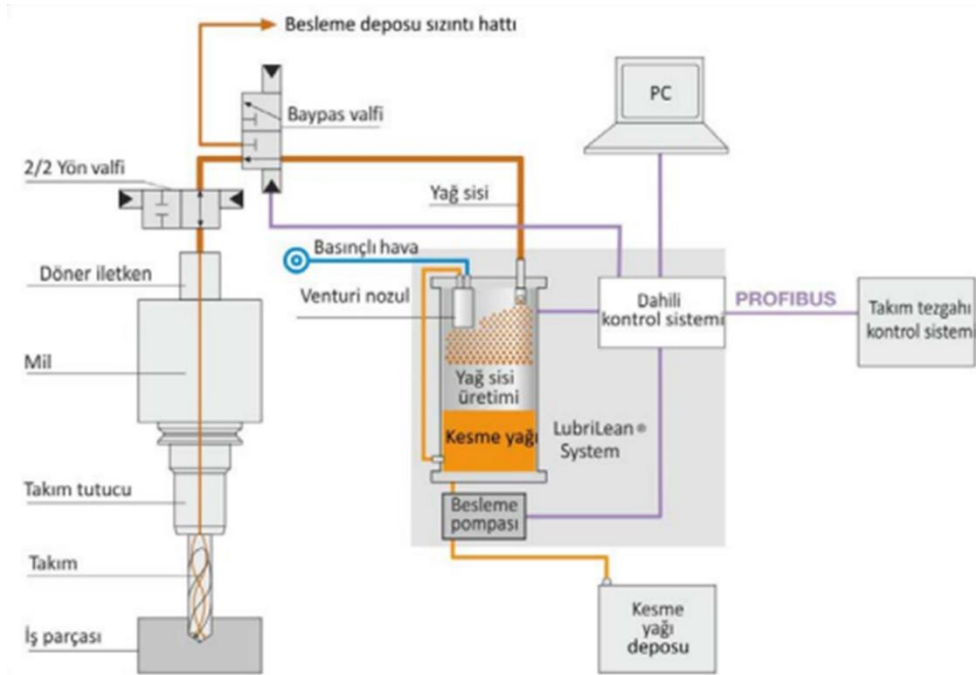
“Minimum Miktarda Yağlama” kavramı ilk olarak 1996 yılında Michigan Teknik Üniversitesi’nde görevli W. D. Hewson ve G. K. Gerow adlı bilim insanları tarafından ortaya atılmıştır [118]. MMY sistemi, günümüz imalat işlemlerinde yaygın olarak kullanılan ve bu alanda araştırma yapan bilim insanları için önemli bir obje olarak karşımızda duran yeni nesil bir soğutma-yağlama teknolojisidir [119]. MMY, üç ana işleme yöntemi olan torna, freze ve delmenin yanında taşlama işlemlerinde de yoğun olarak kullanılmaktadır [120]-[123]. Kuru ve konvansiyonel soğutma-yağlamanın karışımı olarak tanımlanabilen MMY, her iki sistemin avantajlarını bünyesinde toplamaktadır. MMY sisteminin en belirgin faydaları üretim maliyetlerini aşağı çekmek ve işçi sağlığını korumak olarak sıralanabilir [124]. MMY sisteminin kullanımı ile birlikte toplam üretim maliyetinde % 15’e kadar iyileştirme sağlanabilmektedir. MMY sistemi en genel tanımıyla çok az miktarda (bazı kaynaklar yağ miktarını maksimum 50ml/s olarak tanımlarken [125] bazı kaynaklarda ise bu oran 50-500ml/s olarak [113] veya 10-150ml/s olarak verilmektedir [123]) yağ kullanımı veya konvansiyonel soğutma-yağlama sistemi ile arasında 1/10000 lik bir kesme sıvısı tasarrufu [24] ve parçacık haldeki kesme sıvısının basınçlı hava yardımıyla kesme bölgesine püskürtülmesi olarak tanımlanabilir.

Minimum kesme sıvısı kullanımını amaçlayan MMY sistemi, kesme sıvısını yüksek basınçlı hava ile kesme bölgesine iletmeyi amaçlamaktadır [126]. Bu yüksek basınçlı püskürtme soğutma ve yağlama görevinin yanında kesme sıvılarının bir başka görevi olan talaşı kesme bölgesinden uzaklaştırma işlemini de yapmaktadır [127].

Minimum miktarda yağlama sisteminde, 10 bar civarında basınçlı havaya ihtiyaç duyulduğu için bunu karşılayabilecek bir kompresör kullanılır. Kompresörden gelen bu yüksek basınçlı hava, farklı basınç değerlerine sahip sıvı haznesi ve karıştırma haznesine gönderilir. Çok küçük çaplı esnek bir tüp aracılığıyla birbirine bağlı olan bu hazneler yardımıyla karıştırılan kesme sıvısı-hava kombinasyonu yine kompresörde üretilen yüksek basınç tarafından kesme bölgesine iletilir. MMY sistemlerinde kesme sıvıları kesme bölgesine takımın içindeki kanallar vasıtasıyla içeriden veya sabit nozullarla dışarıdan olmak üzere iki farklı şekilde aktarılabilir [20].

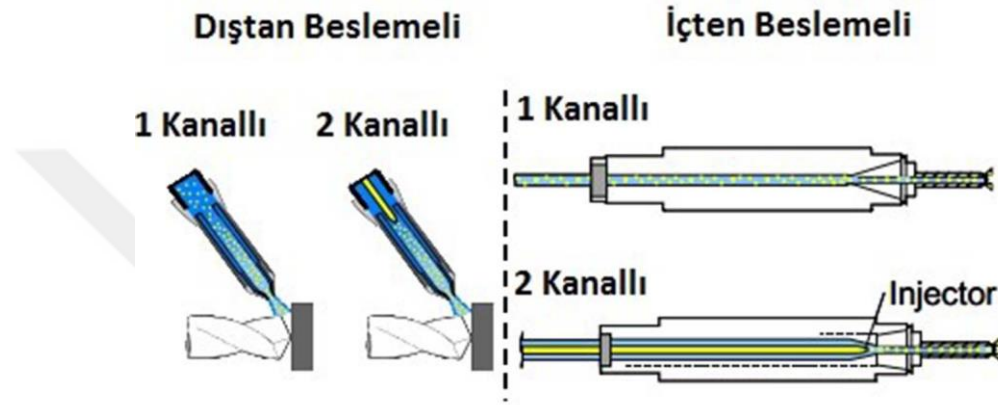
4.5.3.1. Dâhili Minimum Miktarda Yağlama Sistemi

Dâhili minimum miktarda yağlama sisteminde soğutma hava ile yağlama ise hava içerisindeki küçük yağ damlacıkları (aerosol) ile yapılır. Bu sistemde aerosol, yağlama sisteminin içerisinde üretilerek hortumlarla dönen milin içinden geçer. Takımın içindeki MMY soğutma kanallarından da geçerek iş parçasına ulaşır [104]. Şekil 4.5’de dâhili minimum miktarda yağlama sistemini gösteren şematik görünüm verilmiştir.



Şekil 4.5. Tek kanallı içten MMY sisteminin çalışma şeması [128].

Dâhili MMY sistemi kendi içinde tek kanallı ve çift kanallı olmak üzere ikiye ayrılır (Şekil 4.6). Tek kanallı sistemde, yağ-hava karışımı dışarıda hazırlanarak püskürtülür, çift kanallı sistemde ise yağ ve hava ayrı ayrı takım içine gelir ve orada karıştırılır. Dâhili MMY sistemlerinde aerosol oluşturmak için özel bir alet kullanılmaktadır. Bu sayede damlacıkların büyüklüğü 0.3-1 μ m'ye kadar düşürülebilmektedir. Damlacıkların kütlelerinin az olması ataletlerinin de küçük olmasına neden olur. Ataletleri küçük olan aerosollar keskin dönüşler ya da yüksek hızda dönen millerden önemli bir değişikliğe uğramadan geçebilir ve istenilen yağlama noktasına ulaştırılabilir [104].

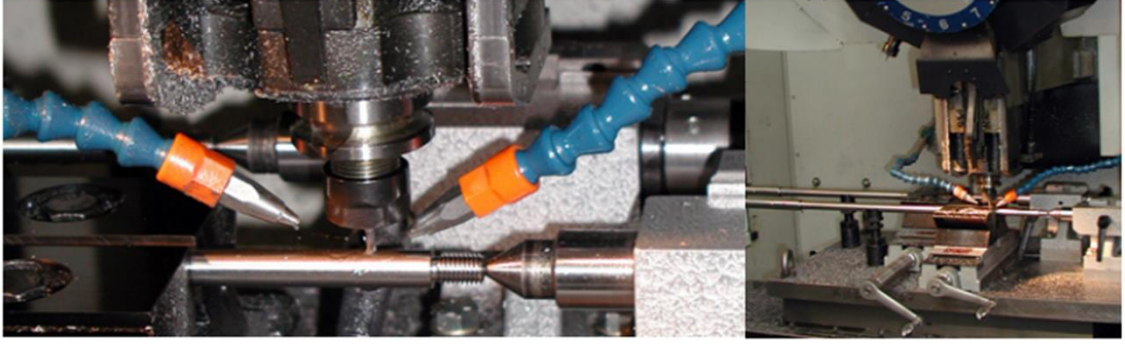


Şekil 4.6. Dâhili MMY sisteminin şematik gösterimi [129].

Bu yöntemle takımın pozisyonundan bağımsız olarak püskürtülen sıvı kesme kenarına ulaşır. Derin delik delme işlemlerinde, büyük l/d oranı içten püskürtmeli minimum miktarda yağlamayı vazgeçilmez hale getirmektedir. Bu yöntemin diğer avantajları ise nozul konumlandırılmadan kaynaklanabilecek hataların önlenmiş olması ve takım içinden püskürtme yapıldığı için işleme alanının besleme borularıyla işgal edilmemiş olmasıdır [104].

4.5.3.2. Harici Minimum Miktarla Yağlama Sistemi

Harici MMY yönteminde soğutma uygulaması sabit nozullarla dışarıdan püskürtme şeklinde yapılır. Bir veya birden fazla karışım düzenleyicisi ve soğutma hortumlarına ek olarak püskürtme ağzından oluşur. Sıkıştırılmış hava sisteme beslenir. Bu sayede kesme sıvısı rezervuarının üzerindeki basıncı artırır. Üniteye beslenen basınçlı hava sayesinde sistemde artan basıncın etkisiyle kesme sıvısı hava ile karışmadan taşınır. Sprey nozuldan eş merkezli şekilde hava ile karışarak atomize olmuş bir halde kesme bölgesine iletilir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Harici püskürtmenin uygulanması [128].

Harici yağlama sistemi de dâhili yağlama sisteminde olduğu gibi kendi içerisinde tek kanallı ve çift kanallı olmak üzere ikiye ayrılır. Tek kanallı harici yağlama sisteminde, yağ hava karışımı dışarıda hazırlanarak püskürtülür, çift kanallı sistemde ise yağ ve hava ayrı ayrı nozul içine veya takım içine gelir ve orada karıştırılır. Dıştan püskürtmeyi gerektiren uygulamalarda aerosol kesici uca dışarıdan bir veya daha fazla nozulla ulaştırılır. Burada nozul sayısı, yönü ve düzeni yöntemin kalitesini belirlemede önemlidir. Bu yöntem; kesme, parmak ve alın frezeleme ve tornalama işlemlerinde kullanılmaktadır. Delme, raybalama ve diş açma gibi işlemlerde sadece uzunluk/çap oranı $l/d < 3$ olduğu durumlarda dıştan püskürtme kullanışlıdır [104].

5. DENEY TASARIMI VE TAGUCHİ METODU

5.1. TAGUCHİ METODU

Üreticiler, varlıklarını devam ettirebilme, pazar paylarını artırma ve müşteri memnuniyeti için kesintisiz bir rekabet içindedirler. Bu rekabet ortamı da onları kaliteli ürünler üretmek zorunda bırakmıştır ve bu nedenle enerjilerinin büyük bölümünü kaliteyi artırma konusuna harcamışlardır. Bu hedef doğrultusunda, kaliteyi geliştirmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Ancak, bu yöntemlerdeki parametre çokluğu yüksek deney sayılarını doğurmuştur. Yüksek deney sayısının üretimdeki karşılığı ise yüksek maliyet ve uzun deney süresi demektir. İkinci dünya savaşının son dönemlerinde Japon makine mühendisi Genichi Taguchi endüstriyel ürün ve süreç geliştirmede çok önemli adımlar atmıştır. Taguchi, attığı bu adımlar sayesinde uzun deney süresi ve yüksek maliyeti azaltabilmek için ortogonal dizinleri ortaya çıkarmıştır [130].

Ortogonal dizinler, faktör seviyelerini teker teker değiştirmek yerine aynı anda değiştirme imkânı sağlamaktadır. Bu imkân da Taguchi deney yaklaşımının kimya ve elektronik sektöründe olduğu gibi imalat sektörü için kabul edilmesini kolaylaştırmaktadır. Taguchi, deneysel tasarım yöntemi açısından bir yenilik olmamasına rağmen sanayi uygulamalarına yönelik yeni nesil çalışmalar yapmış ve böylece imalat sektörü tarafından kabul edilebilirliğini kolaylaştırmıştır [131].

Taguchi metodunun esas amacı, kontrol edilebilen değişkenler belirli seviyelerde zaman ve maliyet açısından etkin kontrol edilemeyen faktörlerin tüm kombinasyonlarına karşı duyarsız ürünler/prosesler tasarlamaktır. Taguchi tekniği, ürünlere ait istenen kaliteleri elde ederken bu kaliteyi elde etme sürecini çok daha az deney sayısı ve maliyetle tamamlamaktadır [132]. Dolayısıyla, Taguchi yaklaşımı diğer yaklaşımlar ile kıyaslandığında daha az deneysel işlem gerektirir. Ayrıca, Taguchi yaklaşımı ile ortaya konulan sonuçlar işlem doğruluğu konusunda oldukça başarılıdır [133].

Taguchi'nin kalite anlayışını yedi maddede özetlenebilir [134];

- a) Üretilen bir ürünün kalitesi o ürünün kullanımı sırasında toplumda meydana getirdiği kayıpla ölçülür.

- b) Bir işletmenin pazarda kalabilmesi için sürekli olarak kaliteyi geliştirip maliyeti azaltması gerekmektedir.
- c) Kalite geliştirme programı sürekli olarak ürün performans karakteristiklerinin hedef değerlerinden olan sapmalarını azaltmayı amaçlamalıdır.
- d) Bir ürünün performansındaki sapmanın, tüketici üzerinde meydana getirdiği kayıp, söz konusu performans karakteristiğinin hedef değerden sapma miktarının karesi ile doğru orantılıdır.
- e) Ürün kalitesi, büyük ölçüde ürün tasarımı ve üretim sürecince belirlenebilmektedir.
- f) Bir ürünün performansındaki sapmayı azaltmak için, ürünün performans karakteristiğinin üzerinde etkili olan parametrelerin etkilerini kontrol altına almak gerekir.
- g) Ürün karakteristiklerindeki değişimi azaltan parametre kombinasyonları tanımlamak amacıyla deneysel tasarım yaklaşımı kullanılabilir.

Taguchi'nin kalite kavramına kattığı en önemli katkı, kalite sistemini üretim öncesi ve üretim esnası olmak üzere iki bölüme ayırarak üretilen bir ürünün kalitesini ve müşteri memnuniyetini üretime başlamadan önce tasarım ile yakından ilgili olduğunu gösteriyor olmasıdır [135].

5.2. TAGUCHİ FELSEFESİNİN TARİHSEL GELİŞİMİ

Taguchi deney tasarımının temeli ilk olarak 1920'li yıllarda İngiliz istatistikçi Sir Ronal Fisher'in tarım alanındaki araştırmaları esnasında bulunmuş ve daha sonra çeşitli şekillerde gelişim göstermiştir. Sir Ronal Fisher deney tasarımının temelini bulmasının yanında deney verilerinin analizinde kullanılan ANOVA yöntemini de geliştirmiştir. Bu yöntem aracılığıyla Amerika tarım konusunda önemli gelişmeler kat etmiş ve dünyada bu alanda lider ülke konumuna gelmiştir. İkinci dünya savaşı sonrasında yeni bir teknolojik sıçrama gerçekleştirmek isteyen Japonya bunun en önemli ayağı olarak bir telefon sisteminin geliştirilmesini hedef edinen bir projeyi görmekteydi. Bu projenin ana hedefi, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Bell laboratuvarlarında kullanılan telefon sistemi Japonya'da da kurmaktı. Ancak Japonya'daki imkânların kısıtlı olmasından dolayı projenin tamamlanma süresi olarak 20 yıllık bir süre öngörülmekteydi. Genichi Taguchi, proje süresini kısaltmak amacıyla, tüm araştırma personeli için metotların standardize edilmesini ve faktöriyel tasarımların kullanılmasını önerdi. Kabul edilen önerisi

sayesinde proje 4 yılda bitirilmiş ve Taguchi çok ünlü olmuştur [130]. Taguchi yönteminin ülkemizdeki kullanımı ilk olarak 1990'lı yılların başına rastlamaktadır ve kullanımının başlaması ile birlikte endüstri uygulamaları açısından geniş kullanım alanına ulaşmıştır.

5.3. TAGUCHİ FELSEFESİ

Kalite mühendisliği tasarımın kalitesinin üç ana etmene dayandığını iddia etmektedir;

- Dikey dizilim (Orthogonal Arrays)
- Sinyal-Gürültü oranı (S/N ratio)
- Kayıp fonksiyonu (Loss Function)

Taguchi yönteminin ana felsefesi üç ana başlık altında toplanmaktadır [135];

- a) Kalite ürüne göre tasarlanmalıdır.
- b) Kalite, hedeften sapmanın en az olduğu durumlarda ortaya çıkabilir, ürün ise kontrol edilemeyen çevresel faktöre karşı telafi edilebilecek şekilde tasarlanmalıdır.
- c) Kalite maliyeti, standarttan sapmanın bir fonksiyonu olarak ölçülmeli ve kayıplar sistem genelinde değerlendirilerek hesaplanmalıdır.

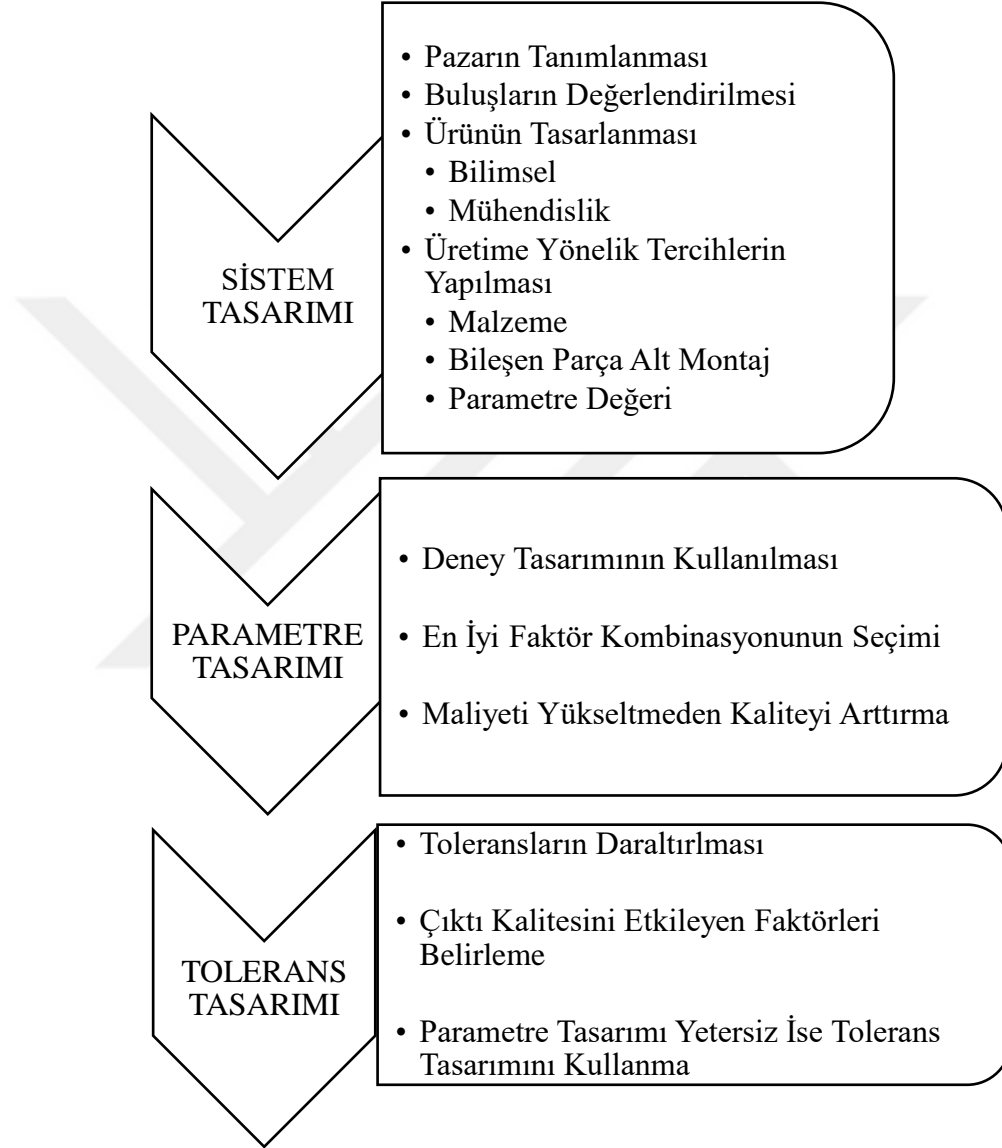
Taguchi metodu, deney tasarımı aracılığıyla elde edilmek istenilen ürün kalitesine ulaşmak için üç aşamalı bir süreci ön plana çıkarmaktadır [135];

Sistem tasarımı: Sürecin ilk aşamasıdır. Ürüne ait istenen fonksiyonların olması için gereken teknolojiler tasarlanır ve bunlardan ürün için en uygun olanı seçilir. Bir ürün istenen fonksiyonu yerine getirmediği zaman müşteri beklentilerine cevap veremez ve bu da kaliteyi doğrudan etkileyen bir unsurdur [134], [136].

Parametre tasarımı: Ürün kalitesini iyileştirmede en belirleyici çalışmaların yapılacağı aşamadır. Bu çalışmalar hem ürün hem de proses için parametre tasarlamayı kapsamaktadır. Parametre tasarımı, ürün parametreleri, malzeme formülasyon değerleri, boyutlar, yüzey örnekleri gibi optimal değerlerin belirlenmesi anlamına gelmektedir. Bu açıdan bakıldığında parametre tasarım süreci Taguchi deney tasarımı yönteminin temel adımı olarak değerlendirilebilir [136].

Tolerans tasarımı: Bu aşamada, parametre tasarımı ile oluşturulmuş nominal parametre bileşimlerine uygun toleranslar belirlenir. Dar toleransların üretim maliyetini

yükseltmesi, geniş toleranslarında performans sapmaları arttırması nedeniyle tolerans tasarımında bu ilişki arasındaki en iyi orta nokta belirlenmesi sorunu vardır. Bu noktanın bulunması tüketicilerin kaliteyi ucuza satın alma istekleri ile üreticilerin kaliteyi ucuza üretme istekleri arasındaki eniyileme probleminin çözümüne benzemektedir [137]. Şekil 5.1’de Taguchi metodunun sistematığı verilmiştir.



Şekil 5.1. Taguchi Metodunun Sistematığı.

Taguchi yönteminin temel felsefesi, farklı parametrelerin farklı seviyelerinin bulunduğu durumlarda deney sayısını azaltmaktır. Bu parametre ve bunların farklı seviyelerinin her biri için deney tasarlanması gereken durumlarda ortaya çıkan Taguchi yöntemi ortogonal dizi tablosu sayesinde çok daha az deney sayısı ile hedeflenen sonucu almayı sağlar.

5.4. TAGUCHİ DENEY TASARIMI AŞAMALARI

Taguchi metodu, deney tasarımı aracılığıyla ürünün tasarımı ve imalat süreci ile birlikte kullanımında ortaya çıkan değişkenliği azalttığını ve bu şekilde mükemmelliğe sahip tasarım elde edildiğini savunmaktadır. Taguchi metodunda deneysel aşamalar şu şekildedir [138];

- a) Faktör ve etkileşimleri belirleme
- b) Faktörlere ait seviyeleri belirleme
- c) Uygun ortogonal dizini belirleme
- d) Belirlenen ortogonal dizine faktör ve etkileşim atama
- e) Deneyleri yapma ve sonuçları kaydetme
- f) Deney sonuçlarını analiz etme
- g) Doğrulama deneylerini yapma

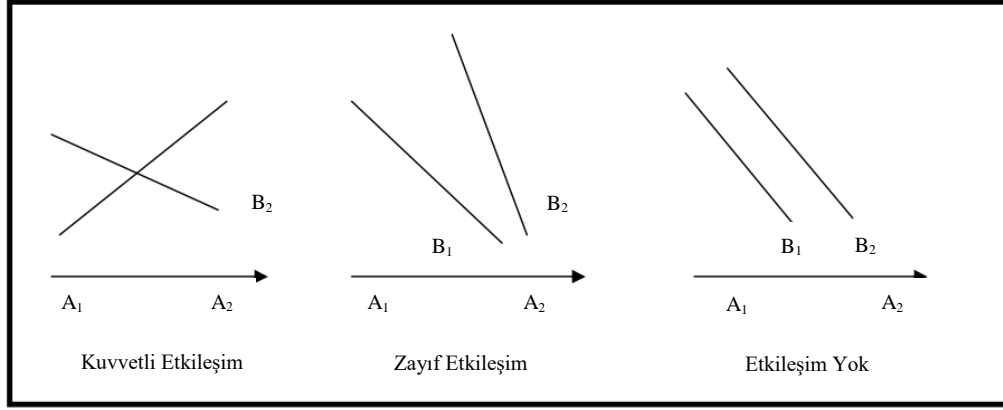
5.4.1. Faktör ve Etkileşimleri Belirleme

Taguchi yöntemi de tıpkı klasik deney yöntemlerinde olduğu gibi problem ve problemin çözümüne dair ana hedefin belirlenmesinden sonra çeşitli yöntemler aracılığıyla değerlendirmeye alınacak faktörler belirlenir. Taguchi yönteminde, faktör seviyeleri belirlenmeden önce faktörler belirlenir ve bu faktörler kontrol edilebilen faktörler ve kontrol edilemeyen faktörler olmak üzere ikiye ayrılır. Kontrol edilebilen faktör sayısına göre deney tasarımı yapılır ve denemeler yapılır [139].

5.4.2. Faktörlere Ait Seviyeleri Belirleme

Faktörlerin belirlenmesinin ardından bu faktörlere ait seviyelerin belirlenmesine geçilir. Bu seviyeler iki, üç veya daha çok olabilir. Faktör seviyelerinden yola çıkarak hesaplanan serbestlik dereceleri, deneyin büyüklüğünü belirlemek açısından önemlidir ve bir faktöre ait serbestlik derecesi o faktörün seviyesinin bir eksiği olarak hesaplanır. Bununla birlikte, faktörlere ait bireysel etkilerle beraber faktörler arası etkileşimler de belirlenir. Bu durumda etkileşim için serbestlik derecesi etkileşen faktörlere ait serbestlik derecelerinin çarpımı şeklinde hesaplanır.

İki faktörün etkileşim halinde olması, bir faktörün (A) kalitesine olan etkisi, diğer faktörün (B) hangi değerde bulunduğuyla alakalıdır. Bu durum AXB şeklinde ifade edilir. Etkileşime grafiği Şekil 5.2’de gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Etkileşim grafik gösterimi.

5.4.3. Uygun Ortogonal Dizini Belirleme

Taguchi yöntemi, yüksek sayıdaki deneysel duruma açıklık getirmek için ortogonal dizinleri oluşturmuştur. Bu dizinlerin en belirgin özelliği, birçok faktörün mümkün olan en az sayıdaki deneyle kontrol edilmesi ve faktör seviyelerini eş zamanlı olarak değiştirmeye olanak sağlamasıdır. Ortogonal dizilere ait genel gösterim şu şekildedir;

$$L_d(a)^k \text{ ya da } L_d \quad (5.1)$$

burada;

d: Deney sayısı

a: Faktörlere ait düzey seviyesi

k: Faktör sayısı

L: Ortogonal diziyi ifade etmektedir.

Genelde iki seviyeli diziler L_4 , L_8 , L_{16} ve L_{32} üç seviyeli diziler ise L_9 , L_{18} ve L_{27} şeklinde olmaktadır. Dizilerin seçimi seviye sayısı ve toplam serbestlik derecesine göre yapılmaktadır. Ortogonal dizi, ürün ortalaması ve varyansında etkili olan birçok faktörle aynı anda ve daha kısa sürede çalışmayı sağlamaktadır [140].

5.4.4. Belirlenen Ortogonal Dizine Faktör ve Etkileşim Atama

Belirlenen ortogonal dizine faktör ve etkileşimlerin atanmasında Taguchi tarafından geliştirilen doğrusal grafikler ve üçgensel tablolar kullanılmaktadır. Doğrusal grafikler faktörlerin atanacağı sütunları gösterirken üçgensel tablolar ise faktörler arasında gerçekleşen tüm etkileşimleri kapsamaktadır [138].

Belirlenen ortogonal dizine faktör ve etkileşimlerin atanmasında ilk yapılan işlem

etkileşimlerin atanması olmalıdır. Eğer ilk olarak etkileşim atanması yapılmazsa bazı sütunlar etkileşim olan diğer sütunlarla karıştırılabilir ve bunun sonucu olarak da bağımsız olarak değerlendirilemeyebilir. Bununla beraber, iki yönlü etkileşimlerin incelenebilmesi için bazı sütunlara faktör atanmaz ve boş bırakılır. Etkileşimlerin atanmasında etkileşim tabloları kullanılır. Etkileşim tabloları etkileşimlerin olduğu sütunları gösterir. Her bir Taguchi dizaynı için ayrı bir etkileşim tablosu bulunmaktadır [130].

5.4.5. Deneyleri Yapma ve Sonuçları Kaydetme

Deneye uygun ortogonal dizinler belirlenip elde edilen ortogonal matrise uygun faktör ve etkileşimler atandıktan sonra deneylerin uygulanmasına geçilebilir. Deneylerin yapılması esnasında deneylerin hangi sıra ile uygulanacağı ve tekrarlı yapıp yapılmayacağına karar verilmelidir. Deney sonucunda ölçülen çıktı sürekli bir veri (sıcaklık, basınç, hız vb.) ise deneyleri tekrarlamak güvenilirliğini artıracaktır. Ancak, deneyler sonucunda elde edilecek çıktı var-yok gibi süreksiz bir veri ise deneyler mutlaka tekrarlı bir şekilde yapılmalıdır [138].

Deneylerin uygulanma sırası belirlenirken çeşitli yöntemler kullanılmaktadır ancak en çok tercih edilen yöntem rassallaştırma. Rassallaştırma, deneylerin yapılış sırasının belirli bir sıra dâhilinde değil de belli bir rastgelelikle yapılması yöntemidir. Buradaki amaç, deney sırasında ortaya çıkabilecek ve sonuçları olumsuz yönde etkileyebilecek ve deneylere başlamadan önce ön görülememiş değişkenliklere karşı koymaktır. Rassallaştırmanın yapıldığı üç ana yöntemden bahsetmek mümkündür;

- Tamamen rassallaştırma
- Basit tekrar
- Bloklar içinde tamamen rassallaştırma

Tamamen rassallaştırma yönteminde, öncelikle istenilen deneyler yapılır. Daha sonraki deneyler rastgele sayılar tablosu kullanılarak daha önceden belirlenmiş sıra ile yapılır. Tekrar gerektiği durumlarda ise bir test tamamlanana kadar rassal olarak seçilir ve ikinci tekrar yapılırken deney sırası rassal olarak bir öncekinden farklı sırada seçilir. Deneyler tamamlanmaya kadar bu yöntem uygulanır. Basit tekrar yönteminde ise tüm deneyler ilk test olarak seçilebilmek için eşit şansa sahiptir. Fakat tamamen rassallaştırma yönteminden farklı olarak, tekrar durumunda seçilen deney için gerekli tüm tekrarlar arka arkaya test edilir [130].

5.4.6. Deney Sonuçlarını Analiz Etme

Deney sonuçlarını analiz ederek en uygun faktör seviyelerinin belirlenmesi için beş yöntem kullanılmaktadır. Bunlar;

- Gözlem yöntemi
- Sıralama yöntemi
- Sütun farkları yöntemi
- Varyans analizi yöntemi
- Faktör etkilerinin grafiksel gösterimi yöntemidir [130].

Bu çalışmada varyans analizi yöntemi tercih edildiğinden sadece bu yöntem açıklanmıştır.

5.4.7. Varyans Analizi

Kalite ile ilgili tartışmaların büyük bölümünü varyans oluşturduğundan deney sonuçlarının yorumlanması ve gerekli kararların alınmasında ANOVA yöntemi kullanılmaktadır. Varyans analizi, toplam varyasyonu bileşenlerine ayıran matematiksel bir tekniktir ve serbestlik derecesi, karelerin toplamı, ortalama kareler (varyans) vb. gibi niceliklerin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu yöntem 1930'lu yıllarda İngiliz istatistikçi Fisher tarafından bulunmuştur. İsminin baş harfinden ötürü literatürde F testi diye de geçmektedir. Varyans analizi tek faktörlü, iki faktörlü ve çok faktörlü olmak üzere geniş bir kullanım yelpazesine sahiptir. Taguchi ortogonal dizileri iki ve üç kademeli olduklarından çoğunlukla ikili veya üçlü kademe için varyans analizi bu aşamada kullanılır [138].

Faktör etkilerinin belirlemek için kullanılan varyans analizi hesaplamalarında kullanılan notasyonlar şu şekildedir;

SS_T : Tüm değerlerin kareleri toplamı

SS_A : A faktörü için kareler toplamı

SS_o : Hata kareleri toplamı

V_T : Toplam serbestlik derecesi

V_A : A'nın serbestlik derecesi

V_{AxB} : A ve B interaksiyonunu serbestlik derecesi

V_O : Hata varyansı

N: Elde edilen toplam veri sayısı

n_A : A faktörü için veri sayısı

T: Mevcut tüm verilerin aritmetik ortalaması

y_i : Gözlenmiş değer

k_A : A faktörünün kademe sayısı

5.4.7.1. Kareler Toplamı

Toplam varyans üç çeşit bileşenden oluşmaktadır. Bunlar;

- Performans karakteristiğini etkileyen faktörlere göre varyasyon
- Faktörlerin etkileşim durumlarına göre varyasyon
- Hataya göre varyasyondur.

Eğer A ve B gibi iki faktör var ve bunlar arasında bir etkileşim varsa toplam varyasyon şu şekilde yazılmaktadır;

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AxB} + SS_o \quad (5.2)$$

A ve B faktörleri arasındaki etkileşim AxB ile temsil edilmektedir.

$$SS_T = \left[\sum_{i=1}^N y_i^2 \right] - \frac{T^2}{N} \quad (5.3)$$

$$SS_A = \left[\sum_{i=1}^{k_A} \left(\frac{A_i^2}{N_{Ai}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \quad (5.4)$$

Toplam kareler toplamından tüm faktörler ve etkileşimlerin kareler toplamının çıkarmak hata varyasyonu hesaplamının en kolay yoludur.

$$SS_T = SS_T + SS_A + SS_B + SS_{AxB} \quad (5.5)$$

Ortogonal düzende sütunların toplam kareler toplamı SS_T 'yi vermektedir.

$$SS_T = \sum SS_{SÜTUN} \quad (5.6)$$

5.4.7.2. Serbestlik Derecesi

Serbestlik derecesi, ANOVA hesaplarını tamamlamak için dikkate alınması gereken önemli bir özelliktir. Serbestlik derecesi istatistiki açıdan verilerden elde edilen her bir parça ile ilişkilendirilmektedir. Kareler toplamı gibi serbestlik derecelerinin toplamı da serbestlik derecesini vermektedir [141].

İki faktör ve bu faktörlerin etkileşimleri göz önüne alınacak olursa;

V T = Toplam Serbestlik derecesi

$$VT = V_A + V_B + V_{AxB} + V_o \quad (5.7)$$

Toplam serbestlik derecesi deneme sayısının bir eksiğine eşittir.

$$VT = N - 1 \quad (5.8)$$

Bir faktör ya da sütunun serbestlik derecesi de seviye sayısının bir eksiğidir.

$$V_A = k_A - 1 \quad (5.9)$$

$$V_B = k_B - 1 \quad (5.10)$$

Etkileşimin serbestlik derecesi ise etkileşen faktörlerin serbestlik derecelerinin çarpımına eşittir.

$$V_{AxB} = (V_A) * (V_B) \quad (5.11)$$

Hata serbestlik derecesi de; toplam serbestlik derecesinden tüm faktör ve etkileşimlerin serbestlik dereceleri çıkartılarak bulunur.

$$V_o = V_T - V_A - V_B - V_{AxB} \quad (5.12)$$

Denemelerin tekrarları söz konusu olduğunda ise toplam serbestlik derecesi

$$V_T = \text{Deneme sayısı} \times \text{Tekrar sayısı} - 1 \quad (5.13)$$

5.4.7.3. Varyans

Varyans istatistikte, ANOVA tablosundan hesaplanabilen bir değer tanımlayıcısı olarak tanımlanmaktadır. Hata varyansı, genellikle varyans olarak bilinir ve hata kareleri toplamının hata serbestlik derecesi ile bölümünden elde edilen değere eşittir.

V_e = Hata varyansı

$$V_T = \frac{SS_o}{V_o} \quad (5.14)$$

Hata varyansı, hata (kontrol edilemeyen) faktörlerden kaynaklanan değişimin ölçüsüdür ve deneylerdeki ölçüm hatalarını da içine almaktadır. Faktörler ve etkileşimlerinin varyanslarında aynı şekilde hesaplanmaktadır.

A faktörü için varyans;

$$V_A = \frac{SS_A}{V_A} \quad (5.15)$$

B faktörü için varyans;

$$V_B = \frac{SS_B}{V_B} \quad (5.16)$$

AxB etkileşimi için varyans;

$$V_{AxB} = \frac{SS_{AxB}}{V_{AxB}} \quad (5.17)$$

Hata varyansı için sütun belirleme işlemi yapılırken F-testi de uygulanabilir. Buna göre; etkisi en çok olan sütunu takip eden küçük etkili sütuna göre önemli olup olmadığını görmek için F-testi uygulanır. Eğer önemli bir F oranı ortaya çıkmazsa, bu iki sütunun etkisi bir sonraki küçük etkili sütunla karşılaştırılmak üzere birleştirilir. Bu işlem önemli bir F oranı buluncaya kadar devam eder [141].

5.4.7.4. F Testi

Deney verilerinin varyansları bulunduktan sonra deneylerde kullanılan faktörlerin hangisinin daha önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermek için F-testi uygulanır. F-testinin uygulanması esnasında hataların eşit sapmalarla ve normal dağıldığı bunun yanında da bağımsız olduğu varsayılmaktadır. F-testinin uygulanmadığı durumlarda önem derecesi doğru hesaplanamayabilir. F-testi uygulanırken analiz sırasında hesaplanan F değerleri ile belirlenen güven seviyesindeki F tablo oranları karşılaştırılarak, tablo oranından büyük F değerine sahip faktörlerin performans karakteristiği üzerinde etkili olduğu düşünülür [141].

5.4.8. Doğrulama Deneylerinin Yapılması

Uygulanan deneylerin analizinden sonra elde edilen en iyi şartlar altında deney tekrarlanmaktadır. En iyi şartları belirleyerek yapılan deneylere doğrulama deneyi denir. Deney sonucunda bulunan faktör-seviye kombinasyonu en iyi performans karakteristiği değerine ulaşırsa istenen durum gerçekleşmiş ve deney amacına ulaşılmış demektir.

6. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Eşsiz özellikleri sayesinde günümüzde yaygın bir kullanım alanına sahip olan süper alaşımlar, aynı zamanda işlenebilirliği son derece zor olan malzemelerdir. Süper alaşımların işlenmesinde araştırmacıların kafasını meşgul eden en önemli soru ise takım ömrünü, ölçü tamlığını ve yüzey kalitesini doğrudan etkilemesinden dolayı, işleme esnasında kesme bölgesinde oluşan ısının nasıl kontrol edilebileceği olmuştur. Kesme bölgesinde oluşan ısıyı kontrol etmek için doğru kesme parametrelerinin (kesici uç, kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği vb.) seçilmesinin yanında doğru soğutma-yağlama sisteminin seçilmesi de önem taşımaktadır. Son yıllarda bu sorunu optimum seviyeye çekebilmek için MMY gibi yeni nesil soğutma-yağlama sistemleri imalat endüstrisinde kullanılmaya başlanmıştır. Bununla beraber, işlenebilirliği zor olan süper alaşımların işlenmesi ve işleme esnasında MMY sisteminin kullanılmasına yönelik araştırmalar devam etmektedir. Bu araştırmaların bir kısmı aşağıda verilmiştir.

6.1. SÜPER ALAŞIMLAR VE WASPALOY'UN İŞLENEBİLİRLİĞİ İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Olgun ve Budak yaptıkları çalışmada, karbür takımlar ile kuru, ıslak ve MMY sistemi altında işlemenin takım ömrü, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini incelemişleridir. Deneyler esnasında Ç1050, Waspaloy ve Ti6Al4V malzemeleri kaplamalı karbür kesicilerle tornalanmıştır. Araştırmacılar kesme parametrelerini Ç1050 malzeme için 400m/dak kesme hızı, 0.2mm/dev ilerleme ve 1 mm kesme derinliği şeklinde seçerken Waspaloy ve Ti6Al4V malzemeleri için 45m/dak kesme hızı, 0.1mm/dev ilerleme ve 0.2 mm kesme derinliği şeklinde seçmişlerdir. Deney sonuçlarının analizini yapan araştırmacılar, Waspaloy'un işlenmesinde ıslak ve MMY sistemini kuru işleme ile kıyaslandığında takım ömründe %100 artış sağladığını görmüşlerdir. Araştırmacılar bu oranı Ç1050'nin işlenmesinde %14 olarak okurken Ti6Al4V'nin işlenmesinde benzer sonuçlar ortaya çıktığını görmüşlerdir. Araştırmacılar ayrıca kesme sıvısı kullanımının yüzey pürüzlülüğü üzerinde de olumlu etkiye sahip olduğunu iddia etmişlerdir [142].

Çakır ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, kızılötesi termometre kullanarak Waspaloy süper alaşımının tornalamasında kesme parametreleri ile kesme sıcaklığı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Bunun yanında, kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin incelenmesini de bu araştırmanın hedeflerinden birisi olarak belirlemişlerdir. Deneyler esnasında PVD yöntemiyle TiAlN-TiN kaplanmış karbür uç, kesme parametresi olarak kesme hızı (45, 65, 95 m/dak), ilerleme (0.05, 0.1, 0.15, 0.20 mm/dev) ve kesme derinliği (0.25, 0.50mm) seçilmiştir. İşleme sürecinde soğutma-yaglama sistemi kullanmayan araştırmacılar sonuç olarak, en yüksek kesme hızı-en düşük ilerleme kombinasyonunun en yüksek ısıyı oluşturduğunu görmüşlerdir. Benzer bir durum yüzey pürüzlülüğü için de geçerlidir. Yüksek kesme hızı-düşük ilerleme-yüksek kesme derinliği kombinasyonu daha iyi yüzey kalitesi ortaya çıkarmıştır [143].

Motorcu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, kaplamalı (TiN) ve kaplamasız matkaplarla Waspaloy süper alaşımının delinmesinde kesici tipi, kesme hızı, ilerleme ve matkap uç açısının yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemişlerdir. Deney tasarımı olarak Taguchi L18 (2^1-3^3) kullanılmıştır. Doğrusal regresyon analizi aracılığıyla ikinci dereceden bir tahmin denklemi geliştirilmiş ve ortalama yüzey pürüzlülük değeri (Ra) için $R^2=96.9$ bulunmuştur. Deney sonuçlarının analizini yapan araştırmacılar, yüzey pürüzlülüğü için parametre etkilerini matkap uç açısı için %49.44, ilerleme için %15.0, kesme hızı için %14.45 ve kesici tipi için %13.47 olarak bulmuşlar ve takım aşınması arttıkça yüzey pürüzlülüğünün de arttığını tespit etmişlerdir. Araştırmacılar deneyler sırasında ayrıca, spiral, sürekli ve kesikli olmak üzere üç tip talaş oluştuğunu gözlemlemişlerdir [144].

Obikawa ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, kesme sıvısı püskürtmenin talaş kaldırma üzerindeki etkilerini araştırmak için normal püskürtme ve mikro püskürtmeyi karşılaştırmışlardır. Deneyler esnasında, nikel bazlı süper alaşım olan Inconel 718'i çok katmanlı CVD- TiCN/Al₂O₃/TiN kaplamalı karbür kesici takımlar ile tornalamışlar ve püskürtme hızının takım ömrü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Araştırmacılar deney sonuçlarını analiz ettikten sonra özel olarak tasarlanmış nozul ile mikro püskürtmenin takım ömrünü arttırmada oldukça etkili olduğunu iddia etmişlerdir [145].

Wang ve arkadaşları, kaplamalı ve kaplamasız karbür takımlar ile nikel esaslı süper alaşım olan Inconel 182'nin frezelenmesinde MMY sistemini kuru işleme ile karşılaştırmışlardır. Çalışma esnasında deney çıktısı olarak kesme kuvveti, kesme bölgesinde ortaya çıkan sıcaklık ve yüzey pürüzlülüğü ele alınmıştır. İşleme esnasında frezeleme yöntemi olarak hem aynı yönlü frezeleme hem de zıt yönlü frezelemeyi

kullanılmıştır. Araştırmacılar deney sonuçlarında, özellikle zıt yönlü frezelemede, MMY sisteminin kesme kuvveti üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Bu durumda, MMY sisteminin takım aşınması üzerinde de etkili olduğunu iddia etmişlerdir. Ancak aynı yönlü frezelemede bu durum değişiklik göstermiştir. Sonuç olarak araştırmacılar, İncel 182 süper alaşımının zıt yönlü frezelenmesinde MMY sisteminin takım aşınması ve üretim maliyetleri üzerinde etkili olduğunu iddia etmektedirler [146].

Olovsjö ve Nyborg yaptıkları çalışmada, farklı mikro yapılarıdaki İncel 718 ve Waspaloy'un kaplamasız karbür takımlarla sabit kesme hızı (30m/dak), sabit ilerleme(0.1m/dev) ve sabit kesme derinliği (2mm) altında tornalayarak malzeme türüne bağlı olarak yanak aşınması, çentik aşınması, krater aşınması ve kesme kuvvetindeki değişimi incelemişlerdir. Deneyler esnasında suya oranı %7 olan mineral esaslı yağ-su karışımı kesme sıvısı olarak kullanılmıştır. İncel 718 için farklı ısı işlemlerinde üç özdeş deney yapılırken bu sayı Waspaloy'da ikidir. Aşınma için yapılan deneylerde ayrı kesme kuvveti için yapılan deneylerde ayrı kesici takımlar kullanılarak deney yapılmıştır. Deney sonuçlarını inceleyen araştırmacılar, Waspaloy'un işlenmesi esnasında daha büyük dayanım ve kesme kuvveti, daha küçük yanak aşınması oluştuğunu görmüşlerdir. Ayrıca, işleme esnasında oksidasyon oluşumunun İncel 718'e göre Waspaloy'da daha fazla olduğunu gören araştırmacılar adhezif direncin Waspaloy'da daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir [147].

Su ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, titanyum alaşımlarının yüksek hızda işlenmesi esnasında, kesme bölgesinde oluşan yüksek kesme sıcaklıklarının takım ömründeki azalmanın kesme sıvısı kullanımına bağlı olarak değişip değişmediğini incelemek için kaplamalı sementit karbür takımlarla Ti-6Al-4V alaşımının, yüksek hızda frezelenmesi esnasında uygulanan farklı soğutma ve yağlama şartlarının takım ömrü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada, takım ömrünü arttırmak için optimum soğutma-yağlama şartlarının belirlenmesini amaçlayan araştırmacılar, bu amaçla deneyler yürütmüş ve bu deneyleri kuru, ıslak, nitrojen-yağ buharı, 0-(-10) °C'de basınçlı soğuk nitrojen gazı gibi soğutma-yağlama koşullarında gerçekleştirilmişlerdir. Deney sonucunu inceleyen araştırmacılar, basınçlı soğuk nitrojen gazı-yağ buharı kesme koşullarının en iyi takım ömrünü sağlayan kesme koşulları olduğunu görmüşlerdir. Aşınma mekanizmalarını belirlemek için aşınmış takımların SEM'de analizi yapan araştırmacılar, bütün kesme koşulları altında serbest yüzey aşınmasının, baskın aşınma tipi olduğu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, kaplamalı takımlar üzerinde difüzyon ve termal

yorulma mekanizmalarının baskın aşınma mekanizmaları olduğu tespit edilmiştir [148].

Ginting ve Nouari yaptıkları çalışmada, küresel parmak frezelerle Ti-6242S titanyum alaşımının frezelenmesinde, kaplamasız karbür takımların uygunluğunu incelenmişlerdir. Deneyler kuru kesme şartları altında iki farklı kesme hızı (60-150 m/dak) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Eksenel ve radyal kesme derinlikleri (2-8.8 mm) sabit tutularak, 0.1-0.15 mm/diş olmak üzere iki farklı ilerleme hızı denenmiştir. Aşınmış takımlar üzerinde yapılan SEM analizlerinde, yanak aşınması ve kesici kenar üzerindeki aşırı dökülmelerin takım bozulması üzerinde ana etkiye sahip olduğu görülmüştür. Deneyde kullanılan her iki ilerleme hızında da yüksek kesme hızlarında işleme ile yüzey kalitesinin arttığı tespit edilmiştir. Sonlu elemanlar metodu ile talaş oluşumu modellemesinin, titanyum alaşımlarının kuru kesme şartlarında işlenmesindeki, kesme parametrelerinin hesaplanması ve takım aşınma mekanizmalarının anlaşılmasına yardımcı olduğu ve iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir [149].

Lacalle ve arkadaşları, uzay endüstrisinde sıkça kullanılan iki alaşım; nikel esaslı alaşım Inconel 718 ve Ti-6Al-4V'in frezelenmesinde işleme verimliliğini arttırmaya yönelik bir çalışma yapmışlardır. Her iki alaşımın da sahip oldukları yüksek sıcaklık direnci ve mükemmel mekanik özelliklerinden dolayı çeşitli turbo-motor parçalarının imalatında yaygın bir şekilde kullanıldığını vurgulamışlardır. Yapılan çalışmada, bu alaşımların frezelenmesinin zor olmasına etki eden faktörler analiz edilmiştir. Frezeleme işleminin verimliliğini arttırmak için takım geometrisi ve kaplama malzemesi ile işleme parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme hızı ve radyal kesme derinliği) etkileri değerlendirilmiştir. Araştırma sonucunda frezeleme işleminin verimliliğini arttırmaya yönelik başarılı sonuçlar elde edilmiştir [150].

Lacalle ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, Haynes 25, Inconel 718 gibi işlenebilirliği zor ısıya dirençli süper alaşımların PAM (Plasma Assisted Milling) yöntemi adı verilen uygulamayla bir ark kaynağı yardımıyla malzemeyi ısıtarak frezelenmesini deneysel olarak araştırmışlardır. Yapılan deneylerde TiAlN kaplamalı karbür uçlar kullanılmıştır. PAM yönteminden önce işleme parametreleri olarak 1 mm lik kesme derinliği ve 20 m/dak'lık kesme hızı kullanılmış ve 500 mm lik frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. PAM yöntemi kullanılarak yapılan frezeleme işleminde ise kesme hızı 70 m/dak'ya çıkarılmış takım aşınması, kesme kuvveti ve malzemenin yapısındaki değişiklikler gözlenmiştir. Sonuç olarak PAM yönteminden önce 20 m/dak'lık kesme hızı %350 arttırılarak 70 m/dak'ya çıkarıldığında herhangi bir olumsuz sonuç oluşmamıştır.

Frezeleme esnasında kesme kuvvetlerinin %25 azaldığı, 0.5 mm olan takım aşınmasının 0.1 mm'ye düştüğü gözlenmiştir. Ayrıca PAM yardımıyla yapılan işlemin, malzemenin yapısında olumlu değişiklikler doğurduğu ortaya çıkmıştır. Fakat PAM pahalı bir uygulama olmasına rağmen takım ömründeki artışın yeterli düzeyde olmadığı belirtilmiştir [151].

Benghersallah ve arkadaşları Stellite 6 kobalt esaslı süper alaşımın SANDVİK üretici firmasına ait 1030, H13A, 3040, 4240 ve 4030 kalitesine sahip kesici uçlarla frezede işlenebilirliğini araştırmışlardır. Mikroskop altında aşınma miktarlarını inceleyen araştırmacılar, kesici uçların aşınma miktarının 0.3 mm'ye ulaştığında işleme zamanlarının karşılaştırılmasını yapmış ve en iyi sonucu veren kesicilerin H13A ve 1030 kalitesine sahip uçlar olduğunu görmüşlerdir. Bu iki kalitenin karşılaştırılması yapıldığında ise gerek 120 m/dak'lık, gerekse 190 m/dak'lık kesme hızında kaplamasız karbür uç olan H13A kalitesinin daha iyi sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir [152].

6.2. MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

Kuna-Ming Li ve arkadaşları MMY tekniğinin takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemek için bir çalışma yapmışlardır. Çalışmanın ana eksenini takım malzemesi, soğutma sıvısı ve hava oranının MMY tekniği ile işleme yaparken takım performansına etkileri üzerine yerleştirilmiştir. Yapılan deney sonuçları göstermiştir ki; MMY tekniği ile yapılan mikro frezeleme işlemleri kuru kesmeye oranla hem takım ömründe hem de yüzey pürüzlülüğünde önemli bir iyileşme göstermiştir. Ayrıca araştırmacılar, mikro kesme işleminde yüzey pürüzlülüğü takım aşınma şartlarıyla yakından ilgili olduğunu görmüşlerdir. Yapılan deney sonuçlarının analizini yapan araştırmacılar, takım aşınması 80µm'yi geçtiğinde bitiş yüzey pürüzlülüğünün maksimum olmakta; takım aşınma değeri 100µm'yi geçtiğinde ise takımın kırılmakta olduğunu gördüklerinden müsaade edilen maksimum takım aşınmasının 80µm civarında kabul etmişlerdir. Ayrıca araştırmacılar, optimum MMY şartlarının kesme sıvısı (yağ) akış oranı 1.88ml/s ve hava akış oranı 40 l/dak olduğunu bu çalışma ile gözlemişlerdir. Araştırmacılar, hava akış oranının yağ akış oranına göre MMY tekniğinin işleme performansına etkisi üzerinde daha önemli bir rol oynadığını iddia etmektedirler [153].

Thepsonthi ve arkadaşları sürdürdükleri çalışmada, soğutma sıvısının takım aşınmasını önlediğini ve yüzey pürüzlülüğünü azalttığını dikkate alınarak kullanılan soğutma sıvısı

miktarını optimum seviyelerde tutup en etkili uygulama yöntemini incelemişlerdir. Bunun için yüksek hızlı dar kesitte ve püskürtme oranı 2ml/dak debi ile soğutma sıvısı uygulamışlardır. Bu soğutma tekniğini kuru kesme ve geleneksel soğutma tekniği ile kıyaslamak için sert çelikler yüksek hızda frezelenirken bu üç teknik kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarının analizini yapan araştırmacılar, MMY tekniğinin daha düşük kesme kuvvetleri, takım aşınmasında azalma, takım ömründe artma ve yüzey kalitesindeki gelişimi yönünden diğer iki tekniğe oranla daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, çalışma sonunda parmak ve yuvarlak uçlu freze kullanılarak sert çeliklerin işlenmesinde MMY sistemi kullanımının çevreye olan olumsuz etkiyi azaltmakta ve işleme performansını artırmakta olduğunu iddia etmişlerdir [107].

Liao ve Lin yaptıkları çalışmada, MMY tekniği kuru kesmeye kıyasla kullanılan tüm kesme hızlarında takım performansını artırmıştır. MMY tekniği ile takım ve talaş ara yüzeyine ekstra oksijen saplayarak koruyucu oksit tabakanın oluşumuna katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Bu katman temel olarak Fe, Si, Mn ve Al oksit bileşikleridir. Oluşan bu katman etkili bir şekilde difüzyonu engeller. Böylece takım dayanımını ve aşınma direncini koruyarak takım ömründe önemli bir ilerleme sağlamış olur. Kesme hızı düşük olduğunda daha az oksit katmanı olduğundan takım ömrünü de olumsuz etkiler. Kesme hızı optimum değerden uzaklaştığında koruyucu katman kaybolur ve kesici kenarlardaki büyük sıcaklık değişimlerinden dolayı termal çatlaklar meydana gelir. Sonuçlar göstermiştir ki; MMY uygulamalarında aşırı yüksek hızda işleme takım ömründe yeterli artışı sağlamadığı için uygun değildir. Bu çalışmaya bağlı olarak şu sonuç çıkarılabilir: NAK80 sert çelik malzemeyi yüksek hızlarda işlemede uygun parametreler seçildiğinde takım ömründe dikkate değer bir ilerleme kaydedilebilir [154].

Sarıkaya ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, kuru, ıslak ve MMY sisteminin takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Kaplamasız karbür takımlar ile yürütülen deneylerde, kobalt esaslı Haynes 25 süper alaşım tornalanmış ve farklı soğutma-yağlama yöntemlerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasındaki değişim gözlemlenmiştir. Araştırmacılar bu çalışma sonucunda, MMY sisteminin kullanımı ile üretim maliyetlerinde azalma, işleme kalitesinde ise artma olduğunu beyan etmişlerdir [155].

Sarıkaya ve Güllü bir başka çalışmada, kaplamasız karbür takım ile kobalt esaslı süper alaşım Haynes 25'i MMY yağlamanın farklı kombinasyonları altında tornalayarak kesme

yağları ve kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemiştirlerdir. Deneyler esnasında kesme parametresi olarak kesme hızı (30, 40, 50 m/dak), ilerleme (0.15mm/dev), kesme derinliği (1mm) alınmıştır. MMY sisteminde kullanılacak parametreler, bitkisel yağ (40 °C’de viskozite: 32 mm²/s, 20 °C’de yoğunluk: 0.85 g/cm³, parlama noktası: 201 °C), Mineral yağ sentetik ester karışımı (viskozite: 25 mm²/s, yoğunluk: 0.835 g/cm³, parlama noktası: 170 °C) Mineral yağ (viskozite: 30 mm²/s, yoğunluk: 0.87 g/cm³, parlama noktası: 200 °C), debi (60, 120, 180 ml/s) ve 6 bar basınç seçilmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre araştırmacılar, en düşük yüzey pürüzlülüğünün bitkisel kesme sıvısı, 180 ml/s debi ve 30m/dak kesme hızı kombinasyonu sonucu ortaya çıktığını belirtmişlerdir [156].

Ansari ve Kotiveerachary yaptıkları çalışmada, kaplamasız karbür takımları kullanarak demir esaslı Incoloy 800 süper alaşımının farklı soğutma-yağlama yöntemleri (kuru, ıslak (600 ml/s), MMY₁ (150 ml/s) ve MM₂ (300ml/s)) altında tornalanması sonucu kesme parametreleri ve soğutma-yağlama tekniğindeki değişiminin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemiştirlerdir. Çalışma sonucunda araştırmacılar, kesme parametreleri açısından bakıldığında yüzey pürüzlülüğü üzerinde en önemli parametrenin ilerleme en az öneme sahip parametrenin de kesme derinliği olduğunu belirtmişlerdir. Soğutma-yağlama yöntemi açısından ise en az yüzey pürüzlülüğünün MMY₁’e ait parametrelerde olduğunu gözlemlemişlerdir [157].

Li ve arkadaşları, 0.276MPa basınçta hava-yağ karışımını, takım tutucudaki 0.762 mm çaplı delikten vererek minimum miktarda yağlama yöntemini incelemiştirlerdir. Çalışma sonucunda minimum miktarda yağlamanın teğetsel kuvveti azalttığı görülmüştür. Bu kuvvet, minimum miktarda yağlama kullanıldığında, özellikle düşük hızlarda kuru kesmeye göre %24.4, sulu kesmeye göre ise %32.2 azalmıştır. Bu yöntem geniş bir kesme hızı aralığında, kesme sıcaklıkları üzerinde güçlü bir etki göstermiştir ve kuru kesmeye göre takım aşınması da azalmıştır [158].

Kamata ve Obikawa yaptıkları çalışmada, MMY sisteminin takım ömrü üzerindeki etkilerini incelemek için nikel esaslı Inconel 718’i tornalamışlardır. Araştırmacılar bu çalışma esnasında deney değişkenlerini üç farklı kaplamalı karbür takım (TiCN/Al₂O₃/TiN (CVD), TiN/AlN superlattice (PVD) and TiAlN (PVD)), iki farklı kesme hızı (60, 90 m/dak), sabit ilerleme (0.1mm/dev) ve sabit kesme derinliği (1mm) ile birlikte kuru, ıslak ve MMY olmak üzere üç farklı soğutma-yağlama sistemi şeklinde belirlemişlerdir. Deneyler sonunda araştırmacılar, en uzun takım ömrünün

TiCN/Al₂O₃/TiN kaplamalı takımın çıkması ile birlikte MMY sisteminin kesme bölgesine daha iyi nüfuz etmesi sebebiyle yüzey pürüzlülüğünün azalmasında etkili olduğunu belirtmişlerdir [159].

Thakur ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, MMY sisteminin Inconel 718'in işlenmesine etkilerini araştırmak için bazı deneyler yapmışlardır. Bu deneyler esnasında kesme parametreleri olarak kesme hızı, ilerleme, basınç ve yağ debisi gibi bazı parametreleri kullanmışlardır. Araştırmacılar deney sonuçlarını incelediğinde en sağlıklı sonucu veren parametre grubunu 13 MPa basınç, 40 m/dak kesme hızı, 0.05 mm/dak ilerleme ve kesme sıvısının takım içinden verildiği durum olarak bulmuşlardır [160].

Davis ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, iki farklı katkı maddesi kullanılarak oluşturulan kesme sıvılarının kullanıldığı MMY sistemini kuru işleme ile karşılaştırarak titanyumun işlenmesindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneylerde katkı maddesi olarak - düşük kaynama noktalı - iyonik sıvı ve 1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate (BMIM-PF₆) maddesini kullanılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde, iyonik sıvının katkı maddesi olarak kullanıldığı MMY sisteminin kuru işleme göre %60 iyi sonuç verdiğini, BMIM-PF₆ katkı maddeli MMY sisteminin ise yine kuru işleme göre %15 iyi sonuç verdiğini görülmüştür. Ayrıca araştırmacılar, en düşük kesme kuvveti ve en iyi yüzey kalitesinin de iyonik sıvının katkı maddesi olarak kullanıldığı MMY sistemi ile işleme sonucunda ortaya çıktığını iddia etmişlerdir [161].

Lin ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, iki farklı kaplamalı ve bir kaplamasız karbür kesici uç kullanarak kuru, ıslak, MMY sistemi ve kriyojenik soğutmanın yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve talaş morfolojisi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar bu çalışma esnasında kesme parametresi olarak; kesme hızı (70, 90, 110 m/dak), ilerleme (0.25 mm/dev) ve kesme derinliğini (1mm) seçmişlerdir. Deneyler esnasında alkol esaslı kesme sıvısı (40°C'de viskozite; 15 mm²/s, parlama noktası; 165°C) ve sentetik ester (40°C'de viskozite; 30 mm²/s, parlama noktası; 290°C) şeklinde iki farklı kesme sıvısı kullanılmıştır. Araştırmacılar diğer soğutma yağlama sistemlerini ve parametrelerini de kuru kesme, ıslak kesme, MMY₁ (dıştan püskürtme, 150 ml/s debi, hava sıcaklığı 11°C ve su sıcaklığı 20°C), MMY₂ (İçten püskürtme, 1.2 L/h debi, su ve hava sıcaklığı 30°C) ve kriyojenik soğutma (-16°C ve -26°C) olarak belirlemişlerdir. Araştırmacılar deney sonuçlarına göre MMY sisteminin ve kriyojenik işlemenin kuru ve ıslak işleme göre daha iyi sonuçlar verdiğini iddia etmişlerdir [162].

Thamizhmanii ve Hasan yaptıkları çalışmada, kuru işleme ile MMY sistemi altında nikel esaslı süper alaşım olan Inconel 718'i işleyerek soğutma-yağlama sistemi ve kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar deneyler esnasında MMY sistemi için üç farklı debi (12.5 ml/s, 25ml/s ve 37.5 ml/s) kullanmışlardır. Deney sonuçları analiz edildiğinde, MMY sisteminin takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde kuru işlemeye göre daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Araştırmacılar ayrıca, MMY sisteminde kesme bölgesine gönderilen sıvının basınç değeri arttıkça yüzey pürüzlülüğünün daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir [163].

Jia ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, düzlem yüzey taşlama işleminde nikel esaslı süper alaşım olan GH4169'u taşlamışlar ve üç farklı değişken grubu şeklinde oluşturdukları deney tasarımı ile MMY sisteminin kesme kuvveti, taşlama enerjisi ve sürtünme üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deneyler sonunda araştırmacılar, optimum sonucu veren MMY sistemi parametrelerini 0.5 MPa basınç, 0.4 gaz/sıvı oranı, ve 0.005 kg/s debi olarak belirlemişlerdir. Bu parametreler altında en iyi taşlama kuvveti, özel taşlama enerjisi ve sürtünme katsayısını sırasıyla 1.45 N/mm, 74.57 J/mm³ ve 0.414 olarak bulmuşlardır. Yine optimum kesme parametreleri altındaki yüzey pürüzlülük değerleri olan Ra, Rz ve RSm'yi sırasıyla 0.249 µm, 1.972 µm ve 0.028 mm olarak bulmuşlardır [164].

Liu ve arkadaşları, kaplamalı karbür takımları kullanarak Ti-6Al-4V süper alaşımını farklı MMY parametreleri (hava basıncı, yağ tipi, nozul pozisyonu vb. gibi) altında frezelemişler, kesme kuvveti ve kesme bölgesinde oluşan sıcaklık üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçları incelendiğinde, MMY sisteminin kesme kuvveti ve kesme bölgesinde oluşan sıcaklığı azaltma üzerinde önemli etkisi olduğunu görmüşlerdir. Yine deney sonuçları göstermiştir ki, nozul mesafesinin çok uzak ya da çok yakın olması kesme kuvvetinin düşürülmesine etki etmemektedir [165].

Chetan ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, PVD TiN kaplamalı karbür kesici uç kullanarak Nimonic 90 ve Ti6Al4V süper alaşımlarının farklı soğutma yöntemleri (kuru, MMY) altında işlenmesinin takım ömrü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar kesme sıvısı olarak biyolojik emülsiyon ve suda çözünebilir ayçiçeği yağını kullanmışlardır. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, MMY sisteminin Nimonic 90'in işlenmesine oranla Ti6Al4V alaşımının işleme sürecindeki kesici takım aşınmasına daha olumlu katkılarda bulunduğu tespit edilmiştir [166].

Yazid ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, nikel esaslı süper alaşım olan Inconel 718'i kaplamalı karbür takımlar ile üç farklı soğutma-yağlama parametresi (kuru, MMY 50 ml/s ve MMY 100ml/s) altında tornalayarak soğutma-yağlama sisteminin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemiştirlerdir. Araştırmacılar diğer kesme parametrelerini kesme hızı (90, 120, 150 m/dak), ilerleme (0.1, 0.15 mm/dev) ve kesme derinliği (0.3, 0.5mm) olarak belirlemiştirlerdir. Deney sonuçlarını yorumlayan araştırmacılar, en düşük yüzey pürüzlülüğü için optimum parametre grubunun 0.1mm/dev ilerleme, 0.3mm kesme derinliğinde 90-120 m/dak kesme hızı için 50 ml/s debiye sahip MMY sistemi olduğunu, 150 m/dak kesme hızı içinse 100ml/s debiye sahip MMY sistemi olduğunu iddia etmişlerdir [167].

Tosun ve Hüseyinoğlu, 7075-T6 Alüminyum alaşımının frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü üzerine farklı kesme parametreleri ve farklı soğutma-yağlama tekniklerinin (ıslak ve MMY) etkilerini incelemiştirlerdir. Kesme sıvısı olarak su ve bor yağı kullanan araştırmacılar ortaya çıkan sonuçları analiz etmek için ANOVA kullanmışlardır. Araştırma sonunda, düşük kesme hızlarında ıslak işlemedeki yüzey pürüzlülüğü MMY sisteminde ortaya çıkan yüzey pürüzlülüğünden daha düşük olmuştur. Ancak, kesme hızı arttıkça MMY sisteminde yüzey pürüzlülüğünün daha iyi, ıslak işlemede ise daha kötü olduğu gözlemlenmiştir [168].

Braga ve arkadaşları Alüminyum-Slikon alaşımının (A356) kaplamasız ve elmas kaplamalı karbür takımlar ile ıslak ve MMY (10 ml/s 72 m³/s ve 4.5 bar basınç) soğutma-yağlama sistemleri altında delinmesinin işlenebilirlik üzerindeki etkilerini incelemiştirlerdir. Deneysel çalışma sonucunda, kesici takımlardaki kaplama ve soğutma-yağlama yönteminin ortalama delik çapı üzerindeki etkisi incelendiğinde kaplamalı takımlar için MMY sisteminin daha iyi sonuçlar verdiği görülürken kaplamasız takımlarla delmede ıslak işleme ve MMY sistemi birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Ayrıca kesme kuvveti, takım aşınması ve delik kalitesi açısından hem elmas kaplamalı hem de kaplamasız karbür takımların çalışmasında MMY ve ıslak işleminin birbirine yakın sonuçlar verdiğini görmüşlerdir. Ayrıca MMY sisteminin kullanımında harcanan enerji 0.70 kW olurken ıslak işlemede harcanan enerji 0.80kW olmuştur. Tüm bunların sonucu olarak da gerek işleme kalitesi gerekse de üretim maliyeti açısından MMY tekniğinin kullanımının daha faydalı olacağına karar vermişlerdir [124].

Bhowmick ve arkadaşları Al-%6.5Si (319 Al) alaşımına kılavuz çekilmesini konvansiyonel ıslak işleme, kuru ve MMY şartları altında yaparak sonuçları

karşılaştırmışlardır. MMY ve kuru işlemeyi konvansiyonel ıslak işleme ile karşılaştırmak için iki tip deney yapılmıştır. Birinci tip deneyde kaplamasız HSS ve DLC kaplamalı karbür kılavuz takımları ile kuru ortamda kılavuz çekilmiştir. HSS takımlar 20 delikten daha az bir sürede adhezyon nedeniyle ömürlerini tamamlamışlardır. DLC kaplamalı takımlar ise küçük torklar üretmiş ve takım ömrü biraz daha uzun sürmüştür. İkinci tip deneyde ise MMY sistemi altında sadece kaplamasız HSS takımlar kullanılmıştır. MMY sisteminin 80 ml/s debi ile kullanımı esnasında ıslak işlemeye benzer tork üretilmiş ve daha yüksek diş kalitesi gözlemlenmiştir. Kuru işleme sırasında sıcaklık 75°C ölçülürken MMY sistemi altında sıcaklık 55°C olarak ölçülmüştür. Deneylede kullanılan deliklerdeki mekanik özellikler ölçüldüğünde kuru işlemede bir değişim gözlenirken MMY sisteminde herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Sonuç olarak sülfür ve fosfor takviyeli kesme yağları ile MMY sisteminin adhezyonu azaltmada faydalı olduğu gözlemlenmiştir [169].

Attanasio ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, tornalama işleminde MMY tekniğinin takım aşınma sürecindeki etkilerini incelemişler ve deney sonuçlarına göre MMY sisteminin avantajlı olup olmadığına karar vermişlerdir. Araştırmacılar tornalama işlemini tercih ettikleri bu çalışmada iki farklı ilerleme oranı ve kesme uzunluğu ile MMY tekniği kullanılarak elde edilen sonuçlar rapor etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, takım yan yüzeyine uygulanan MMY tekniğinin takım ömründe kuru kesmeden farklı bir sonuç vermediği, fakat aynı tekniğin takımın talaş yüzeyine uygulandığında takım ömrünü artırdığı gözlenmiştir [121].

Dhar ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, AISI 4340 çeliğin endüstride kullanılan kesme hızı ve ilerleme şartları ile kaplamasız karbür takım kullanılarak yapılan tornalama işlemlerinde oluşan takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğünde, kullanılan MMY tekniğinin işleme performansına etkisiyle ilgili bir araştırma yapmışlardır. Takım- talaş ve iş parçası- talaş arasındaki uygun değişiklik ve kesme bölgesinde oluşan ısıdaki azalma, takım aşınmasındaki azalma ve yüzey kalitesi iyileşmesi gibi olumlu sonuçları sağlayan MMY tekniğinin bu etkileri önemli sonuçlardır [170].

Gaitonde ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, prinç malzemeyi K10 karbür takımla tornalama işleminde en uygun kesme hızı ilerleme oranı ve optimum MMY tekniğini belirlemeyi amaçlamışlardır. Çeşitli analiz metotlarını kullanarak ve eş zamanlı olarak yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetini minimize etmeye çalışmışlardır. Parametrelerin relatif önemleri ANOVA tekniği ile belirlenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki; 200m/min

kesme hızı ve 0.05mm/rev ilerleme oranı minimum kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünü eş zamanlı veren kesme şartlarıdır [171].

Iqbal ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, kaplamalı karbür takım kullanarak sert çeliklerin bitiş yüzeyinin frezelenmesi işleminin analizini yapmışlardır. Optimizasyon tekniği kullanılarak yaptıkları analizde iş parçası malzemesi, iş parçası eğim açısı, takımın dönüş hızı ve radyal kesme derinliğine bağlı olarak takım ömrü ve iş parçası yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Takım aşınması için iş parçası malzemesi (kimyasal yapısı ve sertliği) en etkili parametre olarak belirlenmiştir. Bu parametreyi takımın dönüş hızı takip etmiş olduğu gözlenmiştir. AISI D2 malzemenin işlenebilirliğinin X210 Cr12 malzemesinden daha düşük olduğu saptanmıştır. Yüksek takım dönüş hızı olumsuz takım ömrüne karşılık olumlu yüzey kalitesi sonucu verdiği gözlenmiştir [172].

Kang ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada, hibrit kaplama metoduyla farklı kaplanmış takımlarla AISI D2 soğuk takım çeliğini yüksek hızda işlerken kuru, geleneksel ve MMY soğutma tekniklerini kullanarak bir karşılaştırma yapmayı amaçlamışlardır. Makino V55 dikey işleme merkezli takım tezgâhı kullanılarak yapılan yüksek hızlı kesme işleminde kaplamalı takımlardaki takım aşınması değerleri incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda görülmüştür ki MMY tekniğiyle takım ömründe en iyi performansa düşük takım ömrü gözlenmiştir. MMY tekniği kullanılan iki kaplama tekniği için de takım ömrü için faydalı olmuştur. Sonuçlar endüstriyel uygulamalarda sert malzemelerin yüksek hızda işlenebilirliği fizibilitesini kanıtlamıştır [173].

Krishna ve arkadaşları AISI 1040 çeliğin karbür takımlar ile tornalanması sırasında SAE-40 ve Hindistan cevizi bazlı nanoborik asit süspansiyonlarının performansını incelemişlerdir. Çalışma süresince 50 µm partikül boyutlu borik asit katı yağlar kullanılmıştır. Sonuç olarak termal iletkenliğin arttığı ve süspansiyon içindeki nanoborik asit oranının yüzdesel olarak artması ile birlikte özgül ısıda azalma gözlenmiştir. Ayrıca farklı kesme hızı ve ilerleme oranlarıyla yapılan deneysel çalışmada kesme sıcaklığı, yanak aşınması ve yüzey kalitesinde ciddi iyileşmeler gözlemlenmiştir [174].

Sreejith'in çalışmasında, elmas kaplamalı karbür takımlar ve farklı soğutma-yağlama yöntemlerinin 6061 alüminyum alaşımını işlenmesinde kesme kuvveti, yüzey kalitesi ve takım aşınması üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Üç farklı soğutma-yağlama sistemi karşılaştırıldığında MMY sisteminin çok iyi bir alternatif olduğu ortaya koyulmuştur. Bu nedenle MMY sisteminin uygun şekilde kullanıldığı takdirde hem çevre dostu olması

hem de işlenebilirlik özelliklerini geliştirmesi nedeniyle kesme işlemleri için en iyi seçeneklerden biri olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca diğer soğutma-yağlama sistemlerine göre MMY sisteminde kesme kuvveti ve takım aşınmasında azalma, yüzey kalitesinde de önemli bir artış gözlemlenmiştir [175].

Khan ve arkadaşları, AISI 9310 çelik alaşımının tornalama işleminde bitkisel yağ esaslı soğutma sıvısı kullanılan MMY tekniğinin takım talaş ara yüzeyi sıcaklığı, talaş şekli, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini belirleyerek bu etkiyi ıslak kesme ve kuru kesme teknikleri ile karşılaştırmışlardır. MMY tekniğinde hava püskürtme ile bitkisel yağ gerekli yere aktarılır. Deney sonuçları incelendiğinde araştırmacılar, MMY tekniğinin kesme bölgesi sıcaklığı, talaş akış şekli açısından diğer yağlama soğutma sistemlerine üstünlük sağladığını görmüşlerdir. Bunun yanında, takım aşınmasındaki azalmaya bağlı olarak takım ömründe ve bitmiş yüzeyde iyileşmeler elde edildiğini görmüşlerdir [176].

Diniz ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada, kaplanmış CBN takımla sertleştirilmiş AISI 52100 çeliğini minimum miktarda yağlama, kuru kesme ve konvansiyonel kesme şartlarında işleyerek çıkan sonuçları incelemişlerdir. Kuru kesme, bu üç yöntem içinde en düşük yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasını sağlamıştır. Kesme sıcaklıkları kuru kesmede artmaktadır ve bu artış talaşın deformasyonunu ve kaymasını kolaylaştırarak, yüksek sıcaklık dayanımı yüksek olan takımın fazla zarar görmesini engellemiştir. Minimum miktarda yağlama kullanıldığında; sıvı, sıcaklığın yükselmesine izin vermemiştir. Bu nedenle takım, talaşın ve iş parçasının yüksek sertliğinden dolayı yüksek basınçlar altında kalmıştır ve sonuç olarak takım aşınmaları ve yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Sulu kesmede ise en yüksek yüzey pürüzlülükleri oluşmuştur çünkü soğutma etkisi sayesinde sıcaklık çok düşüktür bunun sonucunda kesme kuvvetleri ile titreşimler artmıştır [177]. Çizelge 6.1’de MMY sistemi kullanılarak yapılan ve bu bölümde verilen çalışmaların özet bilgileri verilmiştir.

Çizelge 6.1. MMY sisteminin kullanımı ile ilgili incelenen çalışmalar.

| Yazar | Yöntem | İş Parçası Malzemesi | Kesme Sıvısı Uygulama Yön. | Kesici Takım | MMY Parametreleri | İncelenen Kriterler |
|---|-----------|----------------------|--|----------------------|---|--|
| Kuan-Ming Li Shih-Yen Chou [153] | Frezeleme | SKD 61 çeliği | MMY | Kaplamasız Karbür | Debi: 1.88, 3.75, 7.5 ml/s Basınç: 0.5 MPa Yağ: Bitkisel | Takım aşınması Yüzey pürüzlülüğü |
| T. Thepsonthi M. Hamdi K. Mitsui [107] | Frezeleme | ASSAB DF3 | Kuru Islak MMY | Kaplamalı Karbür | Debi: 120ml/s Basınç: 20 MPa Yağ: Mineral | Takım aşınması Yüzey pürüzlülüğü |
| Y. S. Liao H. M. Lin [154] | Frezeleme | NAK 80 | Kuru MMY | Kaplamalı Karbür | Debi: 10 ml/s Basınç: 0.45 MPa Yağ: Mineral | Takım aşınması Yüzey pürüzlülüğü Kesme Kuvveti |
| M. Sarıkaya V. Yılmaz A. Güllü [155] | Tornalama | Haynes 25 | Kuru Islak MMY | Kaplamasız Karbür | Debi: 100 ml/s Basınç: 6 bar Yağ: Mineral | Takım aşınması Yüzey pürüzlülüğü |
| M. Sarıkaya A. Güllü [156] | Tornalama | Haynes 25 | MMY ₁ MMY ₂ MMY ₃ | Kaplamasız Karbür | Debi: 60, 120, 180 ml/s Basınç: 6 bar Yağ: Mineral, bitkisel, mineral-sentetik ester | Takım aşınması Yüzey pürüzlülüğü |
| I. Ansari [157] B. Kotiveerachary | Tornalama | AISI 1045 | Kuru Islak MMY | Kaplamasız Karbür | Debi: 100 ml/s Basınç: 0.276 MPa Yağ: Bitkisel | Takım aşınması Yüzey pürüzlülüğü |
| Y. Kamata [159] T. Obikawa | Tornalama | Inconel 718 | Kuru Islak MMY | Kaplamalı Karbür | Debi: 16.8 ml/s Basınç: 0.4-0.6 MPa Yağ: Sentetik ester | Takım aşınması Yüzey pürüzlülüğü |
| D.G. Thakur [160] B. Ramamoorthy L. Vijayaraghavn | Tornalama | Inconel 718 | MMY ₁ MMY ₂ | Kaplamalı Karbür | Debi: 300, 600 ml/s Basınç: 10-13MPa Yağ: Suda çözünen yağ | Takım aşınması |
| B. Davis [161] J.K. Schueller Y. Huang | Tornalama | Titanyum | Kuru MMY ₁ MMY ₂ | Kaplamalı CBN | Debi: 60 ml/s Basınç: 7 MPa Yağ: Katkılı mineral | Kesme kuvveti Yüzey pürüzlülüğü |

Çizelge 6.1 (devam). MMY sisteminin kullanımını ile ilgili incelenen çalışmalar.

| Yazar | Yöntem | İş Parçası Malzemesi | Kesme Sıvısı Uygulama Yön. | Kesici Takım | MMY Parametreleri | İncelenen Kriterler |
|-------------------------------------|---------------|-----------------------|--|------------------------------------|--|--|
| H. Lin ve Arkadaşları [162] | Tornalama | Ti-6Al-4V | Kuru Islak MMY Kriyojenik | Kaplamalı- Kaplamasız Karbür | Debi: 20 ml/s Basınç: 0.3 MPa Yağ: Alkol esaslı kesme sıvısı- sentetik ester | Takım aşınması Yüzey pürüzlülüğü Talaş morfolojisi |
| S. Thamizhmanii S. Hasan [163] | Frezeleme | Inconel 718 | Kuru MMY | Kaplamalı Karbür | Debi: 12, 25, 37.5ml/s Basınç: 20 MPa Yağ: Mineral | Takım aşınması Yüzey pürüzlülüğü |
| D. Jia ve Arkadaşları [164] | Taşlama | GH4169 | Kuru Islak MMY | - | Debi: 5 ml/s Basınç: 0.5 MPa Yağ: Mineral | Taşlama enerjisi Yüzey pürüzlülüğü Kesme Kuvveti |
| Z. Q. Liu ve arkadaşları [165] | Frezeleme | Ti-6Al-4V | MMY ₁ MMY ₂ MMY ₃ MMY ₄ | Kaplamalı Karbür | Debi: 2, 4, 6, 8, 10 ml/s Basınç: 1, 3, 5, 7 bar Yağ: Mineral | Kesme kuvveti |
| B.C. Chetan ve arkadaşları [166] | Tornalama | Nimonic 90 Ti6Al4V | Kuru Islak MMY | Kaplamalı Karbür | Debi: 60 ml/s Basınç: 3 bar Yağ: Bitkisel | Takım aşınması Kesme kuvveti |
| M. Y. A. Yazid ve arkadaşları [167] | Tornalama | Inconel 718 | Kuru MMY ₁ MMY ₂ | Kaplamalı Karbür | Debi: 100, 150 ml/s Basınç: 6 MPa Yağ: Bitkisel | Yüzey pürüzlülüğü |
| N. Tosun [168] M. Hüseyinoğlu | Frezeleme | AA 7075-T6 | Islak MMY | Kaplamalı Karbür | Debi: 48 ml/s Basınç: 5 bar Yağ: Bor yağı+su | Yüzey pürüzlülüğü |
| D. U. Braga ve arkadaşları [124] | Delme | A356 | Islak MMY | Kaplamalı Kaplamasız Karbür | Debi: 10 ml/s Basınç: 4.5 bar Yağ: Mineral | Takım aşınması Kesme kuvveti Delik kalitesi |
| S. Bohwmick ve arkadaşları [169] | Kılavuz çekme | AISI 319 | Kuru Islak MMY | HSS Kaplamalı Karbür | Debi: 50, 80, 100 ml/s Basınç: 5 MPa Yağ: Asit bazlı sıvı | Kesme kuvveti Takım aşınması |

Çizelge 6.1 (devam). MMY sisteminin kullanımı ile ilgili incelenen çalışmalar.

| Yazar | Yöntem | İş Parçası Malzemesi | Kesme Sıvısı Uygulama Yön. | Kesici Takım | MMY Parametreleri | İncelenen Kriterler |
|-------------------------------------|-----------|----------------------|----------------------------|-------------------|--|--|
| A. Attansino ve arkadaşları [121] | Tornalama | 100Cr6 | Kuru MMY | Kaplamalı Karbür | Debi:20 ml/s Basınç: 2.5 bar Yağ: EP katkılı ester | Takım aşınması |
| N. R. Dhar ve arkadaşları [170] | Tornalama | AISI 4340 | Kuru Islak MMY | Kaplamalı Karbür | Debi: 60 ml/s Basınç: 7 bar Yağ: Mineral | Takım aşınması Yüzey pürüzlülüğü |
| V. N. Gaitonde ve arkadaşları [171] | Tornalama | Pirinç | Kuru MMY | Kaplamasız Karbür | Debi: 50, 100, 200 ml/s Basınç: 0.5 MPa Yağ: Mineral | Yüzey pürüzlülüğü Kesme Kuvveti |
| A. Iqbal ve arkadaşları[172] | Frezeleme | AISI D2 C210 Cr12 | MMY | Kaplamalı Karbür | Debi: 25 ml/s Basınç: 6 bar Yağ: Mineral | Takım aşınması Yüzey pürüzlülüğü |
| K.H. Kang ve arkadaşları[173] | Frezeleme | AISI D2 | Kuru Islak MMY | Kaplamalı Karbür | Debi: 50 ml/s Basınç: 6.5 bar Yağ: Mineral | Takım aşınması |
| P. V. Krishna ve arkadaşları[174] | Tornalama | AISI 1040 | MMY | Kaplamalı Karbür | Debi: 10 ml/s Basınç: 6 MPa Yağ: Bitkisel | Kesme sıcaklığı Takım aşınması Yüzey pürüzlülüğü |
| P. S. Sreejith [175] | Tornalama | AA 6061 | Kuru Islak MMY | Kaplamalı Karbür | Debi: 50, 100 ml/s Basınç: - Yağ: Mineral | Takım aşınması Kesme kuvveti Yüzey pürüzlülüğü |
| M. M. A. Khan ve arkadaşları[176] | Tornalama | AISI 9310 | Kuru Islak MMY | Kaplamasız Karbür | Debi: 100 ml/s Basınç: 6 bar Yağ: Bitkisel | Takım aşınması Kesme sıcaklığı Yüzey pürüzlülüğü |
| A.E. Diniz ve arkadaşları[177] | Tornalama | AISI 52100 | Kuru Islak MMY | Kaplamalı CBN | Debi: 10, 30, 60 ml/s Basınç: 4.5 MPa Yağ: Mineral | Kesme kuvveti Takım aşınması |

6.3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Burada sadece belli başlı örneklere değinilen literatür çalışmaları istenildiğinde çok daha fazla elde edilebilir. Literatür araştırması esnasında farklı soğutma-yağlama şartları ve kesme parametrelerinin değişik varyasyonları kullanılarak işleme performansına etkilerinin incelendiği gözlemlenmiştir.

Literatür araştırması esnasında incelenen soğutma-yağlama yöntemleri;

- Konvansiyonel (geleneksel) soğutma yöntemi
- Yüksek basınçla kesme sıvısının kesme bölgesine iletildiği yöntem
- Minimum miktarda kesme sıvısı iletimi yöntemi
- Kriyojenik soğutma yöntemi
- Basınçlı hava ile kesme yöntemi
- Kuru kesme yöntemi

Şeklinde özetlenebilir.

Yapılan araştırmalar esnasında bu yöntemlerden en sık tercih edilenler ise kuru kesme yöntemi, konvansiyonel soğutma yöntemi ve MMY sistemi olduğu görülmüştür. Araştırmalar genellikle bu üç yöntemin birbiri ile karşılaştırılarak işleme üzerine etkilerinin farkları üzerine yoğunlaşmıştır.

Yapılan çalışmalarda MMY sistemine ait kullanım;

- Farklı kesme sıvıları (mineral, sentetik, yarı sentetik, bitkisel vb.) kullanılarak
- Uygulanma şekli (farklı debilerde, farklı basınçlarda, farklı tip nozullar ile vb.)
- Nozul konumu (mesafe, takım altı-üstü, açısı vb.)

Literatür araştırması esnasında kesme parametrelerinin farklı kombinasyonlarının da çalışmalarda tercih edildiği görülmüştür. Bahsedilen diğer kesme parametreleri;

- İşleme türü (tornalama, frezeleme, delme, taşlama vb.)
- Kesme hızı
- İlerleme
- Kesici uç (farklı kaplama, farklı geometri vb)
- Kesme derinliği
- İşlenen malzeme türü

Yapılan çalışmalarda incelenen deney çıktılarını özetlemek gerekirse;

- Takım aşınması
- Takım ömrü
- Kesme bölgesinde oluşan sıcaklık
- Kesme kuvveti
- Yüzey pürüzlülüğü
- Talaş tipi
- Boyutsal doğruluk

Literatürdeki çalışmalar değerlendirildiğinde;

- Süper alaşımın ısı direnci, aşınmaya karşı gösterdiği direnç ve yüksek sıcaklıklarda korozyon direncinin çok iyi olduğu ve bu özelliklerinden dolayı askeri, ticari ve cerrahi uygulamalarda kullanıldığı vurgulanmıştır.
- Waspaloy süper alaşımının işlenebilirliği üzerine kapsamlı herhangi bir çalışma yapılmadığı görülmüştür.
- Literatürde genel olarak malzemenin işlenebilirliğinin zorluğu ve yüksek maliyeti hakkında değerlendirmeler yapılmış fakat çözüm önerileri çok sınırlı kalmıştır.
- Farklı yöntemler uygulanarak süper alaşımın işlenebilirliği araştırılmış fakat işleme maliyetini çok fazla arttırdığı belirtilmiştir.
- Yeni bir soğutma yöntemi olan MMY, bir takım çalışmalarda kullanıldığı ancak süper alaşımlarla ilgili yapılan çalışmalarda henüz çok fazla kullanılmadığı dolayısıyla da süper alaşımların frezelenmesinde ne tür sonuçlar doğurduğuna dair çok fazla fikrin literatürde yer almadığı tespit edilmiştir.

Literatürdeki çalışmalar analiz edildiğinde, hedeflenen bu çalışma ile işlenmesi zor malzemelerden Waspaloy süper alaşımının frezelenmesi esnasında ortaya çıkan problemlerin ortadan kaldırılması ve diğer yöntemlerden daha düşük bir maliyetle en uygun sonuçların elde edilmesi sağlanacaktır. Deneyler sonucu elde edilen veriler çoklu regresyon analizi ile değerlendirilecek ve bu işleme en uygun tahmin modeli ortaya çıkarılacaktır. Ayrıca elde edilen sonuçların nikel esaslı süper alaşımlar ve diğer süper alaşımların işlenebilirliği hakkında genel olarak yol gösterici olacağı düşünülmektedir. Bu amaçla, kesici tipi ve kesme parametrelerinin, kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması üzerindeki etkileri bir arada değerlendirilecektir.

7. MATERYAL VE YÖNTEM

Yapılan bu çalışmada, kuru, ıslak ve MMY şartları altında, farklı kesme parametrelerinin ve farklı kesici takımların, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü/aşınması üzerindeki etkileri incelenerek optimum frezeleme şartları tespit edilmiştir. Bu amaca hizmet eden yöntemle beraber değerlendirme ve sonuca ulaşmada izlenen yol aşağıda aşama aşama ayrıntılı bir şekilde ifade edilmiştir.

7.1. DENEYLERDE KULLANILAN MATERYAL VE CİHAZLAR

7.1.1. Malzeme

Deneyleerde kullanılan malzeme, nikel esaslı bir süper alaşım olan Waspaloy'dur. Malzemenin kimyasal bileşenleri ve mekanik özellikleri sırası ile Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2'de, fiziksel özellikleri ise Çizelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7.1. Waspaloy alaşımının kimyasal bileşenleri.

| %Al | %B | %C | %Cr | %Co | %Fe | %Mo | %Ni | %Ti | %Zr |
|------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|------|
| 1.40 | 0.010 | 0.050 | 19.50 | 13.00 | 1.00 | 4.30 | 57.00 | 3.00 | 0.70 |

Çizelge 7.2. Waspaloy alaşımının mekanik özellikleri.

| Erime Aralığı (°C) | Elastikiyet Modülü (GPa) | Sertliği Rockwell C | Çekme Dayanımı | % Uzama |
|-----------------------|-----------------------------|------------------------|----------------|---------|
| 1330-1360 | 204 | 38 | 897-1276 MPa | 26.6 |

Çizelge 7.3. Waspaloy alaşımının fiziksel özellikleri.

| Yoğunluk (g/cm ³) | Isıl Genleşme (µm/m-°C) | Isıl İletkenlik (W/m-K) | Özgül Isı (kJ/kg-K) |
|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------|
| 8.19 | 13.9 | 13.9 | 0.52 |

7.1.2. Deney Numuneleri

Frezeleme deneylerinde 150x100x21 mm ebatlarında plakalar kullanılmıştır (Şekil 7.1). Deney numuneleri, kesme esnasında oluşacak ısının malzemeye ait kimyasal kararlılığı etkilememesi için tel erezyon tezgâhında dielektrik sıvı içinde kesilerek hazırlanmıştır.






Şekil 7.1. Frezeleme deneylerinde kullanılacak numune boyutları.

7.1.3. Kesici Takım ve Takım Tutucular

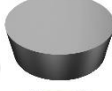


Frezeleme deneylerinde, SANDVİK kesici takım firması tarafından aynı geometrilerle imal edilmiş iki adet, farklı kaplama tipine sahip kaplamalı (GC1030, GC2040) ve bir adet kaplamasız (H13 A), 15 ° dalma açısına sahip karbür uç ve üç farklı özelliğe sahip seramik uç (CC6060, CC650, CC670) kullanılmıştır. Kaplamasız bir karbür sınıfı olan H13 A, orta kesme hızlarında ısıl dirençli alaşımların frezelenmesinde kullanılan aşınma direnci ve tokluğu yüksek olan kaplamasız bir karbür kalitesidir. PVD (TiAlN) kaplamalı bir karbür sınıfı olan GC1030, orta hızlarda ısıl dirençli süper alaşımların frezelenmesi için kullanılmaktadır. Talaş yığılması ve plastik deformasyona karşı iyi direnç göstermesi tercih edilme nedenlerindedir. CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalı bir karbür olan GC2040 ise ısıl dirençli alaşımların frezelenmesinde yaygın olarak kullanılan bir kesici takım türüdür. Silikon nitrürün güçlü yapısını, geliştirilmiş kimyasal kararlılık ile birleştiren Sialon CC6060 kalite kesici uç, ısıl dirençli süper alaşım malzemelerin işlenmesinde tercih edilmektedir. CC650 kalite seramik uç, alümina tabanlı, titanyum karbür takviyeli karma seramik uç kalitesidir. Gri dökme demir ve sertleştirilmiş malzemelerin yüksek hızda işlenmesinde ve ısıl dirençli süper alaşım malzemelerin düşük tokluk gerektiren yarı-ince işlenmesinde kullanılmaktadır. CC670 kalite seramik uç ise “whiskers” takviyeli bir kesici uçtur. Yüksek tokluk özelliğinden dolayı genellikle nikel esaslı süper alaşımların frezelenmesinde tercih edilmektedir. Ayrıca, deney malzemesinin işlenebilirliğinin düşük olması ve dolayısıyla kesici takım ömrünün az olması sebebiyle

dayanımı artırmak amacıyla yuvarlak geometriye sahip uçlar tercih edilmiştir. Karbür uçlar için kesici takım özellikleri Çizelge 7.4’te, seramik uçlar için kesici takım özellikleri ise Çizelge 7.5’te verilmiştir.

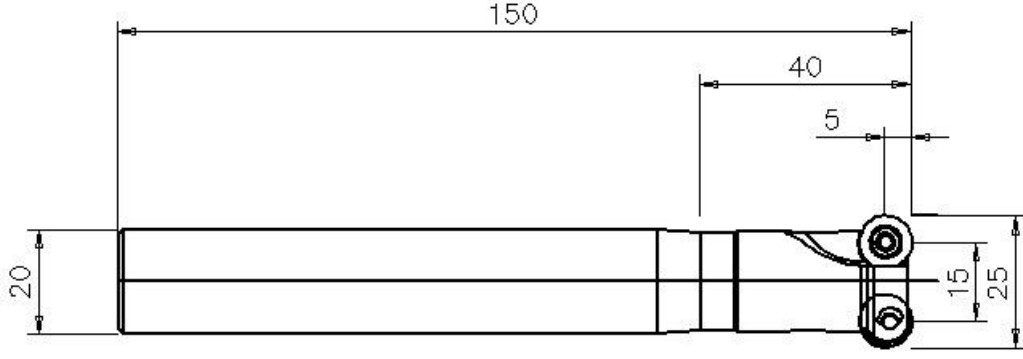
Çizelge 7.4. Karbür uçlar için kesici takım özellikleri.

| ISO Kodu | Görünüm | Kaplama Yöntemi | Kaplama Türü | Sertlik (HV3) | Kaplama Kalınlığı (µm) |
|------------------------|---|-----------------|--|---------------|------------------------|
| R300-1032E- KL H13A |  | - | Kaplamasız | 1550 | - |
| R300-1032E- PM 1030 |  | PVD | TiAlN | 1650 | 3 |
| R300-1032E- MM 2040 |  | CVD | TiCN+Al ₂ O ₃ +TiN | 1300 | 3 |

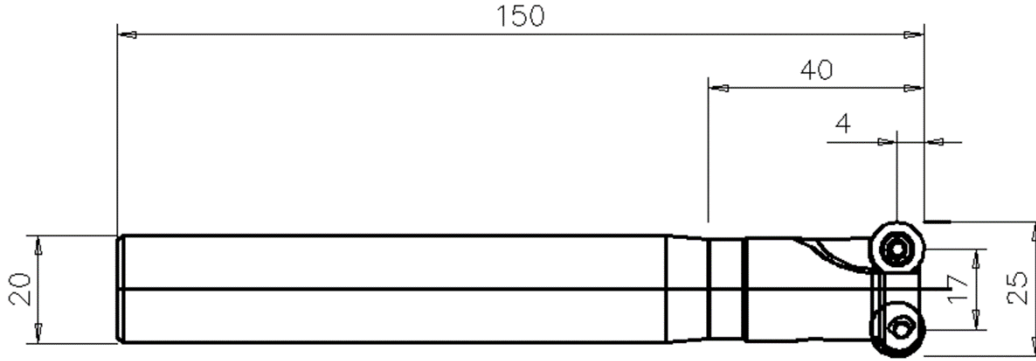
Çizelge 7.5. Seramik uçlar için kesici takım özellikleri.

| ISO Kodu | Görünüm | Takviye Türü | İçeriği (%) | İç Teğet Daire Çapı | Köşe Radyüsü |
|--------------------------|---|--------------|--|---------------------|--------------|
| RPGN090300 E 6060 |  | Sialon | Si ₃ N ₄ (80) Al ₂ O ₃ (20) | 9.525 mm | 4.762 mm |
| RPGN090300 T01020 670 |  | Whiskers | Al ₂ O ₃ (80) SiC (20) | 9.525 mm | 4.762 mm |
| RPGN090300 T01020 650 |  | Alümina | Al ₂ O ₃ (70) TiN (22.5) TiC (7.5) | 9.525 mm | 4.762 mm |

Deneyler esnasında kullanılan takım tutucular, ISO 8688-1’de tanımlanan özelliklere ve deneylerin yapıldığı CNC dik işleme merkezinin kesici takım bağlama başlığı yuvasına uygun olarak seçilmiştir. Bu kapsamda, karbür uçlar için R300-025A20-10M kodlu, SANDVİK marka ve ölçüleri Şekil 7.2’de verilen takım tutucu seçilirken seramik uçlar için R300C-025A20-09M kodlu, SANDVİK marka ve ölçüleri Şekil 7.3’te verilen takım tutucu tercih edilmiştir. Ancak, ön deneyler esnasında deneylerde kullanılan takım tutucu boylarının 150 mm olmasının kesme esnasında titreşime neden olduğu ve bu titreşimin de kesici takım ömrünü etkilediği gözlemlendiğinden takım tutucu boyları 100 mm olacak şekilde kısaltılmıştır.



Şekil 7.2. Karbür uçlar için takım tutucu boyutları.



Şekil 7.3. Seramik uçlar için takım tutucu boyutları.

Ayrıca deney numunelerini hazırlamak için R390-11 T3 08M-MM 2040 ve R390-11 T3 08M-PM 1030 ISO kodlu sementit karbür uçlar kullanılmıştır. Bu uçların kullanımı için seçilen takım tutucu da R390-025A25-11L kodlu takım tutucudur.

7.1.4. Takım Tezgâhı

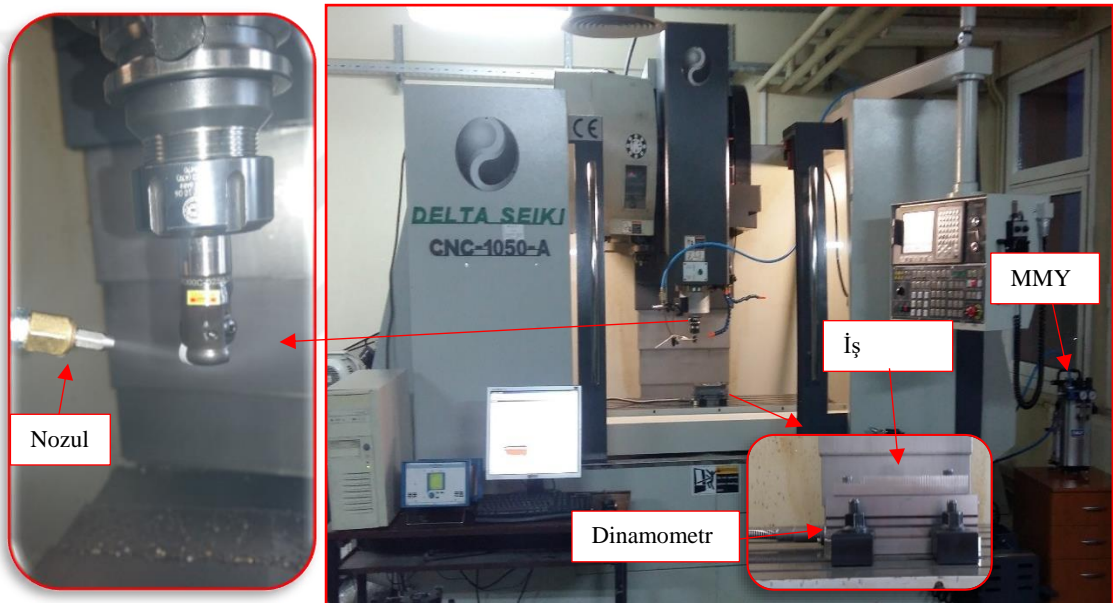
Frezeleme deneyleri, kuru, ıslak ve MMY şartları altında maksimum devri 10.000 dev/dak olan DELTA SEIKI CNC-1050 A marka CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Bu tezgâha ait teknik özellikler Çizelge 7.6’da verilmiştir.

Çizelge 7.6. CNC dik işleme merkezinin özellikleri.

| | |
|----------------------------|------------------------|
| Markası | DELTA SEIKI CNC-1050 A |
| Tabla ölçüsü | 1270-400 mm |
| Max iş parçası ağırlığı | 500 kg |
| Max devir sayısı | 10.000 dev/dak |
| Kesici bağlama hane sayısı | 24 Adet |
| Fener mili motor gücü | 11 kW |
| İşletim sistemi | Fanuc OT |

7.1.5. Minimum Miktarda Yağlama Sistemi

Soğutma-yağlama sistemlerinin kullanımında kesme bölgesinde oluşan ısıyı azaltmak veya talaşı kesme bölgesinden uzaklaştırmanın yanında üretim maliyetlerinin de düşürülmesi fikri yatmaktadır. Bir başka deyişle, soğutma işlemini yaparken maliyetleri düşürmeyi başarabilmek asıl önemli olan noktadır. MMY sistemi altında yapılan işlenebilirlik deneylerinde, çok az miktarda kesme sıvısı, 8 bar basınçlı hava ile beraber pulverize bir şekilde nozul yardımıyla kesme bölgesine püskürtülmüştür. Deneylerde kullanılan optimum MMY parametreleri önceden yapılan deneylerle belirlenmiştir. Bu deneylerle belirlenen yağ tipi, debi, nozul, püskürtme çeşidi ve püskürtme yöntemi ile ana deneyler sürdürülmüştür. Deney sisteminin fotoğrafı Şekil 7.4'te görülmektedir.



Şekil 7.4. Deney düzeneği.

Deneylerde kullanılan ve SKF firmasından temin edilen Vario model MMY sistemine ait teknik özellikler Çizelge 7.7'de verilmiştir.

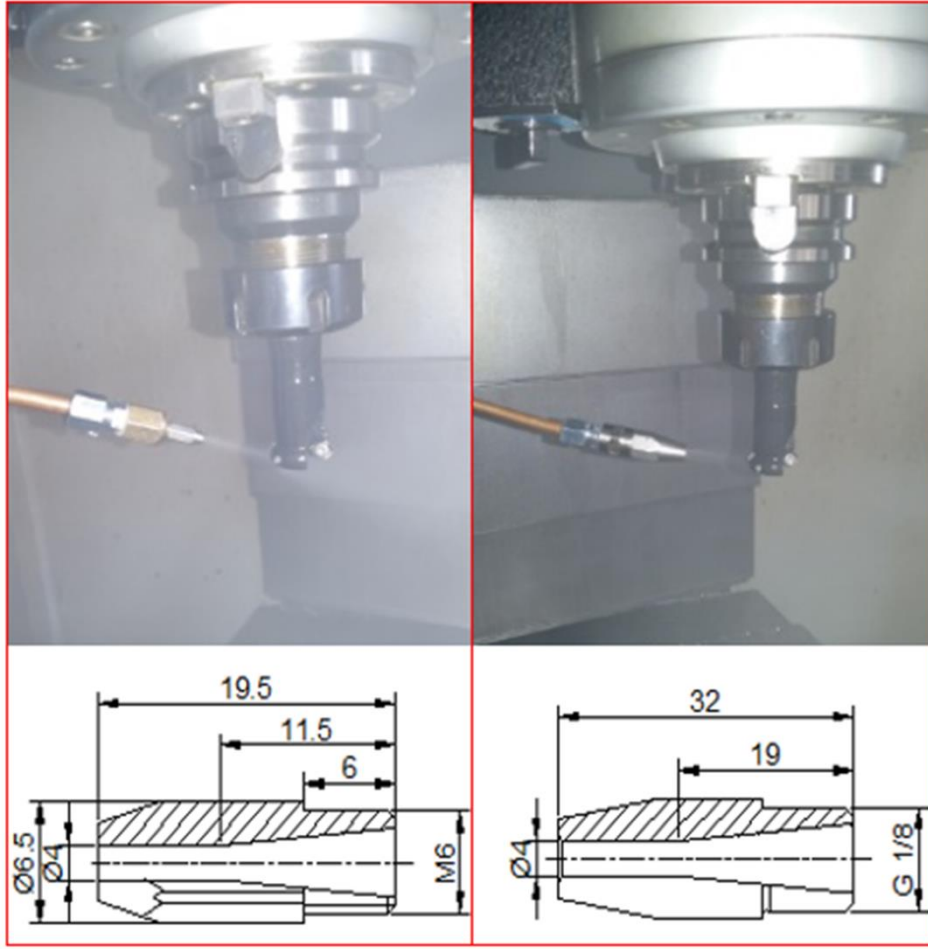
Çizelge 7.7. SKF marka MMY sisteminin teknik özellikleri.

| | |
|--------------------------------|---------------------|
| Metal Gövde | Var |
| Kapasite (Litre) | 1.8 |
| Takım İçinden Yağlama | Var |
| Takım Dışından Yağlama | Var |
| Basınçlı Hava Kapasitesi (Bar) | Min. 6 Max. 8 |
| Çalıştırma | Manuel Sürgülü Vana |
| Yağ Seviyesi İzleme | Var |
| Akış Sensörü | Yok |
| Basınç Kontrolü | Yok |
| Çıkış Deliklerinin Sayısı | 1-3 |
| Hava Tüketimi (NI/min) | 15-300 |
| Yağ Miktarı (ml/s) | 1-150 |
| Ağız Pozisyonu | Dikey |
| Boş Ağırlık (kg) | 6.1 |

Optimum MMY parametrelerinin tayini için yapılan deneylerde kullanılan kesme yağları ve teknik özellikleri Çizelge 7.8’de verilmiştir. Ayrıca, deneylerde kullanılan nozul ve ölçüleri Şekil 7.5’te verilmiştir.

Çizelge 7.8. Kesme yağlarının teknik özellikleri.

| Kesme yağı | Teknik Özellikler | | |
|----------------------|-----------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| | Yoğunluk (20 °C) g/mL | Kinematik viskozite (40 °C) cSt | Parlama noktası °C |
| Bitkisel yağ | 0.895 | 5 | 170 |
| Sentetik yağ | 0.797 | 5.1 | 160 |
| Mineral yağ | 0.930 | 14 | 180 |
| Mineral-Sentetik yağ | 0.854 | 10.5 | 212 |



Şekil 7.5. Deneylerde kullanılan nozullar; 1 nolu nozul (a), 2 nolu nozul (b).

7.1.6. Deneylerde Kullanılan Diğer Soğutma-Yağlama Yöntemleri

İşlenebilirlik deneyleri ilk olarak kuru kesme şartları altında yapılmıştır. Daha sonra Waspaloy süper alaşımının işleme performansını arttırmak için aşağıda belirtilen soğutma-yağlama yöntemleri denenmiştir.

7.1.6.1. Konvansiyonel Soğutma-Yağlama Yöntemi

Islak soğutma yöntemi olarak da bilinen bu yöntemde yağ+su emülsiyonu soğutma sıvısı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bu yöntem halen imalat sanayisinde en yaygın kullanılan soğutma metodu olmayı sürdürmektedir. Bu yöntemle yapılan talaş kaldırma işlemlerinde %8 oranında bor yağı katkılı yağ-su emülsiyonu hazırlanmıştır. Geleneksel soğutmada, deneyler esnasında kullanılan işleme merkezinin kendi soğutma sistemi kullanılmıştır.

7.2. DENEYSEL ÖLÇÜM VE ÖLÇÜM CİHAZLARI

7.2.1. Kesme Kuvvetlerinin Ölçülmesi

Kesici uç-talaş arasındaki temasın uzunluğu kesme kuvvetini etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Örneğin; işleme esnasında kesikli talaş oluşumuna meyilli malzemelerin işlenmesinde kesici uç ve talaş arasındaki temas uzunluğu kısa olduğu için çok küçük kesme kuvvetleri meydana gelmektedir. Bir başka örnek olarak, kesme hızının artırıldığı durumlarda kayma açısının artması ve daha ince talaş oluşmasından dolayı temas uzunluğu azalmakta ve yine kesme kuvvetleri düşük çıkmaktadır. Kesme kuvvetlerini etkileyen bir başka faktör de kesici uç geometrisidir. Ayrıca, zamanla boşluk yüzeyi temas alanı artacağından aşınma da kesme kuvvetini önemli ölçüde etkilemektedir [178]. Talaşlı imalat sürecinde kullanılan çoğu takım tezgâhı kesme kuvvetini talaş kesiti ile işlenen malzemenin özgül kesme direncinin çarpımı olarak kabul etmekte ve kesme gücü buna bağlı olarak belirlenmektedir. Dolayısıyla talaş geometrisi de kesme kuvvetini etkileyen parametrelerden biridir [179].

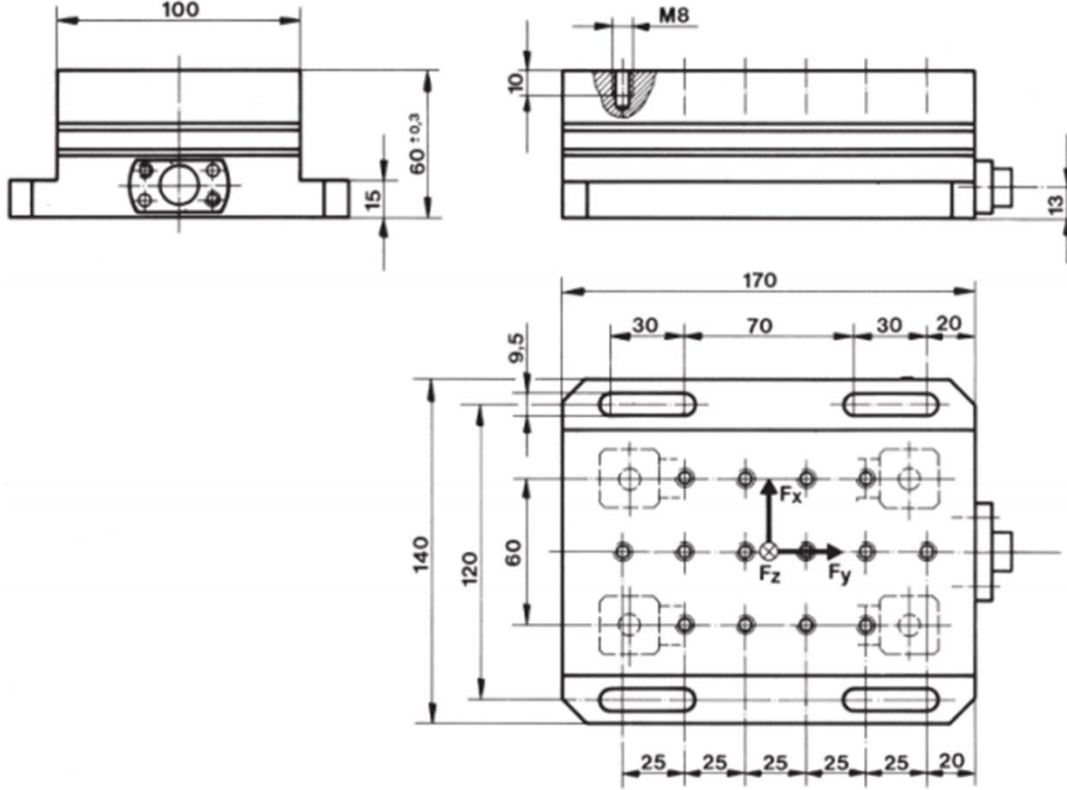
Kesme kuvvetinin ölçümü aynı anda üç yönde ölçüm yapabilen bir dinamometre aracılığıyla yapılmıştır. Her ölçüm için yeni bir kesici uç kullanılmıştır. Dinamometre aracılığıyla elde edilen kesme kuvveti değerleri tabloya aktarılmış ve bu değerler kullanılarak F_r değeri aşağıdaki eşitlik aracılığıyla hesaplanmıştır.

$$F_r = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (7.1)$$

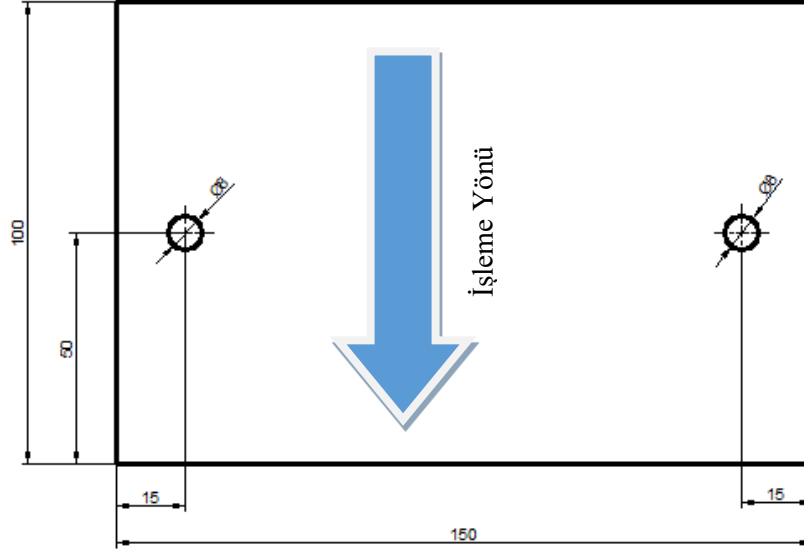
Burada F_x , F_y ve F_z bileşke kuvvetlerdir ve bu kuvvetler kullanılarak F_r elde edilmektedir.

İşlenebilirlik deneylerinde kesme kuvveti ölçümleri, Şekil 7.6'da ölçüleri verilen Kistler 9257B dinamometreye deney numunesinin M8 civata ile doğrudan bağlanması ile yapılmıştır. Deney setinin tasarımında öncelikle; KISTLER 9257B 4 bileşenli piezo-elektrik dinamometre, dinamometreden gelen sinyallerin veri okuma kartına (KISTLER PCIM DAS 1602/16) aktarılmasında KISTLER 5070-A çok kanallı amplifier, 1677-A5 veri kablosu, 1500-B15 kablo, RS232 kablo ve son olarak da verilerin işlenmesi ve grafiklerin elde edilmesi için Windows işletim sistemi ile uyumlu KISTLER Dynoware 2825A-02-01 yazılımı hazır olarak temin edilmiştir. Şekil 7.7'de görüldüğü üzere dinamometreye bağlanan deney numunesi eksenler arası 120mm olan 8mm çapında

boydan boya delik delinmiştir. Kesme kuvvetlerinin ölçümü önceden belirlenen parametrelere bağlı olarak her bir numune için 100 mm boyda yüzey frezeleme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Deliklerin olduğu bölgede kesme kuvvetlerinde değişim olacağı göz önüne alınarak kesme kuvveti ölçümleri orta kısımlardan yapılmıştır. Dinamometreye ait teknik özellikleri Çizelge 7.9’da verilmiştir.



Şekil 7.6. KISTLER 9257B dinamometreye ait ölçüler.

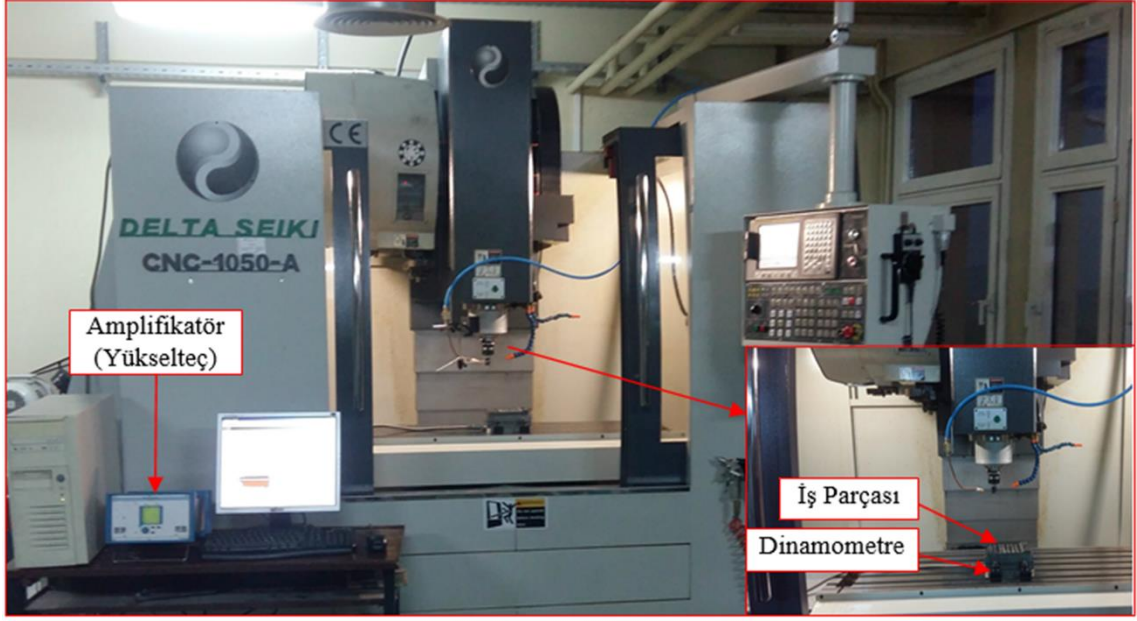


Şekil 7.7. Kesme kuvveti ölçümünde kullanılan deney numunesi ölçüleri.

Çizelge 7.9. Kistler 9257B dinamometrenin teknik özellikleri.

| | |
|---|----------|
| Kuvvet aralığı (kN) (F_x , F_y , F_z) | -5...10 |
| Tepki verme (N) | <0.01 |
| Hassasiyet (pC/N) F_x , F_y | -7.5 |
| F_z | -3.5 |
| Doğrusallık | %1 FSO |
| Histerezis | %0.5 FSO |
| Doğal frekans $f_0(x,y,z)$ (kHz) | 3.5 |
| Çalışma sıcaklığı (°C) | 0...70 |
| Kapasitans (pF) | 220 |
| 20 °C'daki yalıtım direnci (Ω) | > 1013 |
| Topraklama sınıfı (Ω) | > 108 |
| Koruma sınıfı | IP 67 |
| Ağırlık (kg) | 7.3 |

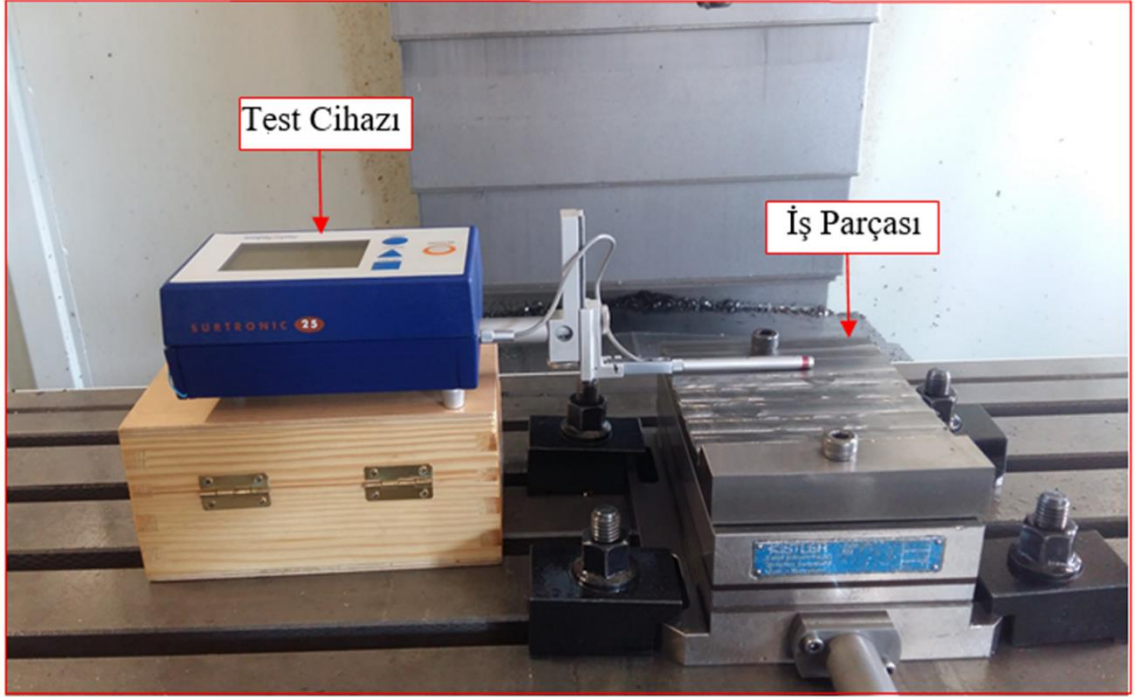
Kesme kuvveti deneyleri karbür ve seramik kesici uçlarla kuru, ıslak ve MMY yöntemleri altında talaş kaldırılarak yapılmıştır. Böylece soğutma-yağlama yönteminin kesme kuvveti üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Kesme kuvvetini ölçmek için kullanılan deney düzeneği Şekil 7.8'de görülmektedir.



Şekil 7.8. Kesme kuvvetleri ölçmek için kurulan deney düzeneği.

7.2.2. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçülmesi

Yüzey pürüzlülüklerinin ölçümünde, ölçüm kriteri olarak ortalama yüzey pürüzlülük değeri (R_a) seçilmiştir. Pürüzlülük ölçümünde profil değişimini R_a ve R_z cinsinden okuyabilen ve özellikleri Çizelge 7.13’de verilmiş olan Taylor Hobson marka yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. Cihaz, ölçme işleminden önce kalibrasyon blokları ile kalibre edilmiştir. Her yüzey daha önce kullanılmamış bir takım ile işlenmiştir. Ölçüm yapılacak yüzeylerin oksitlenmemesi ve ölçüm değerlerini etkilememesi için ölçme bekletilmeden yapılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri, işlenen yüzey üzerinden işleme yönünde, dört noktadan birer kez ölçülmüş ve ölçülen değerlerin aritmetik ortalaması alınmıştır. Şekil 7.9’da test cihazı ile yüzey pürüzlülük ölçümü görülmektedir. Çizelge 7.10’da ise deneylerde kullanılan yüzey pürüzlülük ölçüm cihazının teknik özellikleri verilmiştir.



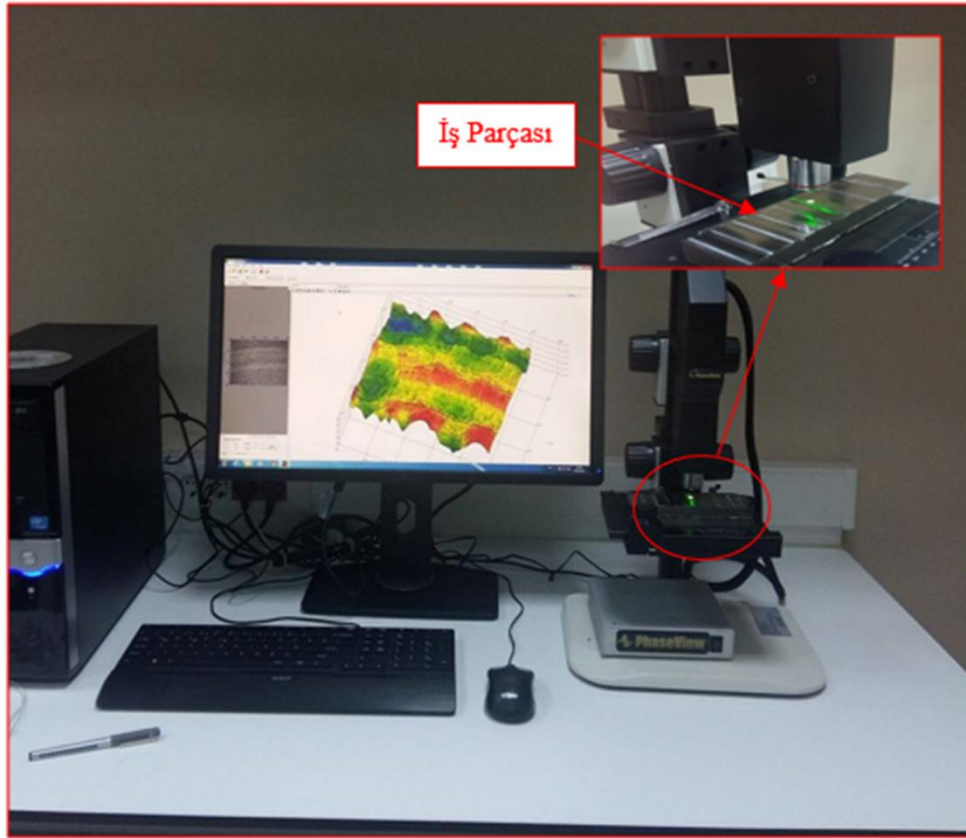
Şekil 7.9. Yüzey pürüzlülük ölçümü.

Çizelge 7.10. Yüzey pürüzlülük ölçümlerinin yapıldığı cihaza ait teknik özellikler.

| | |
|--|--|
| Model | Surtronic 25 |
| Ölçme aralığı (μm) | 300 |
| Kararlılık (μm) | 0.01 |
| Tarama metodu | Diferansiyel indüksiyon |
| Ölçme kuvveti (mg) | 150-300 |
| Dedektör ucu (μm) | Elmas, radyüs: 5 |
| Örnekleme uzunluğu (mm) | 0.25-0.8-2.5-8 |
| Tarama uzunluğu (mm) | 0.25-25 mm |
| Tarama hızı (mm/sn) | 1 |
| Görüntüleme birimi | $\mu\text{m}/\mu\text{in}$ |
| Parametreler | Ra, Rz, Rt, Rp, Rmr, Rpc, Rsm, Rz1max, Rsk, Rda |
| Çalışma sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) | 5-40 |
| Ölçüler (mm) | 127x85x60 |
| Ağırlık (g) | 450 |

Yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesinde hâlihazırda birçok yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler genellikle temaslı ve temassız ölçüm yöntemleri olmak üzere iki bölüme ayrılmaktadır. Temaslı yöntem, genellikle mekanik bir ucun ölçülmek istenen yüzeyde dolaşmasıyla yüzey pürüzlülüğünün ölçüldüğü yöntemdir [180]. Bu yöntemin bazı dezavantajları nedeniyle son yıllarda temassız yöntemlere geçilmiştir ve günümüzde yoğun olarak kullanılmaktadır. Temassız olarak yapılan yüzey ölçme yöntemleri arasında

atomik kuvvet mikroskobu, girişim mikroskobu, dikey tarama interferometresi, konfokal mikroskobisi ve saçılım modellemesi yer almaktadır [181]. Bu çalışmada PhaseView tarafından üretilen kamera ve sensör ile yapılan mikroskobik temassız bir yöntem uygulanmıştır. Yazılım, işlenmiş yüzeylerin fotoğrafını çekmek, 3D yüzey topografyasını elde etmek ve yüzey verileri oluşturmak için kullanılmıştır. Ölçüm noktaları işlenmiş yüzeylerden 2.5mmx2.5mm ölçüsünde rastgele seçilmiştir. Şekil 7.10'da optik profilometre görüntüsü verilirken Çizelge 7.11'de optik profilometrenin teknik özellikleri verilmiştir.



Şekil 7.10. Optik profilometre ile ölçüm.

Çizelge 7.11. Optik Profilometrenin Teknik Özellikleri.

| | |
|-----------------------------|--------------|
| Model | WaveGauge |
| Objektif Çap Aralığı, mm | 0.5-20 |
| Kamera Pixel Ölçüsü, um | 6.45x6.45 |
| Güç Aralığı, D | -20.....+20 |
| Güç Doğruluğu | 0.1.....0.3% |
| Güç Çözünürlüğü, D | 0.01 |
| MTF Mutlak Doğruluk | 2% |
| Işık Kaynağı Dalga Boyu, nm | 535 |

7.2.3. Takım Ömrünün Ölçülmesi

7.2.3.1. Takım Ömrü Ön Deneyleri

Takım ömrünü belirleyecek ana deneyleri uygulamadan önce kesme hızı, ilerleme, işleme yönü, kullanılacak kesici uç sayısı gibi takım ömrünü doğrudan etkileyen parametrelerde optimumu yakalamak amacıyla bir takım ön deneyler yapılmıştır. Kesme hızı belirlenirken kesici takım firmasına ait öneriler ve literatürde benzer özelliğe sahip malzemelerin deney sonuçlarını yayınlayan araştırmacıların çalışmaları incelenmiş ve yakın bir değer seçilmiştir. İşleme yönü belirlenirken her iki yönde de (aynı yönlü, zıt yönlü frezeleme) işleme yapılmış çıkan sonuç kesici takım firması ve literatüre uygun olarak zıt yönlü frezeleme seçilmiştir. Kesme esnasında meydana gelen kesme kuvvetlerinin tek bir uca yoğunlaşması ve elde edilen sonucun daha net olmasından dolayı kesici uç sayısı bir olarak seçilmiştir.

Ön deney yapmanın diğer amaçları ise;

- Tezgâhın kapasitesini belirlemek (istenilen talaş kaldırma parametrelerine tezgâhın ulaşip ulaşamayacağını belirlemek),
- Kesici takımlar için katalog ve literatürde önerilen değerlerin geçerliliğini test etmek,
- Çalışma için en uygun işleme stratejisini belirlemek,
- Takım aşınması ve kesme süresinin ölçülmesi konusunda gerekli beceri ve alışkanlıkları kazanmak,
- Kesici takımların gösterdiği aşınma tiplerini belirlemek,

şeklinde sıralanabilir.

Bu şekilde yapılan ön deneyler değerlendirilerek seçilen kesme şartlarına ait bazı düzenlemeler yapılmış ve ölçme hassasiyetlerinin de uygunluğu tespit edildikten sonra esas takım ömrü deneylerine başlanmıştır. Ayrıca, hem ön deneyler hem de esas deneyler esnasında işleme mesafesi ISO 8688-1 standardı dikkate alınarak kesici takım çapının %60'ına tekabül eden 15 mm seçilmiştir. Seramik uçların darbeye karşı hassas olmasından dolayı kesici takım firmasının önerisi dikkate alınarak giriş ve çıkıştaki darbeyi en aza indirmek amacıyla seramik kesicilerle talaş kaldırma esnasında parçaya giriş ve çıkışı doğrudan yapmak yerine 15 mm'lik bir radüs kullanarak dairesel giriş çıkış yapılmıştır.

7.2.3.2. Esas Takım Ömrü Deneyleri

Her deney öncesinde yeni bir uç kullanılarak yapılan esas takım ömrü deneyleri, kuru, ıslak ve MMY soğutma teknikleri altında gerçekleştirilerek her işleme şartı altındaki takım ömrü hesaplanmıştır. Takım aşınma fotoğrafları, Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar ve Uygulama Merkezi'nde bulunan "FEI (Model: Quanta FEG 250)" marka taramalı elektron mikroskobunda çekilmiştir. Her deneyin bitiminden sonra talaşlar kesme bölgesinden uzaklaştırılmıştır. Kesici uçlar sökülerek AM 4113ZT (Dino-Lite) polarize dijital mikroskopla kontrol edilmiş ve aşınma değerleri ölçülmüştür. Ölçülen değerler not edilmiş ve her deney sonrası kesici ucun ilgili kısmı kodlanarak ve oksitlenmemesi için poşetlenerek saklanmıştır. Dijital mikroskop ile ölçüm Şekil 7.11'de verilirken Çizelge 7.12'de dijital mikroskoba ait teknik özellikler yer almaktadır.



Şekil 7.11. AM 4113ZT polarize dijital mikroskop ile ölçüm.

Çizelge 7.12. AM 4113ZT polarize dijital mikroskobunun teknik özellikleri.

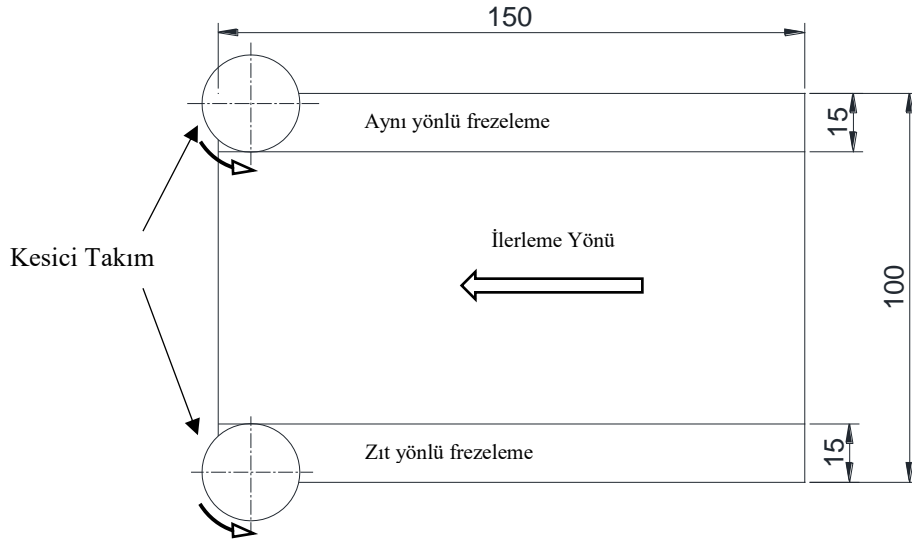
| | |
|----------------------|--|
| Model | AM413ZT |
| Çözünürlük | 1.3 megapixel (1280x1024 pixels) |
| Büyütme | 10x~70x, 200x |
| Arayüz | USB 2.0 |
| LED Sayısı | 8 |
| LED Açıp Kapanabilir | Evet |
| LED Rengi | Beyaz |
| Materyal | Kompozit |
| Microtouch | Evet |
| Çıkış | Resim, video ve time-lapsed video |
| Görüntü Hızı | Saniyede 30 kare, 15fps at 1.3M |
| Ölçüm | Evet, (Çizgi, Yarıçap, Daire, 3 Noktadan daire |

7.3. DENEYSEL TASARIM VE KESME PARAMETRELERİ

Çalışma esnasında deneyler dört aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, ana deneylerde kullanılacak MMY sistemi için optimum parametreleri belirlemek amacıyla bir dizi deney gerçekleştirilirken ikinci aşamada karbür kesici takımlar ve kullanılan işleme parametrelerinin (soğutma yöntemi, kesme hızı ve ilerleme) işlenebilirliğe etkilerini araştırmak için bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşamada seramik kesici takımlarla işlenmesi sırasında aynı kesme parametrelerinin işlenebilirliğe etkisi araştırılmıştır. Dördüncü aşamada ise işleme parametrelerinin işlenebilirliğe etkisini tanımlamak amacıyla istatistiksel analizler yapılmıştır.

7.3.1. MMY Parametrelerinin Optimizasyonu İçin Deneysel Tasarım

Bu aşamada, ana deneylerde kullanılacak optimum MMY parametrelerini belirlemek için Taguchi L_{16} ($4^2 2^3$) dikey dizini kullanılarak farklı MMY parametreleri (yağ tipi, debi, frezeleme yönü (aynı yönlü frezeleme, zıt yönlü frezeleme), püskürtme mesafesi, nozul tipi) ile bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sırasında, Sandvik marka kaplamasız H13A kalite karbür uçlar tercih edilmiş olup ön deneyler, literatür ve üretici firmanın tavsiyesine göre, kesme hızı (45 m/dak), ilerleme (0.1 mm/dev) ve kesme derinliği (0.5 mm) sabit tutularak optimum MMY parametrelerine ulaşmak hedeflenmiştir. Şekil 7.12’de aynı yönlü ve zıt yönlü frezelemenin şematik resmi verilmiştir. Çizelge 7.13’te deney girdi parametreleri, Çizelge 7.14’de Taguchi L_{16} dikey dizini deney tasarımı, Çizelge 7.15’de ise araştırmadaki çıktı parametrelerinin özeti verilmiştir.



Şekil 7.12. Frezeleme yönlerini gösteren şematik resim.

Çizelge 7.13. Deney girdi parametreleri.

| Yağ tipi | Debi (ml/s) | Frezeleme yönü | Püskürtme Mesafesi (mm) | Nozul Tipi |
|-------------------|-------------|----------------|-------------------------|------------|
| -Bitkisel | 25 | | | |
| -Sentetik | 50 | Aynı Yönlü | 25 | 1 |
| -Mineral | 75 | Zıt Yönlü | 50 | 2 |
| -Mineral-Sentetik | 100 | | | |

Çizelge 7.14. Taguchi L_{16} ($4^2 2^3$) dikey dizini.

| Deney No | Yağ Tipi | Debi | Konum | Mesafe | Nozul Tipi |
|----------|----------|------|-------|--------|------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | 1 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| 4 | 1 | 4 | 2 | 2 | 2 |
| 5 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 6 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| 7 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| 8 | 2 | 4 | 2 | 1 | 1 |
| 9 | 3 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 10 | 3 | 2 | 2 | 1 | 2 |
| 11 | 3 | 3 | 1 | 2 | 1 |
| 12 | 3 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| 13 | 4 | 1 | 2 | 2 | 1 |
| 14 | 4 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 15 | 4 | 3 | 1 | 1 | 2 |
| 16 | 4 | 4 | 1 | 1 | 2 |

Çizelge 7.15. Çıktı parametrelerinin özeti.

| Kesme Kuvveti | Takım Ömrü | Yüzey Kalitesi | Matematiksel Modeller |
|---------------|------------|---|-----------------------|
| N | TÖ (dak) | Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Ra (μm) | N TÖ Ra |

7.3.2. Karbür Takımlar ile İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu İçin Deneysel Tasarım

Bu aşamada, işlenebilirlik deneyleri, kuru, geleneksel soğutma (emülsiyon sıvı) ve MMY gibi farklı soğutma şartları altında gerçekleştirilmiştir. Karbür kesiciler ile optimum kesme parametrelerini belirlemek için Taguchi L_{27} dikey dizini kullanılarak farklı kesme parametreleri (kesme hızı, ilerleme, soğutma-yağlama yöntemi) ile bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Kesme derinliği ve ilerleme ISO 8688-1'e uygun olacak şekilde seçilmiştir. Her bir deney sabit kesme derinliğinde (0.5 mm) yapılmıştır. Deneylerde kullanılan kesme hızları, üretici firma önerileri ve örnek literatür çalışmalarına bağlı olarak tespit edilmiş ve ön deneyler neticesinde nihai olarak belirlenmiştir. Çizelge 7.16'da deney girdi parametreleri, Çizelge 7.17'de Taguchi L_{27} dikey dizini deney tasarımı, Çizelge 7.18'de ise araştırmadaki çıktı parametrelerinin özeti verilmiştir. Deneyler sonucunda işlenmiş yüzeylerin pürüzlülüğü, kesici uç aşınması ve kesme kuvvetleri ölçülmüştür.

Çizelge 7.16. Deney tasarımında kullanılan etkenler ve düzeyleri.

| Seviyeler | (A) Kesici Takım Kalitesi | (B) Soğutma/Yağlama Yöntemi | (C) Kesme hızı V (m/dak) | (D) İlerleme hızı f (m/dev) |
|-----------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | H13 A | Kuru | 30 | 0.10 |
| 2 | GC1030 | Islak | 45 | 0.15 |
| 3 | GC2040 | MMY | 60 | 0.20 |

Çizelge 7.17. Taguchi L₂₇ dikey dizini.

| Deney No | Kesici Takım | Soğutma/Yağlama Yöntemi | Kesme Hızı | İlerleme Hızı |
|----------|--------------|-------------------------|------------|---------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 1 | 3 | 3 |
| 4 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 5 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| 6 | 1 | 2 | 3 | 1 |
| 7 | 1 | 3 | 1 | 3 |
| 8 | 1 | 3 | 2 | 1 |
| 9 | 1 | 3 | 3 | 2 |
| 10 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| 11 | 2 | 1 | 2 | 3 |
| 12 | 2 | 1 | 3 | 1 |
| 13 | 2 | 2 | 1 | 3 |
| 14 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 15 | 2 | 2 | 3 | 2 |
| 16 | 2 | 3 | 1 | 1 |
| 17 | 2 | 3 | 2 | 2 |
| 18 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| 19 | 3 | 1 | 1 | 3 |
| 20 | 3 | 1 | 2 | 1 |
| 21 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| 22 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| 23 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| 24 | 3 | 2 | 3 | 3 |
| 25 | 3 | 3 | 1 | 2 |
| 26 | 3 | 3 | 2 | 3 |
| 27 | 3 | 3 | 3 | 1 |

Çizelge 7.18. Çıktı parametrelerinin özeti.

| Kesme Kuvveti | Takım Ömrü | Yüzey Kalitesi | Matematiksel Modeller |
|---------------|------------|--|-----------------------|
| N | TÖ (dak) | Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Ra (µm) | N TÖ Ra |

7.3.3. Seramik Takımlar ile İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu İçin Deneysel Tasarım

Deneyler, ilk olarak kuru kesme şartları altında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra deneyler geleneksel soğutma ve MMY gibi farklı soğutma şartları altında tekrarlanmıştır. Seramik kesicilerde optimum kesme parametrelerini belirlemek için Taguchi L₂₇ dikey dizini kullanılarak farklı kesme parametreleri (kesme hızı, ilerleme, soğutma-yağlama yöntemi)

ile bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Kesme derinliği ve ilerleme ISO 8688-1'e uygun olacak şekilde seçilmiştir. Her bir deney sabit kesme derinliğinde (0.5 mm) yapılmıştır. Deneylerde kullanılan kesme hızları üretici firma önerileri ve örnek literatür çalışmalarına bağlı olarak tespit edilmiş ve ön deneyler neticesinde nihai hız aralıkları belirlenmiştir. Çizelge 7.19'da deney girdi parametreleri, Çizelge 7.20'de Taguchi L₂₇ dikey dizini deney tasarımı, Çizelge 7.21'de ise araştırmadaki çıktı parametrelerinin özeti verilmiştir. Deneyler sonucunda işlenmiş yüzeylerin pürüzlülüğü, kesici uç aşınması ve kesme kuvvetleri ölçülmüştür.

Çizelge 7.19. Deney tasarımında kullanılan etkenler ve düzeyleri.

| Seviyeler | (A) Kesici Takım Kalitesi | (B) Soğutma/Yağlama Yöntemi | (C) Kesme hızı V (m/dak) | (D) İlerleme hızı f (m/dev) |
|-----------|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | CC650 | Kuru | 500 | 0.02 |
| 2 | CC670 | Islak | 600 | 0.04 |
| 3 | CC6060 | MMY | 700 | 0.06 |

Çizelge 7.20. Taguchi L₂₇ dikey dizini.

| Deney No | Kesici Takım | Soğutma/Yağlama Yöntemi | Kesme Hızı | İlerleme Hızı |
|----------|--------------|-------------------------|------------|---------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 1 | 3 | 3 |
| 4 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 5 | 1 | 2 | 2 | 3 |
| 6 | 1 | 2 | 3 | 1 |
| 7 | 1 | 3 | 1 | 3 |
| 8 | 1 | 3 | 2 | 1 |
| 9 | 1 | 3 | 3 | 2 |
| 10 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| 11 | 2 | 1 | 2 | 3 |
| 12 | 2 | 1 | 3 | 1 |
| 13 | 2 | 2 | 1 | 3 |
| 14 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 15 | 2 | 2 | 3 | 2 |
| 16 | 2 | 3 | 1 | 1 |
| 17 | 2 | 3 | 2 | 2 |
| 18 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| 19 | 3 | 1 | 1 | 3 |
| 20 | 3 | 1 | 2 | 1 |
| 21 | 3 | 1 | 3 | 2 |
| 22 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| 23 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| 24 | 3 | 2 | 3 | 3 |
| 25 | 3 | 3 | 1 | 2 |
| 26 | 3 | 3 | 2 | 3 |
| 27 | 3 | 3 | 3 | 1 |

Çizelge 7.21. Çıktı parametrelerinin özeti.

| Kesme Kuvveti | Takım Aşınması | Yüzey Kalitesi | Matematiksel Modeller |
|---------------|----------------|--|-----------------------|
| N | VB (mm) | Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Ra (µm) | N VB Ra |

7.4. DENEY VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Taguchi'nin L₁₆ ve L₂₇ dikey dizini kullanılarak mevcut parametreler ve seviyelerine göre frezeleme deneyleri yapılmıştır. Frezeleme deneyleri sonucunda elde edilen takım ömrü/aşınması, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları değerlendirilmiştir. Oluşturulan grafikler ile kesme parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme hızı) ve kesme şartlarının (kuru, ıslak ve MMY) takım ömrü/aşınması, kesme kuvveti ve yüzey

pürüzlülüğü üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Ayrıca malzemenin frezelenmesinde takım ömrü/aşınması, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne etki eden parametrelerin etki düzeylerini belirlemek amacıyla ANOVA tabloları oluşturulmuştur. Yine deneylerde kullanılan bağımlı değişkenler ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkinin tanımlanmasında ise çoklu regresyon analizi uygulanmış ve deneysel sonuçlar ile tahmin değerleri arasındaki ilişki belirlenmiştir. Böylece Nikel esaslı Waspaloy süper alaşımının frezede yüksek verimde işlenmesine yönelik sonuçlar açık bir şekilde ortaya konulmuştur. Çizelge 7.22’de deney tasarımı, deneylerin gerçekleştirilmesi ve deney sonuçlarının değerlendirilmesine ilişkin akış şeması verilmiştir.



8. BULGULAR VE TARTIŞMA

İşlenebilirlik, bir malzemenin işlenmesindeki kolaylık veya zorluk olarak ifade edilmekte ve kesme hızı, ilerleme miktarı ve talaş derinliği gibi kesme şartlarını kullanmaktadır. Bir malzemenin işlenebilirliğinin tanımlanması takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti gibi bileşenlerin ölçülmesi ile yapılmaktadır. Bu çalışmada Waspaloy, frezeleme yöntemi ile işlenmiş ve deneysel çalışmalar üç ana başlık altında yürütülmüştür. Birinci bölümde, ana deneylerde kullanılacak olan MMY sistemine ait optimum kesme parametrelerini belirlemek için yağ tipi, debi, frezeleme yönü, püskürtme mesafesi ve nozul tipi gibi değişkenlerin kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu incelemeye ait deney düzeneğinin belirlenmesi sürecinde Taguchi L_{16} ($4^2 2^3$) dikey dizini kullanılmıştır. İkinci bölümde, karbür kesici takımlar ve kullanılan işleme parametrelerinin işlenebilirliğe etkilerini araştırmak için bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Üçüncü bölümde ise seramik kesici takımlarla aynı kesme parametrelerinin işlenebilirliğe etkisi araştırılmıştır. İkinci ve üçüncü bölümlerde kesici takım, soğutma yağlama yöntemi, ilerleme hızı ve kesme hızının kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu incelemeye ait deney düzeneğinin belirlenmesi sürecinde Taguchi L_{27} dikey dizini kullanılmıştır.

8.1. MMY PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU

Bu bölümde, karbür ve seramik kesicilerle yapılan ve ikinci-üçüncü aşama deneylerde kullanılan MMY sistemine ait optimum parametreleri elde etmek için sabit kesici takım (kaplamasız karbür), sabit kesme hızı (45 m/dak), sabit ilerleme (0.1 mm/dev) ve sabit kesme derinliği (0.5 mm) altında kesme kuvveti, takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü açısından en uygun değeri verecek MMY parametrelerinin elde edilmesi amaçlanmıştır.

8.1.1. Takım Ömrü

Optimum MMY parametresinin belirlenmesinde kesici takım, kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği sabit tutularak yağ tipi, debi, frezeleme yönü, püskürtme mesafesi ve nozul tipi gibi MMY parametrelerinin en uzun takım ömrü değerlerini veren kombinasyonunun

bulunması ve faktör etkileşimlerinin takım ömrü üzerindeki etkilerinin incelenmesi bu bölümün amacını oluşturmaktadır. Takım ömrü deneyleri için kesici takım firmasının önerisi, literatür araştırması ve ön deneyler sonucu kaplamasız karbür kesici uç, 45 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve 0.5 mm kesme derinliği seçilmiştir. Ön deneyler sonunda kesici takımlarda oluşan aşınma durumu incelenmiş ve inceleme sonucunda düzenli yanak aşınması ile çentik aşınması gözlenmiştir. Takım ömrü değerlendirmelerinde ISO 8688-1 frezeleme standardında önerilen aşınma ölçüsü (0.3 mm) dikkate alınmıştır. İşleme deneyleri esnasında kesici takımında meydana gelen aşınma miktarı 2.62 dakikalık talaş kaldırma periyotları sonunda dijital mikroskop ile ölçüldükten sonra aşınma değerlerinin yorumlanmasına geçilmiştir.

Takım ömrü deneyleri için kontrol faktörleri yağ tipi, debi (ml/s), frezeleme yönü, püskürtme mesafesi (mm) ve nozul tipi seçilmiştir. Çalışmanın amacı en büyük takım ömrü değerini elde etmek olduğu için S/N (sinyal/gürültü) oranlarının hesaplanmasında “en büyük en iyi” değerini veren Eşitlik (8.1) tercih edilmiştir.

$$S / N = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (8.1)$$

Burada,

Y : Performans karakteristik değeri (takım ömrü),

n : Y değerlerinin sayısıdır.

Kontrol faktörlerinin seviyeleri, yapılan işlenebilirlik deneyleri sonucu elde edilen takım ömürleri ve S/N oranları Çizelge 8.1’de sunulmuştur. Yapılan frezeleme deneyleri sonucunda ortalama takım ömrü değeri 10.1 dakika olarak elde edilirken S/N oranlarının ortalama değeri 19.80 dB olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 8.1. Deney sonuçları ve S/N oranları.

| Dn. No. | Kontrol faktörleri | | | | | Takım Ömrü (dak) | S/N oranı (dB) |
|---------|--------------------|---------------|-----------------------|---------------------------|-------------------|------------------|----------------|
| | A Yağ Tipi (YT) | B Debi (ml/s) | C Frezeleme Yönü (FY) | D Püskürtme Mesafesi (mm) | E Nozul Tipi (NT) | | |
| 1 | Bitkisel | 25 | Aynı yönlü | 25 | 1 | 10.5 | 20.42 |
| 2 | Bitkisel | 50 | Aynı yönlü | 25 | 1 | 10.5 | 20.42 |
| 3 | Bitkisel | 75 | Zıt yönlü | 50 | 2 | 13.1 | 22.35 |
| 4 | Bitkisel | 100 | Zıt yönlü | 50 | 2 | 13.1 | 23.92 |
| 5 | Sentetik | 25 | Aynı yönlü | 50 | 2 | 7.9 | 17.95 |
| 6 | Sentetik | 50 | Aynı yönlü | 50 | 2 | 7.9 | 20.42 |
| 7 | Sentetik | 75 | Zıt yönlü | 25 | 1 | 10.5 | 20.42 |
| 8 | Sentetik | 100 | Zıt yönlü | 25 | 1 | 13.1 | 22.35 |
| 9 | Mineral | 25 | Zıt yönlü | 25 | 2 | 7.9 | 17.95 |
| 10 | Mineral | 50 | Zıt yönlü | 25 | 2 | 10.5 | 17.95 |
| 11 | Mineral | 75 | Aynı yönlü | 50 | 1 | 10.5 | 17.95 |
| 12 | Mineral | 100 | Aynı yönlü | 50 | 1 | 10.5 | 20.42 |
| 13 | Mineral-Sentetik | 25 | Zıt yönlü | 50 | 1 | 7.9 | 17.95 |
| 14 | Mineral-Sentetik | 50 | Zıt yönlü | 50 | 1 | 7.9 | 17.95 |
| 15 | Mineral-Sentetik | 75 | Aynı yönlü | 25 | 2 | 7.9 | 17.95 |
| 16 | Mineral-Sentetik | 100 | Aynı yönlü | 25 | 2 | 10.5 | 20.42 |

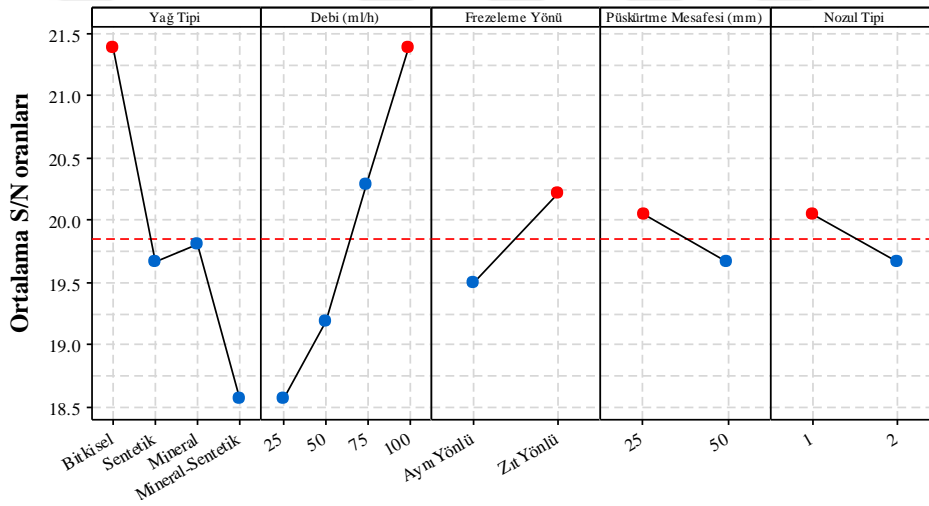
Yapılan deneylerden elde edilen verilerin S/N oranları Taguchi metodu aracılığıyla optimize edilmiştir. Taguchi metodunda deney sonuçlarını analiz edebilmek için literatürde S/N oranı olarak bilinen bir istatistiksel performans ölçüsü kullanılmaktadır. S/N oranında yer alan S sinyal oranını N ise gürültü oranını temsil etmektedir. Başka bir deyişle, S gerçek değeri N ise deney tasarımına katılmayan fakat deney sonucuna etki eden faktörleri ifade etmektedir. Çizelge 8.2’de takım ömrü için S/N tablosu verilmiştir ve optimum takım ömrü değerleri için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri görülmektedir.

Çizelge 8.2. S/N yanıt tablosu.

| Seviyeler | Kontrol faktörleri | | | | |
|-----------|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | A | B | C | D | E |
| Seviye 1 | 21.38 | 18.57 | 19.50 | 20.05 | 20.05 |
| Seviye 2 | 19.67 | 19.19 | 20.22 | 19.67 | 19.67 |
| Seviye 3 | 19.81 | 20.29 | - | - | - |
| Seviye 4 | 18.57 | 21.38 | - | - | - |
| Delta | 2.81 | 2.81 | 0.72 | 0.38 | 0.38 |

MMY parametrelerinin takım ömrü üzerindeki etkileri araştırılırken optimizasyon aracı olarak kullanılan Taguchi yöntemi, tasarıma ait varyasyonları ölçmek için S/N analizini

kullanılmaktadır [182]. Kalite değerinin hedeflendiği duruma göre küçük değer iyi (SB), büyük değer iyi (LB) ve nominal değer iyi (NB) olmak üzere üç temel S/N değeri bulunmaktadır ve bu değerler aracılığıyla deney sonuçları analiz edilmektedir [183]. Çalışmanın bu bölümünde, yüksek takım ömrü istendiğinden LB S/N seçilmiştir. Sisteme yüklenen herhangi bir kontrol faktörü için en iyi seviye faktörün seviyeleri içerisindeki en büyük S/N değerine göre bulunmaktadır [183]. Bu nedenle, en yüksek takım ömrü değerini veren faktörlere ait seviye ve S/N oranları faktör A için (Seviye 1, S/N= 21.38 dB), faktör B için (Seviye 4, S/N=21.38 dB), faktör C için (Seviye 2, S/N=20.22 dB), faktör D için (Seviye 1, S/N=20.05 dB) ve faktör E için (Seviye 1, S/N=20.05 dB) olarak belirlenmiştir (Çizelge 8.2). Ayrıca Şekil 8.1’de takım ömrü değerleri için kontrol faktörlerinin S/N oranları ana etki grafiği verilmiştir.

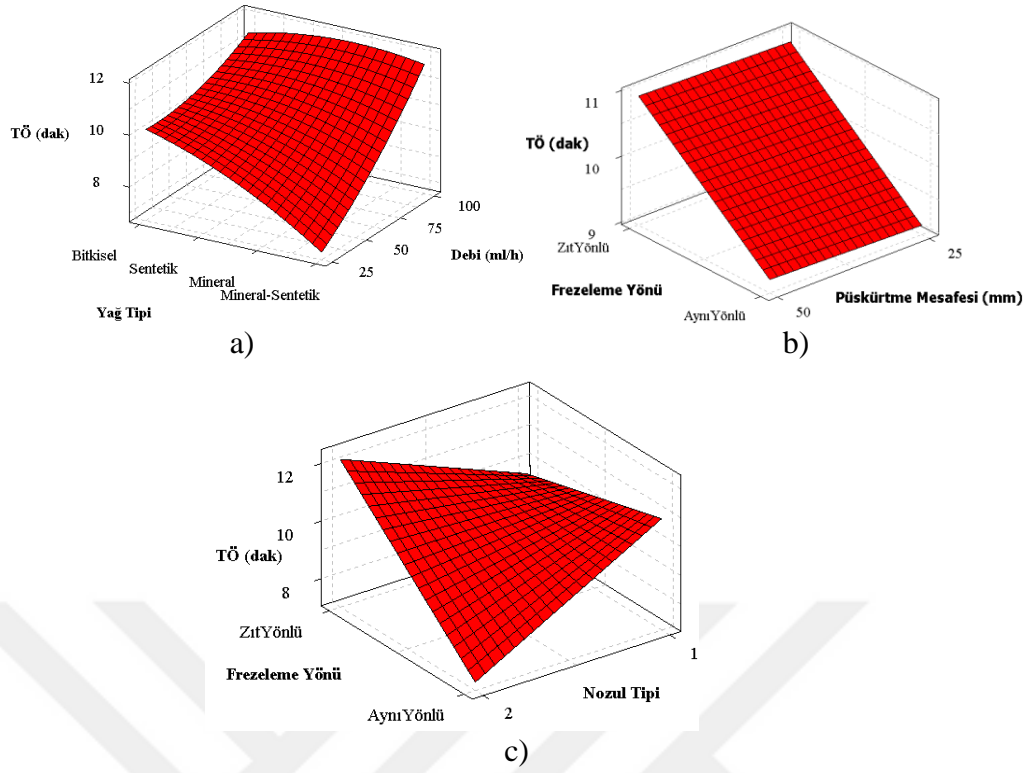


Şekil 8.1. S/N oranları ana etki grafiği.

Şekil 8.1 incelendiğinde, en yüksek takım ömrü değerini veren MMY parametrelerinin bitkisel yağ (A₁), 100 ml/s debi (B₄), zıt yönlü frezeleme işlemi (C₂), 25 mm püskürtme mesafesi (D₁) ve 1 numaralı nozul tipi (E₁) olduğu görülmüştür.

8.1.1.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

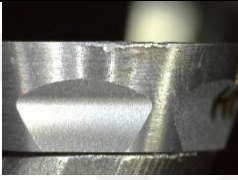


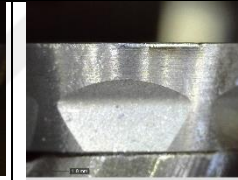


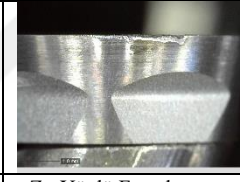
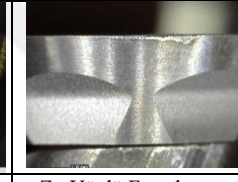






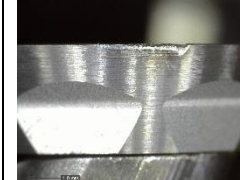

Frezeleme deneyleri sonucunda elde edilen takım ömrü ile diğer ana faktör etkileşimlerinin üç boyutlu yüzey grafikleri Şekil 8.2’de verilmiştir.



Şekil 8.2. Giriş parametrelerine bağlı olarak takım ömrü değişimi, a) Debi ve yağ tipi b) Frezeleme yönü ve püskürtme mesafesi c) Frezeleme yönü ve nozul tipi.

Şekil 8.2a incelendiğinde, en yüksek takım ömrünün bitkisel esaslı kesme yağı ile elde edildiği görülmektedir. Bitkisel esaslı kesme yağının diğer kesme yağlarına göre daha iyi olma sebebi, kimyasal yapıları ve viskoziteleri nedeniyle kesme bölgesinde ince, güçlü ve uzun ömürlü bir film tabakası oluşturmasından kaynaklanmaktadır [184], [185]. Bitkisel esaslı kesme yağı ile sentetik, mineral ve mineral-sentetik esaslı kesme sıvıları karşılaştırıldığında sırasıyla %16.53, %15.71 ve %27.54 oranlarında daha iyi sonuç vermiştir. Debi ile takım ömrü arasındaki ilişkiyi gösteren kısım incelendiğinde, debinin artması ile takım ömründeki artışın doğru orantılı olduğu ve en yüksek takım ömrünün en yüksek debi olan 100 ml/s ile sağlandığı görülmektedir (Şekil 8.2a). Kesme bölgesine gönderilen yağ miktarının artması ile aşınma azalmaktadır [186]. 25 ml/s debiye göre, 50 ml/s debi %7.6, 75 ml/s debi %22.81, 100 ml/s debi ise %38.01 oranında iyileşme sağlamıştır. Zıt yönlü frezeleme aynı yönlü frezelemeye göre %10.18 oranında daha iyi sonuç vermiştir. Frezelemenin yapılma şekli kesme süresine de bağlı olarak kesme kuvveti ve takım ömrü üzerinde önemli etki yaratabilmektedir [187], [188]. Aynı yönlü frezeleme işleminde kesicinin iş parçasına temas ettiği nokta maksimum talaş kalınlığının olduğu noktadır. Bu da gerek takım ömrü gerekse de kesme kuvveti açısından zıt yönlü frezelemeyi daha tercih edilebilir kılmaktadır [189]. Şekil 8.2b’de yer alan ve takım ömrü

ile püskürtme mesafesi arasındaki etkileşimi gösteren kısım incelendiğinde, daha yakından olması ve aerosol dağılımına izin vermeden kesme bölgesine aktarması nedeniyle 25 mm'lik püskürtme mesafesinin daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Ve bu iyileşme %3.3'lük bir oranda olmuştur. Şekil 8.2c'de takım ömrü ile nozul tipi arasındaki ilişki görülmektedir. Şekil 7.5 incelendiğinde, nozul geometrileri ve ölçüleri benzer olmasına rağmen 2 numaralı nozulun ağız kısmında havşa varken 1 numaralı nozulda olmadığı görülecektir. Havşa olmaması nedeniyle aerosol dağılmadan ve daha yoğun olarak kesme bölgesine ulaştığından 1 nolu nozul takım ömrü açısından daha iyi bir sonuç vermiştir. Ve bu iyileşme %3.3 seviyesindedir. Şekil 8.3'te 7.9 dakikalık işleme süresi sonunda kesici uçlardaki aşınma durumunu gösteren fotoğraflar verilmiştir.

| | 25 ml/s | 50 ml/s | 75 ml/s | 100 ml/s |
|------------------|---|---|--|---|
| Bitkisel |  |  |  |  |
| | - Aynı Yönlü Frezeleme - 25 mm - Tip 1 nozul | - Aynı Yönlü Frezeleme - 25 mm - Tip 1 nozul | - Zıt Yönlü Frezeleme - 50 mm - Tip 2 nozul | - Zıt Yönlü Frezeleme - 50 mm - Tip 2 nozul |
| Sentetik |  |  |  |  |
| | - Aynı Yönlü Frezeleme - 50 mm - Tip 2 nozul | - Aynı Yönlü Frezeleme - 50 mm - Tip 2 nozul | - Zıt Yönlü Frezeleme - 25 mm - Tip 1 nozul | - Zıt Yönlü Frezeleme - 25 mm - Tip 1 nozul |
| Mineral |  |  |  |  |
| | - Zıt Yönlü Frezeleme - 25 mm - Tip 2 nozul | - Zıt Yönlü Frezeleme - 25 mm - Tip 2 nozul | - Aynı Yönlü Frezeleme - 50 mm - Tip 1 nozul | - Aynı Yönlü Frezeleme - 50 mm - Tip 1 nozul |
| Mineral-Sentetik |  |  |  |  |
| | - Zıt Yönlü Frezeleme - 50 mm - Tip 1 nozul | - Zıt Yönlü Frezeleme - 50 mm - Tip 1 nozul | - Aynı Yönlü Frezeleme - 25 mm - Tip 2 nozul | - Aynı Yönlü Frezeleme - 25 mm - Tip 2 nozul |

Şekil 8.3. Eşit işleme süresi sonunda kesici takımlardaki aşınma durumu (x50).

8.1.1.2. ANOVA

Bu çalışmada, takım ömrü üzerinde yağ tipi, debi, frezeleme yönü, püskürtme mesafesi ve nozul tipinin etkilerini analiz etmek için ANOVA kullanılmıştır. Takım ömrü değerleri için ANOVA sonuçları Çizelge 8.3'te verilmiştir. Analiz %95 güven seviyesi dikkate alınarak yapılmıştır. P değerinin 0.05'den küçük olması faktörün çıktı üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu şeklinde kabul edildiğinden yağ tipi ve debinin takım ömrü üzerinde belirli bir etkiye sahip olduğu söylenebilmektedir. Faktörlerin etki düzeylerinin (katkı oranı) belirlenmesinde ise yine tabloda yer alan F değerleri dikkate alınmıştır. Çizelge 8.3 incelendiğinde, takım ömrü üzerinde faktör A, B, C, D ve E'nin yüzdelik katkıları sırasıyla %37.8, %43.7, %6.7, %0.7 ve %0.7 olduğu görülmektedir. Bu veriler ışığında takım ömrünü etkileyen en önemli faktörün debi (B) olduğu görülmektedir. Takım ömrü için hata yüzdesi %10.4 bulunmuştur ve bu güvenilir bir istatistiksel analiz için hata seviyesi %20'den az olmalıdır ilkesi ile örtüşmektedir [190].

Çizelge 8.3. Anova tablosu.

| Faktörler | Serbestlik derecesi | Kareler toplamı | Kareler ortalaması | F değeri | P değeri | Katkı oranı (%) |
|-----------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|-----------------|
| A | 3 | 21.5475 | 7.1825 | 7.29 | 0.020 | 37.8 |
| B | 3 | 24.9275 | 8.3092 | 8.43 | 0.014 | 43.7 |
| C | 1 | 3.8025 | 3.8025 | 3.86 | 0.097 | 6.7 |
| D | 1 | 0.4225 | 0.4225 | 0.43 | 0.537 | 0.7 |
| E | 1 | 0.4225 | 0.4225 | 0.43 | 0.537 | 0.7 |
| Hata | 6 | 5.9150 | 0.9858 | - | - | 10.4 |
| Toplam | 15 | 57.0375 | - | - | - | 100 |

8.1.1.3. Regresyon Analizi

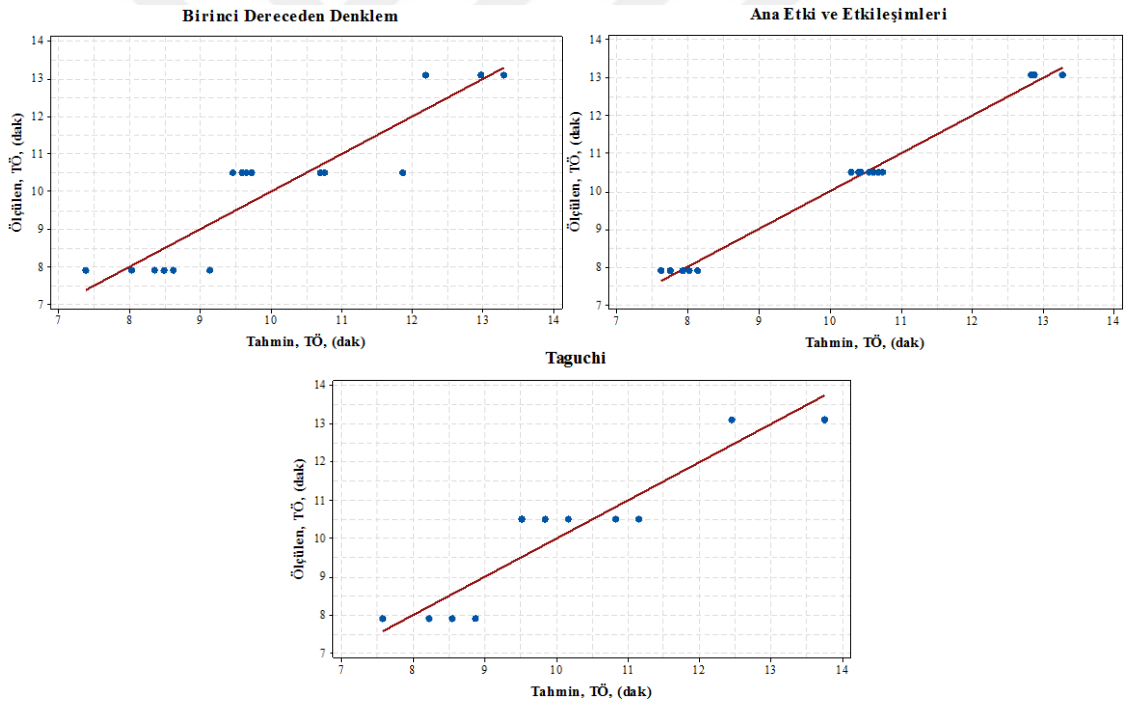
Regresyon analizi, bir bağımlı değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişkenin arasındaki ilişkiyi modellemek ve analiz etmek için kullanılmaktadır[188]. Bu çalışmada, deneyler sonucu elde edilen 16 adet takım ömrü değeri Minitab yazılımında regresyon analizi için kullanılmıştır. Takım ömrü denklemleri, kontrol seviyelerine bağlı olarak yağ tipi (YT), debi (D), frezeleme yönü (FY), püskürtme mesafesi (PM) ve nozul tipi (NT) parametreleri esas alınarak oluşturulmuştur. Sadece kontrol faktörlerinin ana etkileriyle oluşturulan birinci dereceden denklem;

$$T_0 = 9.2 + 0.975YT - 0.0442D - 0.975FY + 0.013PM + 0.325NT \quad (8.2)$$

olarak elde edilmiştir. Elde edilen birinci dereceden denklemin belirleme katsayısı $R^2=0.843$ olarak hesaplanmıştır. %95 güvenilirlik düzeyinde birinci derece denklemlerle elde edilen tahminsel takım ömrü değerleri ile deneysel çalışmalarla elde edilen takım ömrü değerleri arasındaki farklar fazla olacağından faktör etkileşimlerini de kapsayacak yeni bir denklem oluşturulması gerekmektedir. Bu nedenle faktör etkileşimlerini de kapsayan denklem;

$$T_{\bar{o}} = 19.47 + 0.16YT - 0.0065D - 8.32FY + 0.2PM - 11.38NT - 0.16YT^2 + 0.00026D^2 + 0.0156YTxD - 0.0325YTxFY + 0.026DxFY - 0.00312DxPM + 0.026DxNT + 6.17FYxNT \quad (8.3)$$

olarak elde edilmiştir. Bu denklemin belirleme katsayısı ise $R^2=0.991$ bulunmuştur. Şekil 8.4'de deneysel sonuçlar ile tahmin modelleri sonuçlarının karşılaştırılması görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi gerçek değerlere en yakın tahmin denklemi ana etki ve etkileşimlerine ait denklemdir.



Şekil 8.4. Ölçülen değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması.

8.1.1.4. Doğrulama Deneyleri

En yüksek takım ömrüne ait parametre grubu $A_1B_4C_2D_1E_1$ şeklinde elde edilmiştir. Optimum takım ömrü tahmininde Eşitlik (8.4) kullanılmıştır.

$$T_{\bar{o}_{opt}} = (A_1 - T_{T\bar{o}}) + (B_4 - T_{T\bar{o}}) + (C_2 - T_{T\bar{o}}) + (D_1 - T_{T\bar{o}}) + (E_1 - T_{T\bar{o}}) + T_{T\bar{o}} \quad (8.4)$$

Burada, $(A_1, B_4, C_2, D_1, E_1)$ takım ömrünün optimum seviyedeki ortalama değerlerini

vermektedir (Çizelge 8.4). $T_{T\bar{0}}$ değeri ise deneysel çalışma sonucu elde edilen ortalama takım ömrü değerini temsil etmektedir (Çizelge 8.1). Hesaplamalar sonucunda $T\bar{O}_{opt}$ değeri 14.06 dakika olarak bulunmuştur.

Çizelge 8.4. Takım ömrü için ortalama yanıt tablosu.

| Seviyeler | Kontrol faktörleri | | | | |
|-----------|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | A | B | C | D | E |
| Seviye 1 | 11.80 | 8.55 | 9.53 | 10.18 | 10.18 |
| Seviye 2 | 9.85 | 9.20 | 10.50 | 9.85 | 9.85 |
| Seviye 3 | 9.85 | 10.50 | | | |
| Seviye 4 | 8.55 | 11.80 | | | |
| Delta | 3.25 | 3.25 | 0.98 | 0.33 | 0.33 |

Optimizasyonun yeterince doğru olup olmadığını denetlemek için aşağıdaki eşitlikler kullanılarak tahmini güven aralığı hesaplanmıştır.

$$CI_T = \sqrt{F_{\alpha,1,f_e} V_e \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right]} \quad (8.5)$$

ve

$$n_{eff} = \frac{N}{1+T_{dof}} \quad (8.6)$$

Burada $F_{\alpha,1,f_e}$ %95 güvenilirlik oranını, α önem seviyesini, f_e hatanın serbestlik derecesini, V_e hata varyansını, n_{eff} tekrarlanan etkinlik sayısını, R doğrulama deneyleri için tekrar sayısını vermektedir. N toplam deney sayısını, T_{dof} serbestlik derecesinin toplam ana faktörlerini vermektedir. $F_{0.05,1,6}=5.987$, $V_e=0.9858$, $R=2$. $N=16$, $T_{dof}=9$ ve $n_{eff}=1.6$. V_e değerinin elde edilmesinde Çizelge 8.3'ten faydalanılmıştır. Elde edilen değerler Eşitlik (8.5) ve Eşitlik (8.6)'da yerine konularak takım ömrü deneyleri için güven aralığı $CI_{T\bar{0}}=\pm 2.58$ bulunmuştur. %95 güven aralığında tahmini takım ömrü değeri;

$$[T\bar{O}_{opt} - CI_{T\bar{0}}] < T\bar{O}_t < [T\bar{O}_{opt} + CI_{T\bar{0}}] \quad (8.7)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Değerler yerine konulursa;

$$[14.06 - 2.58] < 15.7 < [14.06 + 2.58] = 11.48 < 15.7 < 16.64 \text{ şeklinde olur.}$$

Deneysel olarak elde edilen takım ömrü değeri güven aralığı sınırları içerisinde çıkmıştır. Böylece, takım ömrü için sistem optimizasyonu Taguchi metodu kullanılarak 0.05 anlamlılık düzeyinde elde edilmiştir. Kontrol faktörlerinin doğrulama deneyi optimum seviye ve rastgele seçilen seviyelerle Taguchi metodu ve regresyon denklemleri için yapılmıştır. Çizelge 8.5'de deney sonuçları ile regresyon denklemleri ve Taguchi metodu

aracılığıyla elde edilen tahmin değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Doğrulama deney sonuçları incelendiğinde elde edilen sonuçların yeterli olduğu ve Taguchi optimizasyonunun başarılı olduğu söylenebilir.

Çizelge 8.5. Doğrulama deneyi sonuçları.

| Seviye | Birinci Dereceden Denklem | | | Ana Etki ve Etkileşimlerine Ait Denklem | | | Taguchi Denklemi | | |
|--|---------------------------|--------|----------|---|--------|----------|------------------|--------|----------|
| | Deney | Tahmin | Hata (%) | Deney | Tahmin | Hata (%) | Deney | Tahmin | Hata (%) |
| A ₁ B ₄ C ₂ D ₁ E ₁ | 15.7 | 15.1 | 4.14 | 15.7 | 15.4 | 1.91 | 15.7 | 15.2 | 3.18 |
| A ₂ B ₁ C ₁ D ₂ E ₂ | 13.1 | 13.0 | 0.99 | 13.1 | 12.8 | 2.29 | 13.1 | 12.5 | 5.34 |
| A ₄ B ₃ C ₁ D ₁ E ₂ | 10.5 | 9.6 | 8.67 | 10.5 | 10.6 | 0.95 | 10.5 | 9.9 | 6.67 |

8.1.2. Kesme Kuvveti

Çalışmanın amacı en düşük kesme kuvveti değerini elde etmek olduğu için S/N oranlarının hesaplanmasında “en küçük en iyi” eşitliğini veren Eşitlik (8.8) kullanılmıştır.

$$S/N = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (8.8)$$

Burada,

Y : Performans karakteristik değeri (kesme kuvveti),

n : Y değerlerinin sayısıdır.

Kontrol faktörlerinin seviyeleri, yapılan işlenebilirlik deneyleri sonucu elde edilen F_r kuvveti ve S/N oranları Çizelge 8.6’da sunulmuştur. Yapılan frezeleme deneyleri sonucunda kesme kuvvetlerinin ortalama değeri 567.4 N olarak elde edilmiştir. S/N oranlarının ortalama değeri -55.07 dB olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 8.6. Deney sonuçları ve S/N oranları.

| Dn. No. | Kontrol faktörleri | | | | | Kesme Kuvveti (N) | S/N oranı (dB) |
|---------|--------------------|---------------|-----------------------|---------------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| | A Yağ Tipi (YT) | B Debi (ml/s) | C Frezeleme Yönü (FY) | D Püskürtme Mesafesi (mm) | E Nozul Tipi (NT) | | |
| 1 | Bitkisel | 25 | Aynı yönlü | 25 | 1 | 571 | -55.13 |
| 2 | Bitkisel | 50 | Aynı yönlü | 25 | 1 | 555 | -54.89 |
| 3 | Bitkisel | 75 | Zıt yönlü | 50 | 2 | 549 | -54.79 |
| 4 | Bitkisel | 100 | Zıt yönlü | 50 | 2 | 543 | -54.70 |
| 5 | Sentetik | 25 | Aynı yönlü | 50 | 2 | 589 | -55.40 |
| 6 | Sentetik | 50 | Aynı yönlü | 50 | 2 | 589 | -55.40 |
| 7 | Sentetik | 75 | Zıt yönlü | 25 | 1 | 565 | -55.04 |
| 8 | Sentetik | 100 | Zıt yönlü | 25 | 1 | 541 | -54.66 |
| 9 | Mineral | 25 | Zıt yönlü | 25 | 2 | 595 | -55.49 |
| 10 | Mineral | 50 | Zıt yönlü | 25 | 2 | 583 | -55.31 |
| 11 | Mineral | 75 | Aynı yönlü | 50 | 1 | 585 | -55.34 |
| 12 | Mineral | 100 | Aynı yönlü | 50 | 1 | 569 | -55.10 |
| 13 | Min.-Sentetik | 25 | Zıt yönlü | 50 | 1 | 559 | -54.95 |
| 14 | Mineral-Sentetik | 50 | Zıt yönlü | 50 | 1 | 566 | -55.06 |
| 15 | Mineral-Sentetik | 75 | Aynı yönlü | 25 | 2 | 585 | -55.34 |
| 16 | Mineral-Sentetik | 100 | Aynı yönlü | 25 | 2 | 534 | -54.55 |

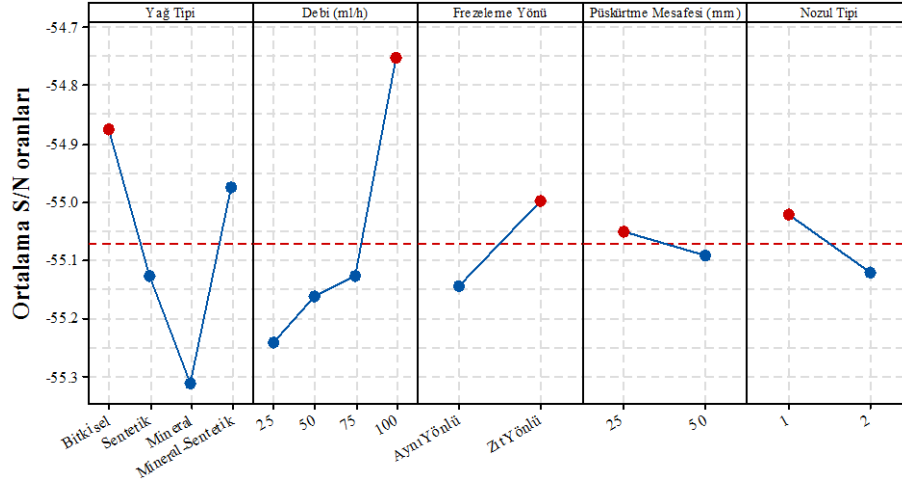
Deneylerden elde edilen sonuçlar Taguchi metodu aracılığıyla S/N oranları ile optimize edilmiştir. Çizelge 8.7’de kesme kuvvetleri için S/N tablosu verilmiştir ve kontrol faktörlerine ait optimum seviyeleri göstermektedir.

Çizelge 8.7. S/N yanıt tablosu.

| Seviyeler | Kontrol faktörleri | | | | |
|-----------|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | A | B | C | D | E |
| Seviye 1 | -54.88 | -55.24 | -55.15 | -55.05 | -55.02 |
| Seviye 2 | -55.13 | -55.16 | -55.00 | -55.09 | -55.12 |
| Seviye 3 | -55.31 | -55.13 | - | - | - |
| Seviye 4 | -54.97 | -54.75 | - | - | - |
| Delta | 0.44 | 0.49 | 0.15 | 0.04 | 0.10 |

Literatürde yer alan araştırma sonuçlarına göre talaş kaldırma sırasında ortaya çıkan kesme kuvvetlerini etkileyen en önemli faktörler; kesme hızı, talaş açısı, kesici takım aşınması ve kesici takım malzemesidir [27]. Ancak, çalışmanın bu bölümünde adı geçen faktörler sabit tutularak MMY parametrelerinin kesme kuvveti üzerindeki etkileri irdelenmiştir. En iyi seviye en büyük S/N oranına göre bulunduğundan en iyi F_r değerini veren faktörlere ait seviyeler ve S/N oranları, faktör A (Seviye 1, S/N= -54.88 dB), faktör B (Seviye 4, S/N=-54.75 dB), faktör C (Seviye 2, S/N=-55.00 dB), faktör D (Seviye 1, S/N=-55.02 dB) ve faktör E (Seviye 1, S/N=-55.02 dB) olarak belirlenmiştir (Çizelge

8.7). Ayrıca Şekil 8.5’de F_r değerleri için kontrol faktörlerinin S/N oranları ana etki grafiği verilmiştir.

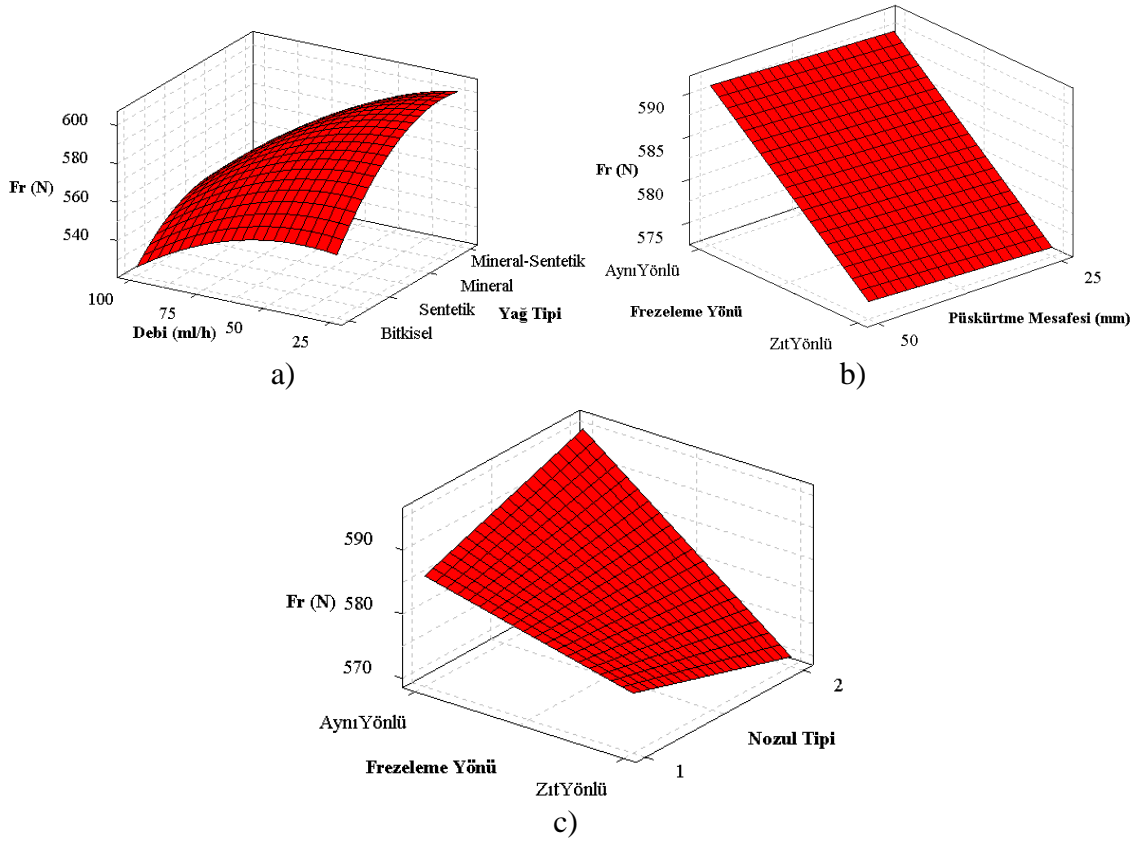


Şekil 8.5. S/N oranları ana etki grafiği.

Şekil 8.5 incelendiğinde, optimum F_r değerinin bitkisel yağ tipinde (A_1), 100 ml/s debide (B_4), zıt yönlü frezeleme işleminde (C_2), 25 mm püskürtme mesafesinde (D_1) ve 1 numaralı nozul tipinde (E_1) elde edildiği görülmüştür.

8.1.2.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Nikel esaslı Waspaloy süper alaşımının sabit kesici takım, sabit kesme hızı, sabit ilerleme ve farklı MMY parametreleri altında frezelenmesi sonucunda elde edilen kesme kuvvetleri ile diğer ana faktör etkileşimlerinin üç boyutlu yüzey grafikleri Şekil 8.6’da verilmiştir.



Şekil 8.6. Giriş parametrelerine bağlı kesme kuvvetleri, a) Debi ve yağ tipi b) Frezeleme yönü ve püskürtme mesafesi c) Frezeleme yönü ve nozul tipi.

Şekil 8.6a incelendiğinde, en düşük kesme kuvveti değerinin bitkisel yağ ile elde edildiği görülmüştür. Bitkisel esaslı kesme yağlarının moleküler olarak uzun, ağır ve iki kutuplu olması metal yüzeylere karşı kimyasal olarak afinitesini arttırmaktadır. Bitkisel esaslı kesme yağları, kimyasal yapıları ve viskozitesi nedeniyle kesme bölgesinde ince, güçlü ve uzun ömürlü yağ filmi oluşturmaktadırlar. Bu sayede kesme bölgesindeki basıncı kontrol ederek kesme kuvvetlerini ve takım-iş parçası arasındaki sürtünmeyi düşürür ve takım aşınmalarını azaltırlar [184]. Bitkisel esaslı kesme sıvısı ile yapılan deneylerden elde edilen kesme kuvveti değerleri sentetik, mineral ve mineral-sentetik esaslı kesme sıvıları ile yapılan deneyler ile karşılaştırıldığında sırasıyla %2.98, %5.14 ve %1.18 oranlarında daha iyi sonuçlar vermiştir. Yine Şekil 8.6a'da yer alan ve deneyler esnasında kullanılan debi miktarları incelendiğinde, yağ miktarının artmasıyla kesme bölgesine etki eden yağ miktarının da artmasından dolayı kesme esnasında ortaya çıkan kesme kuvvetleri azalmaktadır [194]. 25 ml/s debi referans alınarak debi artış oranları incelendiğinde, 50 ml/s debi %0.91, 75 ml/s debi %1.3, 100 ml/s debi ise %5.49 oranında iyileşme sağlamıştır. Zıt yönlü frezeleme aynı yönlü frezelemeye göre %1.67 oranında daha iyi sonuç vermiştir. Aynı yönlü frezeleme işleminde, kesici takımın iş parçasına

batmaya başladığı noktada oluşan talaş kesiti en büyük değerdedir. Ayrıca, oksit ve işleme esnasında ortaya çıkan deformasyonlardan ötürü iş parçası yüzeyi serttir. Bütün bu nedenlerden dolayı kesici takım zorlanır ve aynı yönlü frezeleme işleminde kesme kuvveti daha yüksek çıkar [195]. Şekil 8.6b’de yer alan püskürtme mesafesi eğrisi incelendiğinde daha yakından püskürtüldüğü için aerosolun dağılmadan kesme bölgesine iletilmesi nedeniyle 25 mm olarak tercih edilen mesafe daha iyi sonuçlar vermiştir. Ancak bu iyileşme %0.44’lük bir oranda olmuştur. Nozul tipine ait grafik incelendiğinde, 1 nolu nozul tipi % 1.19 oranında daha iyi sonuç vermiştir

8.1.2.2. ANOVA

Kesme kuvvetleri için ANOVA sonuçları Çizelge 8.8’de verilmiştir. Analiz %95 güven seviyesi dikkate alınarak yapılmıştır. P değerinin 0.05’den küçük olması faktörün çıktı üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu kabul edilmesi anlamına geldiğinden yağ tipi ve debi faktörlerinin kesme kuvveti üzerinde belirli bir etkiye sahip olduğunu söylenebilmektedir. Çizelge 8.8 incelendiğinde kesme kuvveti üzerinde faktör A, B, C, D ve E’nin yüzde katkıları sırasıyla %33.4, %43.0, %6.5, %0.5 ve %3.5 olarak bulunmuştur. Bu veriler ışığında kesme kuvvetini etkileyen en önemli faktörün debi (B) olduğu görülmektedir. F_r için hata yüzdesi %13.1 bulunmuştur. İstatistiksel analiz sonuçları incelendiğinde deneysel çalışmadan elde edilen sonuçları doğrular nitelikte olduğu görülmektedir.

Çizelge 8.8. Anova tablosu.

| Faktörler | Serbestlik derecesi | Kareler toplamı | Kareler ortalaması | F değeri | P değeri | Katkı oranı (%) |
|-----------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|-----------------|
| A | 3 | 1854.75 | 618.25 | 5.10 | 0.043 | 33.4 |
| B | 3 | 2387.25 | 795.75 | 6.56 | 0.025 | 43.0 |
| C | 1 | 361.00 | 361.00 | 2.98 | 0.135 | 6.5 |
| D | 1 | 25.00 | 25.00 | 0.21 | 0.666 | 0.5 |
| E | 1 | 196.00 | 196.00 | 1.62 | 0.251 | 3.5 |
| Hata | 6 | 727.75 | 121.29 | - | - | 13.1 |
| Toplam | 15 | 5551.75 | - | - | - | 100 |

8.1.2.3. Regresyon Analizi

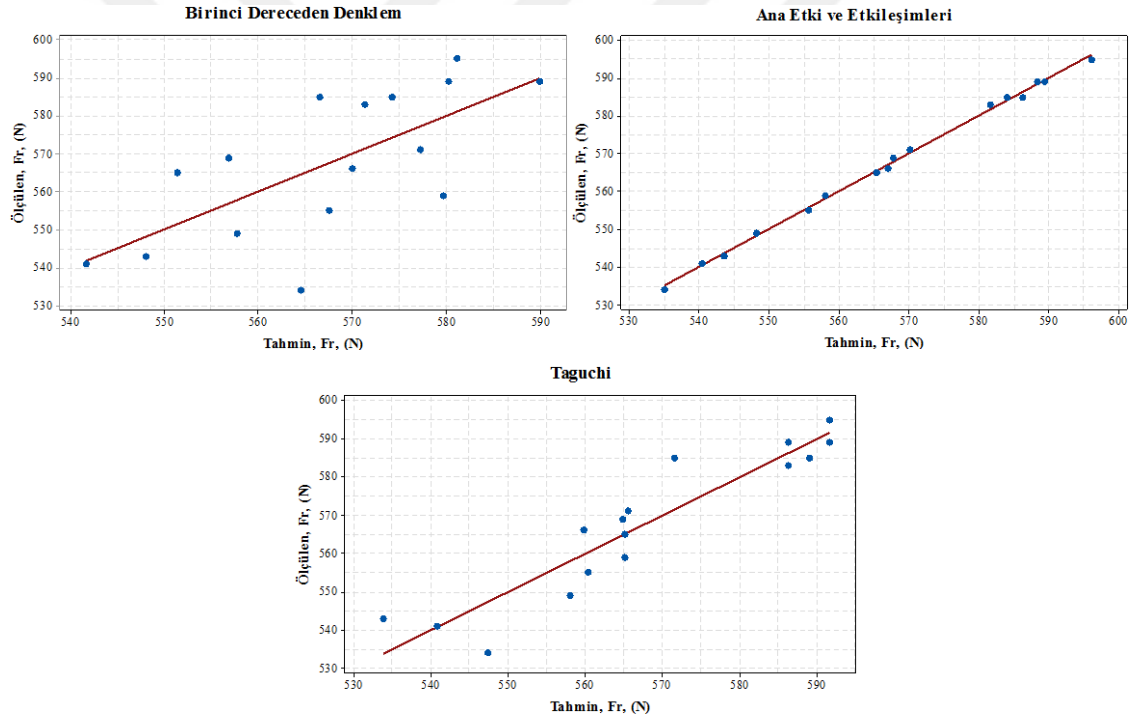
Kesme kuvveti denklemleri, kontrol seviyelerine bağlı olarak yağ tipi, debi, frezeleme yönü, püskürtme mesafesi ve nozul tipi parametreleri esas alınarak oluşturulmuştur. Sadece kontrol faktörlerinin ana etkileriyle oluşturulan birinci dereceden denklem;

$$F_r = 583.9 + 3.15YT - 0.39D - 9.5FY + 0.1PM + 7NT \quad (8.9)$$

olarak elde edilmiştir. Elde edilen birinci dereceden denklemin belirleme katsayısı $R^2=0.483$ olarak hesaplanmıştır. %95 güvenilirlik düzeyinde birinci derece denklemlerle elde edilen tahminsel kesme kuvvetleri ile deneysel çalışmalarla elde edilen kesme kuvveti değerleri arasındaki farklar fazla olacağından faktör etkileşimlerini de kapsayan denklem

$$F_r = 544.6 + 73.75YT - 1.03D + 10.6FY - 2.24PM + 39.1NT - 7.12YT^2 - 0.0076D^2 - 0.140YTxD - 12.50YTxFY + 0.480DxFY + 0.03520DxPM - 0.2DxNT - 17.25FYxNT \quad (8.10)$$

olarak elde edilmiştir. Bu denklemin belirleme katsayısı $R^2=0.998$ olarak bulunmuştur. Şekil 8.7’de deneysel sonuçlar ile tahmin modelleri ile elde edilen tahminlerin karşılaştırılması görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi gerçek değerlere en yakın tahmin denklemi ana etki ve etkileşimlerine ait denklemdir.



Şekil 8.7. Ölçülen değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması.

8.1.2.4. Doğrulama Deneyleri

En düşük kesme kuvvetine ait parametre grubu $A_1B_4C_2D_1E_1$ şeklinde elde edilmiştir. Optimum kesme kuvveti tahmininde Eşitlik (8.11) kullanılmıştır.

$$Fr_{opt} = (A_1 - T_{Fr}) + (B_4 - T_{Fr}) + (C_2 - T_{Fr}) + (D_1 - T_{Fr}) + (E_1 - T_{Fr}) + T_{Fr} \quad (8.11)$$

Burada, $(A_1, B_4, C_2, D_1, E_1)$ kesme kuvvetinin optimum seviyedeki ortalama değerlerini

vermektedir (Çizelge 8.9). T_{Fr} değeri ise deneysel çalışma sonucu elde edilen ortalama kesme kuvveti değerini temsil etmektedir (Çizelge 8.6). Hesaplamalar sonucunda Fr_{opt} değeri 524.3 N olarak bulunmuştur.

Çizelge 8.9. Kesme kuvveti için ortalama yanıt tablosu.

| Seviyeler | Kontrol faktörleri | | | | |
|-----------|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | A | B | C | D | E |
| Seviye 1 | 554.5 | 578.5 | 572.1 | 566.1 | 563.9 |
| Seviye 2 | 571.0 | 573.3 | 562.6 | 568.6 | 570.9 |
| Seviye 3 | 583.0 | 571.0 | - | - | - |
| Seviye 4 | 561.0 | 546.8 | - | - | - |
| Delta | 28.5 | 31.8 | 9.5 | 2.5 | 7.0 |

Optimizasyonun yeterince doğru olup olmadığını denetlemek için Eşitlik (8.5) ve Eşitlik (8.6) kullanılarak tahmini güven aralığı hesaplanmıştır. Elde edilen değerler yerine konulduğunda kesme kuvveti deneyleri için güven aralığı $CI_{Fr} = \pm 28.58$ bulunmuştur. %95 güven aralığında tahmini takım ömrü değeri;

$$[Fr_{opt} - CI_{Fr}] < Fr_t < [Fr_{opt} + CI_{Fr}] \quad (8.12)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Değerler yerine konulursa;

$$[524.3 - 28.58] < 526 < [524.3 + 28.58] = 459.72 < 526 < 552.88 \text{ şeklinde olur.}$$

Deneysel olarak elde edilen kesme kuvveti değeri güven aralığı sınırları içerisinde çıkmıştır. Böylece, kesme kuvveti için sistem optimizasyonu 0.05 anlamlılık düzeyinde elde edilmiştir.

Kontrol faktörlerinin doğrulama deneyi optimum seviye ve rastgele seçilen seviyelerle Taguchi metodu ve regresyon denklemleri için yapılmıştır. Çizelge 8.10'da deney sonuçları ile regresyon denklemleri ve Taguchi metodu aracılığıyla elde edilen tahmin değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Doğrulama deney sonuçları incelendiğinde elde edilen sonuçların yeterli olduğu ve Taguchi optimizasyonunun başarılı olduğu söylenebilir.

Çizelge 8.10. Optimum sonuçlar ve doğrulama deneyleri.

| Seviye | Birinci Dereceden Denklemler | | | Ana Etki ve Etkileşimlerine Ait Denklemler | | | Taguchi Denklemi | | |
|--|------------------------------|--------|----------|--|--------|----------|------------------|--------|----------|
| | Deney | Tahmin | Hata (%) | Deney | Tahmin | Hata (%) | Deney | Tahmin | Hata (%) |
| A ₁ B ₄ C ₂ D ₁ E ₁ | 526 | 532 | 1.14 | 526 | 525 | 0.19 | 526 | 519 | 1.33 |
| A ₂ B ₁ C ₁ D ₂ E ₂ | 589 | 590 | 0.16 | 589 | 589 | 0.00 | 589 | 592 | 0.51 |
| A ₄ B ₃ C ₁ D ₁ E ₂ | 585 | 574 | 1.88 | 585 | 584 | 0.17 | 585 | 572 | 2.22 |

8.1.3. Yüzey Pürüzlülüğü

Yüzey pürüzlülüğü deneylerinin yapılması esnasında kontrol faktörleri olarak yağ tipi, debi, frezeleme yönü, püskürtme mesafesi ve nozul tipi seçilmiştir. Çalışmanın amacı en küçük yüzey pürüzlülüğü değerini elde etmek olduğu için S/N oranlarının hesaplanmasında “en küçük en iyi” değerini veren Eşitlik (8.8) kullanılmıştır. Kontrol faktörlerinin seviyeleri, deneyler sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri ve S/N oranları Çizelge 8.11’de sunulmuştur. Deneyler sonucunda Ra_{ort} 0.228 µm olarak elde edilirken S/N oranlarının ortalama değeri 12.67 dB olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 8.11. Deney sonuçları ve S/N oranları.

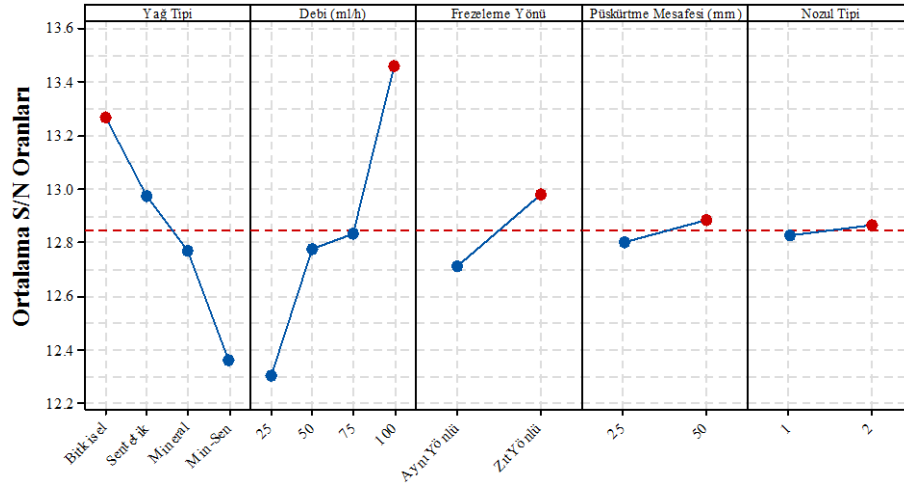
| Dn. No. | Kontrol faktörleri | | | | | Yüzey Pürüzlülüğü (µm) | S/N oranı (dB) |
|---------|--------------------|---------------|-----------------------|---------------------------|-------------------|------------------------|----------------|
| | A Yağ Tipi (YT) | B Debi (ml/s) | C Frezeleme Yönü (FY) | D Püskürtme Mesafesi (mm) | E Nozul Tipi (NT) | | |
| 1 | Bitkisel | 25 | Aynı yönlü | 25 | 1 | 0.240 | 11.70 |
| 2 | Bitkisel | 50 | Aynı yönlü | 25 | 1 | 0.220 | 13.15 |
| 3 | Bitkisel | 75 | Zıt yönlü | 50 | 2 | 0.210 | 13.35 |
| 4 | Bitkisel | 100 | Zıt yönlü | 50 | 2 | 0.200 | 13.98 |
| 5 | Sentetik | 25 | Aynı yönlü | 50 | 2 | 0.250 | 11.87 |
| 6 | Sentetik | 50 | Aynı yönlü | 50 | 2 | 0.220 | 12.40 |
| 7 | Sentetik | 75 | Zıt yönlü | 25 | 1 | 0.220 | 13.15 |
| 8 | Sentetik | 100 | Zıt yönlü | 25 | 1 | 0.210 | 13.98 |
| 9 | Mineral | 25 | Zıt yönlü | 25 | 2 | 0.240 | 12.40 |
| 10 | Mineral | 50 | Zıt yönlü | 25 | 2 | 0.230 | 12.40 |
| 11 | Mineral | 75 | Aynı yönlü | 50 | 1 | 0.230 | 12.40 |
| 12 | Mineral | 100 | Aynı yönlü | 50 | 1 | 0.220 | 12.40 |
| 13 | Mineral-Sentetik | 25 | Zıt yönlü | 50 | 1 | 0.240 | 12.40 |
| 14 | Mineral-Sentetik | 50 | Zıt yönlü | 50 | 1 | 0.250 | 12.04 |
| 15 | Mineral-Sentetik | 75 | Aynı yönlü | 25 | 2 | 0.255 | 11.87 |
| 16 | Mineral-Sentetik | 100 | Aynı yönlü | 25 | 2 | 0.220 | 13.15 |

Çizelge 8.12’de yüzey pürüzlülüğü için S/N tablosu verilmiştir ve optimum yüzey pürüzlülüğü değerleri için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri görülmektedir.

Çizelge 8.12. S/N yanıt tablosu.

| Seviyeler | Kontrol faktörleri | | | | |
|-----------|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | A | B | C | D | E |
| Seviye 1 | 13.27 | 12.31 | 12.71 | 12.80 | 12.83 |
| Seviye 2 | 12.97 | 12.78 | 12.98 | 12.89 | 12.86 |
| Seviye 3 | 12.77 | 12.84 | - | - | - |
| Seviye 4 | 12.36 | 13.46 | - | - | - |
| Delta | 0.91 | 1.15 | 0.27 | 0.08 | 0.04 |

En iyi yüzey pürüzlülük değerini veren faktörlere ait seviyeler ve S/N oranları faktör A için (Seviye 1, S/N= 13.27 dB), faktör B için (Seviye 4, S/N=13.46 dB), faktör C için (Seviye 2, S/N=12.98 dB), faktör D için (Seviye 2, S/N=12.89 dB) ve faktör E için (Seviye 2, S/N=12.86 dB) olarak belirlenmiştir (Çizelge 8.12). Ayrıca Şekil 8.8’de yüzey pürüzlülüğü değerleri için kontrol faktörleri ve faktörlere ait seviye değerleri gösterilmiştir.

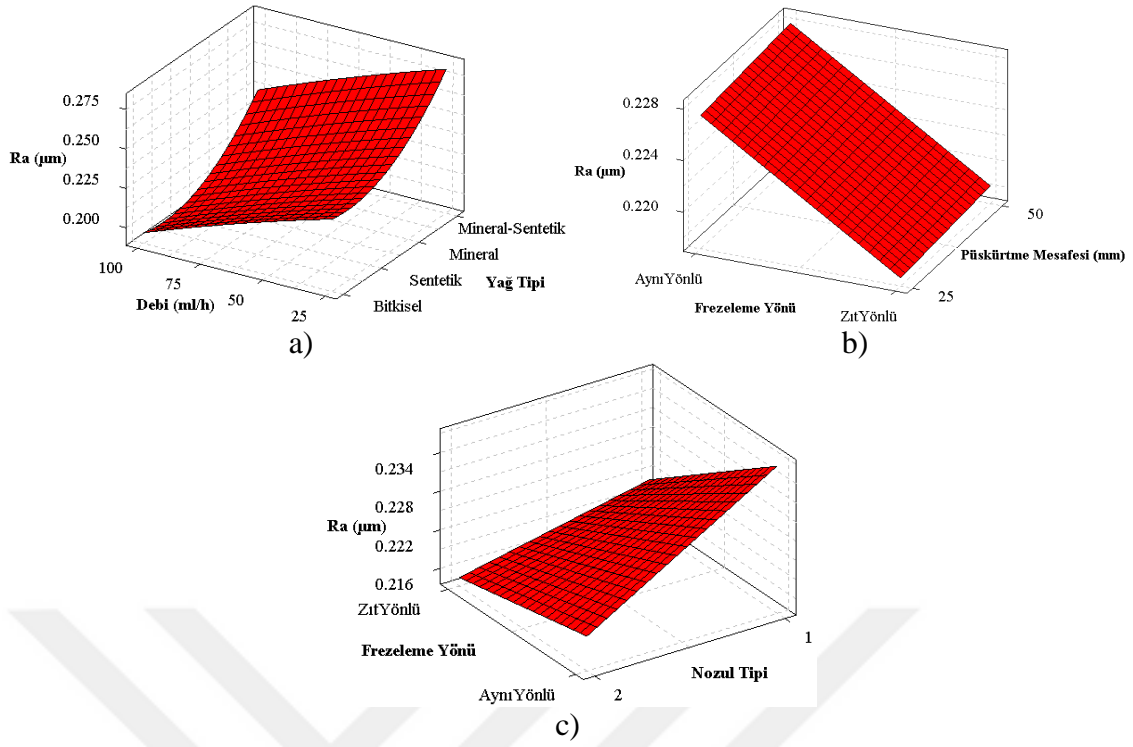


Şekil 8.8. S/N oranları ana etki grafiği.

Şekil 8.8 incelendiğinde, en düşük yüzey pürüzlülük değerini veren MMY parametrelerinin; bitkisel yağ (A₁), 100 ml/s debi (B₄), zıt yönlü frezeleme işlemi (C₂), 50 mm püskürtme mesafesi (D₂) ve 2 numaralı nozul tipi (E₂) olduğu görülmektedir.

8.1.3.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Waspaloy süper alaşımının sabit kesici takım, sabit kesme hızı, sabit ilerleme ve farklı MMY parametreleri altında frezelenmesi sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü ile diğer ana faktör etkileşimlerinin üç boyutlu yüzey grafikleri Şekil 8.9’da verilmiştir.



Şekil 8.9. Giriş parametrelerine bağlı olarak yüzey değişimi, a) Debi ve yağ tipi b) Frezeleme yönü ve püskürtme mesafesi c) Frezeleme yönü ve nozul tipi.

Şekil 8.9a'da yağ tipi ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki incelendiğinde, en düşük yüzey pürüzlülük değerinin bitkisel esaslı kesme yağının kullanıldığı durumlarda elde edildiği görülmektedir. Bu durum bitkisel esaslı kesme yağının katkı maddelerinin gösterdiği etki ve emülsiyon haldeki viskozitesinden kaynaklanan bir durumdur [196], [197]. Viskozitenin artması kesme yağının iyi bir şekilde pulverize olmasını engelleyerek kesme yağının takım-talaş ara yüzeyine girememesine ve yağlamayı tam olarak yapamamasına neden olduğundan [198] yüzey pürüzlülük değerinin artması kaçınılmaz olmaktadır. Bitkisel esaslı kesme sıvısı ile yapılan deneylerden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri sentetik, mineral ve mineral-sentetik esaslı kesme sıvıları ile yapılan deneyler ile karşılaştırıldığında sırasıyla %3.5, %5.75 ve %10.94 oranlarında daha iyi sonuçlar vermiştir. Şekil 8.9a'da yer alan debi ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki incelendiğinde debi miktarının artması ile yüzey pürüzlülük değerinde düşüş meydana geldiği görülmüştür. Bu durum kesme bölgesine gönderilen yağ miktarının artmasından ötürü takım-talaş ara yüzeyinde sürtünmenin azalması ve böylece yüzey pürüzlülüğünün de azalmasıyla açıklanabilir [186]. 25 ml/s debi referans alınarak debi artış oranları incelendiğinde, 50 ml/s debi %5.2, 75 ml/s debi %5.7, 100 ml/s debi ise %12.38 oranında iyileşme sağlamıştır. Şekil 8.9b incelendiğinde, zıt yönlü frezeleme aynı yönlü frezelemeye göre %3.02 oranında daha iyi sonuç vermiştir. Püskürtme mesafesinin

gösterildiği bölüm incelendiğinde ise 50 mm püskürtme mesafesinin daha geniş bir açıdan püskürtme sağlaması ve böylece aeresolün kesme bölgesini daha iyi kavramasından dolayı daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Ancak bu iyileşme %0.9'luk bir oranda olmuştur. Nozul tipine ait grafik incelendiğinde, 2 nolu nozul tipi %0.3 oranında daha iyi sonuç vermiştir

8.1.3.2. ANOVA

Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları Çizelge 8.13'te verilmiştir. Analiz %95 güven seviyesi dikkate alınarak yapılmıştır. P değerinin 0.05'den küçük olması faktörün çıktı üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu kabul edilmesi anlamına geldiğinden yağ tipi ve debi faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirli bir etkiye sahip olduğunu söylenebilir. F değeri aracılığıyla faktörlerin etki düzeyleri belirlenmiştir. Çizelge 8.13 incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde faktör A, B, C, D ve E'nin yüzde katkıları sırasıyla %30.7, %46.7, %4.9, %0.4 ve %0.1 olarak bulunmuştur. Bu veriler ışığında mevcut girdi değerleri içerisinde yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktörün debi (B) olduğu görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü için hata yüzdesi %17.2 bulunmuştur. İstatistiksel analiz sonuçları incelendiğinde deneysel çalışmadan elde edilen sonuçları doğrular nitelikte olduğu görülmektedir.

Çizelge 8.13. Anova tablosu.

| Faktörler | Serbestlik derecesi | Kareler toplamı | Kareler ortalaması | F değeri | P değeri | Katkı oranı (%) |
|-----------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|-----------------|
| A | 3 | 0.001192 | 0.000397 | 3.55 | 0.087 | 30.7 |
| B | 3 | 0.001817 | 0.000606 | 5.41 | 0.038 | 46.7 |
| C | 1 | 0.000189 | 0.000189 | 1.69 | 0.242 | 4.9 |
| D | 1 | 0.000014 | 0.000014 | 0.13 | 0.735 | 0.4 |
| E | 1 | 0.000002 | 0.000002 | 0.01 | 0.910 | 0.1 |
| Hata | 6 | 0.000672 | 0.000112 | - | - | 17.2 |
| Toplam | 15 | 0.003886 | - | - | - | 100 |

8.1.3.3. Regresyon Analizi

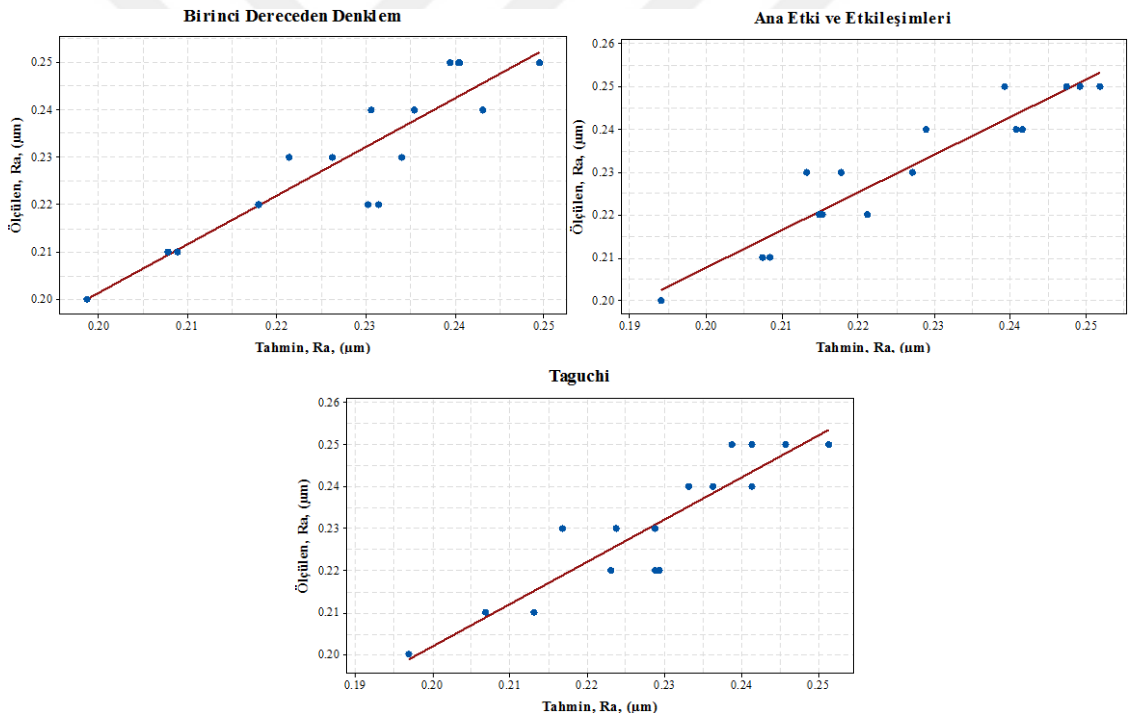
Yüzey pürüzlülüğü denklemleri, kontrol seviyelerine bağlı olarak yağ tipi, debi, frezeleme yönü, püskürtme mesafesi, nozul tipi parametreleri esas alınarak oluşturulmuştur. Sadece kontrol faktörlerinin ana etkileriyle oluşturulan birinci dereceden denklem;

$$Ra = 0.25 + 0.0076YT - 0.00036D - 0.0069FY - 0.00075PM - 0.00063NT \quad (8.13)$$

olarak elde edilmiştir. Elde edilen birinci dereceden denklemin belirleme katsayısı $R^2=0.781$ olarak hesaplanmıştır. %95 güvenilirlik düzeyinde birinci derece denklemlerle elde edilen tahminsel yüzey pürüzlülüğü ile deneysel çalışmalarla elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri arasındaki farklar fazla olacağından faktör etkileşimlerini de kapsayan denklem;

$$Ra = 0.28 + 0.007YT - 0.0014D - 0.013FY - 0.009PM + 0.0032NT + 0.008YT^2 - 0.000002D^2 + 0.00007YTxD - 0.0131YTxFY + 0.00075DxFY - 0.00001DxPM - 0.0005DxNT - 0.003FYxNT \quad (8.14)$$

olarak elde edilmiştir. Bu denklemin belirleme katsayısı $R^2=0.989$ olarak bulunmuştur. Şekil 8.10'da deneysel sonuçlar ile tahmin modelleri ile elde edilen tahminlerin karşılaştırılması görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi gerçek değerlere en yakın tahmin denklemi ana etki ve etkileşimlerine ait denklemdir.



Şekil 8.10. Ölçülen değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması.

8.1.3.4. Doğrulama Deneyleri

En düşük yüzey pürüzlülüğüne ait parametre grubu $A_1B_4C_2D_2E_2$ şeklinde elde edilmiştir. Optimum yüzey pürüzlülüğü tahmininde Eşitlik (8.15) kullanılmıştır.

$$Ra_{opt} = (A_1 - T_{Ra}) + (B_4 - T_{Ra}) + (C_2 - T_{T\bar{6}}) + (D_2 - T_{Ra}) + (E_2 - T_{Ra}) + T_{Ra} \quad (8.15)$$

Burada, $(A_1, B_4, C_2, D_2, E_2)$ yüzey pürüzlülüğünün optimum seviyedeki ortalama

değerlerini vermektedir (Çizelge 8.14). T_{Ra} değeri ise deneysel çalışma sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerini temsil etmektedir (Çizelge 8.11). Hesaplamalar sonucunda Ra_{opt} değeri 0.1981 μm olarak bulunmuştur.

Çizelge 8.14. Yüzey pürüzlülüğü için ortalama yanıt tablosu.

| Seviyeler | Kontrol faktörleri | | | | |
|-----------|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | A | B | C | D | E |
| Seviye 1 | 0.2175 | 0.2425 | 0.2319 | 0.2294 | 0.2287 |
| Seviye 2 | 0.2250 | 0.2300 | 0.2250 | 0.2275 | 0.2281 |
| Seviye 3 | 0.2300 | 0.2288 | - | - | - |
| Seviye 4 | 0.2412 | 0.2125 | - | - | - |
| Delta | 0.0238 | 0.0300 | 0.0069 | 0.0019 | 0.0006 |

Optimizasyonun yeterince doğru olup olmadığını denetlemek için tahmini güven aralığı hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Eşitlik (8.5) ve Eşitlik (8.6)'da yerine konularak yüzey pürüzlülüğü deneyleri için güven aralığı $CI_{Ra}=\pm 0.027$ bulunmuştur. %95 güven aralığında tahmini yüzey pürüzlülüğü değeri;

$$[Ra_{opt} - CI_{Ra}] < Ra_t < [Ra_{opt} + CI_{Ra}] \quad (8.16)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Değerler yerine konulursa;

$$[0.1981 - 0.027] < 0.20 < [0.1981 + 0.027] = 0.1711 < 0.20 < 0.2251 \text{ şeklinde olur.}$$

Deneysel olarak elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri güven aralığı sınırları içerisinde çıkmıştır. Böylece, yüzey pürüzlülüğü için sistem optimizasyonu Taguchi metodu kullanılarak 0.05 anlamlılık düzeyinde elde edilmiştir.

Kontrol faktörlerinin doğrulama deneyi optimum seviye ve rastgele seçilen seviyelerle Taguchi metodu ve regresyon denklemleri için yapılmıştır. Çizelge 8.15'de deney sonuçları ile regresyon denklemleri ve Taguchi metodu aracılığıyla elde edilen tahmin değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Doğrulama deney sonuçları incelendiğinde elde edilen sonuçların yeterli olduğu ve Taguchi optimizasyonunun başarılı olduğu söylenebilir.

Çizelge 8.15. Doğrulama deneyi sonuçları.

| Seviye | Birinci Dereceden Denklem | | | Ana Etki ve Etkileşimlerine Ait Denklem | | | Taguchi Denklemi | | |
|--|---------------------------|--------|----------|---|--------|----------|------------------|--------|----------|
| | Deney | Tahmin | Hata (%) | Deney | Tahmin | Hata (%) | Deney | Tahmin | Hata (%) |
| A ₁ B ₄ C ₂ D ₂ E ₂ | 0.200 | 0.1931 | 3.45 | 0.200 | 0.2031 | 1.55 | 0.200 | 0.1954 | 2.30 |
| A ₂ B ₁ C ₁ D ₂ E ₂ | 0.250 | 0.241 | 3.60 | 0.250 | 0.2474 | 1.04 | 0.250 | 0.2413 | 3.48 |
| A ₄ B ₃ C ₁ D ₁ E ₂ | 0.255 | 0.239 | 6.27 | 0.255 | 0.2518 | 1.25 | 0.255 | 0.2456 | 3.68 |

8.1.4. Genel Değerlendirme

Çalışmanın bu bölümündeki amacın MMY sistemine ait parametrelerin optimizasyonu olduğunu ve bu deneyler sonucu bulunan optimum parametre grubunun bundan sonraki deneyler için kullanılacağı daha önce açıklanmıştır.

Deney sonuçları analiz edildiğinde, takım ömrü ve kesme kuvveti için optimum parametre grubunun; bitkisel yağ (A₁), 100 ml/s debi (B₄), zıt yönlü frezeleme (C₂), 25 mm püskürtme mesafesi (D₁) ve 1 nolu nozul tipi (E₁) olduğu görülürken yüzey pürüzlülüğü için optimum parametre grubunun; bitkisel yağ (A₁), 100 ml/s debi (B₄), zıt yönlü frezeleme (C₂), 50 mm püskürtme mesafesi (D₂) ve 2 nolu nozul tipi (E₂) olduğu görülmüştür. Tercih edilen debiler içerisinde en olumlu etkiyi 100 ml/s debi oranı vermiştir. Frezeleme yönü açısından zıt yönlü frezeleme aynı yönlü frezelemeye göre daha iyi sonuç vermiştir. Püskürtme mesafesi açısından 25 mm'lik püskürtme mesafesi daha iyi sonuç vermiştir. Nozul tipi açısından 1 nolu nozul daha iyi sonuçlar vermiştir. Faktörlerin etki sıralamasına bakıldığında takım ömrü, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü açısından en etkili faktörün debi olduğu bunu sırasıyla yağ tipi, frezeleme yönü, püskürtme mesafesi ve nozul tipinin takip ettiğini söylemek mümkündür.

8.2. KARBÜR KESİCİ UÇLARIN OPTİMİZASYONU

Bu bölümde, karbür kesiciler ile Waspaloy süper alaşımının frezelenmesinde işleme parametrelerinin takım ömrü, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, Taguchi L₂₇ ortogonal dizini aracılığıyla 27 adet deney yapılmıştır. Giriş parametresi olarak; üç kaplama türünde karbür kesici takım (kaplamasız, PVD, CVD), üç kesme hızı (30 m/dak, 45 m/dak, 60 m/dak), üç ilerleme (0.1 mm/dev, 0.15 mm/dev, 0.2 mm/dev) ve üç soğutma-yağlama şartı (kuru, ıslak, MMY) kullanılmıştır. Ayrıca, bu deneylerin yürütülmesi esnasında kesme derinliği 0.5 mm olarak sabit tutulmuştur.

8.2.1. Takım Ömrü

Takım ömrü deneyleri için kullanılan giriş parametre değerleri kesici takım firmasının önerisi, literatür araştırması ve ön deneyler sonucu belirlenmiştir. Yapılan ön deneylerde kesici takımda oluşan aşınma durumu incelenerek düzenli yanak aşınması ve çentik aşınması tespit edilmiştir. Literatürde de süper alaşımların işlenmesinde en çok karşılaşılan aşınma tiplerinin yanak aşınması ve çentik aşınması olduğuna dair çalışmalar bulunmaktadır [199]. Frezeleme deneylerinde kullanılan ISO 8688-1 standardında bu aşınma tipleri için önerilen aşınma ölçüsü 0.3 mm olduğundan aşınma sınırı için bu değer dikkate alınmıştır. Kesici takımlarda meydana gelen aşınma durumu her talaş kaldırma işlemi sonunda dijital mikroskop ile ölçülerek değerlendirme aşamasına geçilmiştir. Takım ömrü ve aşınmanın değerlendirilmesinde, dijital mikroskop görüntülerinin incelenmesi ve SEM ile çekilmiş üç boyutlu kesici takım fotoğraflarının incelenmesi olmak üzere iki farklı yöntem tercih edilmiştir.

Takım ömrü deneylerinin yapılması esnasında kontrol faktörleri olarak kesici takım kaplama tipi, kesme hızı, ilerleme ve soğutma-yağlama yöntemi seçilmiştir. Çalışmanın amacı en büyük takım ömrü değerini elde etmek olduğundan S/N oranlarının hesaplanması için “en büyük en iyi” prensibini karşılayan Eşitlik (8.1) kullanılmıştır. Kontrol faktörlerinin seviyeleri, yapılan işlenebilirlik deneyleri sonucu elde edilen takım ömürleri ve S/N oranları Çizelge 8.16’da sunulmuştur. Yapılan frezeleme deneyleri sonucunda ortalama takım ömrü değeri 20.36 dakika olarak elde edilirken S/N oranlarının ortalama değeri 23.88 dB olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 8.16. Deney sonuçları ve S/N oranları.

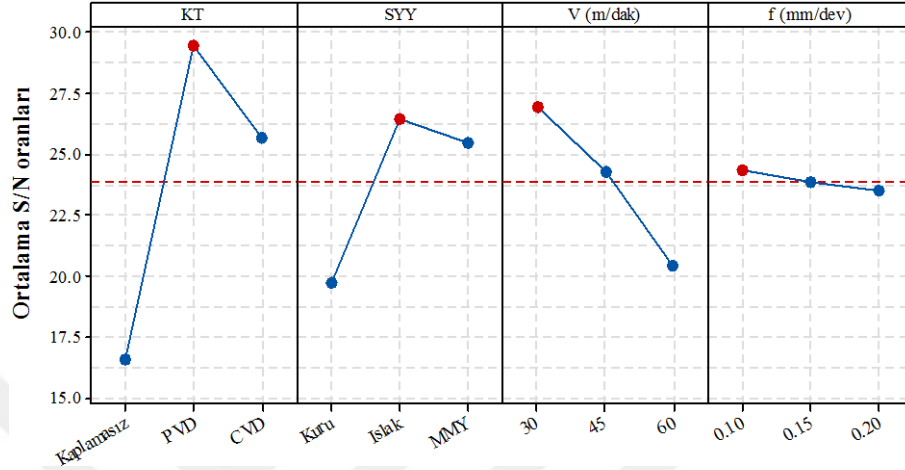
| Den. No. | Kontrol faktörleri | | | | Takım ömrü, (dak) | S/N oranı (dB) |
|----------|---------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------|----------------|
| | A Kesici takım (KT) | B Soğutma/Yağlama Yöntemi (SYY) | C Kesme hızı (V) (m/dak) | D İlerleme hızı (f) (mm/dev) | | |
| 1 | Kaplamasız | Kuru | 30 | 0.10 | 7.9 | 17.95 |
| 2 | Kaplamasız | Kuru | 45 | 0.15 | 5.24 | 14.39 |
| 3 | Kaplamasız | Kuru | 60 | 0.20 | 1.96 | 5.85 |
| 4 | Kaplamasız | Islak | 30 | 0.15 | 13.12 | 22.36 |
| 5 | Kaplamasız | Islak | 45 | 0.20 | 9.1 | 19.18 |
| 6 | Kaplamasız | Islak | 60 | 0.10 | 5.9 | 15.42 |
| 7 | Kaplamasız | MMY | 30 | 0.20 | 11.8 | 21.44 |
| 8 | Kaplamasız | MMY | 45 | 0.10 | 7.9 | 17.95 |
| 9 | Kaplamasız | MMY | 60 | 0.15 | 5.2 | 14.32 |
| 10 | PVD | Kuru | 30 | 0.15 | 23.5 | 27.42 |
| 11 | PVD | Kuru | 45 | 0.20 | 16.9 | 24.56 |
| 12 | PVD | Kuru | 60 | 0.10 | 13.7 | 22.73 |
| 13 | PVD | Islak | 30 | 0.20 | 54.8 | 34.78 |
| 14 | PVD | Islak | 45 | 0.10 | 42.4 | 32.55 |
| 15 | PVD | Islak | 60 | 0.15 | 28.2 | 29.00 |
| 16 | PVD | MMY | 30 | 0.10 | 50.7 | 34.10 |
| 17 | PVD | MMY | 45 | 0.15 | 38.4 | 31.69 |
| 18 | PVD | MMY | 60 | 0.20 | 25.5 | 28.13 |
| 19 | CVD | Kuru | 30 | 0.20 | 16.6 | 24.40 |
| 20 | CVD | Kuru | 45 | 0.10 | 13.1 | 22.35 |
| 21 | CVD | Kuru | 60 | 0.15 | 7.8 | 17.84 |
| 22 | CVD | Islak | 30 | 0.10 | 35.1 | 30.91 |
| 23 | CVD | Islak | 45 | 0.15 | 26.1 | 28.33 |
| 24 | CVD | Islak | 60 | 0.20 | 19 | 25.58 |
| 25 | CVD | MMY | 30 | 0.15 | 28.8 | 29.19 |
| 26 | CVD | MMY | 45 | 0.20 | 23.4 | 27.38 |
| 27 | CVD | MMY | 60 | 0.10 | 17.6 | 24.91 |

Yürütülen deneyler sonucu elde edilen sonuçların S/N oranları Taguchi metodu kullanılarak optimize edilmiştir. Çizelge 8.17’de takım ömrü için S/N tablosu verilmiştir ve optimum takım ömrü değerleri için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri görülmektedir.

Çizelge 8.17. S/N yanıt tablosu.

| Seviyeler | Kontrol faktörleri | | | |
|-----------|--------------------|--------------|--------------|--------------|
| | A | B | C | D |
| Seviye 1 | 16.54 | 19.72 | 26.95 | 24.32 |
| Seviye 2 | 29.44 | 26.46 | 24.26 | 23.84 |
| Seviye 3 | 25.65 | 25.46 | 20.42 | 23.48 |
| Delta | 12.90 | 6.73 | 6.53 | 0.84 |

En yüksek takım ömrünü veren faktörlere ait seviyeler ve S/N oranları; faktör A (Seviye 2, S/N= 29.44 dB), faktör B (Seviye 2, S/N=26.46 dB), faktör C (Seviye 1, S/N=26.95 dB) ve faktör D (Seviye 1, S/N=24.32 dB) olarak belirlenmiştir (Çizelge 8.17). Ayrıca Şekil 8.11’de takım ömrü değerleri için kontrol faktörlerinin S/N oranları ana etki grafiği verilmiştir.

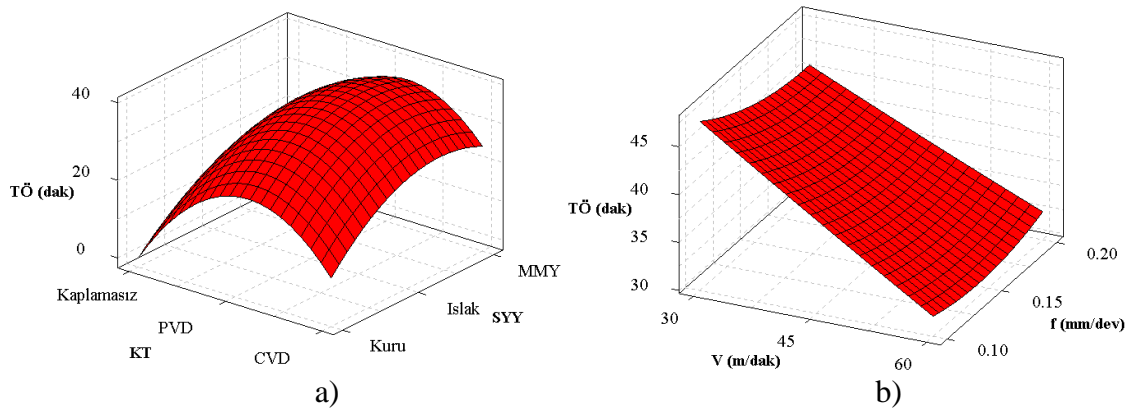


Şekil 8.11. S/N oranları ana etki grafiği.

Şekil 8.11 incelendiğinde, en yüksek takım ömrünü veren optimum kesme parametrelerinin; PVD (TiAlN) kaplamalı karbür kesici uç (A₂), ıslak işleme (B₂), 30 m/dak kesme hızı (C₁) ve 0.1 mm/dev ilerleme (D₁) olduğu görülmektedir.

8.2.1.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Waspaloy süper alaşımının farklı kesme parametreleri altında frezelenmesi işleminde takım ömrü ile diğer ana faktör etkileşimlerinin üç boyutlu yüzey grafikleri Şekil 8.12’de verilmiştir.



Şekil 8.12. Giriş parametrelerine bağlı olarak takım ömrünün değişimi, a) Kesici takım tipi ve soğutma-yaglama yöntemi b) Kesme hızı ve ilerleme.

Şekil 8.12a'daki takım ömrü ile kesici takım kaplama tipi arasındaki ilişki incelendiğinde, en yüksek takım ömrünün PVD (TiAlN) kaplamalı karbür kesici uçlarda olduğu görülmektedir. Waspaloy gibi işlenebilirliği zor malzemelerin içeriğinde bulunan Ni, Co, Cr gibi elementler bu malzemenin işlenmeye karşı yüksek dayanım göstermesine neden olmaktadır. Bunun yanında, nikel esaslı süper alaşımların içeriğinde bulunan M_6C , $M_{23}C_6$ gibi sert aşındırıcı karbürler abrasif aşınmaya sebep olduğundan takım ömrünü düşürmektedir [12].

Kaplamasız kesici uçla kıyaslandığında kaplamalı kesici uçların nispeten daha iyi takım ömrü verdiği, bunun sebebinin literatürde yer alan, uygulanan kaplama malzemeleri karbürlerin var olan özelliklerini geliştirerek kesici takıma aşınma direnci kazandırır ilkesi ile örtüşmektedir. Ayrıca, TiAlN kaplamanın sürtünme katsayısının düşük olması, sertlik ve aşınmaya karşı olan direncinin yüksek olması bu durumun bir başka nedeninin olabileceğini söylemek mümkündür [200], [201]. Kaplamasız karbür kesici takımlarla kesme bölgesinde verimli bir şekilde kayma sağlanamamasından dolayı yan yüzey ve talaş yüzeyi boyunca hareket eden talaşların hareketleri kısıtlı kalmaktadır. Bundan ötürü de yan yüzey aşınması kaplamalı takımlara nazaran daha yüksek olmaktadır [202]. Talaş kaldırma esnasında iş parçasının yüksek dayanımı ve aşındırma etkisi kesici takımın bünyesinde yüksek ısı oluşumuna sebep olmaktadır. Kaplamasız takımlar bu ısıya doğrudan maruz kaldıkları için kaplamalı takımlara göre daha çabuk aşınmaktadır [203], [204]. Bu durum yapılan benzer çalışmalarla paralellik göstermektedir [205], [206]. PVD (TiAlN) kaplamalar CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalar ile karşılaştırıldığında PVD (TiAlN) kaplamalar daha keskin bir kenar profili oluşturduğundan CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalara göre daha dayanıklı bir hal almaktadır. Bu durum günümüz işleme şartlarında PVD (TiAlN) kaplamaların daha iyi sonuç vermesinin ana nedeni olarak karşımıza çıkmaktadır [204]. Kaplamasız karbür takımlar ile yapılan deneylerden elde edilen ortalama takım ömrü değerleri PVD (TiAlN) kaplamalı karbür takımlar ve CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalı karbür takımlar ile yapılan deneyler ile karşılaştırıldığında takım ömründe iyileşme sırasıyla %331.76 ve %175.20 oranlarında olmuştur.

Şekil 8.12a'da yer alan takım ömrü ile soğutma-yağlama yönteminin arasındaki ilişkiyi gösteren bölüm incelendiğinde en yüksek takım ömrünün ıslak işlemede elde edildiği en düşük takım ömrünün de kuru işlemede elde edildiği görülmektedir. Kesme sıvısı kullanımının kesme bölgesindeki sürtünmeyi azalttığı ve ısı oluşumunu kontrol altına










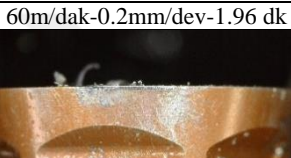


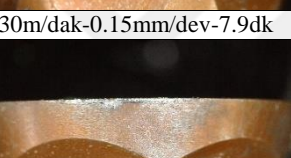
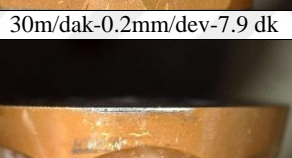
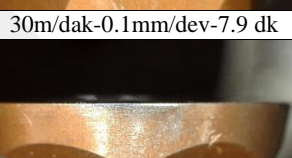
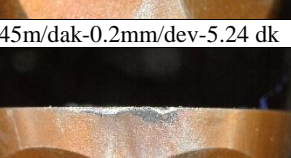
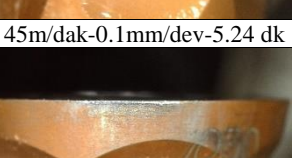
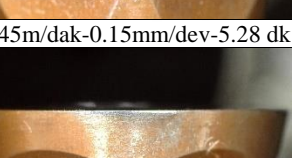
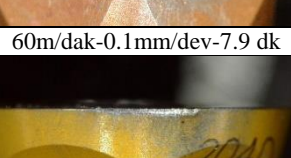
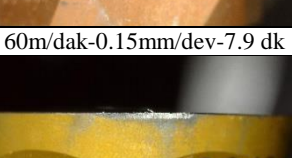
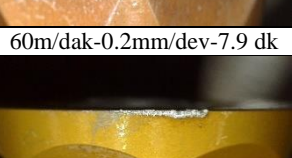
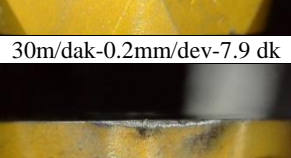
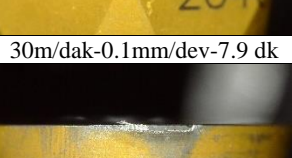
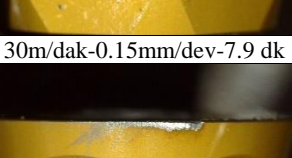
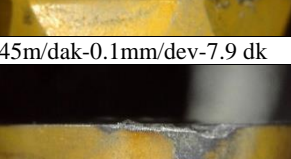
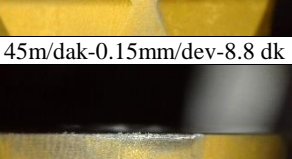

olarak takım ömrüne olumlu katkıları yaptığı bilinmektedir [22], [175], [176], [207]. Islak işleme ve MMY sisteminin kuru işlemeye göre daha iyi sonuç vermesi de kesme bölgesine gönderilen sıvı miktarının kesme esnasında oluşan ısıyı düşürmesi ve sürtünmeyi azaltarak takım ömrünü uzatmasıyla açıklanabilir [159]. Kuru işleme ile yapılan deneylerle elde edilen sonuçlar ıslak işleme ve MMY ile işleme ile karşılaştırıldığında sırasıyla %118.97 ve %96.13 oranlarında iyileşme görülmüştür.

Şekil 8.12b'de yer alan kesme hızının etkisini gösteren bölüm incelendiğinde, kesme hızındaki artış takım ömründe azalmaya neden olmuştur. Kesme hızının artması ile birlikte akan talaş hacmi ve dolayısıyla sürtünmenin artması aşınmanın da artmasını kaçınılmaz hale getirmektedir [208]. Ayrıca, kesme hızının artmasıyla takım-talaş ara yüzeyinde oluşan ısının da artması aşınmanın temel nedenlerinden birisi olmaktadır. Literatürde de kesme hızının aşınma üzerindeki en önemli parametrelerden biri olduğu görülmektedir [209]. 30 m/dak kesme hızı ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ile 45 m/dak ve 60 m/dak kesme hızı ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında takım ömründeki azalma sırasıyla %24.67 ve %48.48 oranlarında olmuştur. Şekil 12b'de kesici takım ömrünün ilerleme ile ilişkisini gösteren kısım incelendiğinde ilerlemenin takım ömrü üzerinde çok etkisinin olmadığı ancak ilerleme değerinin artması ile birlikte küçük de olsa takım ömründe bir düşüş meydana geldiği görülmektedir. Bu düşüş 0.15 mm/dev ilerleme için %7.83 oranında olurken 0.2 mm/dev ilerleme için %9.22 seviyesinde olmuştur.

Şekil 8.13'te deneyler sonucunda kesici takımların dijital mikroskopla elde edilmiş görüntüsü ve aşınma süreleri verilirken Şekil 8.14'te aynı işleme süresinde kesici uçlardaki aşınma durumunu gösteren fotoğraflar verilmiştir. 0.3 mm aşınma değerinin referans alındığı ve bu değere ulaşma sürelerinin gösterildiği Şekil 8.13 incelendiğinde, kuru işleme altında en yüksek kesme süresinin PVD (TiAlN) kaplamalı takımlarla olduğu görülürken bunu CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalı takımların ve kaplamasız takımların takip ettiği görülmektedir. Ayrıca, ıslak işleme ve MQL sistemi ile işlemede de aynı durum söz konusudur. Eşit işleme süresi sonunda soğutma/yağlama yönteminin aşınma üzerindeki etkilerinin gösterildiği Şekil 8.14 incelendiğinde, her üç kesici takım türünde de en düşük aşınma değerinin ıslak işleme altında olduğu, MQL sistemi ile işlemenin ıslak işlemeye yakın sonuçlar verdiği ve en yüksek aşınma değerinin de kuru işleme ile ortaya çıktığı görülmektedir. Her iki şekil de deney sonuçları ile paralellik göstermektedir.

| | Kaplamasız | PVD | CVD |
|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Kuru | | | |
| | 30m/dak-0.1mm/dev-7.9 dk | 30m/dak-0.15mm/dev-23.5 dk | 30m/dak-0.2mm/dev-16.6 dk |
| | | | |
| | 45m/dak-0.15mm/dev-5.24 dk | 45m/dak-0.2mm/dev-16.9 dk | 45m/dak-0.1mm/dev-13.1 dk |
| | | | |
| | 60m/dak-0.2mm/dev-1.96 dk | 60m/dak-0.1mm/dev-13.7 dk | 60m/dak-0.15mm/dev-7.8 dk |
| Islak | | | |
| | 30m/dak-0.15mm/dev-13.12dk | 30m/dak-0.2mm/dev-54.8 dk | 30m/dak-0.1mm/dev-35.1 dk |
| | | | |
| | 45m/dak-0.2mm/dev-9.1 dk | 45m/dak-0.1mm/dev-42.4 dk | 45m/dak-0.15mm/dev-26.1 dk |
| | | | |
| | 60m/dak-0.1mm/dev-5.9 dk | 60m/dak-0.15mm/dev-28.2 dk | 60m/dak-0.2mm/dev-19 dk |
| MMY | | | |
| | 30m/dak-0.2mm/dev-11.8 dk | 30m/dak-0.1mm/dev-50.7 dk | 30m/dak-0.15mm/dev-28.8 dk |
| | | | |
| | 45m/dak-0.1mm/dev-7.9 dk | 45m/dak-0.15mm/dev-38.4 dk | 45m/dak-0.2mm/dev-23.4 dk |
| | | | |
| 60m/dak-0.15mm/dev-5.2 dk | 60m/dak-0.2mm/dev-25.5 dk | 60m/dak-0.1mm/dev-17.6 dk | |

Şekil 8.13. Karbür kesici uçların son aşınma fotoğrafları ve aşınma süreleri (x50).


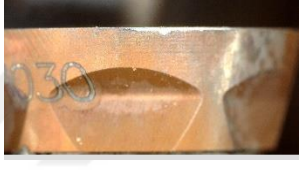

| | Kuru | Islak | MMY |
|------------|---|--|---|
| Kaplamasız |  |  |  |
| | 30m/dak-0.1mm/dev-7.9 dk | 30m/dak-0.15mm/dev-7.9 dk | 30m/dak-0.2mm/dev-7.9 dk |
| |  |  |  |
| | 45m/dak-0.15mm/dev-5.24 dk | 45m/dak-0.2mm/dev-5.24 dk | 45m/dak-0.1mm/dev-5.24 dk |
| |  |  |  |
| | 60m/dak-0.2mm/dev-1.96 dk | 60m/dak-0.1mm/dev-1.96 dk | 60m/dak-0.15mm/dev-2.62 dk |
| PVD |  |  |  |
| | 30m/dak-0.15mm/dev-7.9dk | 30m/dak-0.2mm/dev-7.9 dk | 30m/dak-0.1mm/dev-7.9 dk |
| |  |  |  |
| | 45m/dak-0.2mm/dev-5.24 dk | 45m/dak-0.1mm/dev-5.24 dk | 45m/dak-0.15mm/dev-5.28 dk |
| |  |  |  |
| | 60m/dak-0.1mm/dev-7.9 dk | 60m/dak-0.15mm/dev-7.9 dk | 60m/dak-0.2mm/dev-7.9 dk |
| CVD |  |  |  |
| | 30m/dak-0.2mm/dev-7.9 dk | 30m/dak-0.1mm/dev-7.9 dk | 30m/dak-0.15mm/dev-7.9 dk |
| |  |  |  |
| | 45m/dak-0.1mm/dev-7.9 dk | 45m/dak-0.15mm/dev-8.8 dk | 45m/dak-0.2mm/dev-7.9 dk |
| |  |  |  |
| | 60m/dak-0.15mm/dev-5.9 dk | 60m/dak-0.2mm/dev-5.9 dk | 60m/dak-0.1mm/dev-5.9 dk |

Şekil 8.14. Aynı sürede karbür kesici uçların aşınma durumları (x50).

8.2.1.2. Aşınmanın Karakterizasyonu

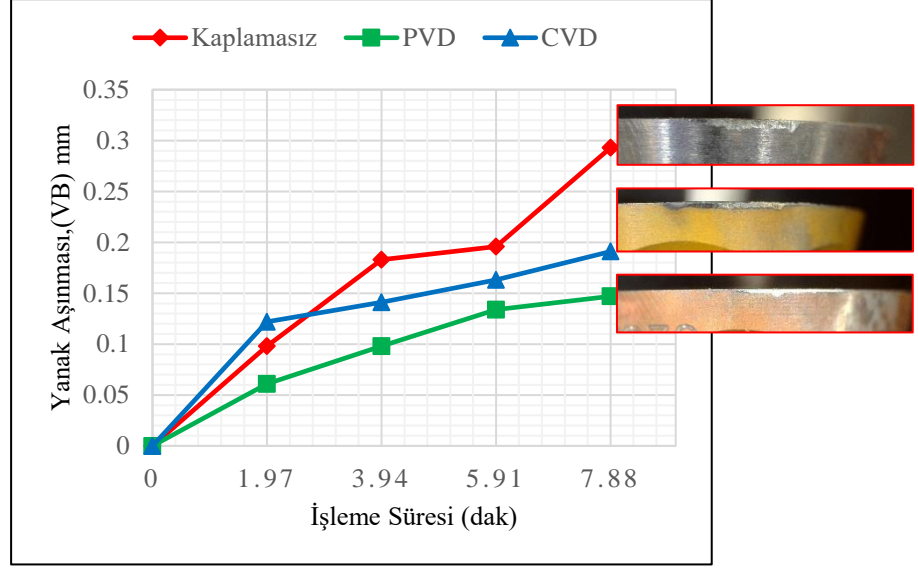
Yürütülen deneyler sırasında deney tasarımının tam faktöriyel olmaması nedeniyle faktör etkileşimlerinin bütün sonuçları görülememektedir. Bu nedenle, deneyler neticesinde ortaya çıkan optimum kesme parametrelerinin etkisi ile kesme hızı 30 m/dak ve ilerleme 0.1 mm/dev değerlerinde sabit tutularak kesici takım kaplama türü ve soğutma-yağlama yönteminin etkisini görmek amacıyla bir dizi yeni deney yürütülmüştür. Deneyler sırasında işleme süresi 7.9 dakika olarak sabit tutulmuştur. Ancak, 1.96 dakika zaman aralığı ile kesici takımdaki aşınma miktarı dijital mikroskop aracılığıyla ölçülmüş ve kaydedilmiştir.

Kaplama türünün aşınma üzerindeki etkisi; bu bölümde kaplama türünün takım aşınması üzerindeki etkisini net bir şekilde ortaya koyabilmek için kuru işleme altındaki deney sonuçları esas alınmıştır. Ayrıca diğer tüm parametreler sabit olarak tutulmuştur. Şekil 8.15'te kuru işleme şartında kaplama türünün aşınma üzerindeki etkisi verilmiştir.

| | Kaplamasız | PVD | CVD |
|------|---|--|---|
| Kuru |  |  |  |
| | 0.293 mm | 0.147 mm | 0.196 mm |

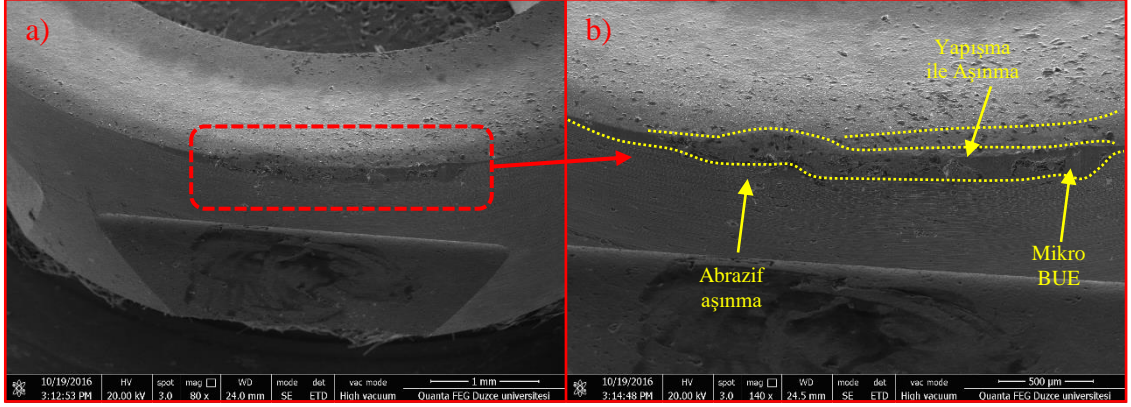
Şekil 8.15. Kuru işleme altında kaplama türünün aşınma üzerine etkisi (x50).

Şekil 8.15 incelendiğinde, aşınma açısından en iyi sonucu PVD (TiAlN) kaplamalı kesici takımın verdiği görülürken en kötü sonucun kaplamasız takımlar aracılığıyla alındığı görülmektedir. Şekil 8.16'da kaplama türü ve işleme zamanına bağlı olarak kesici takımlarda meydana gelen aşınma miktarları verilmiştir. Şekil 8.16 incelendiğinde, en düşük aşınmanın PVD (TiAlN) kaplamalı takımlarda meydana geldiği, en yüksek aşınmanın da kaplamasız takımlarda meydana geldiği görülmektedir. 7.9 dk işleme sonundaki bu aşınma miktarı kaplamasız takımda 0.293 mm iken bu değer CVD kaplamalı takımda 0.191 mm, PVD kaplamalı takımda ise 0.147 mm olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla PVD kaplamalı takım diğer takımlara üstünlük sağlamıştır. PVD kaplamalı takımda meydana gelen aşınma miktarı referans alınarak oransal değişimlere bakıldığında ise kaplamasız takım %92.52 daha fazla aşınırken CVD kaplamalı takım %29.93 daha fazla aşınmıştır.



Şekil 8.16. Kaplama türü ve işleme zamanına bağlı aşınma miktarı.

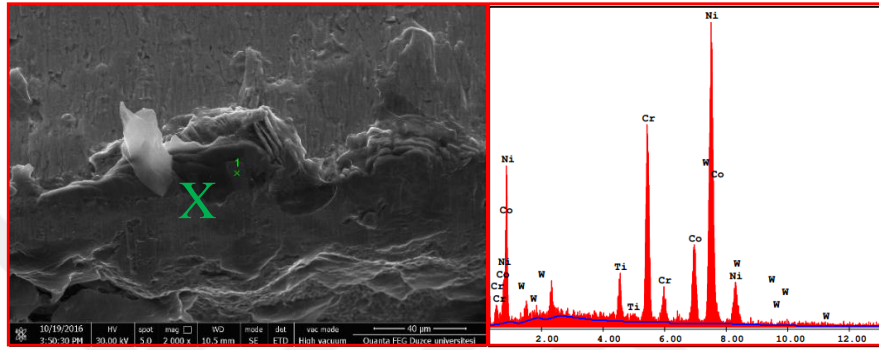
Kesici takımlardaki aşınma davranışlarını incelemek üzere SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 8.17’de kaplamasız karbür kesici uç kullanılarak kuru işleme altında sürdürülen işlenebilirlik deneylerinde kesici takım aşınmasına ait SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 8.17. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve kuru işleme altında aşınmış kaplamasız karbür takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140.

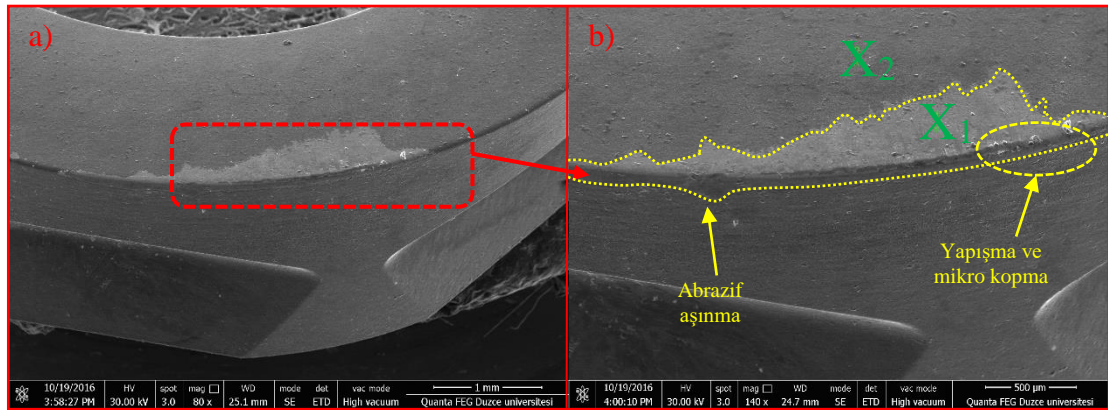
Şekil 8.17 incelendiğinde, aşınmanın sadece kesici uç burun yarıçapı bölgesinde olduğu görülmüştür. SEM fotoğrafları incelendiğinde, bu aşınmada etkin olan aşınma mekanizmalarının abrasif ve adhezif aşınma olduğu düşünülmektedir. Abrasif aşınma mekanizması iş parçası malzemesi içerisindeki sert aşındırıcı karbürlerin etkin olduğu durumdur. Nitekim iş parçası malzemesi içerisindeki bulunan nikel karbürleri bu durumu doğrular niteliktedir. Talaş kaldırma işlemlerinde takım-iş parçası çiftine bağlı olarak iş parçasından kopan talaşlar, belli bir döngü içerisinde takımın yüzeyine yapışır, büyür ve belli bir süreden sonra kopar. Bazen yapışan talaş parçacıkları kesici takım üzerinden

ayrılırken bir miktar takım malzemesini de koparır. SEM resimleri incelendiğinde mikro boyutta yapışan iş parçası malzemelerinin varlığı tespit edilmiştir. Nitekim bu yapışan parçacıklar Şekil 8.18’de verilen EDX analizi yardımıyla da doğrulanmıştır. Dolayısıyla yapışmış bu iş parçası malzemesi etrafında oluşan aşınma izlerinin adeziv aşınma mekanizması etkisiyle oluştuğu söylenebilir. EDX alınan noktada element oranı ağırlıkça %54.5 Ni, %19.87 Cr, %13.64 Co, %8.62 W ve %3.37 Ti çıkmıştır (Şekil 8.18). Değerlerden de anlaşılacağı üzere kesici takım üzerine malzeme yapışması önemli boyuttadır ve bu da aşınmayı tetiklemektedir.



Şekil 8.18. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve kuru işleme altında aşınmış kaplamasız karbür takıma ait EDX analizi.

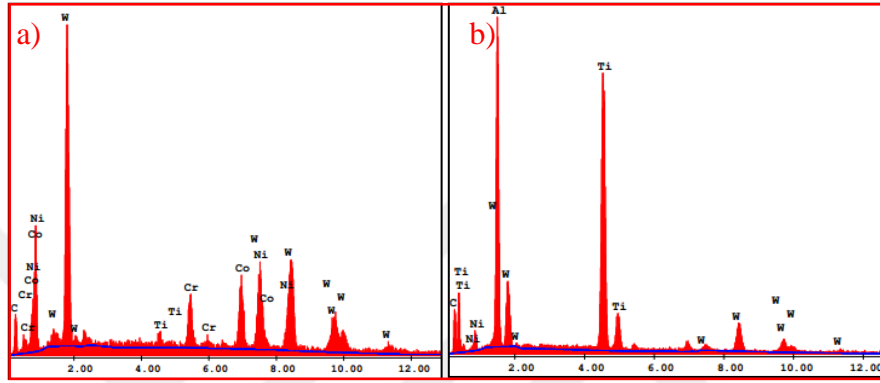
Şekil 8.19’da PVD (TiAlN) kaplamalı karbür deneylerinde kesici takım aşınmasına ait SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 8.19. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve kuru işleme altında aşınmış PVD (TiAlN) kaplamalı karbür takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140.

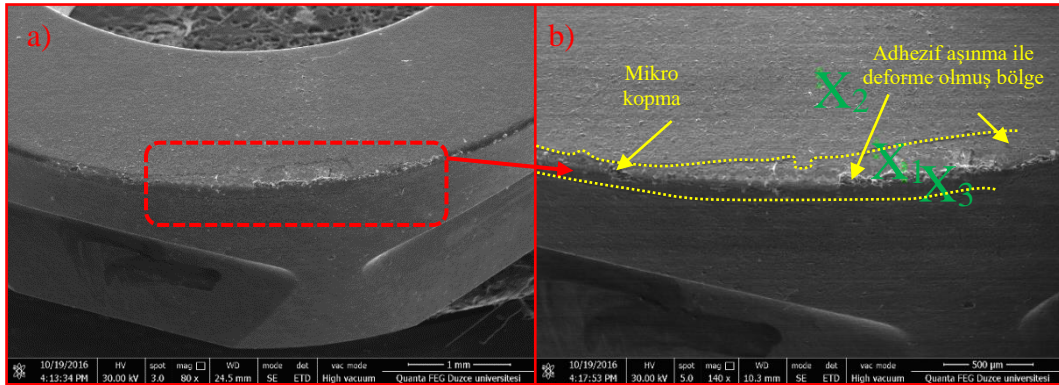
Şekil 8.19 incelendiğinde, ilk etapta kaplamanın kalktığı daha sonra kesici takım ana malzemesinde aşınma başlangıcı olduğu gözükmektedir. Ayrıca, kesici takımın esas kesme hattı boyunca abrasif aşınma mekanizmasının etkisiyle düzenli bir aşınmanın gerçekleştiği görülmektedir. Bununla beraber, kesici takım talaş yüzeyinde kesme kenarı

sonunda iş parçası malzemesinden kopan parçaların yapışmaya başladığı gözlemlenmiştir. Yapışan iş parçası malzemesi bir süre sonra takım malzemesi partikülleri ile birlikte koparak ayrılmıştır. Şekil 8.19b’de gösterilen bir ve iki numaralı noktaların EDX analizi yapılarak kaplamanın kalktığı görülmüştür. Bu durumu gösteren EDX analizleri Şekil 8.20’de verilmektedir. EDX analizinden de anlaşıldığı üzere talaş kaldırma sırasında ilk olarak kaplama kalkmış daha sonra esas karbür takım aşınmaya başlamıştır. Ayrıca, adhezif aşınma mekanizması neticesinde meydana gelen aşınma başlangıcı Şekil 8.20a’da açıkça görülmektedir.



Şekil 8.20. PVD (TiAlN) kaplamalı karbür takıma ait EDX analizi a)1 nolu bölge b)2 nolu bölge.

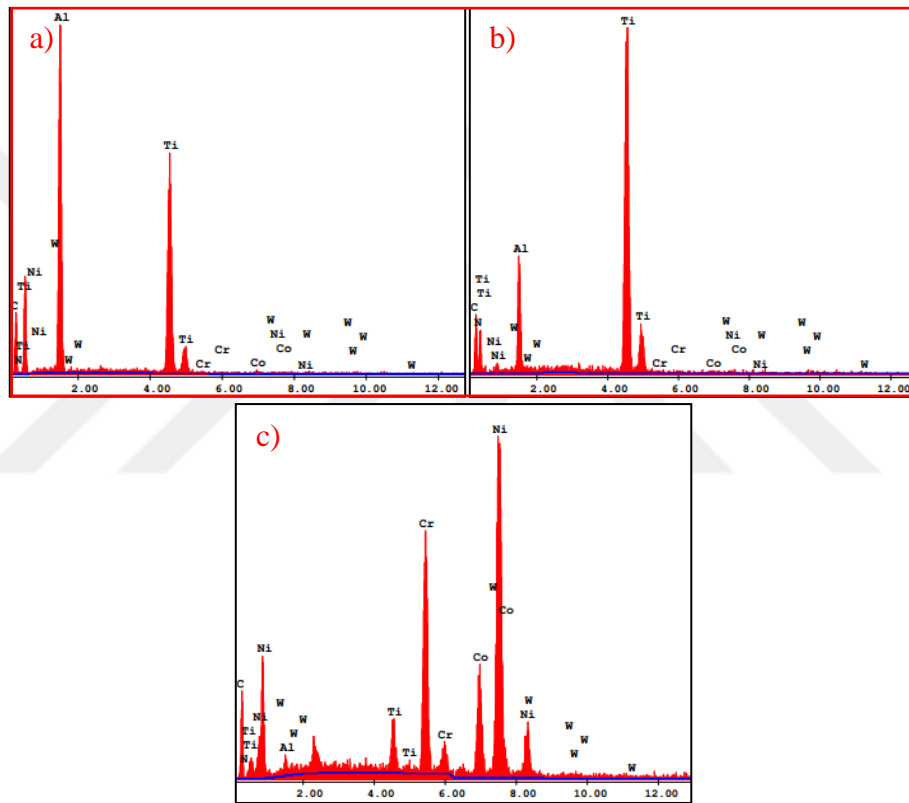
Şekil 8.21’de CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalı karbür kesici uç kullanılarak kuru işleme şartlarında sürdürülen işlenebilirlik deneylerinde kesici takım aşınmasına ait SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 8.21. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve kuru işleme altında CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalı karbür yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140.




Şekil 8.21 incelendiğinde, daha belirgin bir yapışmanın olduğundan bahsedilebilir. Ayrıca, yapışma kesme kenarı hattı boyunca oluşmaya başlamış ve BUE oluşumuna doğru gitmektedir. Ayrıca, yapışan malzemenin kesme hattı üzerinde blok halinde oluştuğu ve kesici kenar geometrisini değiştirdiği görülmektedir (Şekil 8.21b). Bununla

beraber, bazı noktalarda yapışan malzemenin oluşan difüzyon ve mekanik yorulmanın etkisi ile takım malzemesi ile birlikte küçük parçalar halinde kopmalar meydana geldiği ve kesici takım malzemesinin takımdan uzaklaştığı görülmektedir. Bunun sonucunda kesme kenarında chipping oluşmuştur. Şekil 8.21b’de gösterilen bir, iki ve üç numaralı noktalardan EDX analizi yapıldığında kesici takım kaplamasının kalktığı görülmüştür. Bu durumu gösteren EDX analizleri Şekil 8.22’de verilmektedir. EDX analizinden de anlaşıldığı üzere talaş kaldırma sırasında ilk olarak kaplama kalkmış daha sonra esas karbür takım aşınmaya başlamıştır. Ayrıca, adhezif aşınma mekanizması neticesinde meydana gelen aşınma başlangıcı Şekil 8.22c’de açıkça görülmektedir.



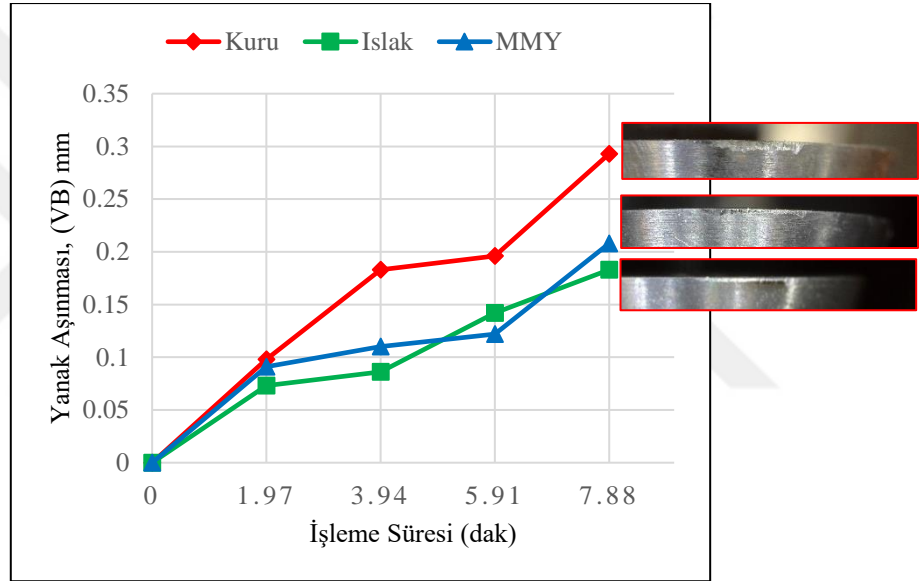
Şekil 8.22. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve kuru işleme altında aşınmış CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalı karbür takıma ait EDX analizi a)1 nolu bölge b)2 nolu bölge c)3 nolu bölge.

Soğutma-yağlama yönteminin aşınma üzerindeki etkisi; soğutma-yağlama yöntemleri arasındaki farkı belirlemek amacıyla yine en belirgin farkı vermesi beklenen kaplamasız karbür kesiciler tercih edilmiştir. Aynı şartlar ve işleme süreleri altında tek değişken olarak soğutma-yağlama yöntemi seçilmiştir. Şekil 8.23’te kaplamasız kesici takımla yürütülen deneylerde soğutma-yağlama yönteminin aşınma üzerindeki etkisi verilmiştir.

| | Kuru | Islak | MMY |
|------------|---|--|---|
| Kaplamasız |  |  |  |
| | 0.293 mm | 0.183 mm | 0.208 mm |

Şekil 8.23. Farklı soğutma-yağlama yöntemleri altında kaplamasız karbür kesici uçların aşınma durumları (x50).

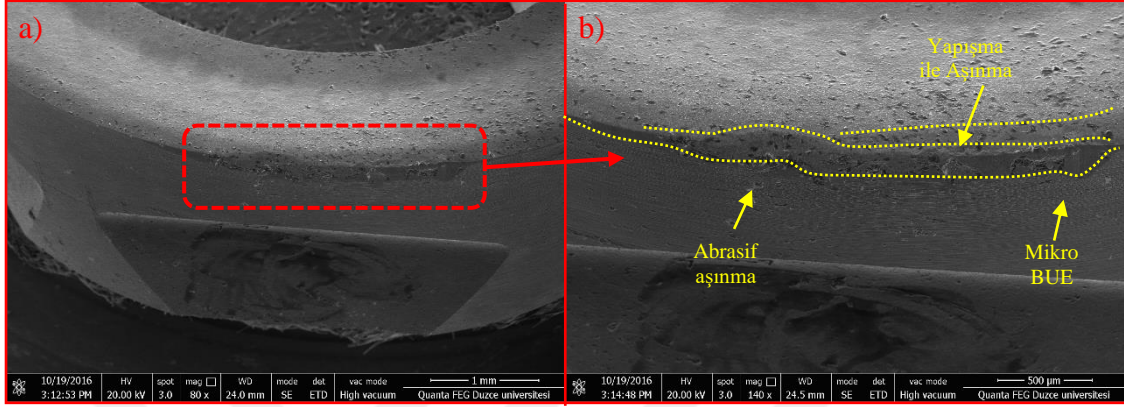
Şekil 8.23 incelendiğinde, kuru işlemenin en yüksek aşınma değerini verdiği, ıslak işleminin ise en iyi sonucu verdiği görülmektedir. Şekil 8.24'te soğutma-yağlama yöntemi ve zamana bağlı olarak kesici takımında meydana gelen aşınma miktarı verilmektedir.



Şekil 8.24. Soğutma-yağlama yöntemi ve işleme zamanına bağlı aşınma miktarı.

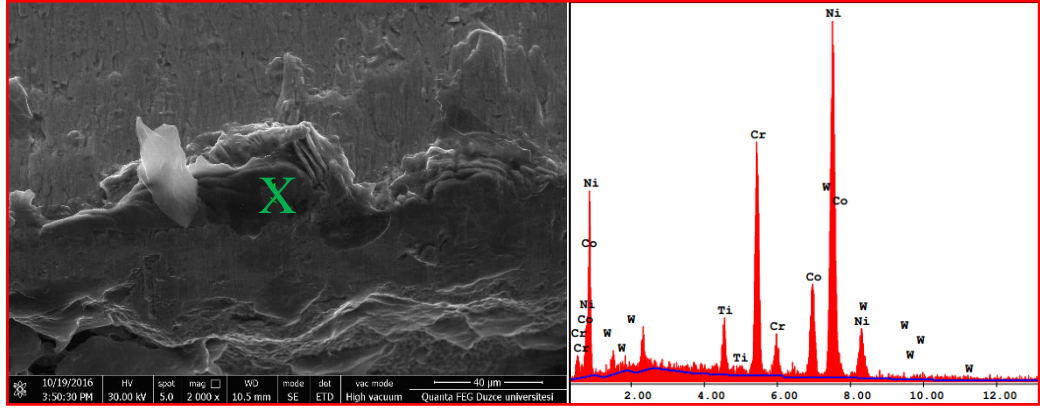
Şekil 8.24 incelendiğinde, en yüksek aşınma değerinin kuru işlemede, en düşük aşınma değerinin de ıslak işlemede ortaya çıktığı görülmektedir. 7.9 dakikalık işleme sonundaki aşınma miktarları kuru işlemede 0.293 mm çıkarken bu değer ıslak işlemede 0.183 mm, MMY sistemi ile işlemede ise 0.208 mm olarak çıkmıştır. Dolayısıyla, kuru işleme kesme sıvısı ile işlemeye nazaran daha yüksek bir aşınmaya sebep olurken ıslak işleme ve MMY sistemi ile işleme birbirine yakın bir durum sergilemiştir. Islak işlemede meydana gelen aşınma miktarı referans alınarak oransal değişimlere bakıldığında ise kuru işlemede %60.11 oranında aşınma artışı olurken bu oran MMY sistemi ile işlemede %13.66 seviyesinde çıkmıştır. Bu durumun temel sebebinin süper alaşım malzemelerin düşük termal iletkenliğe sahip olması nedeniyle kesme esnasında ortaya çıkan yüksek ısının kesici takım üzerinden kesme bölgesini terk etmeye çalışması ve bu esnada da kesici

takımda termal tahribata neden olması olarak düşünülmektedir. Hem ıslak işlemede hem de MMY sistemi ile işlemede kesme sıvısının kullanılması bu tahribatı önemli ölçüde azaltmakta ve buna bağlı olarak da aşınmada önemli iyileştirmeler sağlamaktadır. Şekil 8.25'te kaplamasız karbür kesici uç kullanılarak kuru işleme altında sürdürülen işlenebilirlik deneylerinde kesici takım aşınmasına ait SEM görüntüleri verilmektedir.



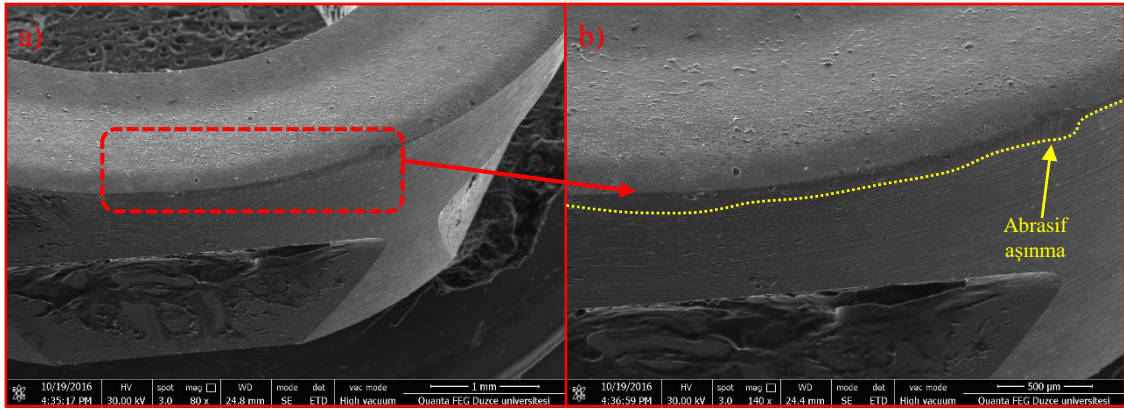
Şekil 8.25. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve kuru işleme altında aşınmış kaplamasız karbür takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140.

Şekil 8.25 incelendiğinde, etkin takım aşınmasının düzenli yanak aşınması ve yapışma aşınması olduğu görülmüştür. SEM görüntülerinde de görüleceği üzere iş parçasından kopan talaşlar adhezif (yapışma) aşınma mekanizmasının etkisiyle kesici takım yüzeyine kaynaklanarak kesici takımın bir parçası halini almıştır. Kesme işlemi sırasında talaşın kesici takıma yapışması kesici takımın bozulmasına sebep olmuş, bunun yanında kesici takım üzerine kaynaklanan malzeme kesici takım üzerinden küçük parçalar halinde kopmuştur. Şekil 8.25b'de adhezif aşınma mekanizmasının etkisiyle takım-talaş yüzeyinde mikro BUE oluşumu açıkça görülmektedir. Şekil 8.26'da SEM görüntüsü ve EDX analizinden de görüldüğü üzere iş parçasından kopan talaş kesici takım yüzeyine kaynaklanarak sertleşmiş ve kesici kenarın bir parçası halini almıştır. EDX alınan noktada elemen oranı ağırlıkça %54.5 Ni, %19.87 Cr, %13.64 Co, %8.62 W ve %3.37 Ti çıkmıştır. Değerlerden de anlaşılacağı üzere kesici takım üzerine malzeme yapışması önemli boyuttadır ve bu da aşınmayı tetiklemektedir.



Şekil 8.26. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve kuru işleme altında aşınmış kaplamasız karbür takıma ait EDX analizi.

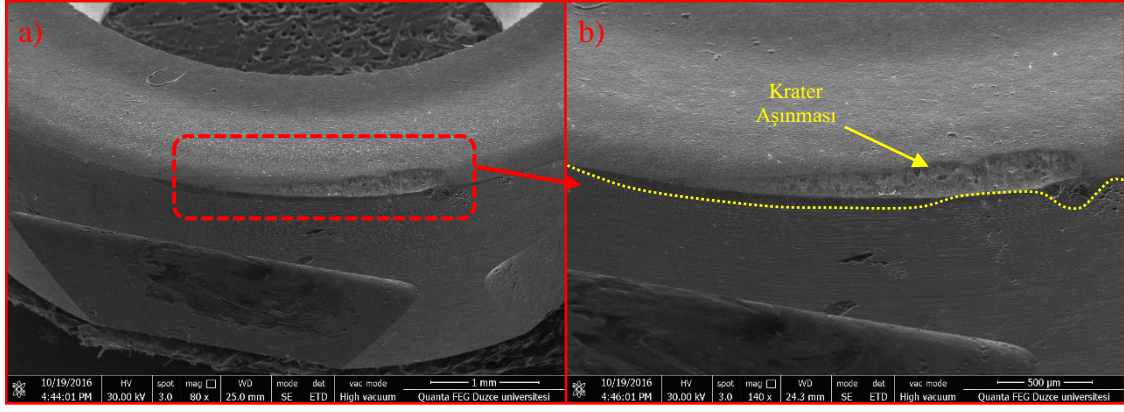
Şekil 8.27’de kaplamasız karbür kesici uç kullanılarak ıslak işleme altında sürdürülen işlenebilirlik deneylerinde kesici takım aşınmasına ait SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 8.27. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve ıslak işleme altında aşınmış kaplamasız karbür takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140.

Şekil 8.27 incelendiğinde, aşınma bölgesinde herhangi bir yapışma olmadığı görülmekle birlikte bunun soğutma sıvısının etkisiyle olduğu düşünülmektedir. Şekil 8.27b incelendiğinde ise aşınma tipinin düzenli yanak aşınması olduğu bunun da abrasif aşınma mekanizması etkisiyle oluştuğu söylenebilir.

Şekil 8.28’de kaplamasız karbür kesici uç kullanılarak MMY sistemi altında sürdürülen işlenebilirlik deneylerinde kesici takım aşınmasına ait SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 8.28. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve MMY sistemi altında aşınmış kaplamasız karbür takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140.

Şekil 8.28 incelendiğinde, düzenli bir aşınmadan söz edilebilir. Kesme hattı boyunca ciddi bir yapışma ile karşılaşmamaktadır (Şekil 8.28a). Bunun nedeni olarak MMY sistemi aracılığıyla kesme bölgesine gönderilen kesme sıvısının etkin bir şekilde rol alması olduğu düşünülmektedir. Ancak, takım talaş yüzeyinde ve kesici kenara çok yakın bir bölgede krater oluşumu mevcuttur.

8.2.1.3. ANOVA

ANOVA sonuçları Çizelge 8.18’de verilmiştir. P değeri 0.05’den küçük olduğu zaman faktörün üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu kabul edildiğinden kesici takım tipi, soğutma-yağlama yöntemi ve kesme hızı faktörlerinin takım ömrü üzerinde belirli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. F değeri dikkate alınarak faktörlere ait etki düzeyleri belirlenmiştir. Çizelge 8.18 incelendiğinde, takım ömrü üzerinde faktör A, B, C ve D’nin yüzdelerle katkıları sırasıyla %54.4, %19.4, %14.9 ve %0.4 olduğu görülmektedir. Bu veriler değerlendirildiğinde takım ömrünü etkileyen en önemli parametrenin kesici takım kaplama türü (A) olduğu görülmektedir. Takım ömrü için hata yüzdesi %10.9 bulunmuştur.

Çizelge 8.18. Anova tablosu.

| Faktörler | Serbestlik derecesi | Kareler toplamı | Kareler ortalaması | F değeri | P değeri | Katkı oranı (%) |
|-----------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|-----------------|
| A | 2 | 2840.08 | 1420.04 | 44.94 | 0.000 | 54.4 |
| B | 2 | 1009.53 | 504.76 | 15.97 | 0.000 | 19.4 |
| C | 2 | 776.57 | 383.29 | 12.13 | 0.000 | 14.9 |
| D | 2 | 20.79 | 10.40 | 0.33 | 0.724 | 0.4 |
| Hata | 18 | 568.77 | 31.60 | - | - | 10.9 |
| Toplam | 26 | 5205.73 | - | - | - | 100 |

8.2.1.4. Regresyon Analizi

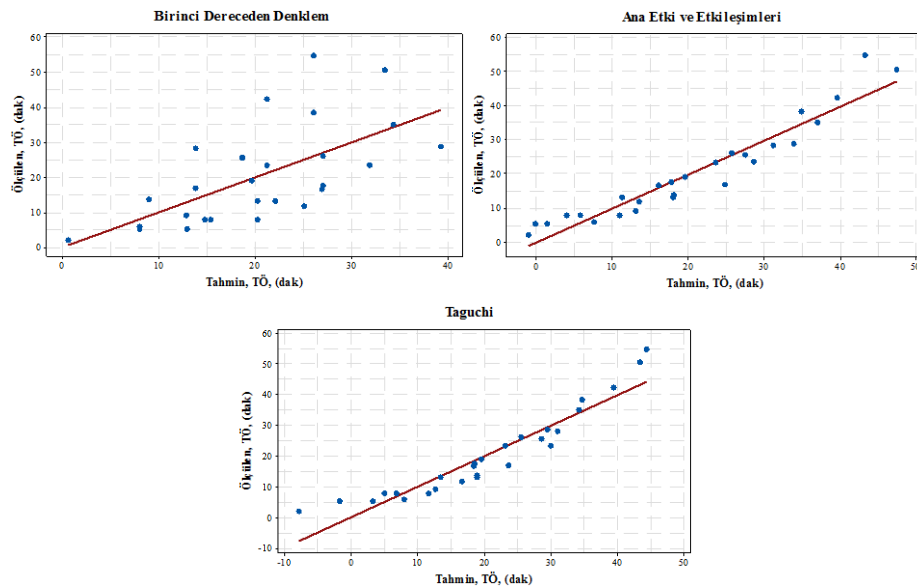
Takım ömrü denklemleri, kontrol seviyelerine bağlı olarak kesici takım tipi (KT), soğutma-yaglama yöntemi (SYY), kesme hızı (V), ilerleme (f) parametreleri esas alınarak oluşturulmuştur. Sadece kontrol faktörlerinin ana etkileriyle oluşturulan birinci dereceden denklem;

$$T_{\hat{0}} = 17.8 + 6.63KT + 5.7SYY - 0.435V - 16.9f \quad (8.17)$$

olarak elde edilmiştir. Elde edilen birinci dereceden denklemin belirleme katsayısı $R^2=0.41$ olarak hesaplanmıştır. %95 güvenilirlik düzeyinde birinci derece denklemlerle elde edilen tahminsel takım ömrü değerleri ile deneysel çalışmalarla elde edilen takım ömrü değerleri arasındaki farklar fazla olacağından faktör etkileşimlerini de kapsayan denklem;

$$\begin{aligned} T_{\hat{0}} = & -67.3 + 81.6KT + 43.9SYY - 0.39V - 175f - 18.48KT^2 - 8.41SYY^2 \\ & + 0.0005V^2 + 459f^2 + 1.56KTxSYY - 0.073KTxV - 5.9KTxf - 0.098SYYxV \\ & - 21.6SYYxF + 1.68Vxf \end{aligned} \quad (8.18)$$

olarak elde edilmiştir. Bu denklemin belirleme katsayısı ise $R^2=0.915$ bulunmuştur. Şekil 8.29'da deneysel sonuçlar ile tahmin modelleri aracılığıyla elde edilen tahminlerin karşılaştırılması görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi gerçek değerlere en yakın tahmin denklemi ana etki ve etkileşimlerine ait denklemdir.



Şekil 8.29. Ölçülen değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması.

8.2.1.5. Doğrulama Deneyleri

Taguchi optimizasyonu sonucunda optimum takım ömrü değerini veren parametre grubu bazen mevcut deneylerden birisi olurken bazen de yapılan deneylerin haricinde bir deney olabilmektedir [192]. Bu çalışmada, en yüksek takım ömrüne ait parametre grubu $A_2B_2C_1D_1$ şeklinde elde edilmiştir. Optimum takım ömrü tahmininde Eşitlik (8.19) kullanılmıştır.

$$T\ddot{O}_{opt} = (A_2 - T_{T\ddot{O}}) + (B_2 - T_{T\ddot{O}}) + (C_1 - T_{T\ddot{O}}) + (D_1 - T_{T\ddot{O}}) + T_{T\ddot{O}} \quad (8.19)$$

Burada, (A_2, B_2, C_1, D_1) takım ömrünün optimum seviyedeki ortalama değerlerini vermektedir (Çizelge 8.19). $T_{T\ddot{O}}$ değeri ise deneysel çalışma sonucu elde edilen ortalama takım ömrü değerini temsil etmektedir (Çizelge 8.16). Hesaplamalar sonucunda $T\ddot{O}_{opt}$ değeri 46.08 dakika olarak bulunmuştur.

Çizelge 8.19. Takım ömrü için ortalama yanıt tablosu.

| Seviyeler | Kontrol faktörleri | | | |
|-----------|--------------------|---------------|---------------|---------------|
| | A | B | C | D |
| Seviye 1 | 7.569 | 11.856 | 26.924 | 21.589 |
| Seviye 2 | 32.678 | 25.969 | 20.282 | 19.596 |
| Seviye 3 | 20.833 | 23.256 | 13.873 | 19.896 |
| Delta | 25.109 | 14.113 | 13.051 | 1.993 |

Optimizasyonun yeterince doğru olup olmadığını denetlemek tahmini güven aralığı hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Eşitlik (8.5) ve Eşitlik (8.6)'da yerine konularak takım ömrü deneyleri için güven aralığı $CI_{T\ddot{O}} = \pm 10.79$ bulunmuştur. %95 güven aralığında tahmini takım ömrü değerinin hesaplanması için kullanılan Eşitlik (8.7)'de değerler yerine konulursa;

$$[46.08 - 10.79] < 56.8 < [46.08 + 10.79] = 35.29 < 56.8 < 56.87 \text{ şeklinde olur.}$$

Deneysel olarak elde edilen takım ömrü değeri güven aralığı sınırları içerisinde çıkmıştır. Böylece, takım ömrü için sistem optimizasyonu Taguchi metodu kullanılarak 0.05 anlamlılık düzeyinde elde edilmiştir. Kontrol faktörlerinin doğrulama deneyi optimum seviye ve rastgele seçilen seviyelerle Taguchi metodu ve regresyon denklemleri için yapılmıştır. Çizelge 8.20'de deney sonuçları ile regresyon denklemleri ve Taguchi metodu aracılığıyla elde edilen tahmin değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır.

Çizelge 8.20. Doğrulama deneyi sonuçları.

| Seviye | Birinci Dereceden Denklem | | | Ana Etki ve Etkileşimlerine Ait Denklem | | | Taguchi Denklemi | | |
|---|---------------------------|--------|----------|---|--------|----------|------------------|--------|----------|
| | Deney | Tahmin | Hata (%) | Deney | Tahmin | Hata (%) | Deney | Tahmin | Hata (%) |
| A ₂ B ₂ C ₁ D ₁ | 56.8 | 67.22 | 18.34 | 56.8 | 59.30 | 4.40 | 56.8 | 63.85 | 12.41 |
| A ₂ B ₁ C ₃ D ₁ | 13.7 | 8.97 | 34.52 | 13.7 | 18.18 | 37.22 | 13.7 | 18.92 | 38.10 |
| A ₃ B ₁ C ₂ D ₁ | 13.1 | 22.13 | 68.93 | 13.1 | 11.27 | 13.97 | 13.1 | 13.48 | 2.90 |

8.2.2. Kesme Kuvveti

Karbür kesici uçlarla yapılan işlenebilirlik deneylerinin odak noktası en düşük kesme kuvveti değerlerini elde etmek olduğu için S/N oranlarının hesaplanmasında “en küçük en iyi” eşitliği için Eşitlik (8.8) kullanılmıştır. Kontrol faktörlerinin seviyeleri, yapılan işlenebilirlik deneyleri sonucu elde edilen F_r kuvveti ve S/N oranları Çizelge 8.21’de sunulmuştur. Yapılan frezeleme deneyleri sonucunda kesme kuvvetlerinin ortalama değeri 728.4 N olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde S/N oranlarının ortalama değeri -57.16 dB olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 8.21. Deney sonuçları ve S/N oranları.

| Den. No. | Kontrol faktörleri | | | | Kesme Kuvveti, (N) | S/N oranı (dB) |
|----------|---------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------|----------------|
| | A Kesici takım (KT) | B Soğutma/Yağlama Yöntemi (SYY) | C Kesme hızı (V) (m/dak) | D İlerleme hızı (f) (mm/dev) | | |
| 1 | Kaplamasız | Kuru | 30 | 0.10 | 816 | -58.23 |
| 2 | Kaplamasız | Kuru | 45 | 0.15 | 848 | -58.57 |
| 3 | Kaplamasız | Kuru | 60 | 0.20 | 851 | -58.60 |
| 4 | Kaplamasız | Islak | 30 | 0.15 | 802 | -58.08 |
| 5 | Kaplamasız | Islak | 45 | 0.20 | 885 | -58.94 |
| 6 | Kaplamasız | Islak | 60 | 0.10 | 609 | -55.69 |
| 7 | Kaplamasız | MMY | 30 | 0.20 | 766 | -57.68 |
| 8 | Kaplamasız | MMY | 45 | 0.10 | 680 | -56.65 |
| 9 | Kaplamasız | MMY | 60 | 0.15 | 705 | -56.96 |
| 10 | PVD | Kuru | 30 | 0.15 | 803 | -58.09 |
| 11 | PVD | Kuru | 45 | 0.20 | 886 | -58.95 |
| 12 | PVD | Kuru | 60 | 0.10 | 757 | -57.58 |
| 13 | PVD | Islak | 30 | 0.20 | 649 | -56.24 |
| 14 | PVD | Islak | 45 | 0.10 | 524 | -54.39 |
| 15 | PVD | Islak | 60 | 0.15 | 566 | -55.06 |
| 16 | PVD | MMY | 30 | 0.10 | 659 | -56.38 |
| 17 | PVD | MMY | 45 | 0.15 | 677 | -56.61 |
| 18 | PVD | MMY | 60 | 0.20 | 682 | -56.68 |
| 19 | CVD | Kuru | 30 | 0.20 | 887 | -58.96 |
| 20 | CVD | Kuru | 45 | 0.10 | 814 | -58.21 |
| 21 | CVD | Kuru | 60 | 0.15 | 843 | -58.52 |
| 22 | CVD | Islak | 30 | 0.10 | 626 | -55.93 |
| 23 | CVD | Islak | 45 | 0.15 | 632 | -56.01 |
| 24 | CVD | Islak | 60 | 0.20 | 686 | -56.73 |
| 25 | CVD | MMY | 30 | 0.15 | 677 | -56.61 |
| 26 | CVD | MMY | 45 | 0.20 | 738 | -57.36 |
| 27 | CVD | MMY | 60 | 0.10 | 599 | -55.55 |

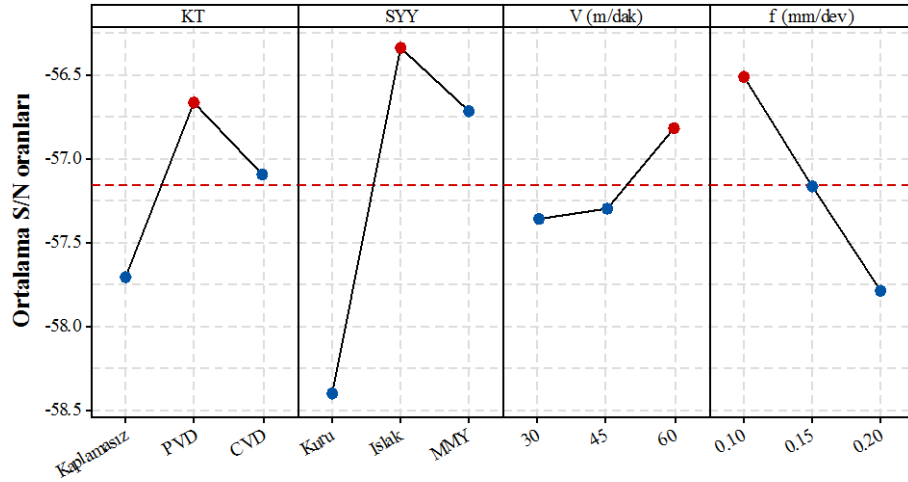
Çizelge 8.22’de kesme kuvvetleri için S/N tablosu verilmiştir ve optimum kesme kuvveti değerleri için kontrol faktörlerinin optimum seviyelerini göstermektedir.

Çizelge 8.22. S/N yanıt tablosu.

| Seviyeler | Kontrol faktörleri | | | |
|-----------|--------------------|---------------|---------------|---------------|
| | A | B | C | D |
| Seviye 1 | -57.71 | -58.41 | -57.36 | -56.51 |
| Seviye 2 | -56.66 | -56.34 | -57.30 | -57.17 |
| Seviye 3 | -57.10 | -56.72 | -56.82 | -57.79 |
| Delta | 1.05 | 2.07 | 0.54 | 1.28 |

Herhangi bir kontrol faktörü için en iyi seviye, o kontrol faktörünün tüm seviyeleri içerisindeki en büyük S/N oranına göre bulunmuştur. Dolayısıyla, en iyi F_r değerini veren

faktörlere ait seviyeler ve S/N oranları, faktör A (Seviye 2, S/N= -56.66 dB), faktör B (Seviye 2, S/N=-56.34 dB), faktör C (Seviye 3, S/N=-56.82 dB) ve faktör D (Seviye 1, S/N=-56.51 dB) olarak belirlenmiştir (Çizelge 8.22). Ayrıca Şekil 8.30'da F_r değerleri için kontrol faktörlerinin S/N oranları ana etki grafiği verilmiştir.

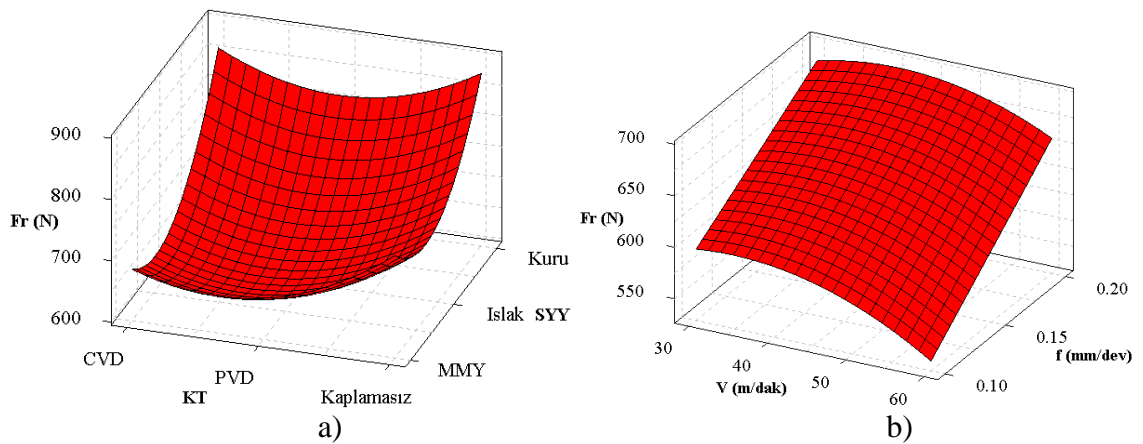


Şekil 8.30. S/N oranları ana etki grafiği.

Şekil 8.30 incelendiğinde, en düşük kesme kuvveti değerinin PVD (TiAlN) kaplamalı karbür kesici uç (A_2), ıslak işleme (B_2), 60 m/dak kesme hızı (C_3) ve 0.1 mm/dev ilerleme (D_1) ile elde edildiği görülmüştür.

8.2.2.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Farklı kesme parametreleri altında yapılan frezeleme işleminde kesme kuvveti ile diğer ana faktör etkileşimlerinin arasındaki ilişkiyi gösteren üç boyutlu yüzey grafikleri Şekil 8.31'de verilmiştir.



Şekil 8.31. Giriş parametrelerine bağlı olarak kesme kuvvetinin değişimi, a) Kesici takım tipi ve soğutma-yaglama yöntemi b) Kesme hızı ve ilerleme.

Şekil 8.31a'daki kesme kuvveti ile kesici takım kaplama tipi arasındaki ilişki incelendiğinde, en düşük kesme kuvvetinin PVD (TiAlN) kaplamalı karbür kesici uçlarda ortaya çıktığı görülmektedir. Kaplamasız karbür kesici uçlarda kesme kuvvetinin yüksek çıkması bu takımların sürtünme katsayılarının yüksek olmasıyla açıklanabilir [210], [211]. Kaplamalı takımlarda adhesif ve kohezif etkiler nedeniyle kaplamanın kalkmasına kadar kesme kuvvetleri düşük çıkmaktadır. Ancak aşınma neticesinde kaplamanın kalkması ile birlikte kaplamanın getirmiş olduğu olumlu etki ortadan kalktığından kesme kuvvetleri de yükselme eğilimine girmektedir [212]. Nikel esaslı süper alaşımların işlenmesinde kaplama katmanı kesme kuvvetlerinin düşürülmesinde önemli bir etkiye sahiptir [213]. Ancak, kaplama türleri uygulamaya göre farklılık arz edebilmektedir. Örneğin; TiAlN kaplamanın daha sert ve kimyasal olarak daha kararlı olması yüksek kesme hızlarında kesme kuvveti açısından onları daha tercih edilebilir kılmaktadır. TiAlN kaplama diğer kaplama türleriyle kıyaslandığında kesme bölgesindeki sıcaklıktan daha az etkilenmekte, talaşın kesme bölgesinden akışını kolaylaştırmakta ve böylece kesme kuvvetlerinin azalmasına yardımcı olmaktadır [204]. Kaplamasız karbür takımlar ile yapılan deneylerden elde edilen ortalama kesme kuvveti değerleri PVD (TiAlN) kaplamalı karbür takımlar ve CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalı karbür takımlar ile yapılan deneyler ile karşılaştırıldığında kesme kuvvetinde iyileşme sırasıyla %10.9 ve %6.61 oranlarında olmuştur.

Şekil 8.31a'da yer alan kesme kuvveti ile soğutma-yağlama yönteminin arasındaki ilişkiyi gösteren bölüm incelendiğinde en düşük kesme kuvvetinin ıslak işlemede elde edildiği en yüksek kesme kuvvetinin de kuru işlemede elde edildiği görülmektedir. Sürtünme ve aşınma kesici takımın performansını sürekli olarak sınırlandırmakta, özellikle kuru işleme şartları kesici kenarın yüksek termal, mekanik ve kimyasal yüklere maruz kalmasına sebep olmaktadır. Bu da kuru işlemede yüksek kesme kuvveti oluşmasının temel nedeni olarak yorumlanabilmektedir [214]. Yine aynı grafikte MMY sistemi altında yapılan talaş kaldırma işleminde ıslak işlemeye yakın bir kesme kuvveti değeri elde edildiği görülmektedir. Frezeleme işlemi esnasında soğutma sıvısı kullanıldığında kaplamalı takımlar çok iyi sonuçlar vermektedir. PVD (TiAlN) kaplamalı takımlar kaplama özellikleri gereği kesme sıvısının kullanımına daha uygun oldukları için daha iyi sonuçlar vermiştir denilebilir. Bu durum literatürle de paralellik arz etmektedir [159], [215]. Kuru işleme ile yapılan deneylerdeki sonuçlar ıslak ve MMY ile işleme ile karşılaştırıldığında sırasıyla %20.33 ve %17.61 oranlarında iyileşme görülmüştür.

Şekil 8.31b’de yer alan kesici takım türü ile kesme hızı arasındaki ilişkiyi gösteren bölüm incelendiğinde, kesme hızındaki artış kesme kuvvetinde azalmaya neden olmuştur. Kesme kuvvetinin, kesme hızının artmasına bağlı olarak düşmesinin sebebi, akış bölgesindeki yüksek sıcaklık ve azalan temas yüzey alanının olduğu düşünülmektedir [216]-[218]. Bir başka deyişle, kesme hızının artması ile kesme kuvvetlerindeki düşüşün sebebi birinci ve ikinci deformasyon bölgesindeki sıcaklığın artması ile malzemenin kayma gerilmesinin azalmasına bağlanabilir [219], [220]. 30 m/dak kesme hızı ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ile 45 m/dak ve 60 m/dak kesme hızı ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında takım ömründeki azalma sırasıyla %2.44 ve %5.79 oranlarında olmuştur. Şekil 31b’de yer alan ve kesme kuvvetinin ilerleme ile ilişkisini gösteren kısım incelendiğinde ilerlemenin kesme kuvveti üzerinde çok etkisinin olmadığı ancak ilerleme değerinin artması ile birlikte küçük de olsa kesme kuvvetinde bir artış meydana geldiği görülmektedir. Bu artış 0.15 mm/dev ilerleme için %7.71 oranında olurken 0.2 mm/dev ilerleme için %15.55 seviyesinde olmuştur.

8.2.2.2. ANOVA

Kesme kuvvetleri için ANOVA sonuçları Çizelge 8.23’de verilmiştir. Analiz %95 güven seviyesi dikkate alınarak yapılmıştır. P değerinin 0.05’den küçük olması faktörün çıktı üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu kabul edilmesi anlamına geldiğinden kesici takım tipi, soğutma-yağlama yöntemi ve ilerleme faktörlerine ait P değerlerinin 0.05’den küçük olması, bu faktörlerin kesme kuvveti üzerinde belirli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Çizelge 8.23 incelendiğinde kesme kuvveti üzerinde faktör A, B, C, ve D’nin yüzde katkıları sırasıyla %11.3, %53.2, %3.8, ve %17.3 olarak bulunmuştur. Bu veriler ışığında kesme kuvvetini etkileyen en önemli faktörün soğutma-yağlama yöntemi (B) olduğu görülmektedir. F_r için hata yüzdesi %14.4 bulunmuştur. İstatistiksel analiz sonuçları incelendiğinde deneysel çalışmadan elde edilen sonuçları doğrular nitelikte olduğu görülmektedir.

Çizelge 8.23. Anova tablosu.

| Faktörler | Serbestlik derecesi | Kareler toplamı | Kareler ortalaması | F değeri | P değeri | Katkı oranı (%) |
|-----------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|-----------------|
| A | 2 | 32485 | 16242 | 7.01 | 0.006 | 11.3 |
| B | 2 | 152518 | 76259 | 32.93 | 0.000 | 53.2 |
| C | 2 | 11065 | 5533 | 2.39 | 0.120 | 3.8 |
| D | 2 | 49719 | 24859 | 10.74 | 0.001 | 17.3 |
| Hata | 18 | 41462 | 2316 | - | - | 14.4 |
| Toplam | 26 | 287469 | - | - | - | 100 |

8.2.2.3. Regresyon Analizi

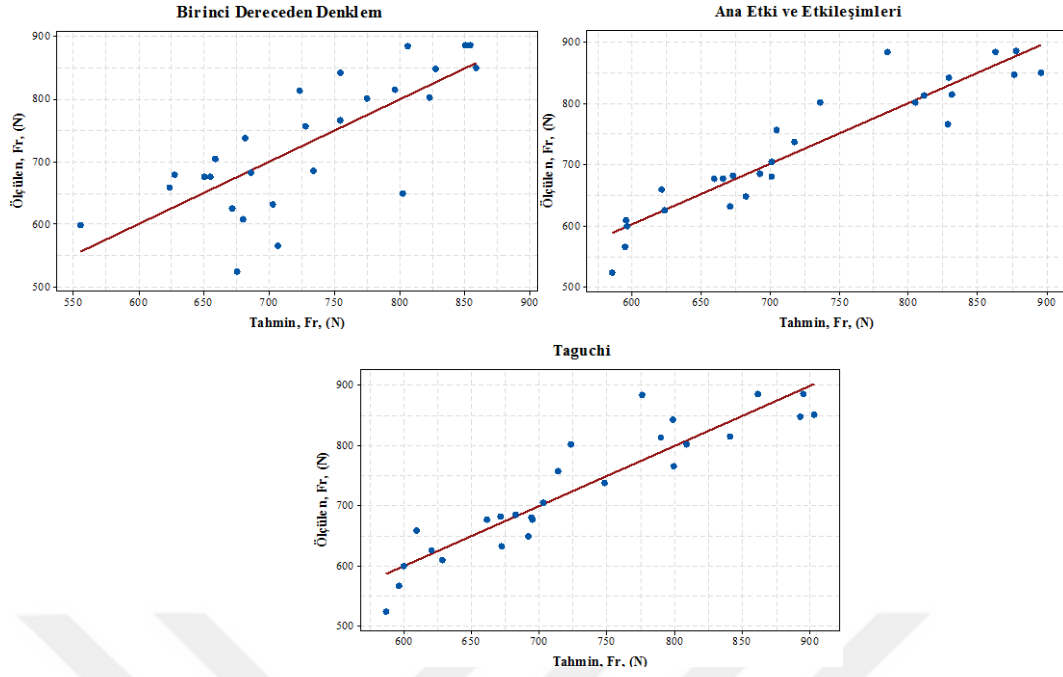
Kesme kuvveti denklemleri, kontrol seviyelerine bağlı olarak kesici takım kaplama tipi, soğutma-yaglama yöntemi, kesme hızı ve ilerleme parametreleri esas alınarak oluşturulmuştur. Sadece faktörlerin ana etkileriyle oluşturulan denklem;

$$F_r = 833.2 - 25.6KT - 73.4SYY - 1.43V + 1051f \quad (8.20)$$

olarak elde edilmiştir. Elde edilen birinci dereceden denklemin belirleme katsayısı $R^2=0.580$ olarak hesaplanmıştır. %95 güvenilirlik düzeyinde birinci derece denklemlerle elde edilen tahminsel kesme kuvvetleri ile deneysel çalışmalarla elde edilen kesme kuvveti değerleri arasındaki farklar fazla olacağından faktör etkileşimlerini de kapsayan denklem;

$$F_r = 1180 - 241KT - 411SYY + 3.97V + 984f + 58.8KT^2 + 96.1SYY^2 - 0.0951V^2 + 178f^2 - 15.90KTxSYY + 0.91KTxV - 195KTxf - 0.18SYYxV - 50SYYxf + 11.2Vxf \quad (8.21)$$

olarak elde edilmiştir. Bu denklemin belirleme katsayısı $R^2=0.878$ olarak bulunmuştur. % 95 güvenilirlik seviyesinde birinci dereceden ve kontrol faktörlerinin yanı sıra etkileşimlerinin de yer aldığı denklemle elde edilen tahmini kesme kuvveti değerleri ve deneysel çalışma sonucunda elde edilen kesme kuvveti sonuçları ve bunların arasındaki karşılaştırma Şekil 8.32'de verilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi gerçek değerlere en yakın tahmin denklemi ana etki ve etkileşimlerine ait denklemdir.



Şekil 8.32. Ölçülen değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması.

8.2.2.4. Doğrulama Deneyleri

Kesme kuvveti deneyleri neticesinde optimum parametre grubu $A_2B_2C_3D_1$ şeklinde elde edilmiştir. Optimum kesme kuvveti tahmininde Eşitlik (8.22) kullanılmıştır.

$$Fr_{opt} = (A_2 - T_{Fr}) + (B_2 - T_{Fr}) + (C_3 - T_{Fr}) + (D_1 - T_{Fr}) + T_{Fr} \quad (8.22)$$

Burada, (A_2 , B_2 , C_3 , D_1) kesme kuvvetinin optimum seviyedeki ortalama değerlerini vermektedir (Çizelge 8.24). T_{Fr} değeri ise deneysel çalışma sonucu elde edilen ortalama kesme kuvveti değerini temsil etmektedir (Çizelge 8.21). Hesaplamalar sonucunda Fr_{opt} değeri 544.1 N olarak bulunmuştur.

Çizelge 8.24. Kesme kuvveti için ortalama yanıt tablosu.

| Seviyeler | Kontrol faktörleri | | | |
|-----------|--------------------|--------------|--------------|--------------|
| | A | B | C | D |
| Seviye 1 | 773.6 | 833.9 | 742.8 | 676.0 |
| Seviye 2 | 689.2 | 664.3 | 742.7 | 728.1 |
| Seviye 3 | 722.4 | 687.0 | 699.8 | 781.1 |
| Delta | 84.3 | 169.6 | 43.0 | 105.1 |

Optimizasyonun yeterince doğru olup olmadığını denetlemek için Eşitlik (8.5) ve Eşitlik (8.6) kullanılarak tahmini güven aralığı hesaplanmıştır. Elde edilen değerler yerine konularak kesme kuvveti deneyleri için güven aralığı $CI_{Fr} = \pm 92.3$ bulunmuştur. %95

güven aralığında tahmini kesme kuvveti değeri Eşitlik (8.12)'de yerine konulursa ;

$$[544.1 - 92.3] < 511 < [544.1 + 92.3] = 451.8 < 511 < 636.4 \text{ şeklinde olur.}$$

Deneysel olarak elde edilen kesme kuvveti değeri güven aralığı sınırları içerisinde çıkmıştır. Böylece, kesme kuvveti için sistem optimizasyonu Taguchi metodu kullanılarak 0.05 anlamlılık düzeyinde elde edilmiştir.

Çizelge 8.25'de deney sonuçları ile regresyon denklemleri ve Taguchi metodu aracılığıyla elde edilen tahmin değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Doğrulama deney sonuçları incelendiğinde elde edilen sonuçların yeterli olduğu ve Taguchi optimizasyonunun başarılı olduğu söylenebilir.

Çizelge 8.25. Optimum sonuçlar ve doğrulama deneyi.

| Seviye | Birinci Dereceden Denklem | | | Ana Etki ve Etkileşimlerine Ait Denklem | | | Taguchi Denklemi | | |
|---|---------------------------|--------|----------|---|--------|----------|------------------|--------|----------|
| | Deney | Tahmin | Hata (%) | Deney | Tahmin | Hata (%) | Deney | Tahmin | Hata (%) |
| A ₂ B ₂ C ₃ D ₁ | 511 | 525 | 2.74 | 511 | 508 | 0.59 | 511 | 502 | 1.76 |
| A ₂ B ₁ C ₁ D ₂ | 803 | 823 | 2.49 | 803 | 805 | 0.25 | 803 | 809 | 0.75 |
| A ₃ B ₃ C ₁ D ₂ | 677 | 652 | 3.69 | 677 | 685 | 1.81 | 677 | 691 | 2.06 |

8.2.3. Yüzey Pürüzlülüğü

Bir malzemenin işlenebilirlik özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılan en önemli parametrelerden biri de işlenen yüzeyin kalitesidir [50], [209], [221]. Bu amaçla, kesici takım kaplama tipi, kesme hızı ve ilerlemenin en düşük yüzey pürüzlülüğünü verecek optimum kesme parametrelerini bulmak ve faktör etkileşimlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemek için bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. İşlenmiş yüzeylerin aritmetik ortalama yüzey pürüzlülük değeri olan Ra işlenmiş yüzeyin dört farklı noktasından ölçülmüş ve ölçümlerin ortalaması alınarak Ra_{ort} değeri bulunmuştur. Bu ölçümlerden elde edilen sonuçlar, kontrol faktörleri, kontrol faktörlerinin seviyeleri ve S/N oranları Çizelge 8.26'da verilmiştir. Yapılan frezeleme deneyleri sonucunda ortalama yüzey pürüzlülük değeri 0.310 µm olarak elde edilirken S/N oranlarının ortalama değeri 10.31 dB olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 8.26. Deney sonuçları ve S/N oranları.

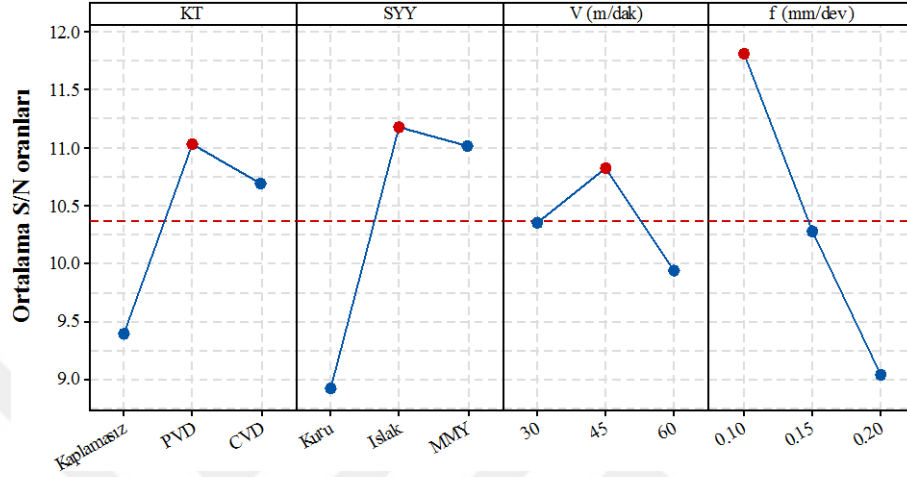
| Den. No. | Kontrol faktörleri | | | | Yüzey Pürüzlülüğü (µm) | S/N oranı (dB) |
|----------|---------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------|----------------|
| | A Kesici takım (KT) | B Soğutma/Yağlama Yöntemi (SYY) | C Kesme hızı (V) (m/dak) | D İlerleme hızı (f) (mm/dev) | | |
| 1 | Kaplamasız | Kuru | 30 | 0.10 | 0.38 | 8.87 |
| 2 | Kaplamasız | Kuru | 45 | 0.15 | 0.38 | 8.40 |
| 3 | Kaplamasız | Kuru | 60 | 0.20 | 0.42 | 7.54 |
| 4 | Kaplamasız | Islak | 30 | 0.15 | 0.32 | 9.90 |
| 5 | Kaplamasız | Islak | 45 | 0.20 | 0.33 | 8.87 |
| 6 | Kaplamasız | Islak | 60 | 0.10 | 0.28 | 10.46 |
| 7 | Kaplamasız | MMY | 30 | 0.20 | 0.34 | 9.37 |
| 8 | Kaplamasız | MMY | 45 | 0.10 | 0.29 | 10.46 |
| 9 | Kaplamasız | MMY | 60 | 0.15 | 0.34 | 9.90 |
| 10 | PVD | Kuru | 30 | 0.15 | 0.40 | 6.74 |
| 11 | PVD | Kuru | 45 | 0.20 | 0.36 | 9.37 |
| 12 | PVD | Kuru | 60 | 0.10 | 0.26 | 10.46 |
| 13 | PVD | Islak | 30 | 0.20 | 0.28 | 12.40 |
| 14 | PVD | Islak | 45 | 0.10 | 0.20 | 13.98 |
| 15 | PVD | Islak | 60 | 0.15 | 0.27 | 12.40 |
| 16 | PVD | MMY | 30 | 0.10 | 0.23 | 12.40 |
| 17 | PVD | MMY | 45 | 0.15 | 0.22 | 13.15 |
| 18 | PVD | MMY | 60 | 0.20 | 0.38 | 7.96 |
| 19 | CVD | Kuru | 30 | 0.20 | 0.40 | 7.96 |
| 20 | CVD | Kuru | 45 | 0.10 | 0.30 | 10.46 |
| 21 | CVD | Kuru | 60 | 0.15 | 0.36 | 8.87 |
| 22 | CVD | Islak | 30 | 0.10 | 0.20 | 13.98 |
| 23 | CVD | Islak | 45 | 0.15 | 0.26 | 11.70 |
| 24 | CVD | Islak | 60 | 0.20 | 0.40 | 7.54 |
| 25 | CVD | MMY | 30 | 0.15 | 0.26 | 11.70 |
| 26 | CVD | MMY | 45 | 0.20 | 0.30 | 10.46 |
| 27 | CVD | MMY | 60 | 0.10 | 0.22 | 13.15 |

Yürütülen deneysel çalışma sonucu elde edilen değerlerin S/N oranlarının optimizasyonu Taguchi metodu aracılığıyla yapılmıştır. Çizelge 8.27’de yüzey pürüzlülüğü için S/N tablosu verilmiştir ve optimum yüzey pürüzlülüğü değerleri için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri görülmektedir.

Çizelge 8.27. S/N yanıt tablosu.

| Seviyeler | Kontrol faktörleri | | | |
|-----------|--------------------|--------------|--------------|--------------|
| | A | B | C | D |
| Seviye 1 | 9.38 | 8.91 | 10.34 | 11.81 |
| Seviye 2 | 11.03 | 11.19 | 10.82 | 10.27 |
| Seviye 3 | 10.69 | 11.01 | 9.94 | 9.03 |
| Delta | 1.65 | 2.27 | 0.89 | 2.78 |

En iyi yüzey pürüzlülük değerini veren faktörlere ait seviyeler ve S/N oranları faktör A (Seviye 2, S/N= 11.03 dB), faktör B (Seviye 2, S/N=11.19 dB), faktör C (Seviye 2, S/N=10.82 dB), ve faktör D (Seviye 1, S/N=11.81 dB) olarak belirlenmiştir (Çizelge 8.27). Ayrıca Şekil 8.33’de yüzey pürüzlülüğü değerleri için kontrol faktörleri ve faktörlere ait seviye değerleri gösterilmiştir.

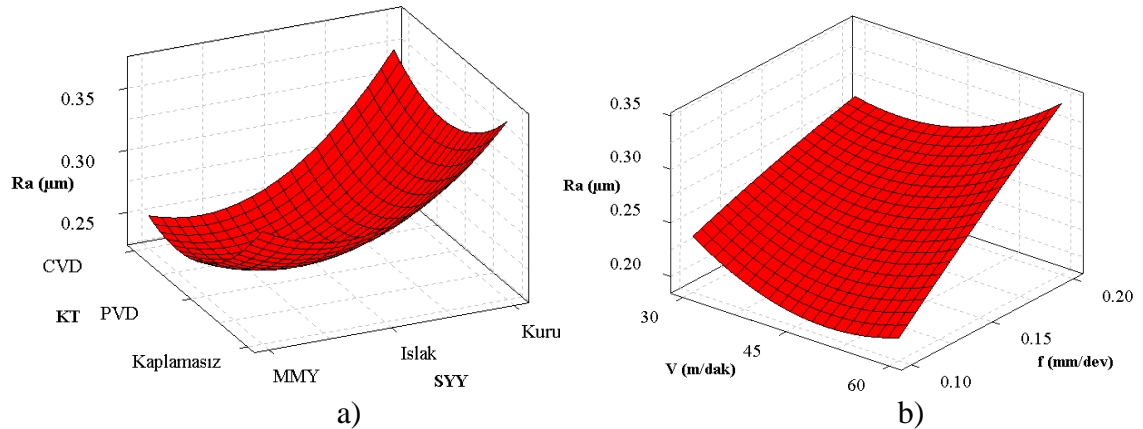


Şekil 8.33. S/N oranları ana etki grafiği.

Şekil 8.33 incelendiğinde, en düşük yüzey pürüzlülük değerini veren optimum kesme parametrelerinin; PVD (TiAlN) kaplamalı karbür kesici takım (A_2), ıslak işleme şartı (B_2), 45 m/dak kesme hızı (C_2) ve 0.1 mm/dev ilerleme (D_1) olduğu görülmektedir.

8.2.3.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Farklı kesme parametreleri altında yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü ile diğer ana faktör etkileşimlerinin üç boyutlu yüzey grafikleri Şekil 8.34’te verilmiştir.



Şekil 8.34. Giriş parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi, a) Kesici takım tipi ve soğutma-yağlama yöntemi b) Kesme hızı ve ilerleme.

Şekil 8.34a’daki yüzey pürüzlülüğü ile kesici takım kaplama tipi arasındaki ilişki

incelendiğinde, en düşük yüzey pürüzlülüğünün PVD (TiAlN) kaplamalı karbür kesici uçlarda olduğu görülmektedir. Kaplamasız takımlarla talaş kaldırma esnasında kesici uç üzerinde meydana gelen yığıntı talaş, kesici takımdan iş parçasına doğru çıkıntı oluşturduğundan talaş derinliğini ve kesici takım geometrisini değiştirmektedir. Bunun sonucu olarak da düzensiz kesme geometrisi oluşur ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde olumsuz etki bırakmaktadır [222], [223]. Waspaloy gibi nikel esaslı süper alaşımların işlenmesi sürecinde kaplamasız takımlardaki düşük termal difüzyon gücü, takım ucundaki kesme sıcaklıklarının bölgeselleşmesine neden olmaktadır. İş parçasından kopan parçacıkların kesici takıma kaynak olmasıyla ortaya çıkan yapışma-BUE oluşumu yüzeylerin bozulmasına neden olmaktadır [224], [225]. Kaplamalı takımlarla yapılan talaş kaldırma işleminde daha sert ve düşük sürtünme katsayısına sahip olması sebebiyle PVD (TiAlN) kaplamalı karbür takım daha iyi performans göstermektedir [223]. Kaplamasız karbür takımlar ile yapılan deneylerden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri PVD (TiAlN) kaplamalı karbür takımlar ve CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalı karbür takımlar ile yapılan deneyler ile karşılaştırıldığında yüzey pürüzlülüğünde iyileşme sırasıyla %18.13 ve %12.28 oranlarında olmuştur.

Şekil 8.34a'da yer alan yüzey pürüzlülüğü ile soğutma-yağlama yönteminin arasındaki ilişkiyi gösteren bölüm incelendiğinde en düşük yüzey pürüzlülüğünün ıslak işlemede elde edildiği en yüksek yüzey pürüzlülük değerinin de kuru işlemede elde edildiği görülmektedir. Kesme sıvıları, fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı talaş kaldırma işlemi esnasında ortaya çıkan ısı oluşumunu azalttığından ısı oluşumunun getireceği hasarların azalmasını veya tamamen önlenmesini sağlamaktadır. Bu nedenle de işlenmiş yüzeyin kalitesinin geliştirilmesinde önemli bir yer tutmaktadırlar [122], [227]. Yüzey pürüzlülüğünün geliştirilmesi için kesme sıvısının kullanımının yanında MMY sisteminin kullanımı da önemli bir yer tutmaktadır. Abrasif aşınma ve adhezif aşınma mekanizmaları sonucunda yüzey pürüzlülüğünün arttığı ve bunların azaltılmasında MMY ile kullanılan yağlayıcı etkisinin önemli olduğu bilinmektedir [207]. Kuru işleme ile yapılan deneylerle elde edilen sonuçlar ıslak işleme ve MMY ile işleme ile karşılaştırıldığında sırasıyla %21.67 ve %20.28 oranlarında iyileşme görülmüştür.

Şekil 8.34b'de yer alan kesici takım kaplama türü ile kesme hızı arasındaki ilişkiyi gösteren bölüm incelendiğinde, kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğünün bir noktaya kadar iyileşme gösterdiği, kesme hızındaki artışın devam etmesi ile yüzey pürüzlülüğündeki iyileşme çizgisinin negatif yönde seyrettiği görülmektedir. Bu durum,

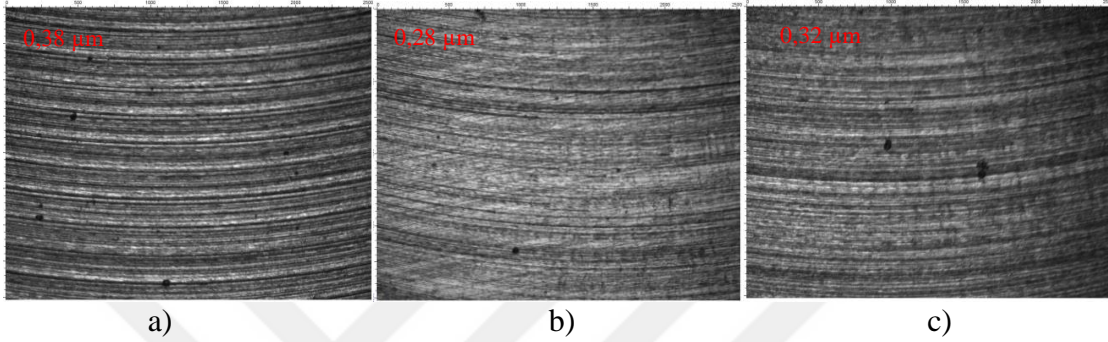
kesme hızının artmasıyla kesme bölgesindeki sıcaklığın artması, 1. deformasyon bölgesinde plastik deformasyonun kolaylaşması, 2. deformasyon bölgesinde talaş akışı ve talaşın biçimlenmesinin kolaylaşmasıyla açıklanabilir. Ayrıca, kesme hızında meydana gelen artış yığıntı talaş oluşumunu ve yığıntı katmanlarını azaltmaktadır ve böylece yüzey pürüzlülüğünün azalmasına sebep olmaktadır. Kesme hızındaki artışa bağlı olarak yüzey kalitesindeki iyileşme literatürde yer alan bir durumdur [228]. Ancak, kesme hızındaki artışın devam etmesi kesici takımın aşınma sürecine daha erken girmesini sağladığından yüzey kalitesinde tekrar kötüleşmeye sebep olabilmektedir [179], [229], [230]. 30 m/dak kesme hızı ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ile diğer kesme hızı ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında ortalama yüzey pürüzlülüğünde 45m/dak kesme hızında %6.1 oranında bir iyileşme ortaya çıkarken 60 m/dak kesme hızında %4.17 kötüleşme ortaya çıkmıştır.

Şekil 8.34b'de yer alan ve yüzey pürüzlülüğünün ilerleme ile ilişkisini gösteren kısım incelendiğinde en düşük yüzey pürüzlülük değerinin 0.1 mm/dev ilerleme ile sağlandığı, ilerlemenin artması ile birlikte yüzey pürüzlülük değerinin de arttığı görülmektedir. Bu artış 0.15 mm/dev ilerleme için %19.08 oranında olurken 0.2 mm/dev ilerleme için %36.26 seviyesinde olmuştur. İlerleme miktarının artması yüksek ilerleme kuvvetine, düşük kayma açısına ve kaldırılan talaş hacminin artmasına neden olduğundan yüzey pürüzlülüğü üzerinde olumsuz bir etki bırakmaktadır [30]. Yapılan çalışmalar yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrelerin ilerleme ve kesici takım burun yarıçapı olduğunu göstermiştir [221], [230], [231]. Ayrıca, literatürde ilerlemedeki artışla yüzey pürüzlülüğünde de artışın beklenen bir durum olduğu ve yüzeyi iyileştirmek için ilerleme değerinin azaltılması gerektiği belirtilmektedir [231]. Bu konu ile ilgili yürütülen çalışmalar incelendiğinde, ilerleme miktarı arttıkça kesme kuvvetlerinin ve buna bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür [232].

8.2.3.2. İşlenmiş Yüzeyin Karakterizasyonu

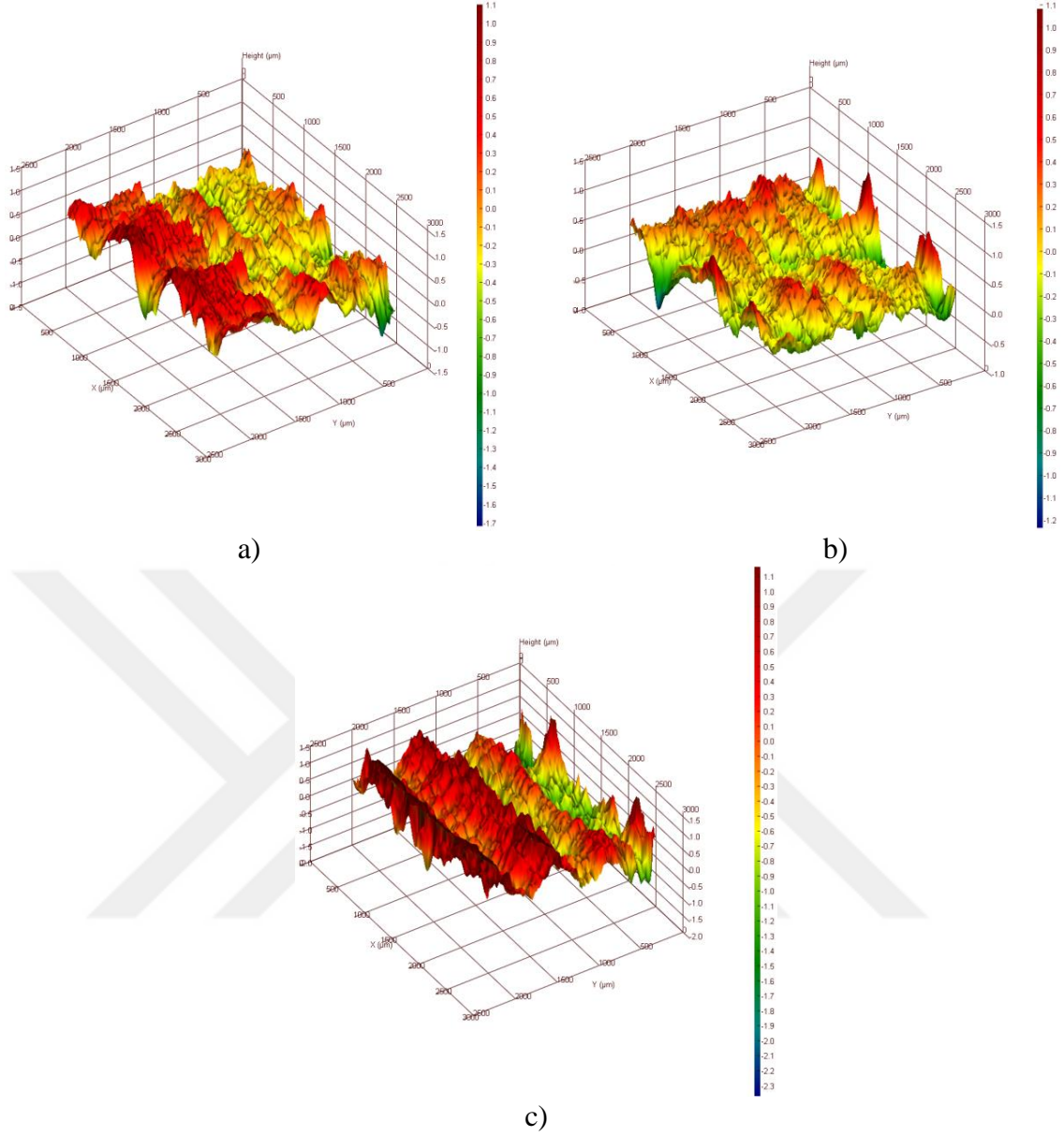
Çalışmanın bu bölümünde, deney sürecinin başında L_{27} ile yapılan deneylerin analizi sonucu elde edilen optimum yüzey parametresinden sonra optimum kesme hızı ve optimum ilerleme altında bir dizi deney yürütülerek kaplama türü ve soğutma-yaglama yönteminin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda kesme hızı 30 m/dak ve ilerleme 0.1mm/dev sabit tutulmuştur. Her deney için daha önce kullanılmamış bir uç seçilmiştir.

Kaplama türünün yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi; kaplama türünün yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin araştırıldığı deneyler esnasında en belirgin farkı vermesi beklenen kuru işleme yöntemi tercih edilmiş, aynı şartlar ve işleme süreleri altında tek değişken olarak kaplama türü seçilmiştir. Şekil 8.35'te kaplamasız karbür kesici uç, PVD (TiAlN) kaplamalı karbür kesici uç ve CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalı karbür kesici uç kullanılarak kuru işleme altında sürdürülen işlenebilirlik deneylerinde elde edilmiş yüzeyin fotoğrafları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 8.35. Kuru işleme ile elde edilmiş yüzeylerin iki boyutlu fotoğrafı, a) kaplamasız karbür, b) PVD (TiAlN) kaplamalı karbür c) CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalı karbür.

Şekil 8.35 incelendiğinde, kesici takımlardaki kaplama değişikçe yüzey pürüzlülüğünün de değişiklik gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, en iyi yüzeyin PVD (TiAlN) kaplamalı takımlarla elde edilen yüzey olduğu görülmektedir (Şekil 8.35b). Yüzey pürüzlülüğü değeri en yüksek yüzeyin ise kaplamasız takımlarla elde edildiği görülmektedir (Şekil 8.35a). Kesici takımlardaki aşınma miktarının artması ile işlenmiş yüzeyin kalitesinin doğru orantılı olduğu bilindiğinden deney sonuçları ile yüzey pürüzlülük değerleri paralellik göstermektedir. Kaplamasız takımlarla yapılan deneyler referans alınıp yüzdesel olarak bakıldığında PVD (TiAlN) kaplamalı takımlarla yürütülen deneylerden elde edilen yüzey pürüzlülük değerinde %26.32'lik bir iyileşme olduğu görülmektedir. CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalı takımlarla yürütülen deneylerdeki iyileşme ise %15.79 olarak çıkmaktadır. Şekil 8.36'da farklı kaplamalı karbür takımlarla kuru işleme altında gerçekleştirilen yüzey pürüzlülük deneylerine ait 3D yüzey topoğrafyası verilmiştir.

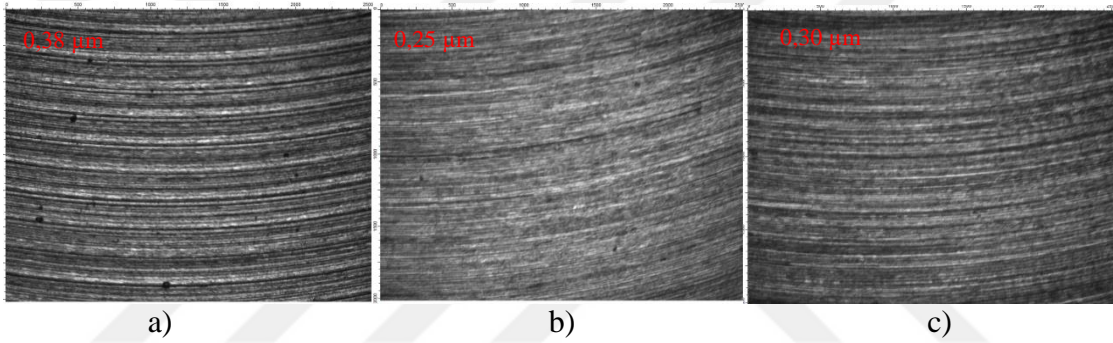


Şekil 8.36. Kuru işleme ile elde edilmiş yüzeylerin 3D yüzey topografyası, a) kaplamasız karbür, b) PVD (TiAlN) kaplamalı karbür c) CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalı karbür.

Genel olarak yüzeye ait bir topoğrafya tribolojik davranış konusunda önemli bir fikir vermektedir [230]. Bu nedenle işlenmiş yüzeylerin topoğrafya grafiği çıkarılmıştır. Şekil 8.36 incelendiğinde, en derin girinti ve çıkıntılarının olduğu yüzey haritasının kaplamasız takımlarla yürütülen deneylerle elde edildiği görülmektedir (Şekil 8.36a). CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalı karbür takımlarla yürütülen deneylerde yüzeyde derin girinti ve çıkıntılarının olduğu görülmektedir (Şekil 8.36c). PVD (TiAlN) kaplamalı karbür takımlarla elde edilen yüzeyin ise diğer iki yüzeye nazaran daha az girinti çıkıntı oluşturduğu görülmektedir (Şekil 8.36b). Kaplama ile birlikte kesici takımların performansının arttığı bilinmektedir [234]. Yüzeylerdeki bu farklılığın temel sebebinin

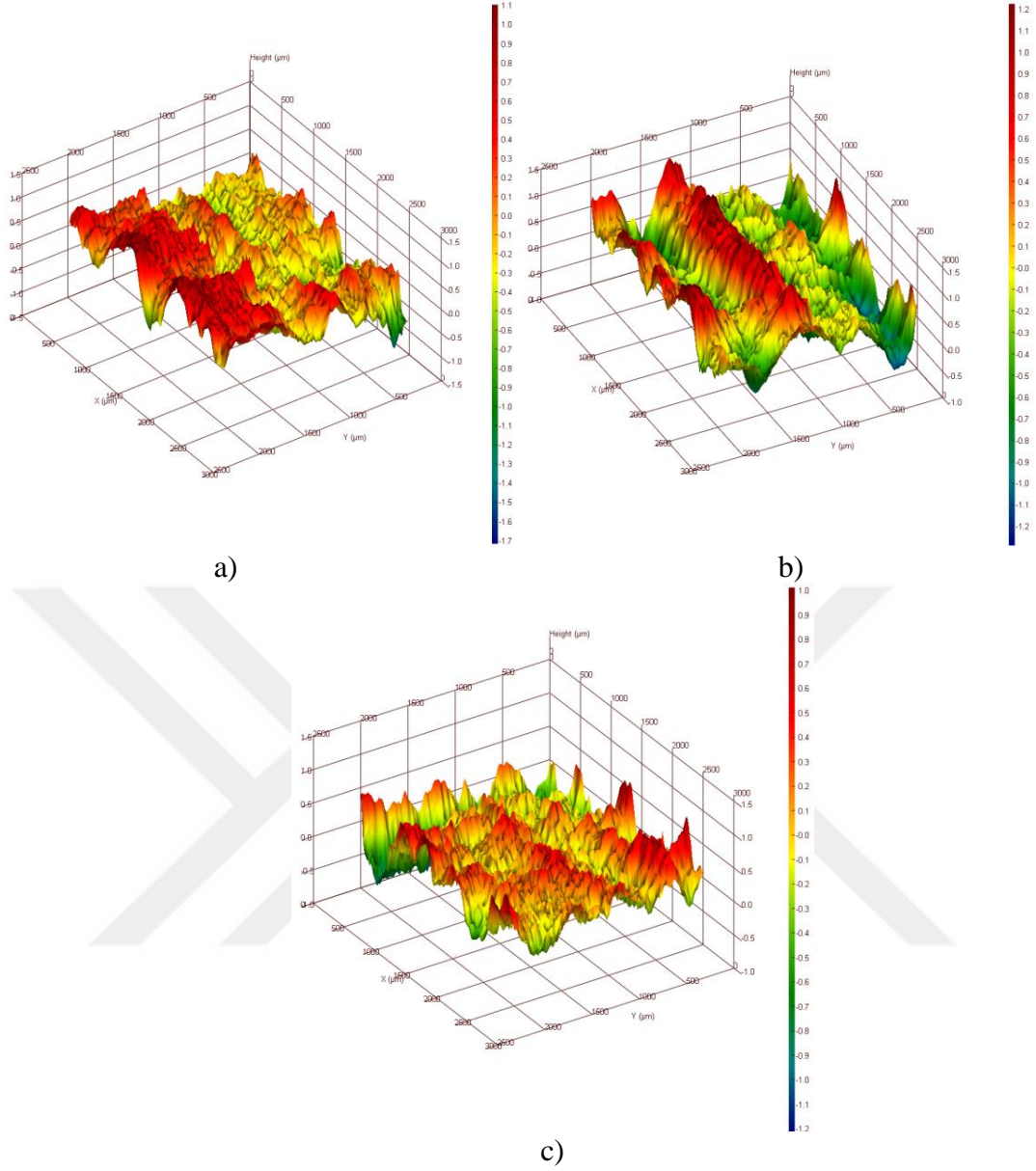
kesici takımlardaki aşınmaya başlama sürecindeki değişiklik olduğu, aşınma derinleştikçe yüzeylerdeki dalgalanmanın arttığı düşünülmektedir. Kaplama sayesinde aşınmaya karşı daha dayanıklı olan kesici takımlar işlenmiş yüzeyin kalitesinde de önemli değişikliklere sebep olmaktadır [235].

Soğutma-yağlama yönteminin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi; soğutma-yağlama yöntemindeki değişikliğin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin araştırıldığı deneyler esnasında en belirgin farkı vermesi beklenen kaplamasız karbür takım tercih edilmiş, aynı kesici takım ve işleme süreleri altında tek değişken olarak soğutma-yağlama yöntemi seçilmiştir. Şekil 8.37’de kuru işleme, ıslak işleme ve MMY sistemi altında kaplamasız karbür takım kullanılarak sürdürülen işlenebilirlik deneylerinde elde edilmiş yüzeyin iki boyutlu fotoğrafları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 8.37. Kaplamasız karbür takım ile elde edilmiş yüzeylerin iki boyutlu yüzey fotoğrafı, a) kuru işleme, b) ıslak işleme c) MMY ile işleme.

Şekil 8.37 incelendiğinde, en fazla yüzey pürüzlülüğüne sahip yüzeyin kuru işleme altında elde edildiği görülmektedir (Şekil 8.37a). En az yüzey pürüzlülüğüne sahip yüzey ise ıslak işleme altında elde edilmiştir (Şekil 8.37b). Bunun yanında, MMY sistemi altında yapılan deneyler sonucunda elde edilen yüzeyin ıslak işlemeye yakın bir durum sergilediği görülmektedir (Şekil 8.37c). Bu durum yürütülen ana deneylerdeki yüzey pürüzlülük sonuçlarıyla da paralellik göstermektedir. Kuru işleme referans alınıp yüzdesel olarak bakıldığında ıslak işleme ile elde edilen yüzey pürüzlülük değerinde %34.21’lik bir iyileşme olduğu görülmektedir. Yine kuru işlemenin referansında MMY sistemi altında yürütülen deneylerdeki iyileşme %21.05 olarak çıkmaktadır. Şekil 8.38’de farklı kaplamasız karbür takımlar ve farklı soğutma-yağlama yöntemi altında gerçekleştirilen yüzey pürüzlülük deneylerinin 3D yüzey topografyası verilmiştir.



Şekil 8.38. Kaplamasız karbür takım ile elde edilmiş yüzeylerin 3D yüzey topografyası, a) kuru işleme, b) ıslak işleme c) MMY ile işleme.

Kuru işleme altında farklı soğutma-yağlama yöntemleri altında yürütülmüş frezeleme deneylerindeki yüzey pürüzlülük değerlerine ait 3D yüzey topografyasının verildiği Şekil 8.38 incelendiğinde, en derin girinti ve çıkıntılarının olduğu yüzey haritasının kuru işleme altında yürütülen deneylerle elde edilen yüzey değerleri olduğu görülmektedir (Şekil 8.38a). Kuru işleme altında ortaya çıkan plastik deformasyon ve yapışma yüzey pürüzlülük değerinin yüksek çıkma nedeni olarak düşünülmektedir. Islak işleme altında elde edilen yüzeylerin 3D topografya grafiği incelendiğinde, bir bölgede çıkıntı görülmesine rağmen genel itibariyle dalgalanma hem kuru işleme altında elde edilen yüzeylerden hem de MMY sistemi altında elde edilen yüzeylerden daha az olduğu

görülmektedir (Şekil 8.38b). Soğutma sıvısı kullanımının işlenen yüzeyin kalitesi ve boyutsal doğruluğu sağlama açısından önemli bir etken olduğu literatürde yoğun olarak yer alan ve bilinen bir durumdur [227]. Soğutma sıvıları, kimyasal ve fiziksel özellikleri nedeniyle talaş kaldırma esnasında ortaya çıkan ısıl ve mekanik hasarların azalmasını veya tamamen ortadan kaldırmasını sağlamaktadır [122]. MMY sistemi altında yapılan yüzey pürüzlülük deneyine ait 3D yüzey topografyası incelendiğinde elde edilen yüzey dalgalanmalarının kuru işlemeden daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 8.38c). Bir başka deyişle kuru işleme altında elde edilen yüzey pürüzlülüğü MMY sistemi altında elde edilen yüzey pürüzlülüğünden daha yüksektir.

8.2.3.3. ANOVA

ANOVA sonuçları Çizelge 8.28’de verilmiştir. Analiz %95 güven seviyesi dikkate alınarak yapılmıştır. P değerinin 0.05’den küçük olması faktörün çıktı üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu kabul edilmesi anlamına geldiğinden kesici takım tipi, soğutma-yaglama yöntemi ve ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerinde belirli bir etkiye sahip olduğunu söylenebilir. Faktörlerin etki düzeylerinin (katkı oranı) belirlenmesinde ise yine tabloda yer alan F değerleri dikkate alınmıştır. Çizelge 8.28 incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde faktör A, B, C ve D’nin yüzde katkıları sırasıyla %12.2, %31.2, %4.0 ve %34.4 olarak bulunmuştur. Bu veriler ışığında mevcut girdi değerleri içerisinde yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli faktörün ilerleme (D) olduğu görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü için hata yüzdesi %18.1 bulunmuştur. İstatistiksel analiz sonuçları incelendiğinde deneysel çalışmadan elde edilen sonuçları doğrular nitelikte olduğu görülmektedir.

Çizelge 8.28. Anova tablosu.

| Faktörler | Serbestlik derecesi | Kareler toplamı | Kareler ortalaması | F değeri | P değeri | Katkı oranı (%) |
|-----------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|-----------------|
| A | 2 | 0.014 | 0.0071 | 6.06 | 0.010 | 12.2 |
| B | 2 | 0.036 | 0.018 | 15.48 | 0.000 | 31.2 |
| C | 2 | 0.0047 | 0.0024 | 2.01 | 0.163 | 4.0 |
| D | 2 | 0.040 | 0.020 | 17.10 | 0.000 | 34.4 |
| Hata | 18 | 0.021 | 0.0012 | - | - | 18.1 |
| Toplam | 26 | 0.11 | - | - | - | 100 |

8.2.3.4. Regresyon Analizi

Yüzey pürüzlülüğü denklemleri, kontrol seviyelerine bağlı olarak kesici takım kaplama türü, soğutma-yaglama yöntemi, kesme hızı ve ilerleme parametreleri esas alınarak

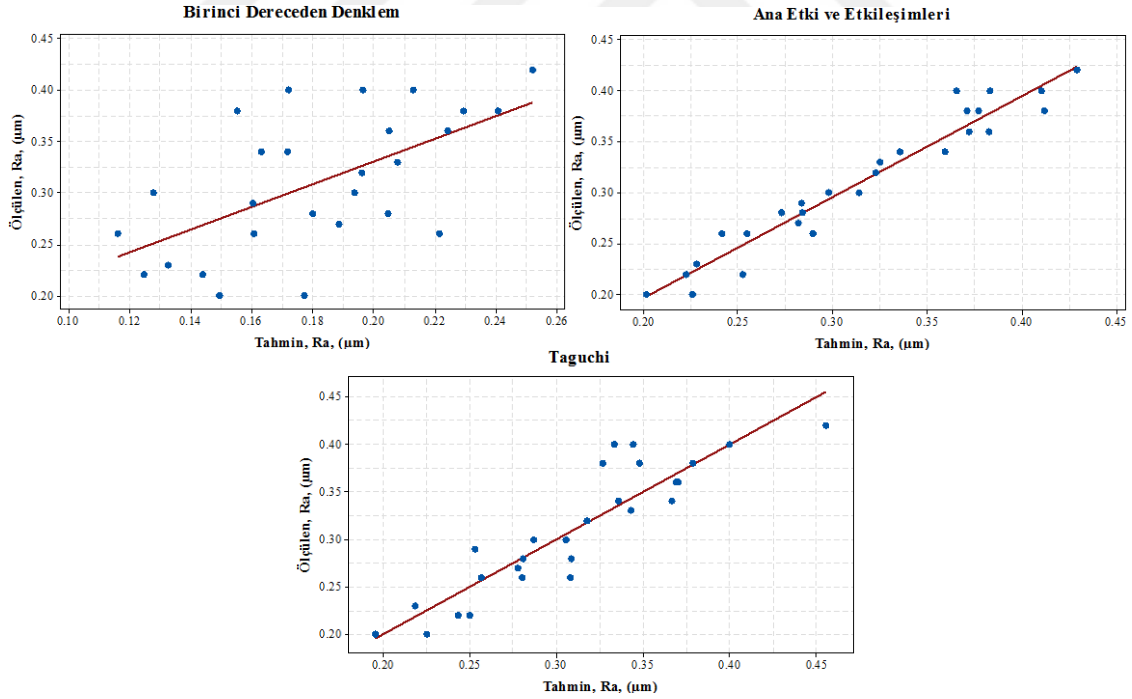
oluşturulmuştur. Sadece kontrol faktörlerinin ana etkileriyle oluşturulan birinci dereceden denklem;

$$Ra = 0.2665 - 0.0211KT - 0.378SYY + 0.000444V + 0.0944f \quad (8.23)$$

olarak elde edilmiştir. Elde edilen birinci dereceden denklemin belirleme katsayısı $R^2=0.640$ olarak hesaplanmıştır. %95 güvenilirlik düzeyinde birinci derece denklemlerle elde edilen tahminsel yüzey pürüzlülüğü ile deneysel çalışmalarla elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri arasındaki farklar fazla olacağından faktör etkileşimlerini de kapsayan denklem;

$$Ra = 1.12 - 0.204KT - 0.24SYY - 0.018V - 0.71f + 0.032KT^2 + 0.042SYY^2 + 0.000114012V^2 - 1.11f^2 - 0.0113KTxSYY + 0.0006521KTxV + 0.03161KTxf + 0.0012SYYxV + 0.018SYYxf + 0.02933Vxf \quad (8.24)$$

olarak elde edilmiştir. Bu denklemin belirleme katsayısı $R^2=0.948$ olarak bulunmuştur. Şekil 8.39'da deneysel sonuçlar ile tahmin modelleri ile elde edilen tahminlerin karşılaştırılması görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi gerçek değerlere en yakın tahmin denklemi ana etki ve etkileşimlerine ait denklemdir.



Şekil 8.39. Ölçülen değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması.

8.2.3.5. Doğrulama Deneyleri

Yüzey pürüzlülüğüne ait optimum parametre grubu deneylerden farklı olarak $A_2B_2C_2D_1$ şeklinde elde edilmiştir. Değer tahmininde Eşitlik (8.25) kullanılmıştır.

$$Ra_{opt} = (A_2 - T_{Ra}) + (B_2 - T_{Ra}) + (C_2 - T_{Ra}) + (D_1 - T_{Ra}) + T_{Ra} \quad (8.25)$$

Burada, (A_2, B_2, C_2, D_1) yüzey pürüzlülüğünün optimum seviyedeki ortalama değerlerini vermektedir (Çizelge 8.29). T_{Ra} değeri ise deneysel çalışma sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerini temsil etmektedir (Çizelge 8.26). Hesaplamalar sonucunda Ra_{opt} değeri $0.1966 \mu\text{m}$ olarak bulunmuştur.

Çizelge 8.29. Yüzey pürüzlülüğü için ortalama yanıt tablosu.

| Seviyeler | Kontrol faktörleri | | | |
|-----------|--------------------|---------------|---------------|---------------|
| | A | B | C | D |
| Seviye 1 | 0.3422 | 0.3622 | 0.3122 | 0.2622 |
| Seviye 2 | 0.2889 | 0.2822 | 0.2933 | 0.3122 |
| Seviye 3 | 0.3000 | 0.2867 | 0.3256 | 0.3567 |
| Delta | 0.0533 | 0.0800 | 0.0322 | 0.0944 |

Optimizasyonun yeterince doğru olup olmadığını denetlemek için Eşitlik (8.5) ve Eşitlik (8.6) kullanılarak tahmini güven aralığı hesaplanmıştır. Elde edilen değerler yerine konularak yüzey pürüzlülüğü deneyleri için güven aralığı $CI_{Ra} = \pm 0.07$ bulunmuştur. %95 güven aralığında tahmini yüzey pürüzlülüğü değeri Eşitlik (8.15)'te yerine konularsa;

$$[0.1966 - 0.07] < 0.20 < [0.1966 + 0.07] = 0.1266 < 0.20 < 0.2666 \text{ şeklinde olur.}$$

Deneysel olarak elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri güven aralığı sınırları içerisinde çıkmıştır. Böylece, sistem optimizasyonu 0.05 anlamlılık düzeyinde elde edilmiştir.

Çizelge 8.30'da deney sonuçları ile regresyon denklemleri ve Taguchi metodu aracılığıyla elde edilen tahmin değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Doğrulama deney sonuçları incelendiğinde elde edilen sonuçların yeterli olduğu ve Taguchi optimizasyonunun başarılı olduğu söylenebilir.

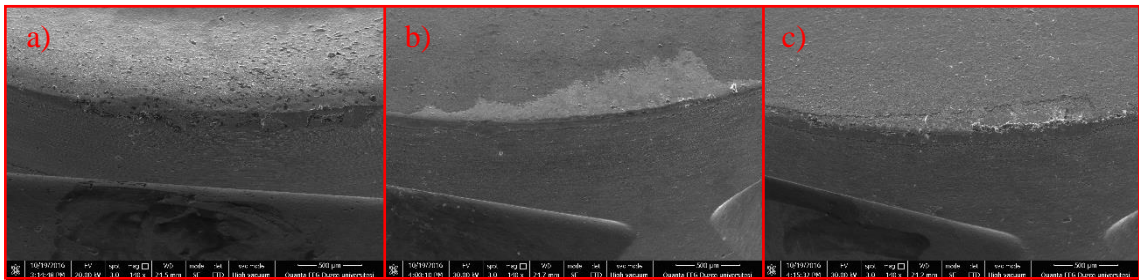
Çizelge 8.30. Doğrulama deneyi sonuçları.

| Seviye | Birinci Dereceden Denklem | | | Ana Etki ve Etkileşimlerine Ait Denklem | | | Taguchi Denklemi | | |
|---|---------------------------|--------|----------|---|--------|----------|------------------|--------|----------|
| | Deney | Tahmin | Hata (%) | Deney | Tahmin | Hata (%) | Deney | Tahmin | Hata (%) |
| A ₂ B ₂ C ₂ D ₁ | 0.20 | 0.18 | 10 | 0.20 | 0.20 | 0.00 | 0.20 | 0.20 | 0.00 |
| A ₁ B ₃ C ₁ D ₃ | 0.34 | 0.16 | 52.94 | 0.34 | 0.34 | 0.00 | 0.34 | 0.37 | 8.82 |
| A ₃ B ₁ C ₂ D ₁ | 0.30 | 0.19 | 36.67 | 0.30 | 0.30 | 0.00 | 0.30 | 0.29 | 3.33 |

8.2.4. Genel Değerlendirme

Karbür kesici takımlar referans alınarak kesme parametrelerinin takım ömrü, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin incelenmesinin amaçlandığı bu bölümde giriş faktörleri kesici takım kaplama türü, kesme hızı, ilerleme olarak seçilmiş ve kesme derinliği sabit tutulmuştur.

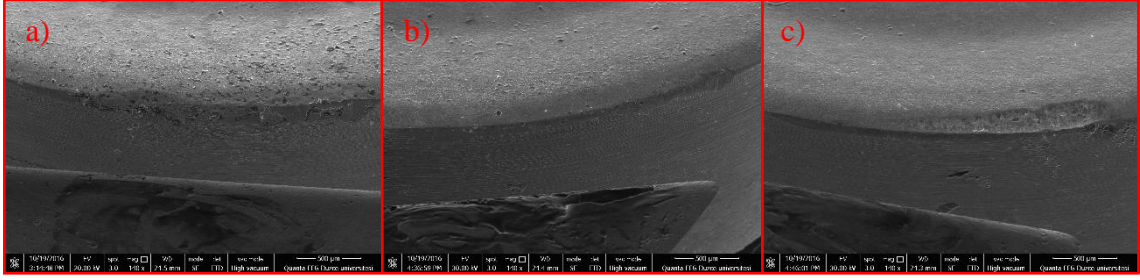
Deney sonuçları analiz edildiğinde, takım ömrü ve kesme kuvveti açısından optimum parametre grubu; PVD (TiAlN) kaplamalı karbür takım, ıslak işleme, 30 m/dak kesme hızı ve 0.1 mm/dev olurken yüzey pürüzlülüğü açısından optimum parametre grubunun PVD (TiAlN) kaplamalı karbür takım, ıslak işleme, 45 m/dak kesme hızı ve 0.1 mm/dev olduğu görülmüştür. Şekil 8.40'da kuru işleme altında 30 m/dak kesme hızı ve 0.1 mm/dev ilerleme ile yapılan ve kaplama türünün takım ömrü üzerindeki etkilerini gösteren 140x yakınlıkta çekilmiş SEM fotoğrafları verilmiştir. SEM fotoğraflarında çıkan sonuçlar diğer deney sonuçlarını doğrular niteliktedir.



Şekil 8.40. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve kuru işleme altında aşınmış farklı kaplamalı karbür takım yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Kaplamasız b) PVD (TiAlN) kaplama c) CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplama.

Soğutma-yağlamanın etkisi literatüre uygun olarak en olumlu durum ıslak işlemede görülmesine rağmen MMY sisteminin etkisi de ıslak işlemeye yakın çıkmıştır. Bu da araştırmacılara MMY sistemini ıslak işlemeye bir alternatif olarak sunmaktadır. Şekil 8.41'de kuru işleme altında 30 m/dak kesme hızı ve 0.1 mm/dev ilerleme ile yapılan ve soğutma-yağlama yönteminin takım ömrü üzerindeki etkilerini gösteren SEM fotoğrafları

verilmiştir. SEM fotoğraflarında çıkan sonuçlar diğer deney sonuçlarını doğrular niteliktedir.



Şekil 8.41. 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve soğutma-yağlama yöntemleri altında aşınmış kaplamasız karbür takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) kuru işleme b) ıslak işleme c) MMY sistemi ile işleme.

Takım ömrü ve kesme kuvvetinde kesme hızı arttıkça kötüleşme meydana gelirken yüzey pürüzlülüğünde düşük ve yüksek kesme hızlarında yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmüştür. Takım ömrü açısından faktörlerin etki sıralamasına bakıldığında en etkili faktörün kaplama tipi olduğu bunu sırasıyla soğutma-yağlama yöntemi, kesme hızı ve ilerlemenin takip ettiğini söylemek mümkündür. Takım ömrü açısından ilerlemenin etkisinin çok küçük olarak karşımıza çıktığını da söylemek gerekir. Kesme kuvveti açısından etki sıralaması sırasıyla soğutma-yağlama yöntemi, ilerleme, kesici takım kaplama türü ve kesme hızı şeklinde sıralandığını söylemek mümkündür. Yüzey pürüzlülüğü açısından faktörlerin etki sıralaması ise sırasıyla ilerleme, soğutma yağlama yöntemi, kesici takım kaplama türü ve kesme hızı şeklindedir. Deney sonuçlarına bakıldığında literatürle paralellik arz etmektedir.

8.3. SERAMİK KESİCİ UÇLARIN OPTİMİZASYONU

Çalışmanın bu bölümünde seramik uçlar kullanılarak Waspaloy süper alaşımının frezelenmesi işleminde kesici takım takviye türü, soğutma-yağlama yöntemi, kesme hızı ve ilerlemenin takım aşınması, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, Taguchi L_{27} ortogonal dizini aracılığıyla 27 adet deney yapılmıştır. Giriş parametresi olarak; üç farklı seramik kesici türü (alümina esaslı, whiskers takviyeli, sialon esaslı), üç farklı soğutma-yağlama yöntemi (kuru, ıslak, MMY), üç farklı kesme hızı (500 m/dak, 600 m/dak, 700 m/dak) ve üç farklı ilerleme (0.02 mm/dev, 0.04 mm/dev, 0.06 mm/dev) değeri kullanılırken kesme derinliği 0.5 mm olarak sabit tutulmuştur.

8.3.1. Takım Aşınması

Seramik kesicilerle yapılan deneyler, toplamda kaldırılan talaş hacmi sabitlenerek gerçekleştirilmiştir. Yapılan ön deneyler neticesinde bu değer 1125 mm^3 olarak seçilmiştir. Kesici takımındaki aşınma miktarının ölçüldüğü bu deneyler ISO 8688-1 standardında önerilen esas kesme kenarı yanak yüzeyinde oluşmuş bölgesel yanak aşınması 0.8 mm değeri dikkate alınmıştır. Ancak, deneyler esnasında kaldırılan talaş hacminin sabit tutulması nedeniyle, kesici takımındaki aşınmanın bu değere yaklaşma ya da geçme durumu olarak hesaplanmıştır. Ve böylece kesici takım tipi, kesme hızı ve ilerleme hızının değişimi soğutma/yağlama koşullarına bağlı olarak değerlendirilmiştir. Takım ömrü ve aşınmanın değerlendirilmesinde kesici takımlarda meydana gelen aşınma durumu her paso sonunda dijital mikroskop ile ölçülerek değerlendirilmesi ve SEM ile çekilmiş üç boyutlu kesici takım fotoğraflarının incelenmesi olmak üzere iki aşamada yürütülmüştür.

Çalışmanın amacı en küçük aşınma değerini elde etmek olduğundan S/N oranlarının hesaplanması için Eşitlik (8.8)'de sunulan “en küçük en iyi” kullanılmıştır. Kontrol faktörlerinin seviyeleri, yapılan işlenebilirlik deneyleri sonucu elde edilen takım ömürleri ve S/N oranları Çizelge 8.31’de sunulmuştur. Yapılan frezeleme deneyleri sonucunda ortalama aşınma değeri 1.03 mm olarak elde edilirken S/N oranlarının ortalama değeri 2.93 dB olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 8.31. Deney sonuçları ve S/N oranları.

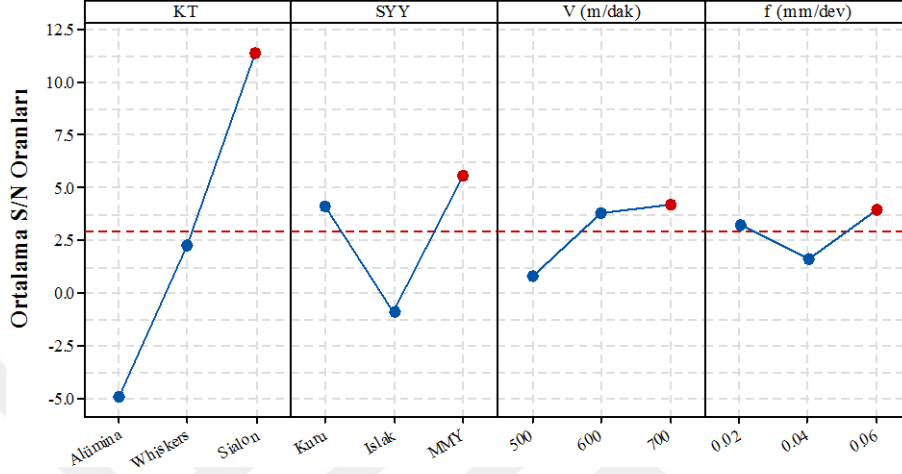
| Den. No. | Kontrol faktörleri | | | | Aşınma Miktarı, (mm) | S/N oranı (dB) |
|----------|---------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------------------|----------------------|----------------|
| | A Kesici takım (KT) | B Soğutma/Yağlama Yöntemi (SYY) | C Kesme hızı (V) (m/dak) | D İlerleme hızı (f) (mm/dev) | | |
| 1 | Alümina | Kuru | 500 | 0.02 | 2.59 | -8.28 |
| 2 | Alümina | Kuru | 600 | 0.04 | 1.64 | -4.29 |
| 3 | Alümina | Kuru | 700 | 0.06 | 0.73 | 2.70 |
| 4 | Alümina | Islak | 500 | 0.04 | 3.17 | -10.02 |
| 5 | Alümina | Islak | 600 | 0.06 | 3.10 | -9.83 |
| 6 | Alümina | Islak | 700 | 0.02 | 1.43 | -3.11 |
| 7 | Alümina | MMY | 500 | 0.06 | 1.21 | -1.66 |
| 8 | Alümina | MMY | 600 | 0.02 | 1.55 | -3.82 |
| 9 | Alümina | MMY | 700 | 0.04 | 1.94 | -5.76 |
| 10 | Whiskers | Kuru | 500 | 0.04 | 0.72 | 2.81 |
| 11 | Whiskers | Kuru | 600 | 0.06 | 0.61 | 4.24 |
| 12 | Whiskers | Kuru | 700 | 0.02 | 0.89 | 0.99 |
| 13 | Whiskers | Islak | 500 | 0.06 | 1.37 | -2.74 |
| 14 | Whiskers | Islak | 600 | 0.02 | 0.43 | 7.41 |
| 15 | Whiskers | Islak | 700 | 0.04 | 1.51 | -3.60 |
| 16 | Whiskers | MMY | 500 | 0.02 | 0.84 | 1.48 |
| 17 | Whiskers | MMY | 600 | 0.04 | 0.67 | 3.45 |
| 18 | Whiskers | MMY | 700 | 0.06 | 0.48 | 6.38 |
| 19 | Sialon | Kuru | 500 | 0.06 | 0.29 | 10.66 |
| 20 | Sialon | Kuru | 600 | 0.02 | 0.20 | 14.15 |
| 21 | Sialon | Kuru | 700 | 0.04 | 0.20 | 14.15 |
| 22 | Sialon | Islak | 500 | 0.02 | 0.82 | 1.73 |
| 23 | Sialon | Islak | 600 | 0.04 | 0.59 | 4.63 |
| 24 | Sialon | Islak | 700 | 0.06 | 0.42 | 7.62 |
| 25 | Sialon | MMY | 500 | 0.04 | 0.22 | 13.15 |
| 26 | Sialon | MMY | 600 | 0.06 | 0.12 | 18.27 |
| 27 | Sialon | MMY | 700 | 0.02 | 0.12 | 18.42 |

Deneyler sonucu elde edilen verilerin S/N oranları optimize edilmiştir. Çizelge 8.32’de takım aşınması için S/N tablosu verilmiştir ve optimum takım aşınması değerleri için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri görülmektedir.

Çizelge 8.32. S/N yanıt tablosu.

| Seviyeler | Kontrol faktörleri | | | |
|-----------|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| | A | B | C | D |
| Seviye 1 | -4.89 | 4.13 | 0.79 | 3.22 |
| Seviye 2 | 2.27 | -0.88 | 3.80 | 1.61 |
| Seviye 3 | 11.42 | 5.55 | 4.20 | 3.96 |
| Delta | 16.31 | 6.43 | 3.40 | 2.35 |

En düşük aşınma değerini veren faktörlere ait seviyeler ve S/N oranları; faktör A (Seviye 3, S/N= 11.42 dB), faktör B (Seviye 3, S/N=5.55 dB), faktör C (Seviye 3, S/N=4.20 dB) ve faktör D (Seviye 3, S/N=3.96 dB) olarak belirlenmiştir (Çizelge 8.32). Ayrıca Şekil 8.42’de takım aşınması değerleri için kontrol faktörlerinin S/N oranları ana etki grafiği verilmiştir.

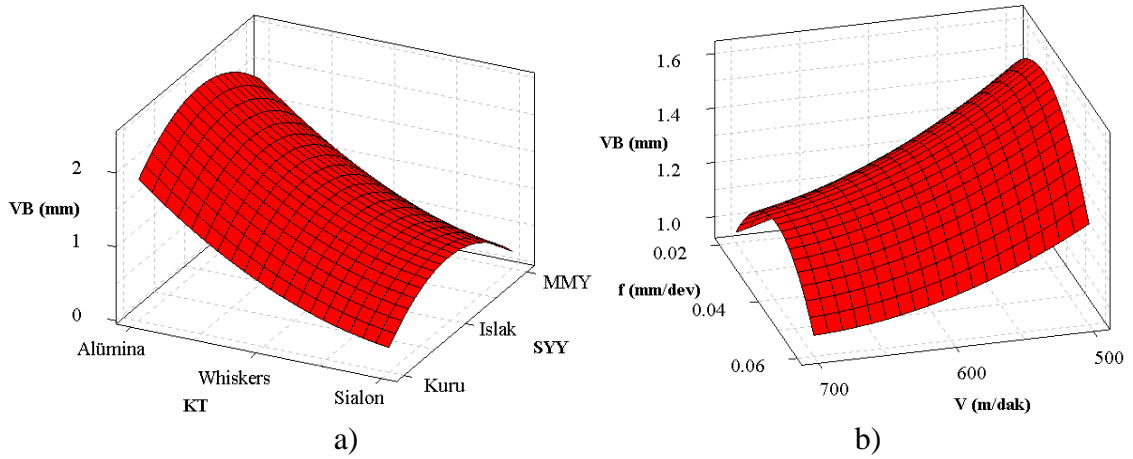


Şekil 8.42. S/N oranları ana etki grafiği.

Şekil 8.42 incelendiğinde en düşük aşınma değerini veren optimum kesme parametrelerinin; sialon esaslı seramik kesici uç (A_3), MMY sistemi altında işleme (B_3), 700 m/dak kesme hızı (C_3) ve 0.06 mm/dev ilerleme (D_3) olduğu görülmektedir.

8.3.1.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Waspaloy süper alaşımının farklı kesme parametreleri altında frezelenmesi işleminde aşınma miktarı ile diğer ana faktör etkileşimlerinin üç boyutlu yüzey grafikleri Şekil 8.43’de verilmiştir.



Şekil 8.43. Giriş parametrelerine bağlı olarak aşınmanın değişimi, a) Kesici takım tipi ve soğutma-yağlama yöntemi b) Kesme hızı ve ilerleme.













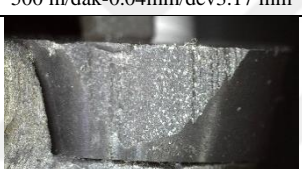

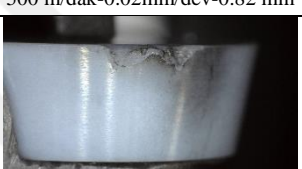
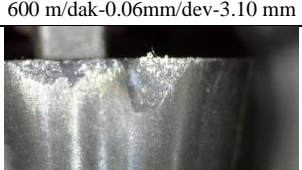

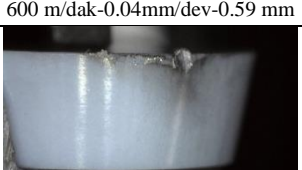




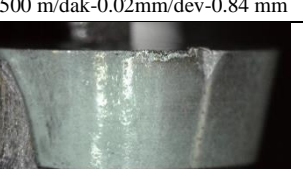
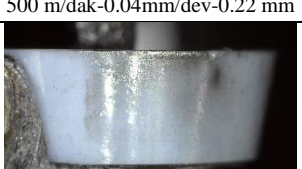

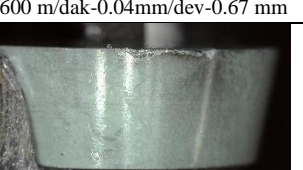
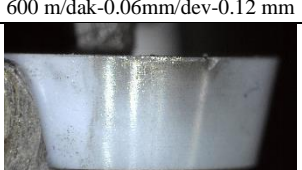
Şekil 8.43a'daki aşınma ile kesici takım tipi arasındaki ilişki incelendiğinde, en düşük aşınma değerinin sialon esaslı seramik kesici uçlarda olduğu görülmektedir. Alümina esaslı takımlar ile yapılan deneylerden elde edilen ortalama aşınma değerleri whiskers takviyeli takımlar ve sialon esaslı takımlar ile yapılan deneyler ile karşılaştırıldığında takım aşınmasında iyileşme sırasıyla %56.48 ve %83.90 oranlarında olmuştur. Seramik kesici takımlar, karbür kesici takımlarla kıyaslandığında sundukları yüksek kesme şartı nedeniyle nikel esaslı süper alaşımların işlenmesinde yoğun olarak tercih edilmektedirler [12]. Sialonlar daha çok nikel esaslı süper alaşımların kaba işleme operasyonları için uygun olmakla birlikte, Inconel 718, Waspaloy ve Incoloy 901 gibi nikel esaslı süper alaşımların tornalama ve frezeleme operasyonlarında da kullanılmaktadırlar [236]. Sialon esaslı seramikler daha iyi mekaniksel dayanım sağladıkları için geleneksel ya da karma alümina takımlara göre daha iyi performans göstermektedirler [237], [238].

Şekil 8.43a'da yer alan ve takım aşınması ile soğutma-yağlama yöntemi arasındaki ilişkiyi gösteren bölüm incelendiğinde en düşük aşınmanın MMY sistemi ile elde edildiği, en yüksek aşınmanın da ıslak işleme ile elde edildiği görülmektedir. Kuru işleme ile yapılan deneylerle elde edilen sonuçlar ıslak işleme ile karşılaştırıldığında takım aşınması %64.37 artarken MMY ile işleme ile karşılaştırıldığında %9.20 iyileşme görülmüştür. MMY sistemi birinci kesme bölgesinde ve talaş-takım ile takım-iş parçası ara yüzeyindeki ısıyı minimize ettiği için nikel esaslı süper alaşımların işlenmesinde kesici takımların performansına olumlu katkıda bulunmaktadır. Özellikle yüksek basınçlarda soğutma-yağlama sisteminin avantajı verimli bir şekilde segmentli talaş oluşumu, soğutma ve yağlama sağlamak suretiyle takım ömrünün artmasını sağlamasıdır [236].

Islak işleme kuru işlemeden daha kötü sonuç vermiştir. Geleneksel soğutma sıvısı yani bir başka deyişle ıslak işleme seramik takımlar için tavsiye edilen bir soğutma-yağlama yöntemi değildir [240].

Şekil 8.43b’de yer alan kesici takım türü ile kesme hızı arasındaki ilişkiyi gösteren bölüm incelendiğinde, kesme hızındaki artış aşınmanın azalmasına neden olmuştur. 500 m/dak kesme hızı ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ile 600 m/dak ve 700 m/dak kesme hızı ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında takım aşınmasındaki azalma sırasıyla %20.8 ve %31.2 oranlarında olmuştur. Yüksek hızlarda kesme kenarındaki sıcaklık artışı iş parçası malzemesinin takım kesme kenarına basınçla kaynak olmasına neden olur. Kaynak olmuş malzemede sonraki rastgele kopmalar takım parçacıkları birikintilerini hareket ettirir bu da seramik takımın aşınmasını artırır. İş parçası malzemesinin basınçla kaynağı da mümkün olmaktadır. Çünkü yüksek kesme şartlarında iş parçası ve takım arasındaki ara yüzey sıcaklığı nikel esaslı süper alaşımın ergime noktası aralığına ulaşmaktadır. Nikel esaslı süper alaşımların uzun süre yüksek kesme şartlarında işlenmesi yeni oluşturulmuş yüzeylerin yumuşaması ile sonuçlanmakta ve iş parçası malzemesinin takıma adhezyonu ile birlikte takımda aşınma oluşmaya başlamaktadır [12]. Literatürde de kesme hızının aşınma üzerindeki en önemli parametrelerden biri olduğu görülmektedir [209].

Şekil 43b’de yer alan ve kesici takım aşınmasının ilerleme ile ilişkisini gösteren kısım incelendiğinde, en düşük ilerleme değeri ile en yüksek ilerleme değerinde nispeten daha düşük aşınma değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Şekil 8.44’de deneyler sonucunda kesici takımların dijital mikroskopla elde edilmiş görüntüsü ve aşınma süreleri verilmiştir. Şekil 8.44 incelendiğinde, deney sonuçları ile paralellik göstermektedir. Bir başka deyişle, en fazla aşınma ıslak işleme şartında meydana gelirken en az aşınma MMY sistemi altında işlemede meydana gelmiştir.

| | Alümina | Whiskers | Sialon |
|-------|---|--|---|
| Kuru |  |  |  |
| | 500 m/dak-0.02mm/dev-2.59 mm | 500 m/dak-0.04mm/dev-0.72 mm | 500 m/dak-0.06mm/dev-0.29 mm |
| |  |  |  |
| | 600 m/dak-0.04mm/dev-1.64 mm | 600 m/dak-0.06mm/dev-0.61 mm | 600 m/dak-0.02mm/dev-0.20 mm |
| |  |  |  |
| | 700 m/dak-0.06mm/dev-0.73 mm | 700 m/dak-0.02mm/dev-0.89 mm | 700 m/dak-0.04mm/dev-0.20 mm |
| Islak |  |  |  |
| | 500 m/dak-0.04mm/dev-3.17 mm | 500 m/dak-0.06mm/dev-1.37 mm | 500 m/dak-0.02mm/dev-0.82 mm |
| |  |  |  |
| | 600 m/dak-0.06mm/dev-3.10 mm | 600 m/dak-0.02mm/dev-0.43 mm | 600 m/dak-0.04mm/dev-0.59 mm |
| |  |  |  |
| | 700 m/dak-0.02mm/dev-1.43 mm | 700 m/dak-0.04mm/dev-1.51 mm | 700 m/dak-0.06mm/dev-0.42 mm |
| MMY |  |  |  |
| | 500 m/dak-0.06mm/dev-1.21 mm | 500 m/dak-0.02mm/dev-0.84 mm | 500 m/dak-0.04mm/dev-0.22 mm |
| |  |  |  |
| | 600 m/dak-0.02mm/dev-1.55 mm | 600 m/dak-0.04mm/dev-0.67 mm | 600 m/dak-0.06mm/dev-0.12 mm |
| |  |  |  |
| | 700 m/dak-0.04mm/dev-1.94 mm | 700 m/dak-0.06mm/dev-0.48 mm | 700 m/dak-0.02mm/dev-0.12 mm |




Şekil 8.44. Seramik kesici uçların aşınma fotoğrafları ve aşınma miktarları (x50).

8.3.1.2. Aşınmanın Karakterizasyonu

Freze ile talaş kaldırma işleminde kesici takımın yaptığı dönme hareketinden dolayı kesici takım talaş kaldırdıktan sonra boşa çıktığı için darbeli bir talaş kaldırma işlemi oluşmaktadır. Bu nedenden ötürü diğer talaş kaldırma işlemleri olan tornalama ve delmenin aksine çentikleme yâda kırılma sık görülen bir aşınma tipidir. Seramik kesiciler yeterince tok olmadığından mekanik ve termal yükler karşısından karbür takımlardan daha farklı bir aşınma karakterizasyonu göstermektedir. Karbür kesiciler daha tok ve darbeyi absorbe edebilme özellikleri nedeniyle daha düzenli bir aşınma gösterirken seramik kesiciler kırılma yapılarından ötürü daha çok çentiklenme, çatlama ve kırılma şeklinde aşınma göstermişlerdir.

Deney tasarımının tam faktöriyel olmaması faktör etkileşimlerinin bütün sonuçlarını verememektedir. Bu dezavantajı ortadan kaldırıp sağlıklı bir karşılaştırma işlemi yapabilmek için ana deneyler sonucunda ortaya çıkan optimum kesme parametrelerinin etkisi ile kesme hızı 700 m/dak ve ilerleme 0.06 mm/dev değerlerinde sabit tutularak kesici takım takviye türü ve soğutma-yağlama yönteminin etkisini görmek amacıyla bir dizi yeni deney yürütülmüştür. Deneyler sırasında kaldırılan toplam talaş hacmi 1125 mm³ olarak sabit tutulmuştur.

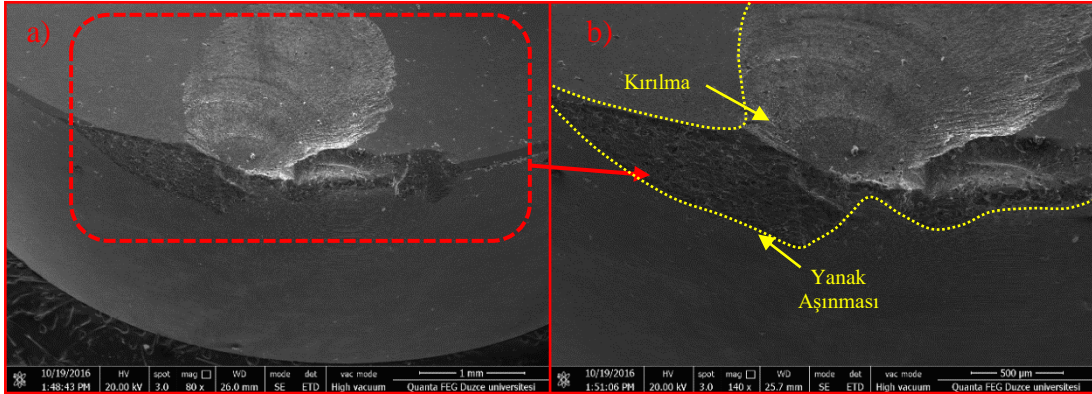
Takviye türünün aşınma üzerindeki etkisi; takviye türünün etkisinin araştırıldığı deneyler esnasında en belirgin farkı vermesi beklenen kuru işleme yöntemi tercih edilmiş, aynı şartlar ve işleme hacmi altında tek değişken olarak takviye türü seçilmiştir. Şekil 8.45'te kuru işleme şartında takviye türünün aşınma üzerindeki etkisi verilmiştir.

| | Alümina | Whiskers | Sialon |
|------|---|--|---|
| Kuru |  |  |  |
| | 0.697 mm | 0.575 mm | 0.232 mm |

Şekil 8.45. Kuru işleme altında takviye türünün aşınma üzerine etkisi (x50).

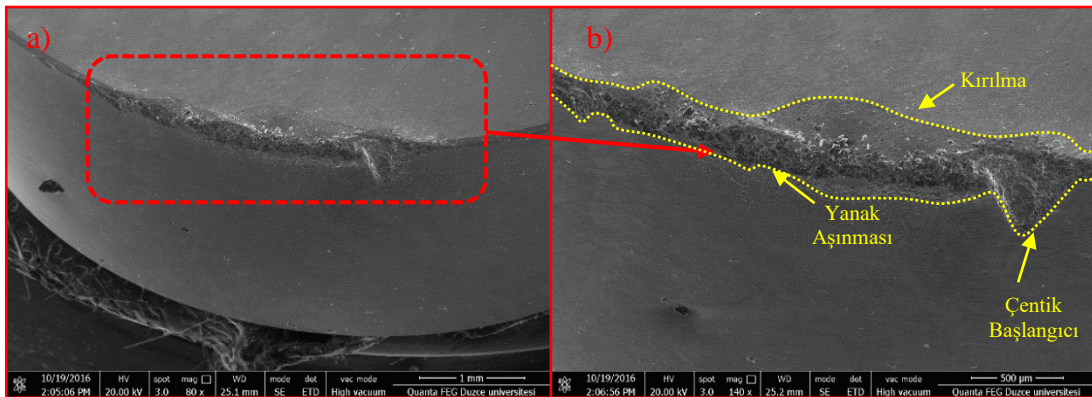
Şekil 8.45 incelendiğinde, aşınma açısından en iyi sonucu sialon esaslı seramik kesici takımın verdiği görülürken en kötü sonucun alümina esaslı seramik takım aracılığıyla alındığı görülmektedir. Kesici takımların aynı işleme parametreleri ve aynı işleme hacmindeki aşınma miktarlarının incelenmesinden sonra aşınma davranışlarını incelemek üzere SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 8.46'da alümina esaslı seramik kesici uç

kullanılarak kuru işleme altında sürdürülen işlenebilirlik deneylerinde kesici takım aşınmasına ait SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 8.46. 700 m/dak kesme hızı, 0.06 mm/dev ilerleme ve kuru işleme ile aşınmış alümina esaslı takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140.

Şekil 8.46 incelendiğinde, düzensiz bir yanak aşınması görülürken kesici ağız noktasında ve kesici ağız noktasının üst bölgesinde makro düzeyde kırılmalar meydana gelmiştir. 1125 mm³ hacminde kaldırılan talaş sonunda kesici takımın yan yüzeyinde 0.697 mm'lik bir yanak aşınması oluşmuş ve kesici takım kullanılmaz hale gelmiştir. Alümina esaslı seramik kesicilerle yapılan ön deneylerde, ana deney ve tekrar deneylerinde kırılma aşınması görülmüştür. Bu da literatürle paralellik göstermektedir [241]. Şekil 8.47'de whiskers takviyeli seramik kesici uç kullanılarak kuru işleme şartlarında sürdürülen işlenebilirlik deneylerinde kesici takım aşınmasına ait SEM görüntüleri verilmektedir.

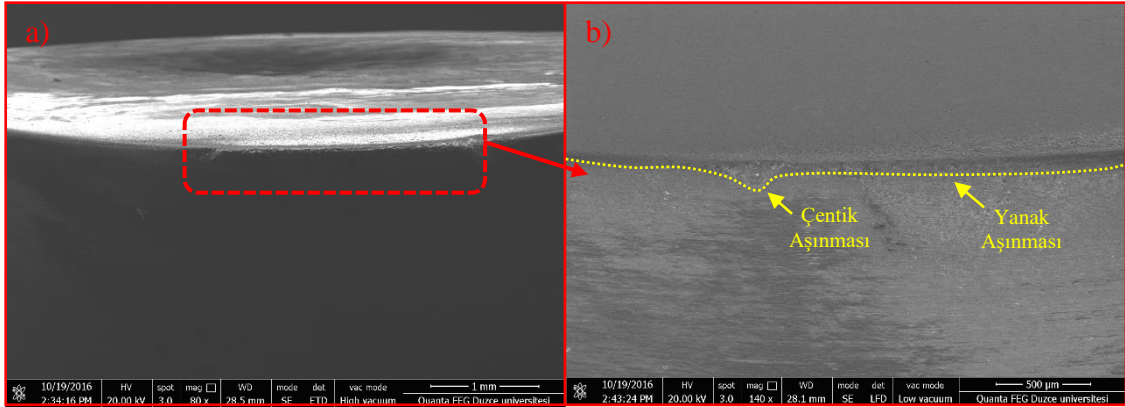


Şekil 8.47. 700 m/dak kesme hızı, 0.06 mm/dev ilerleme ve kuru işleme ile aşınmış whiskers takviyeli takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140.

Şekil 8.47 incelendiğinde, kesici takımın kesme kenarı boyunca yanak aşınması meydana geldiği, yanak aşınmasının bittiği noktadan ise çentik aşınması olduğu görülmektedir. Ayrıca, abrasif aşınma mekanizmasının etkisiyle kesici takımdan kopmalar meydana geldiği görülmüştür. Bütün bunlarla beraber Şekil 8.47b incelendiğinde, kesici kenarın

üst bölgesinde mikro kırılmalar meydana geldiği görülmektedir.




Şekil 8.48'de sialon esaslı seramik kesici uç kullanılarak kuru işleme şartlarında sürdürülen işlenebilirlik deneylerinde kesici takım aşınmasına ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 8.48. 700 m/dak kesme hızı, 0.06 mm/dev ilerleme ve kuru işleme ile aşınmış sialon esaslı takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140.

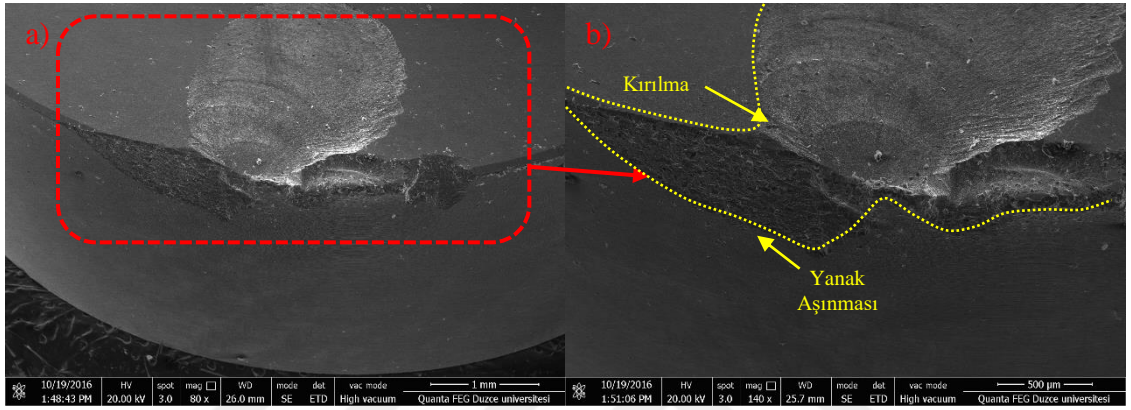
Sialon esaslı seramik uçlardaki aşınmanın SEM fotoğraflarını gösteren Şekil 8.48 incelendiğinde, kesici kenar boyunca düzenli bir yanak aşınmasının olduğu belirgin olarak görülmektedir. Ayrıca, kesme kenarının başlangıcında ve bitiminde çentik oluşumu meydana geldiği, çentik aşınmasının artması ile birlikte mikro düzeyde kırıklar oluştuğu görülmektedir.

Soğutma-yağlama yönteminin aşınma üzerindeki etkisi; soğutma-yağlama yöntemleri arasındaki farkı belirlemek amacıyla en belirgin farkı vermesi beklenen alümina esaslı seramik kesiciler tercih edilmiştir, aynı şartlar ve işleme hacmi altında tek değişken olarak soğutma-yağlama yöntemi seçilmiştir. Şekil 8.49'da alümina esaslı seramik kesici takımla yürütülen deneylerde soğutma-yağlama yönteminin aşınma üzerindeki etkisi verilmiştir.

| | Kuru | Islak | MMY |
|---------|---|--|---|
| Alümina |  |  |  |
| | 0.697 mm | 3.17 mm | 0.594 |

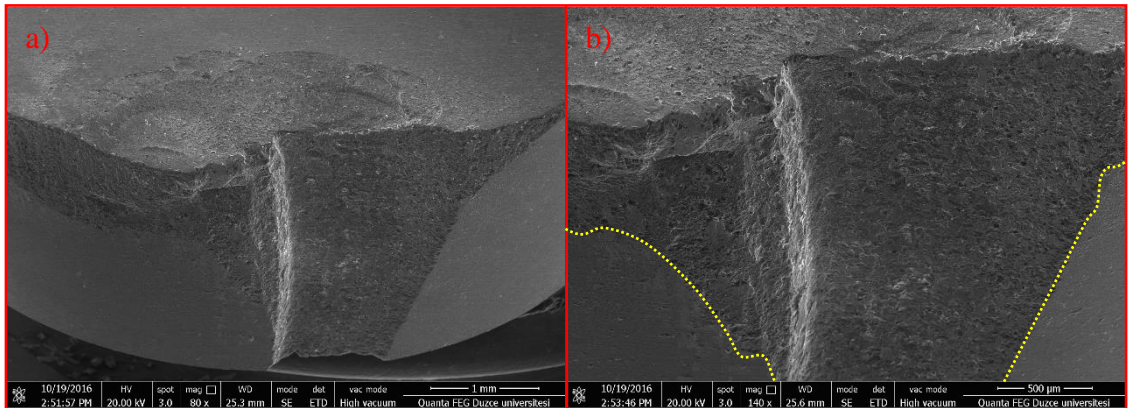
Şekil 8.49. Farklı soğutma-yağlama yöntemleri ile alümina esaslı seramik kesici uçların aşınma durumları (x50).

Şekil 8.49 incelendiğinde, en yüksek aşınmanın ıslak işleme altında meydana geldiği, ıslak işleme altında yürütülen deneylerde kullanılan kesici takımın boydan boya bir kırılmaya maruz kaldığı görülmektedir. 1125 mm³ talaş hacmi için ıslak işleme ile talaş kaldırmada kesici takımda boydan boya bir aşınma görülürken bu değer kuru işlemede 0.697 mm uzunluğundadır. MMY sistemi altında yapılan talaş kaldırma işlemine ait deney sonuçları incelendiğinde en az aşınmanın gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 8.50'de alümina esaslı seramik kesici uç kullanılarak kuru işleme altında sürdürülen işlenebilirlik deneylerinde kesici takım aşınmasına ait SEM görüntüleri verilmektedir.



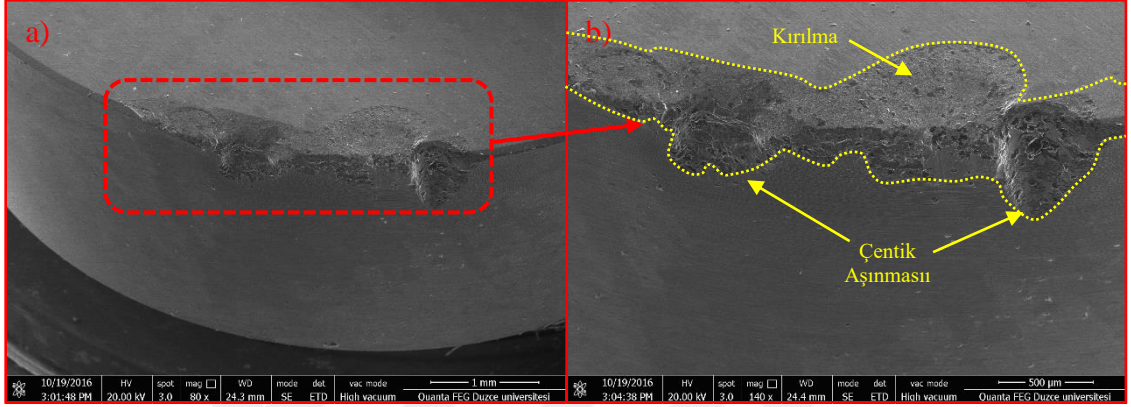
Şekil 8.50. 700 m/dak kesme hızı, 0.06 mm/dev ilerleme ve kuru işleme ile aşınmış alümina esaslı takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140.

Şekil 8.50 incelendiğinde, etkin takım aşınmasının düzensiz yanak aşınması ve kırılma olduğu görülmüştür. Şekil 8.51'de alümina esaslı seramik kesici uç kullanılarak ıslak işleme şartlarında sürdürülen işlenebilirlik deneylerinde kesici takım aşınmasına ait SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 8.51. 700 m/dak kesme hızı, 0.06 mm/dev ilerleme ve ıslak işleme ile aşınmış alümina esaslı takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140.

Alümina esaslı seramik kesici takımdaki aşınmasının SEM fotoğrafını gösteren Şekil 8.51 incelendiğinde, kesici takımda boydan boya bir kırılma meydana geldiği görülmektedir. Üretici firma ve literatürde seramik takımlar için kesme sıvısı kullanımı kaçınılması gereken bir durum olduğu belirtilmektedir ve bu durum deney sonuçları ile paralellik göstermektedir. Şekil 8.52’de alümina esaslı seramik kesici uç kullanılarak MMY sistemi altında sürdürülen işlenebilirlik deneylerinde kesici takım aşınmasına ait SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 8.52. 700 m/dak kesme hızı, 0.06 mm/dev ilerleme ve MMY sistemi ile aşınmış alümina esaslı takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) x80 b) x140.

Şekil 8.52 incelendiğinde, kesme bölgesindeki kırılmaların hem kuru işleme hem de ıslak işlemeye nazaran daha az olduğu görülmektedir. Ayrıca, aşınma türü diğer işleme şartlarına göre daha düzenli bir şekilde seyretmiştir. Şekil 8.52b incelendiğinde, aşınma tipinin yanak aşınması olduğu, kesme kenarının başlangıç ve sonunda çentik aşınmasının olduğu, ıslak işleme ve kuru işleme kadar olmasa da kesme bölgesinin üst bölgesinde kopmaların olduğu görülmektedir.

8.3.1.3. ANOVA

Uygulanan deneyler sonucu elde edilen takım aşınması değerleri için ANOVA sonuçları Çizelge 8.33’de verilmiştir. Analiz %95 güven seviyesi dikkate alınarak yapılmıştır. P değerinin 0.05’den küçük olması faktörün çıktı üzerindeki etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu kabul edilmesi anlamına geldiğinden kesici takım tipi ve soğutma-yağlama yönteminin takım aşınması üzerinde belirli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Faktörlerin etki düzeylerinin belirlenmesinde ise yine tabloda yer alan F değerleri dikkate alınmıştır. Çizelge 8.33 incelendiğinde, takım aşınması üzerinde faktör A, B, C ve D’nin yüzdeler katkılarları sırasıyla %60.9, %20.9, %2.3 ve %0.1 olduğu görülmektedir. Bu veriler değerlendirildiğinde takım aşınmasını etkileyen en önemli

parametrenin kesici takım takviye türü (A) olduğu görülmektedir. Takım aşınması için hata yüzdesi %15.8 bulunmuştur.

Çizelge 8.33. Anova tablosu.

| Faktörler | Serbestlik derecesi | Kareler toplamı | Kareler ortalaması | F değeri | P değeri | Katkı oranı (%) |
|-----------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|-----------------|
| A | 2 | 26.0945 | 13.0472 | 34.78 | 0.000 | 60.9 |
| B | 2 | 8.9745 | 4.4873 | 11.96 | 0.000 | 20.9 |
| C | 2 | 0.9651 | 0.4826 | 1.29 | 0.301 | 2.2 |
| D | 2 | 0.0445 | 0.0222 | 0.06 | 0.943 | 0.1 |
| Hata | 18 | 6.7530 | 0.3752 | - | - | 15.8 |
| Toplam | 26 | 42.8316 | - | - | - | 100 |

8.3.1.4. Regresyon Analizi

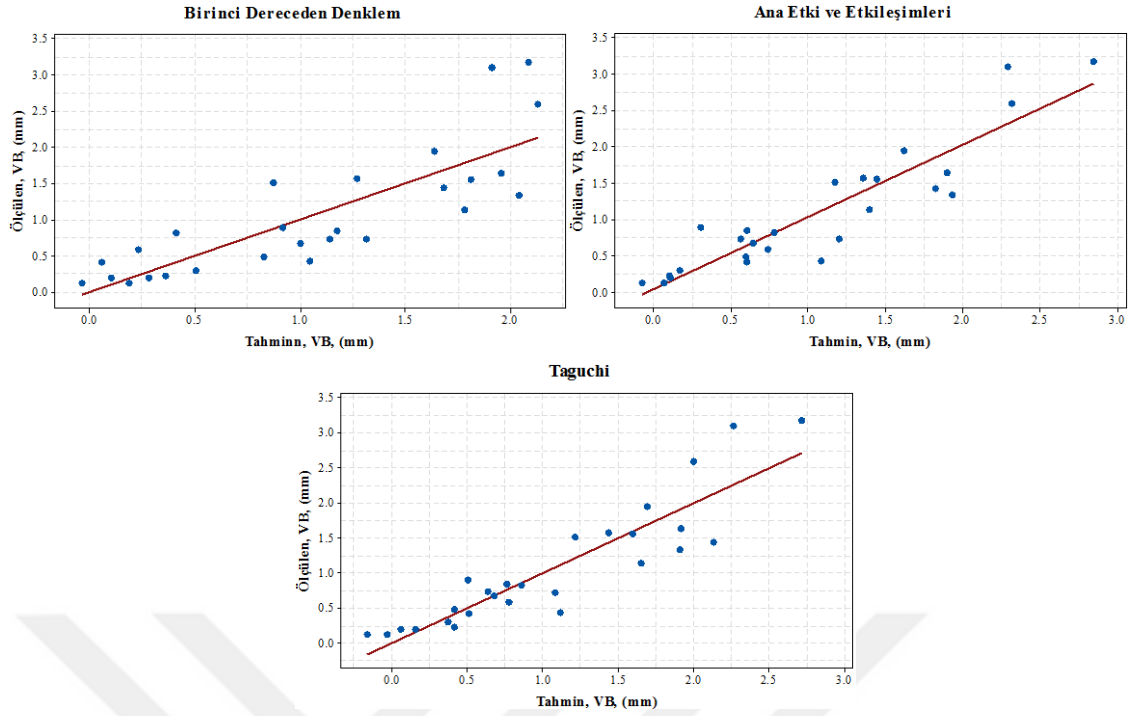
Takım aşınması denklemleri, kesici takım tipi, soğutma-yağlama yöntemi, kesme hızı, ilerleme parametreleri esas alınarak oluşturulmuştur. Sadece kontrol faktörlerinin ana etkileriyle oluşturulan birinci dereceden denklem;

$$V_B = 5.945 - 0.8KT - 0.04SYY - 0.00196V - 1.48f \quad (8.26)$$

olarak elde edilmiştir. Elde edilen denklemin belirleme katsayısı $R^2=0.632$ olarak hesaplanmıştır. %95 güvenilirlik düzeyinde birinci derece denklemlerle elde edilen tahminsel aşınma değerleri ile deneysel çalışmalarla elde edilen aşınma değerleri arasındaki farklar fazla olacağından faktör etkileşimlerini de kapsayan denklem;

$$\begin{aligned} V_B = & 9.38 - 2.93KT + 1.14SYY - 0.0176V + 25f + 0.292KT^2 - 0.590SYY^2 \\ & + 0.0000060V^2 - 571f^2 + 0.0090KT \times SYY + 0.001720KT \times V + 1.270KT \times f \\ & + 0.00178SYY \times V - 3.42YY \times f - 0.0248V \times f \end{aligned} \quad (8.27)$$

olarak elde edilmiştir. Bu denklemin belirleme katsayısı ise $R^2=0.829$ bulunmuştur. % 95 güvenilirlik ve %5 önem seviyesinde birinci dereceden ve kontrol faktörleri ve etkileşimlerinin de yer aldığı denklemle elde edilen aşınma değerleri ve deneysel çalışma sonucunda elde edilen aşınma değerlerinin karşılaştırılması Şekil 8.53'te verilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi gerçek değerlere en yakın tahmin denklemi ana etki ve etkileşimlerine ait denklemdir.



Şekil 8.53. Aşınma için ölçülen değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması.

8.3.1.5. Doğrulama Deneyleri

Bu çalışmada, optimum parametre grubu $A_3B_3C_3D_3$ şeklinde elde edilmiştir. Optimum aşınma tahmininde Eşitlik (8.28) kullanılmıştır.

$$VB_{opt} = (A_3 - T_{VB}) + (B_3 - T_{VB}) + (C_3 - T_{VB}) + (D_3 - T_{VB}) + T_{VB} \quad (8.28)$$

Burada, (A_3 , B_3 , C_3 , D_3) takım aşınmasının optimum seviyedeki ortalama değerlerini vermektedir (Çizelge 8.34). T_{VB} ise deneysel çalışma sonucu elde edilen ortalama takım aşınması değerini temsil etmektedir (Çizelge 8.31). Hesaplamalar sonucunda VB_{opt} değeri 0.41 mm olarak bulunmuştur.

Çizelge 8.34. Takım aşınması için ortalama yanıt tablosu.

| Seviyeler | Kontrol faktörleri | | | |
|-----------|--------------------|---------------|---------------|---------------|
| | A | B | C | D |
| Seviye 1 | 2.6424 | 0.9534 | 1.5562 | 1.3077 |
| Seviye 2 | 0.9047 | 2.1040 | 1.1977 | 1.3326 |
| Seviye 3 | 0.3299 | 0.8196 | 1.1231 | 1.2368 |
| Delta | 2.3126 | 1.2844 | 0.4331 | 0.0958 |

Çizelge 8.35’de deney sonuçları ile regresyon denklemleri ve Taguchi metodu aracılığıyla elde edilen tahmin değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Doğrulama deney sonuçları incelendiğinde elde edilen sonuçların yeterli olduğu ve Taguchi

optimizasyonunun başarılı olduğu söylenebilir.

Çizelge 8.35. Doğrulama deneyi sonuçları.

| Seviye | Birinci Dereceden Denklem | | | Ana Etki ve Etkileşimlerine Ait Denklem | | | Taguchi Denklemi | | |
|---|---------------------------|--------|----------|---|--------|----------|------------------|--------|----------|
| | Deney | Tahmin | Hata (%) | Deney | Tahmin | Hata (%) | Deney | Tahmin | Hata (%) |
| A ₃ B ₃ C ₃ D ₃ | 0.11 | 0.145 | 31.81 | 0.11 | 0.123 | 11.81 | 0.11 | 0.081 | 27.27 |
| A ₂ B ₂ C ₃ D ₂ | 1.51 | 1.073 | 28.94 | 1.51 | 1.494 | 1.05 | 1.51 | 1.587 | 5.09 |
| A ₃ B ₁ C ₁ D ₃ | 0.29 | 0.382 | 31.72 | 0.29 | 0.320 | 10.34 | 0.29 | 0.199 | 31.37 |

8.3.2. Kesme Kuvveti

Çalışmanın bu bölümünde en düşük kesme kuvveti değerlerini elde etmek için S/N oranlarının hesaplanmasında “en küçük en iyi” eşitliği için Eşitlik (8.6) kullanılmıştır. Kontrol faktörlerinin seviyeleri, yapılan işlenebilirlik deneyleri sonucu elde edilen F_r kuvveti ve S/N oranları Çizelge 8.36’da sunulmuştur. Yapılan frezeleme deneyleri sonucunda kesme kuvvetlerinin ortalama değeri 775.3 N olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde S/N oranlarının ortalama değeri -57.61 dB olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 8.36. Deney sonuçları ve S/N oranları.

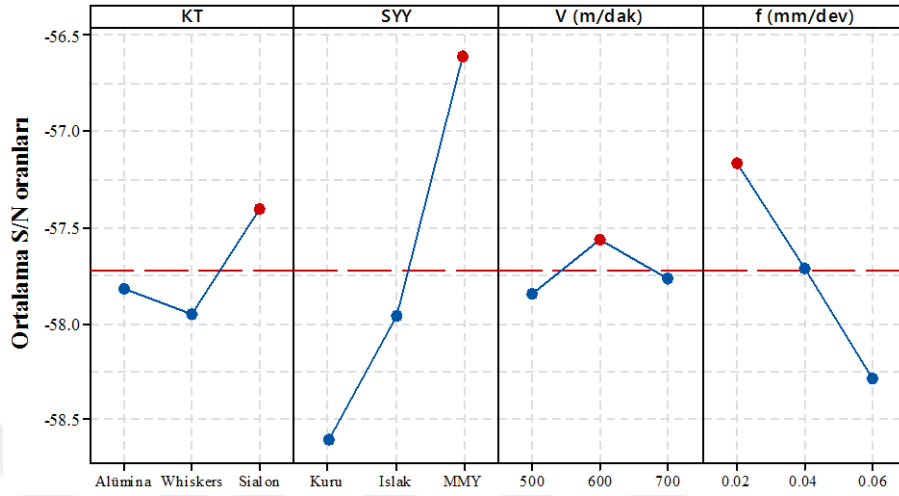
| Den. No. | Kontrol faktörleri | | | | Kesme Kuvveti, (N) | S/N oranı (dB) |
|----------|------------------------|------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------|----------------|
| | A Kesici takım (KT) | B Soğutma/Yağlama Yöntemi (SYY) | C Kesme hızı (V) (m/dak) | D İlerleme hızı (f) (mm/dev) | | |
| 1 | Alümina | Kuru | 500 | 0.02 | 811 | -58.18 |
| 2 | Alümina | Kuru | 600 | 0.04 | 836 | -58.44 |
| 3 | Alümina | Kuru | 700 | 0.06 | 938 | -59.44 |
| 4 | Alümina | Islak | 500 | 0.04 | 789 | -57.94 |
| 5 | Alümina | Islak | 600 | 0.06 | 831 | -58.39 |
| 6 | Alümina | Islak | 700 | 0.02 | 784 | -57.89 |
| 7 | Alümina | MMY | 500 | 0.06 | 756 | -57.57 |
| 8 | Alümina | MMY | 600 | 0.02 | 643 | -53.95 |
| 9 | Alümina | MMY | 700 | 0.04 | 659 | -54.95 |
| 10 | Whiskers | Kuru | 500 | 0.04 | 923 | -59.30 |
| 11 | Whiskers | Kuru | 600 | 0.06 | 948 | -59.54 |
| 12 | Whiskers | Kuru | 700 | 0.02 | 881 | -58.90 |
| 13 | Whiskers | Islak | 500 | 0.06 | 847 | -58.56 |
| 14 | Whiskers | Islak | 600 | 0.02 | 703 | -56.94 |
| 15 | Whiskers | Islak | 700 | 0.04 | 768 | -57.71 |
| 16 | Whiskers | MMY | 500 | 0.02 | 629 | -55.97 |
| 17 | Whiskers | MMY | 600 | 0.04 | 729 | -57.25 |
| 18 | Whiskers | MMY | 700 | 0.06 | 741 | -57.40 |
| 19 | Sialon | Kuru | 500 | 0.06 | 893 | -59.02 |
| 20 | Sialon | Kuru | 600 | 0.02 | 707 | -56.99 |
| 21 | Sialon | Kuru | 700 | 0.04 | 764 | -57.66 |
| 22 | Sialon | Islak | 500 | 0.02 | 749 | -57.49 |
| 23 | Sialon | Islak | 600 | 0.04 | 810 | -58.17 |
| 24 | Sialon | Islak | 700 | 0.06 | 846 | -58.54 |
| 25 | Sialon | MMY | 500 | 0.04 | 675 | -56.59 |
| 26 | Sialon | MMY | 600 | 0.06 | 642 | -56.80 |
| 27 | Sialon | MMY | 700 | 0.02 | 631 | -56.00 |

Deney tasarımına uygun şekilde elde edilen sonuçlar Taguchi metodu aracılığıyla S/N oranları ile optimize edilmiştir. Çizelge 8.37’de kesme kuvvetleri için S/N tablosu verilmiştir ve kesme kuvveti için kontrol faktörlerine ait optimum seviyeleri göstermektedir.

Çizelge 8.37. Kesme kuvveti için S/N yanıt tablosu.

| Seviyeler | Kontrol faktörleri | | | |
|-----------|--------------------|---------------|---------------|---------------|
| | A | B | C | D |
| Seviye 1 | -57.82 | -58.61 | -57.85 | -56.17 |
| Seviye 2 | -57.95 | -57.96 | -57.56 | -57.72 |
| Seviye 3 | -57.40 | -56.61 | -57.77 | -58.29 |
| Delta | 0.55 | 2.00 | 0.29 | 1.12 |

En iyi F_r değerini veren faktörlere ait seviyeler ve S/N oranları, faktör A (Seviye 3, S/N=-57.40 dB), faktör B (Seviye 3, S/N=-56.61 dB), faktör C (Seviye 2, S/N=-57.56 dB) ve faktör D (Seviye 1, S/N=-56.17 dB) olarak belirlenmiştir (Çizelge 8.37). Ayrıca Şekil 8.54'de F_r değerleri için kontrol faktörlerinin S/N oranları ana etki grafiği verilmiştir.

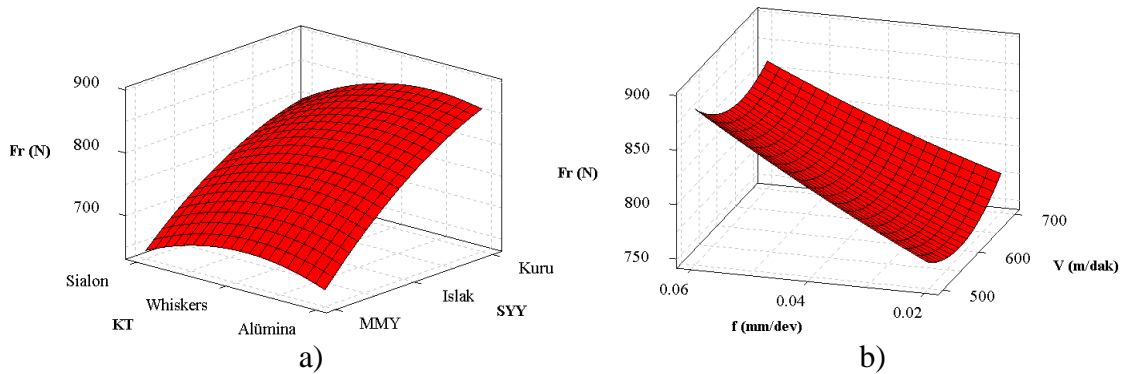


Şekil 8.54. S/N oranları ana etki grafiği.

Şekil 8.54 incelendiğinde, en düşük kesme kuvveti değerinin Sialon esaslı kaplamalı karbür kesici uç (A_3), MMY sistemi altında işleme (B_3), 600 m/dak kesme hızı (C_2) ve 0.02 mm/dev ilerleme (D_1) ile elde edildiği görülmüştür.

8.3.2.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Farklı kesme parametreleri altında yapılan frezeleme işleminde kesme kuvveti ile diğer ana faktör etkileşimlerinin arasındaki ilişkiyi gösteren üç boyutlu yüzey grafikleri Şekil 8.55'te verilmiştir.



Şekil 8.55. Giriş parametrelerine bağlı olarak kesme kuvvetinin değişimi, a) Kesici takım tipi ve soğutma-yaglama yöntemi b) Kesme hızı ve ilerleme.

Şekil 55a incelendiğinde, en düşük kesme kuvvetinin sialon esaslı seramik kesici uçlarla yapılan deneylerde elde edildiği görülmektedir. Alümina takımlar ile yürütülen deneylerden elde edilen kesme kuvveti değeri whiskers takviyeli takımlarda %1.73 oranında artarken sialon esaslı takımlar ile yapılan deneylerde %4.69 oranında azalmıştır. Kesme parametreleriyle beraber kesici takım geometrisi ve işlenen malzemenin sertliği de kesme kuvvetleri üzerinde önemli etkiye sahiptir [242]. Dolayısıyla, yuvarlak geometriye sahip takımların üçgen geometriye sahip takımlara nazaran işlenebilirliğe katkı açısından daha iyi sonuçlar verdiği dair bilgiler literatürde yer almaktadır [217], [243], [244]. Sialon esaslı kesiciler, yüksek hızlarda aşınmaya karşı daha fazla dayanım gösteren bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla kesme bölgesinde meydana gelen sıcaklık artışına karşı direnç göstermiş ve böylece kesme kuvvetleri düşük çıkmıştır [245]. Dahası, kesme bölgesinde takım-talaş ara yüzeyindeki temas yüzeyinin kısılması ve sürtünmenin azalması kesme kuvvetlerinin düşüşünde önemli rol oynamıştır. Sialon esaslı seramik kesici takımların kullanılması esnasında elde edilen düşük kesme kuvveti literatürle de paralellik göstermektedir [187], [246]-[248].

Soğutma-yağlama sisteminin kesme kuvveti üzerindeki etkisini gösteren kısım incelendiğinde, en düşük kesme kuvvetinin MMY sistemi ile yapılan talaş kaldırma işleminde elde edildiği görülmektedir (Şekil 55a). Bu durum, ıslak işlemin seramik takımlar için tavsiye edilen bir soğutma-yağlama yöntemi olmaması ile ilişkilendirilmiştir [34]. Kuru işleme ile yapılan deneylerle elde edilen sonuçlar ıslak işleme ve MMY ile işleme ile karşılaştırıldığında sırasıyla %7.45 ve %20.73 oranlarında iyileşme görülmüştür.

Şekil 55b'de yer alan ve kesme hızı ile kesme kuvveti arasındaki ilişkiyi gösteren bölüm incelendiğinde, 500 m/dak kesme hızında yüksek kesme kuvveti çıkarken 600 m/dak kesme hızında kesme kuvveti azalmış 700 m/dak kesme hızında yine artma eğilimine girmiştir. Düşük kesme hızlarında yüksek kesme kuvveti çıkması bilinen bir durumken yüksek kesme hızlarında kesme kuvveti artışı iş parçası kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıkların kesici takım üzerinde oluşturduğu serbest kenar ve çentik aşınmalarıyla ilişkilendirmiştir [249]. Bir başka deyişle, düşük kesme hızlarında kesici takımda meydana gelen aşınmanın kesme kuvvetini artırdığı, yüksek hızlarında ise kesme kenarındaki sıcaklık artışı iş parçası malzemesinin takım kesme kenarına basınçla kaynak olmasına neden olması ve böylece kesme kuvvetinin artması ile açıklanabilir [12]. 500 m/dak kesme hızı ile yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ile 600 m/dak ve 700

m/dak kesme hızı ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında kesme kuvvetindeki azalma sırasıyla %3.15 ve %0.85 oranlarında olmuştur.

Şekil 55b'de yer alan ve kesme kuvvetinin ilerleme ile ilişkisini gösteren kısım incelendiğinde, düşük ilerleme değerinde kesme kuvvetinin daha düşük olduğu, ilerlemenin artması ile birlikte kesme kuvvetinin de arttığı görülmektedir. Bu artış 0.04 mm/dev ilerleme için %6.35 oranında olurken 0.06 mm/dev ilerleme için %13.83 seviyesinde olmuştur. İlerlemenin artışı ile kesme kuvvetindeki artış değerlendirildiğinde, ilerlemenin artması ile birlikte kaldırılan talaş hacmi artmış ve böylece kesme kuvvetinin arttığı görülmüştür. Bu durum literatürle paralellik arz etmektedir [250].

8.3.2.2. ANOVA

Kesme kuvveti deneyleri için ANOVA sonuçları Çizelge 8.38'de verilmiştir. Çizelge 8.38 incelendiğinde kesme kuvveti üzerinde faktör A, B, C, ve D'nin yüzde katkıları sırasıyla %5.1, %60.9, %1.3, ve %19.1 olarak bulunmuştur. Bu veriler ışığında kesme kuvvetini etkileyen en önemli faktörün soğutma-yağlama yöntemi (B) olduğu görülmektedir. F_r için hata yüzdesi %13.6 bulunmuştur. İstatistiksel analiz sonuçları incelendiğinde deneysel çalışmadan elde edilen sonuçları doğrular nitelikte olduğu görülmektedir.

Çizelge 8.38. Anova tablosu.

| Faktörler | Serbestlik derecesi | Kareler toplamı | Kareler ortalaması | F değeri | P değeri | Katkı oranı (%) |
|-----------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|-----------------|
| A | 2 | 12148 | 6074 | 3.36 | 0.057 | 5.1 |
| B | 2 | 145192 | 72596 | 40.21 | 0.000 | 60.9 |
| C | 2 | 2972 | 1486 | 0.82 | 0.455 | 1.3 |
| D | 2 | 45488 | 22744 | 12.60 | 0.000 | 19.1 |
| Hata | 18 | 32497 | 1805 | - | - | 13.6 |
| Toplam | 26 | 238296 | - | - | - | 100 |

8.3.2.3. Regresyon Analizi

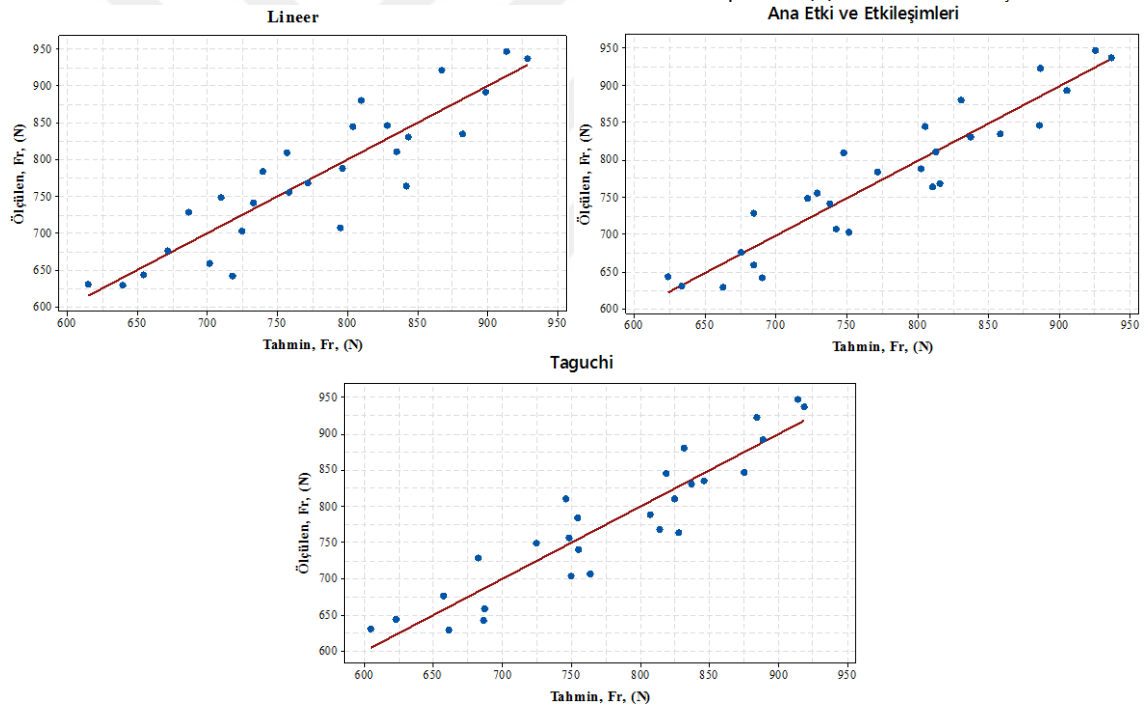
Kesme kuvveti denklemleri, kontrol seviyelerine bağlı olarak kesici takım kaplama tipi, soğutma-yağlama yöntemi, kesme hızı ve ilerleme parametreleri esas alınarak oluşturulmuştur. Sadece kontrol faktörlerinin ana etkileriyle oluşturulan birinci dereceden denklem;

$$F_r = 908.9 - 18.3KT - 88.7SY - 0.034V + 2511f \quad (8.29)$$

olarak elde edilmiştir. Elde edilen birinci dereceden denklemin belirleme katsayısı $R^2=0.810$ olarak hesaplanmıştır. %95 güvenilirlik düzeyinde birinci derece denklemlerle elde edilen tahminsel kesme kuvvetleri ile deneysel çalışmalarla elde edilen kesme kuvveti değerleri arasındaki farklar fazla olacağından faktör etkileşimlerini de kapsayan denklem;

$$F_r = 1328 + 121KT + 2SY - 2.3307V + 5549f - 32.00KT^2 - 24.90SY^2 + 0.00215V^2 + 10246f^2 + 11.6KTxSY - 0.058KTxV + 14KTxf + 0.01SYxV - 528SYxf - 4.72Vxf \quad (8.30)$$

olarak elde edilmiştir. Bu denklemin belirleme katsayısı $R^2=0.867$ olarak bulunmuştur. Şekil 8.56'da deneysel sonuçlar ile tahmin modelleri ile elde edilen tahminlerin karşılaştırılması görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi gerçek değerlere en yakın tahmin denklemi ana etki ve etkileşimlerine ait denklemdir.



Şekil 8.56. F_r için ölçülen değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması.

8.3.2.4. Doğrulama Deneyleri

Kesme kuvveti deneyleri neticesinde optimum parametre grubu $A_3B_3C_2D_1$ şeklinde elde edilmiştir. Optimum kesme kuvveti tahmininde Eşitlik (8.31) kullanılmıştır.

$$F_{r_{opt}} = (A_3 - T_{Fr}) + (B_3 - T_{Fr}) + (C_2 - T_{Fr}) + (D_1 - T_{Fr}) + T_{Fr} \quad (8.31)$$

Burada, (A_3, B_3, C_2, D_1) kesme kuvvetinin optimum seviyedeki ortalama değerlerini

vermektedir (Çizelge 8.39). T_{Fr} değeri ise deneysel çalışma sonucu elde edilen ortalama kesme kuvveti değerini temsil etmektedir (Çizelge 8.36). Hesaplamalar sonucunda Fr_{opt} değeri 586.1 N olarak bulunmuştur.

Çizelge 8.39. Kesme kuvveti için ortalama yanıt tablosu.

| Seviyeler | Kontrol faktörleri | | | |
|-----------|--------------------|--------------|--------------|--------------|
| | A | B | C | D |
| Seviye 1 | 782.9 | 855.6 | 785.8 | 726.4 |
| Seviye 2 | 796.6 | 791.9 | 761.0 | 772.6 |
| Seviye 3 | 746.3 | 678.3 | 779.1 | 826.9 |
| Delta | 50.2 | 177.3 | 24.8 | 100.4 |

Çizelge 8.40'de deney sonuçları ile regresyon denklemleri ve Taguchi metodu aracılığıyla elde edilen tahmin değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Doğrulama deney sonuçları incelendiğinde elde edilen sonuçların yeterli olduğu ve Taguchi optimizasyonunun başarılı olduğu söylenebilir.

Çizelge 8.40. Optimum sonuçlar ve doğrulama deneyi.

| Seviye | Birinci Dereceden Denklem | | | Ana Etki ve Etkileşimlerine Ait Denklem | | | Taguchi Denklemi | | |
|----------------|---------------------------|--------|----------|---|--------|----------|------------------|--------|----------|
| | Deney | Tahmin | Hata (%) | Deney | Tahmin | Hata (%) | Deney | Tahmin | Hata (%) |
| $A_3B_3C_2D_1$ | 586.1 | 717.07 | 22.35 | 586.1 | 612.65 | 4.53 | 586.1 | 670.21 | 14.35 |
| $A_1B_2C_3D_1$ | 784 | 739.62 | 5.66 | 784 | 771.46 | 1.60 | 784 | 754.49 | 3.76 |
| $A_3B_1C_2D_1$ | 707 | 795.12 | 12.46 | 707 | 742.42 | 5.01 | 707 | 763.51 | 7.99 |

8.3.3. Yüzey Pürüzlülüğü

Teorik açıdan ilerleme ve kesici uç radyüsünün bir fonksiyonu olan yüzey pürüzlülüğü aynı zamanda kesme hızı, talaş derinliği ve aşınmanın da etkisi altındadır [251]. Çalışmanın bu bölümünde, kesici takım, kesme hızı ve ilerleme ve faktör etkileşimlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen sonuçlar, kontrol faktörleri, kontrol faktörlerinin seviyeleri ve S/N oranları Çizelge 8.41'de verilmiştir. Deneyler sonucunda ortalama yüzey pürüzlülük değeri 0.963 μm olarak elde edilirken S/N oranlarının ortalama değeri 1.92 dB olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 8.41. Deney sonuçları ve S/N oranları.

| Den. No. | Kontrol faktörleri | | | | Yüzey Pürüzlülüğü (µm) | S/N oranı (dB) |
|----------|---------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------------------|------------------------|----------------|
| | A Kesici takım (KT) | B Soğutma/Yağlama Yöntemi (SYY) | C Kesme hızı (V) (m/dak) | D İlerleme hızı (f) (mm/dev) | | |
| 1 | Alümina | Kuru | 500 | 0.02 | 0.82 | 1.72 |
| 2 | Alümina | Kuru | 600 | 0.04 | 0.94 | 0.54 |
| 3 | Alümina | Kuru | 700 | 0.06 | 1.12 | -0.98 |
| 4 | Alümina | Islak | 500 | 0.04 | 1.40 | -2.92 |
| 5 | Alümina | Islak | 600 | 0.06 | 2.10 | -6.44 |
| 6 | Alümina | Islak | 700 | 0.02 | 1.06 | -0.51 |
| 7 | Alümina | MMY | 500 | 0.06 | 0.58 | 4.73 |
| 8 | Alümina | MMY | 600 | 0.02 | 0.28 | 11.06 |
| 9 | Alümina | MMY | 700 | 0.04 | 0.46 | 6.74 |
| 10 | Whiskers | Kuru | 500 | 0.04 | 1.40 | -2.92 |
| 11 | Whiskers | Kuru | 600 | 0.06 | 1.68 | -4.51 |
| 12 | Whiskers | Kuru | 700 | 0.02 | 0.90 | 0.92 |
| 13 | Whiskers | Islak | 500 | 0.06 | 2.18 | -6.77 |
| 14 | Whiskers | Islak | 600 | 0.02 | 2.01 | -6.06 |
| 15 | Whiskers | Islak | 700 | 0.04 | 0.94 | 0.54 |
| 16 | Whiskers | MMY | 500 | 0.02 | 0.30 | 10.46 |
| 17 | Whiskers | MMY | 600 | 0.04 | 0.42 | 7.54 |
| 18 | Whiskers | MMY | 700 | 0.06 | 0.44 | 7.13 |
| 19 | Sialon | Kuru | 500 | 0.06 | 0.94 | 0.54 |
| 20 | Sialon | Kuru | 600 | 0.02 | 0.52 | 5.68 |
| 21 | Sialon | Kuru | 700 | 0.04 | 0.84 | 1.51 |
| 22 | Sialon | Islak | 500 | 0.02 | 0.84 | 1.51 |
| 23 | Sialon | Islak | 600 | 0.04 | 1.62 | -4.19 |
| 24 | Sialon | Islak | 700 | 0.06 | 1.12 | -0.98 |
| 25 | Sialon | MMY | 500 | 0.04 | 0.38 | 8.40 |
| 26 | Sialon | MMY | 600 | 0.06 | 0.50 | 6.02 |
| 27 | Sialon | MMY | 700 | 0.02 | 0.22 | 13.15 |

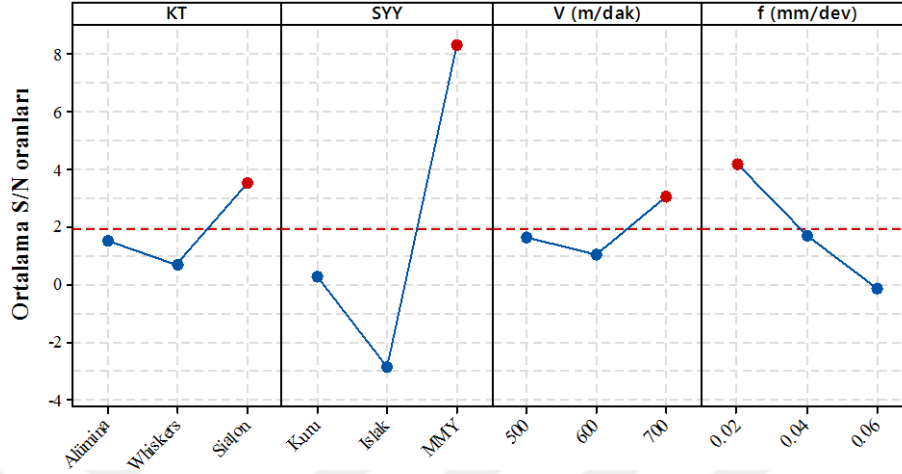
Çizelge 8.42’de yüzey pürüzlülüğü için S/N tablosu verilmiştir ve optimum yüzey pürüzlülüğü değerleri için kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri görülmektedir.

Çizelge 8.42. S/N yanıt tablosu.

| Seviyeler | Kontrol faktörleri | | | |
|-----------|--------------------|-------------|-------------|-------------|
| | A | B | C | D |
| Seviye 1 | 1.55 | 0.28 | 1.64 | 4.21 |
| Seviye 2 | 0.70 | -2.87 | 1.07 | 1.69 |
| Seviye 3 | 3.52 | 8.36 | 3.06 | -0.14 |
| Delta | 2.81 | 11.23 | 1.99 | 4.35 |

En iyi yüzey pürüzlülük değerini veren faktörlere ait seviyeler ve S/N oranları faktör A (Seviye 3, S/N= 3.52 dB), faktör B (Seviye 3, S/N=8.36 dB), faktör C (Seviye 3,

S/N=3.06 dB) ve faktör D (Seviye 1, S/N=4.21 dB) olarak belirlenmiştir (Çizelge 8.42). Ayrıca Şekil 8.57’de yüzey pürüzlülüğü değerleri için kontrol faktörleri ve faktörlere ait seviye değerleri gösterilmiştir.

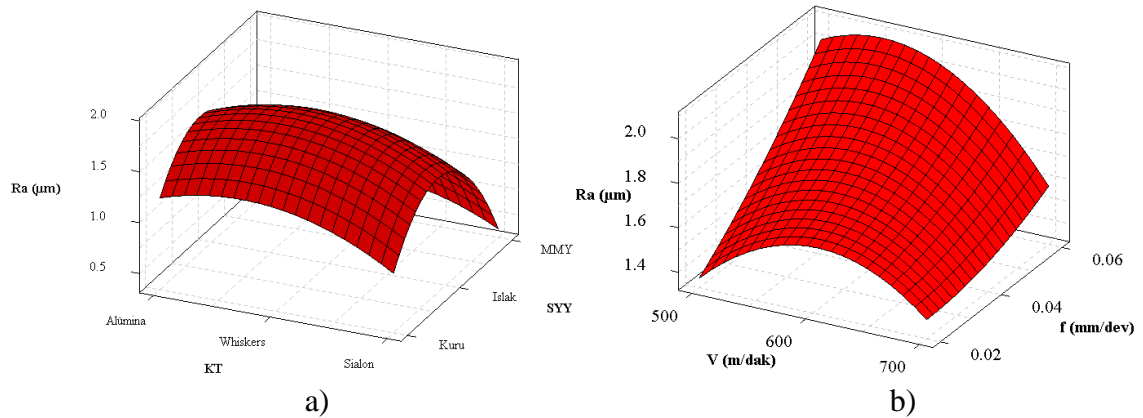


Şekil 8.57. S/N oranları ana etki grafiği.

Şekil 8.57 incelendiğinde en düşük yüzey pürüzlülük değerini veren optimum kesme parametrelerinin; Sialon esaslı seramik kesici takım (A_3), MMY sistemi altında işleme şartı (B_3), 700 m/dak kesme hızı (C_3) ve 0.02 mm/dev ilerleme (D_1) olduğu görülmektedir.

8.3.3.1. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Farklı kesme parametreleri altında yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü ile diğer ana faktör etkileşimlerinin üç boyutlu yüzey grafikleri Şekil 8.58’de verilmiştir.



Şekil 8.58. Giriş parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi, a) Kesici takım tipi ve soğutma-yagliama yöntemi b) Kesme hızı ve ilerleme.

Şekil 8.58a’deki yüzey pürüzlülüğü ile kesici takım tipi arasındaki ilişki incelendiğinde, en en düşük yüzey pürüzlülüğünün sialon esaslı seramik kesici uçlarda olduğu

görülmektedir. Alümina esaslı takımlar ile yapılan deneylerden elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri whiskers takviyeli takımlarda %17.16 artış gösterirken sialon esaslı takımlar ile yapılan deneylerde %20.86 azalma göstermiştir. Yine aynı grafikte MMY sistemi altında yapılan talaş kaldırma işleminde en iyi yüzey pürüzlülük değerinin elde edildiği görülmektedir. Kuru işleme ile yapılan deneylerle elde edilen sonuçlar ıslak işleme ve MMY ile işleme ile karşılaştırıldığında yüzey pürüzlülük değerinde sırasıyla %45.54 artış, %61.39 azalma görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğünün geliştirilmesi için kesme sıvısının kullanımının yanında MMY sisteminin kullanımı önemli bir yer tutmaktadır. Abrasiv aşınma ve adheziv aşınma mekanizmaları sonucunda yüzey pürüzlülüğünün arttığı ve bunların azaltılmasında MMY ile kullanılan yağlayıcı etkisinin önemli olduğu bilinmektedir [207].

Düşük kesme hızlarında kesici takımın BUE oluşumunun artması ve bunun da yüksek değerlerde yüzey pürüzlülüklerine neden olmasından dolayı düşük kesme hızında yüzey pürüzlülüğü daha fazla çıkmıştır [251], [252]. 500 m/dak kesme hızı referans alındığında 600 m/dak kesme hızı ile yapılan deneylerde yüzey pürüzlülüğü %14.29 artarken 700 m/dak kesme hızı ile yapılan deneylerde %19.39 oranında azalmıştır. Kesme hızının artmasıyla iyileşen yüzey pürüzlülüğünün sebebi, yüksek hızlarda deformasyon bölgelerinde artan sıcaklığa bağlı olarak kesme bölgesinde deformasyon işleminin kolaylaşması, iş parçası malzemesinin, kesici kenar ve burun radyusu çevresinde rahat bir şekilde deforme edilmesi ve bu sayede herhangi bir yırtılma olmadan şekillendirilebilmesi ile açıklanabilir [253]. Ancak, kesme hızındaki artışın devam etmesi kesici takımın aşınma sürecine daha erken girmesini sağlayacağından kesme hızının belli bir sınıra kadar artırılması yüzey kalitesi açısından olumlu olurken, daha fazla artırılması yüzey kalitesinde tekrar kötüleşmeye sebep olabilmektedir [229], [230].

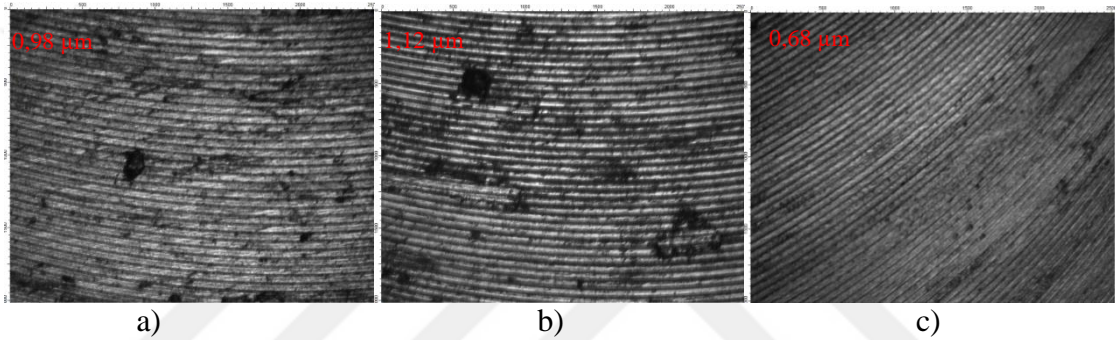
İlerleme miktarı en etkin parametre olup artan ilerleme miktarının artması ile yüzey pürüzlülük değeri de artmaktadır [254]. Bu artış 0.04 mm/dev ilerleme hızında %20.78 seviyesinde olurken 0.06 mm/dev ilerleme hızında %53.25 seviyesinde olmuştur. Takım geometrisi-ilerleme miktarı ve kesme hızı-ilerleme miktarı etkileşimlerinin istatistiksel olarak yüzey pürüzlülüğü üzerinde anlamlı etki yarattığı bildirilmektedir [255].

8.3.3.2. İşlenmiş Yüzeyin Karakterizasyonu

Bu bölümdeki deneyler esnasında yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemli bir etkisi olduğu bilinen ilerleme ve kesme hızını sabit tutarak kesici takım takviye türünün ve soğutma-

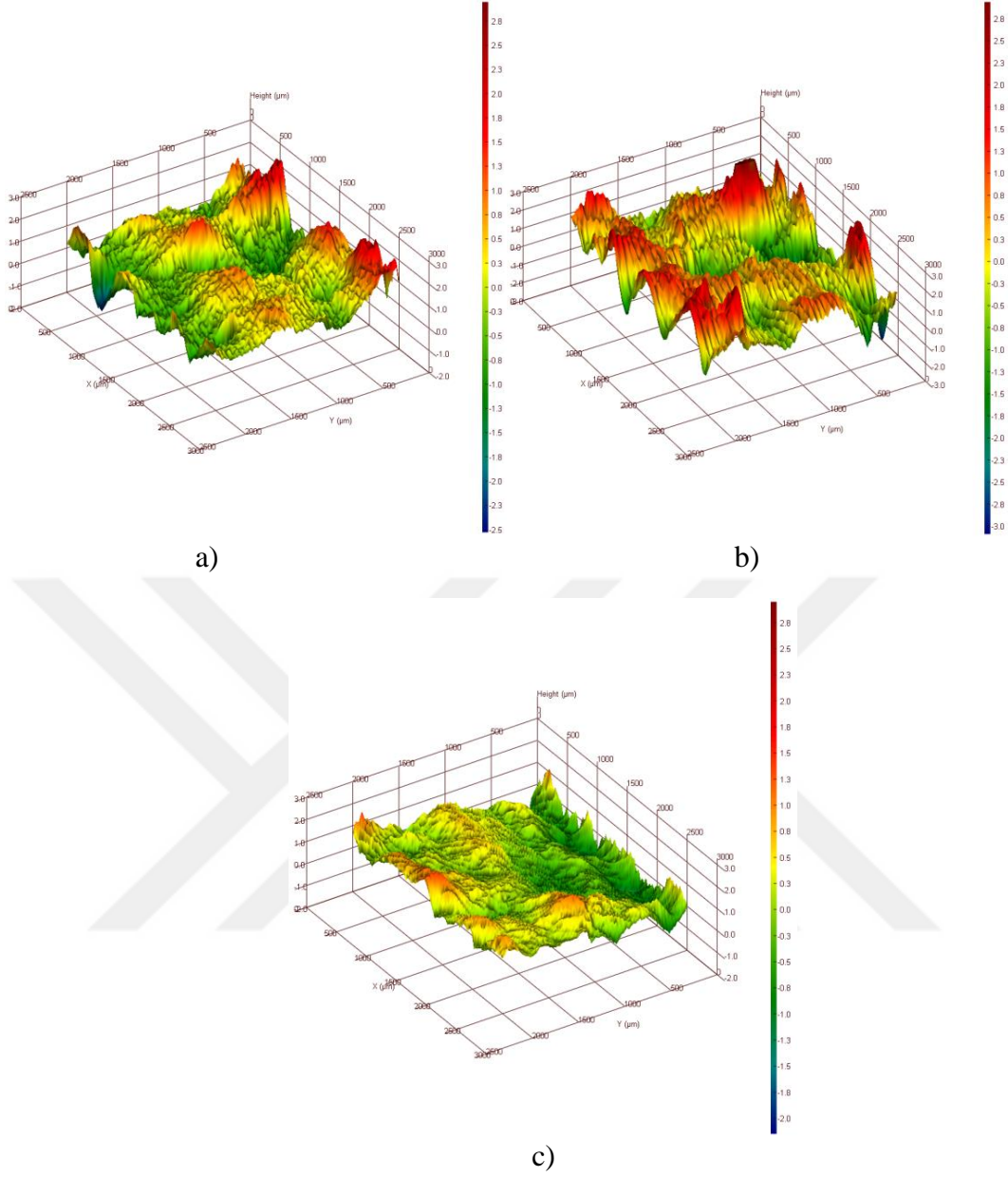
yağlama yöntemlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda kesme hızı 700 m/dak ve ilerleme 0.06 mm/dev sabit tutulmuştur. Her deney için daha önce kullanılmamış bir uç seçilmiştir.

Takviye türünün yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi; takviye türünün yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin araştırıldığı deneyler esnasında en belirgin farkı vermesi beklenen kuru işleme yöntemi tercih edilmiş, aynı kesme parametreleri ve kaldırılan talaş hacmi altında tek değişken olarak takviye türü seçilmiştir. Şekil 8.59'da Alümina esaslı, whiskers takviyeli ve sialon esaslı seramik uç kullanılarak kuru işleme altında sürdürülen işlenebilirlik deneylerinde elde edilmiş yüzeylerin iki boyutlu fotoğrafları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 8.59. Kuru işleme altında elde edilmiş yüzeylerin iki boyutlu fotoğrafı, a) alümina esaslı, b) whiskers takviyeli, c) sialon esaslı.

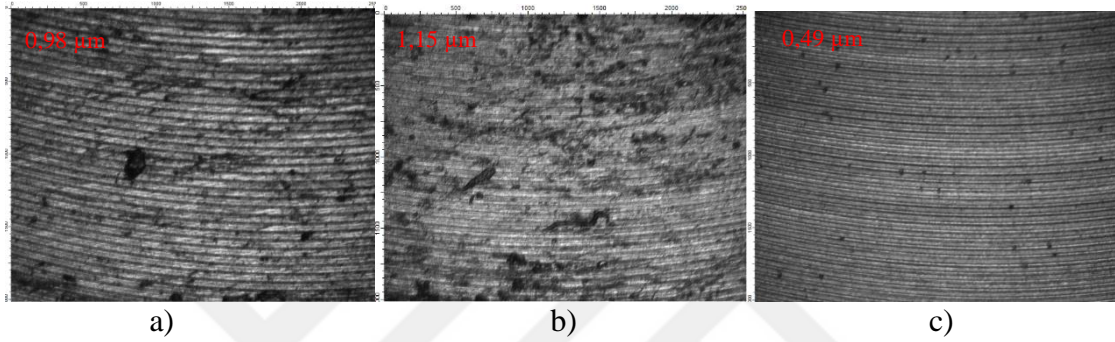
Şekil 8.59 incelendiğinde, kesici takımlardaki takviye türüyle beraber yüzey pürüzlülüğün de değişiklik gösterdiği görülmektedir. En iyi yüzeyin ise sialon esaslı seramik takımlarla elde edilen yüzey olduğu görülmektedir (Şekil 8.59c). Yüzey pürüzlülüğü en yüksek yüzeyin ise whiskers takviyeli seramik takımlarla elde edildiği görülmektedir (Şekil 8.59b). Alümina esaslı seramik takımlarla yapılan deneyler referans alınıp yüzdesel olarak bakıldığında whiskers takviyeli takımlarla yürütülen deneylerden elde edilen yüzey pürüzlülük değerinde %14.29'luk bir artma olduğu görülmektedir. Sialon esaslı seramik takımlarla yürütülen deneylerde ise %30.62 oranında bir iyileşme olmuştur. Şekil 8.60'da farklı seramik takımlarla kuru işleme altında gerçekleştirilen yüzey pürüzlülük deneylerine ait 3D yüzey topoğrafyası verilmiştir.



Şekil 8.60. Kuru işleme altında elde edilmiş yüzeylerin 3D yüzey topografyası, a) alümina esaslı, b) whiskers takviyeli, c) sialon esaslı.

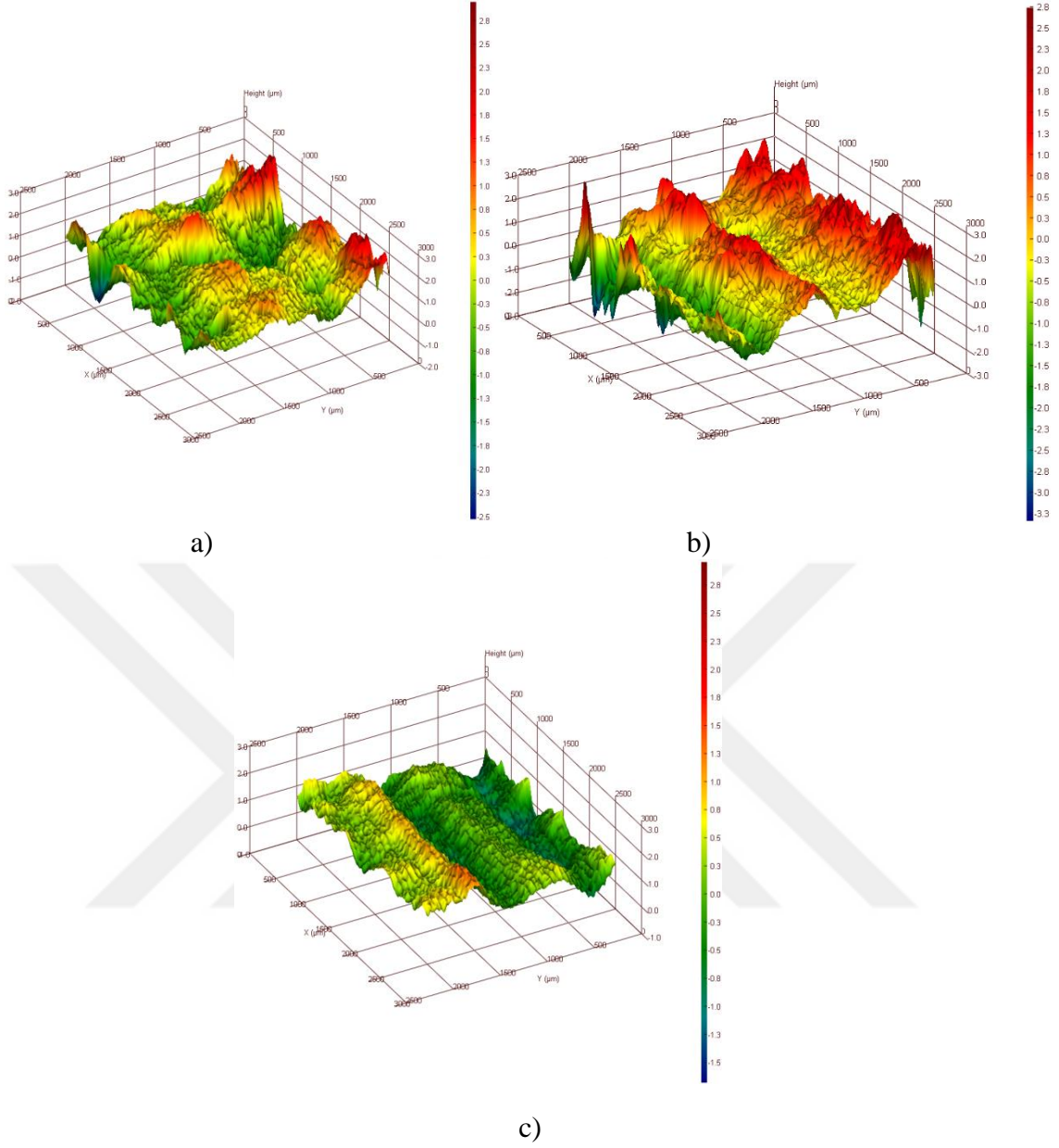
Şekil 8.60 incelendiğinde, en derin girinti ve çıkıntıların olduğu yüzey haritasının whiskers takviyeli seramik takımlarla yürütülen deneylerde elde edilen yüzeylerde ortaya çıktığı görülmektedir (Şekil 8.60b). Sialon esaslı seramik takımlarla yürütülen deney sonuçlarına ait topoğrafya incelendiğinde, en az dalgalanmanın bu kesici takım türüyle yürütülen deneylerde elde edildiği görülmektedir (Şekil 8.60c). Alümina esaslı takımlarla elde edilen yüzeyin whiskers takviyeli takımlarla elde edilen yüzeye nazaran daha az girinti çıkıntıya sahip olmasına rağmen buna yakın bir durum sergilediği görülmektedir (Şekil 8.60a).

Soğutma-yağlama yönteminin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi; soğutma-yağlama yöntemindeki değişikliğin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin araştırıldığı deneyler esnasında en belirgin farkı vermesi beklenen alümina esaslı seramik takım tercih edilmiş, aynı kesici takım ve aynı talaş hacmi altında tek değişken olarak soğutma-yağlama yöntemi seçilmiştir. Şekil 8.61’de kuru işleme, ıslak işleme ve MMY sistemi altında alümina esaslı seramik takım kullanılarak sürdürülen işlenebilirlik deneylerinde elde edilmiş yüzeyin fotoğrafları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 8.61. Alümina esaslı seramik takım ile elde edilmiş yüzeylerin fotoğrafı, a) kuru işleme, b) ıslak işleme c) MMY ile işleme.

Şekil 8.61 incelendiğinde, en fazla yüzey pürüzlülüğüne sahip yüzeyin ıslak işleme altında elde edildiği görülmektedir (Şekil 8.61b). En az yüzey pürüzlülüğüne sahip yüzeyin ise MMY sistemi altında elde edildiği görülmektedir (Şekil 8.61c). Kuru işleme altında yapılan deneyler referans yüzey pürüzlülüğündeki değişim oransal olarak incelendiğinde ıslak işleme ile yürütülen deneylerden elde edilen yüzey pürüzlülük değerinde %17.34'lük bir kötüleşme olduğu görülmektedir. Yine kuru işlemenin referansında MMY sistemi altında yürütülen deneylerde %50 oranında bir iyileşme ortaya çıkmaktadır. Şekil 8.62’de Alümina esaslı seramik takımlarla farklı soğutma-yağlama yöntemi altında gerçekleştirilen yüzey pürüzlülük deneylerinin 3D yüzey topografyası verilmiştir.



Şekil 8.62. Alümina esaslı seramik takım ile elde edilmiş yüzeylerin 3D topoğrafyası, a) kuru işleme, b) ıslak işleme c) MMY ile işleme.

Şekil 8.62 incelendiğinde, en derin girinti ve çıkıntılarının olduğu yüzey haritasının ıslak işleme altında yürütülen deneylerle elde edilen yüzey değerleri olduğu görülmektedir (Şekil 8.62b).

8.3.3.3. ANOVA

Deneyler sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri için ANOVA sonuçları Çizelge 8.43’de verilmiştir. Çizelge 8.43 incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde faktör A, B, C, ve D’nin yüzde katkıları sırasıyla %8.1, %71.0, %6.7 ve %10.5 olarak bulunmuştur. Bu veriler ışığında mevcut girdi değerleri içerisinde yüzey pürüzlülüğünü

etkileyen en önemli faktörün soğutma-yağlama yöntemi (B) olduğu görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü için hata yüzdesi %3.8 bulunmuştur.

Çizelge 8.43. Anova tablosu.

| Faktörler | Serbestlik derecesi | Kareler toplamı | Kareler ortalaması | F değeri | P değeri | Katkı oranı (%) |
|-----------|---------------------|-----------------|--------------------|----------|----------|-----------------|
| A | 2 | 0.6027 | 0.30134 | 3.99 | 0.0037 | 8.1 |
| B | 2 | 5.2565 | 2.62823 | 34.82 | 0.000 | 71.0 |
| C | 2 | 0.4949 | 0.24743 | 3.28 | 0.061 | 6.7 |
| D | 2 | 0.7768 | 0.38841 | 5.15 | 0.014 | 10.5 |
| Hata | 18 | 0.2786 | 0.01548 | - | - | 3.8 |
| Toplam | 26 | 7.4095 | - | - | - | 100 |

8.3.3.4. Regresyon Analizi

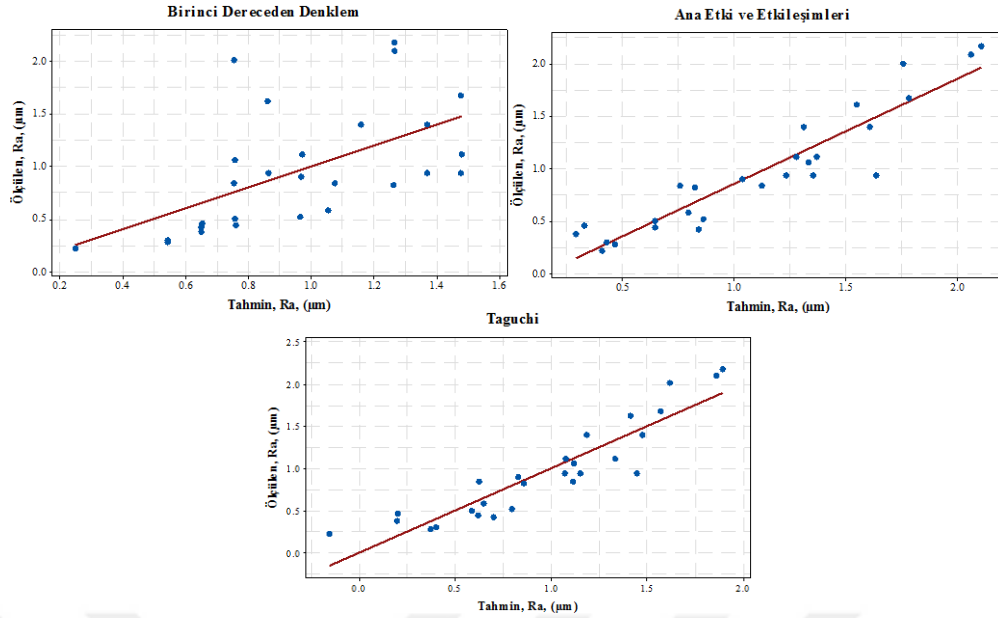
Yüzey pürüzlülüğü denklemleri, kontrol seviyelerine bağlı olarak kesici takım kaplama tipi, soğutma-yağlama yöntemi, kesme hızı ve ilerleme parametreleri esas alınarak oluşturulmuştur. Sadece kontrol faktörlerinin ana etkileriyle oluşturulan birinci dereceden denklem;

$$Ra = 1.949 - 0.099KT - 0.310SYY - 0.0009V + 10.31f \quad (8.32)$$

olarak elde edilmiştir. Elde edilen birinci dereceden denklemin belirleme katsayısı $R^2=0.335$ olarak hesaplanmıştır. %95 güvenilirlik düzeyinde birinci derece denklemlerle elde edilen tahminsel yüzey pürüzlülüğü ile deneysel çalışmalarla elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri arasındaki farklar fazla olacağından faktör etkileşimlerini de kapsayan denklem;

$$Ra = -10.57 + 0.77KT + 2.62SYY + 0.028V + 50.3f - 0.27KT^2 - 0.77SYY^2 - 0.000023V^2 + 112f^2 + 0.0596KTxSYY + 0.0003330KTxV - 3.1100KTxf + 0.000289SYYxV - 3.67SYYxf - 0.0591Vxf \quad (8.33)$$

olarak elde edilmiştir. Bu denklemin belirleme katsayısı $R^2=0.873$ olarak bulunmuştur. Şekil 8.63'te deneysel sonuçlar ile tahmin modelleri ile elde edilen tahminlerin karşılaştırılması görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi gerçek değerlere en yakın tahmin denklemi ana etki ve etkileşimlerine ait denklemdir.



Şekil 8.63. Ölçülen değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırılması.

8.3.3.5. Doğrulama Deneyleri

En düşük yüzey pürüzlülüğüne ait parametre grubu $A_3B_3C_3D_1$ şeklinde elde edilmiştir. Optimum yüzey pürüzlülüğü tahmininde Eşitlik (8.34) kullanılmıştır.

$$Ra_{opt} = (A_3 - T_{Ra}) + (B_3 - T_{Ra}) + (C_3 - T_{Ra}) + (D_1 - T_{Ra}) + T_{Ra} \quad (8.34)$$

Burada (A_3 , B_3 , C_3 , D_1) yüzey pürüzlülüğünün optimum seviyedeki ortalama değerlerini vermektedir (Çizelge 8.44). T_{Ra} değeri ise deneysel çalışma sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerini temsil etmektedir (Çizelge 8.41). Hesaplamalar sonucunda Ra_{opt} değeri $0.21 \mu\text{m}$ olarak bulunmuştur.

Çizelge 8.44. Yüzey pürüzlülüğü için ortalama yanıt tablosu.

| Seviyeler | Kontrol faktörleri | | | |
|-----------|--------------------|---------------|---------------|---------------|
| | A | B | C | D |
| Seviye 1 | 0.9733 | 1.0178 | 0.9822 | 0.5822 |
| Seviye 2 | 1.1411 | 1.4744 | 1.1189 | 0.9333 |
| Seviye 3 | 0.8056 | 0.9823 | 0.7289 | 1.1844 |
| Delta | 0.3355 | 0.4921 | 0.3900 | 0.6022 |

Deneysel olarak elde edilen yüzey pürüzlülüğü değeri güven aralığı sınırları içerisinde çıkmıştır. Çizelge 8.45'te deney sonuçları ile regresyon denklemleri ve Taguchi metodu aracılığıyla elde edilen tahmin değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Doğrulama deney sonuçları incelendiğinde elde edilen sonuçların yeterli olduğu ve Taguchi optimizasyonunun başarılı olduğu söylenebilir.

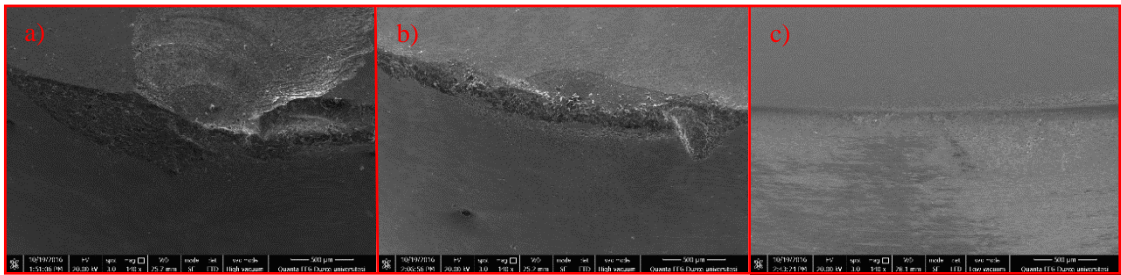
Çizelge 8.45. Doğrulama deneyi sonuçları.

| Seviye | Birinci Dereceden Denklem | | | Ana Etki ve Etkileşimlerine Ait Denklem | | | Taguchi Denklemi | | |
|---|---------------------------|--------|----------|---|--------|----------|------------------|--------|----------|
| | Deney | Tahmin | Hata (%) | Deney | Tahmin | Hata (%) | Deney | Tahmin | Hata (%) |
| A ₃ B ₃ C ₃ D ₁ | 0.22 | 0.181 | 17.73 | 0.22 | 0.205 | 6.81 | 0.22 | 0.203 | 7.73 |
| A ₁ B ₁ C ₁ D ₁ | 0.82 | 1.261 | 53.66 | 0.82 | 0.824 | 0.49 | 0.82 | 0.855 | 4.27 |
| A ₂ B ₂ C ₂ D ₁ | 2.01 | 0.755 | 62.44 | 2.01 | 1.757 | 12.93 | 2.01 | 1.616 | 19.06 |

8.3.4. Genel Değerlendirme

Takviye türü, soğutma-yağlama yöntemi, kesme hızı ve ilerlemenin takım aşınması, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerinin incelenmesinin amaçlandığı bu bölümde, giriş faktörleri takım takviye türü, kesme hızı, ilerleme olarak seçilmiş ve kesme derinliği sabit tutulmuştur.

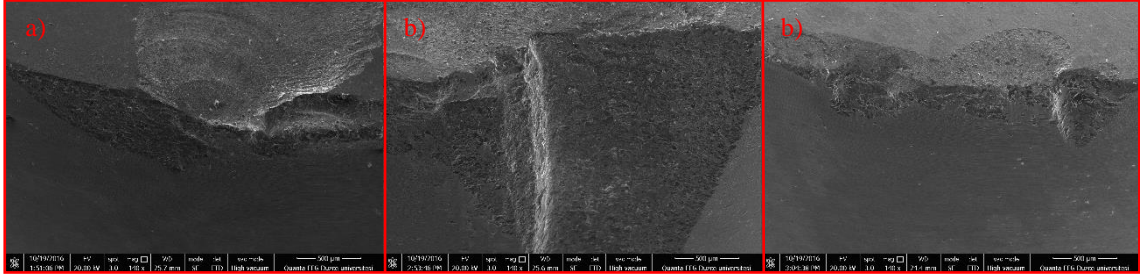
Deney sonuçları analiz edildiğinde, takım aşınması açısından optimum parametre grubu; sialon esaslı takım, MMY sistemi, 700 m/dak kesme hızı ve 0.06 mm/dev olduğu görülmüştür. Aşınma açısından faktörlerin etki sıralaması ise sırasıyla kesici takım türü, soğutma yağlama yöntemi, kesme hızı ve ilerleme şeklindedir. Şekil 8.64'te kuru işleme altında 700 m/dak kesme hızı ve 0.06 mm/dev ilerleme ile yapılan ve takviye türünün takım aşınması üzerindeki etkilerini gösteren 140x yakınlıkta çekilmiş SEM fotoğrafları verilmiştir. SEM fotoğraflarında çıkan sonuçlar diğer deney sonuçlarını doğrular niteliktedir.



Şekil 8.64. 700 m/dak kesme hızı, 0.06 mm/dev ilerleme ve kuru işleme altında aşınmış takım yüzeylerinin SEM görüntüleri a) Alümina b) Whiskers c) Sialon.

Soğutma-yağlamanın etkisi incelendiğinde, literatüre uygun olarak en olumsuz durum ıslak işlemede görülürken MMY sistemi altında yapılan işlemede en düşük aşınma miktarı elde edilmiştir. Bu durum da MMY sistemini seramik takımlarla nikel esaslı alaşımların frezelenmesinde önemli bir soğutma-yağlama yöntemi olarak ön plana çıkarmaktadır. Şekil 8.65'de kuru işleme altında 700 m/dak kesme hızı ve 0.06 mm/dev ilerleme ile yapılan ve soğutma-yağlama yönteminin takım aşınması üzerindeki etkilerini

gösteren SEM fotoğrafları verilmiştir. SEM fotoğraflarında çıkan sonuçlar diğer deney sonuçlarını doğrular niteliktedir.



Şekil 8.65. 700 m/dak kesme hızı, 0.06 mm/dev ilerleme ve soğutma-yağlama yöntemleri altında aşınmış alümina esaslı takım yüzeyinin SEM görüntüleri a) kuru işleme b) ıslak işleme c) MMY sistemi ile işleme.

Kesme kuvveti deneylerinde optimum parametre grubunun; sialon esaslı seramik kesici takım, MMY sistemi ile işleme, 600 m/dak kesme hızı ve 0.02 mm/dev ilerleme olduğu görülmektedir. Orta kesme hızında daha iyi sonuçlar elde edilme nedeninin hem düşük hem de yüksek kesme hızlarında takımın daha erken aşınma sürecine girmesi olduğu düşünülmektedir. Kesme kuvveti açısından faktörlerin ekti sıralaması ise sırasıyla soğutma-yağlama yöntemi, ilerleme, kesici takım takviye türü ve kesme hızı şeklinde olmuştur.

Yüzey pürüzlülüğü deney sonuçları değerlendirildiğinde optimum parametre grubunun; sialon esaslı seramik kesici takım, MMY sistemi ile işleme, 700 m/dak kesme hızı ve 0.06 mm/dev ilerleme olduğu görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü açısından faktörlerin ekti sıralaması ise sırasıyla soğutma-yağlama yöntemi, ilerleme, kesici takım takviye türü ve kesme hızı şeklinde olmuştur. Seramik kesici takımlarla yapılan deneylerin tümünde MMY sistemi altında yapılan deneyler diğer soğutma-yağlama yöntemi ile yapılan deneylere göre daha iyi sonuçlar vermiştir.

9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, işlenebilirliği zor malzemeler arasında yer alan nikel esaslı Waspaloy süper alaşımının frezelenmesinde seçilen kesme parametreleri ve soğutma-yağlama yöntemlerinin işlenebilirlik üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla CNC freze tezgâhında ISO 8688-1 standardına uygun olarak bir dizi deney yapılmıştır. Birinci grup deneyde, daha sonra ana deneylerde kullanılacak olan MMY sistemi için yağ tipi, debi, frezeleme yönü, püskürtme mesafesi ve nozul tipi için optimum parametre grubunu belirlemek amacıyla 16 deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden elde edilen optimum sonuçları da kullanarak ikinci ve üçüncü grup deneyler gerçekleştirilmiştir. Karbür kesici takım kullanılan ikinci grup deneylerde kesici takım kaplama türü, soğutma-yağlama yöntemi, kesme hızı ve ilerlemenin takım ömrü, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Karbür kesici takımların aşınma deneylerinde, 0.3 mm aşınma miktarının yakalandığı süre takım ömrü olarak kabul edilmiştir. Üçüncü grup deneylerde ise seramik kesici takımlar kullanılarak kesici takım takviye türü, soğutma-yağlama yöntemi, kesme hızı ve ilerlemenin takım aşınması, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Seramik kesicilerle yapılan aşınma deneylerinde ise 1125 mm³ sabit talaş hacmindeki aşınma değerleri dikkate alınmıştır. Yapılan bu çalışma sonucu aşağıdaki sonuçlar çıkarılmış ve bazı öneriler sunulmuştur.

9.1. MMY DENEYLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

- Bitkisel yağın kesme bölgesinde ince bir yağ filmi oluşturmaya diğer yağ tiplerine göre daha yatkın olması nedeniyle sürtünmeyi ve dolayısıyla aşınmayı azaltması diğer yağlara nazaran takım ömrü, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde daha etkin olmasını sağlamaktadır.
- Tercih edilen debiler içerisinde işlenebilirlik üzerine en olumlu etkiyi 100 ml/s debi oranı vermiştir. Bunun sebebi; kesme bölgesine daha fazla miktarda yağ gönderilmesi ve böylece sürtünmenin azalmasına diğerlerinden daha fazla katkı sağlamasıdır.

- Frezeleme yönü açısından zıt yönlü frezeleme aynı yönlü frezelemeye göre daha iyi sonuç vermiştir. Bunun sebebi, aynı yönlü frezelemede kesici takımın parçaya ilk daldığı noktadaki talaş miktarının maksimum olması ve dolayısıyla kesici takımını ilk talaş kaldırma esnasında aşındırmaya başlamasıdır.
- Püskürtme mesafesi açısından aerosolün kesme bölgesine daha yakından püskürtülmesi nedeniyle 25 mm mesafesi 50 mm'ye göre daha iyi sonuçlar vermiştir.
- Nozul tipi açısından püskürtme bölgesindeki geometrik farklılık nedeniyle 1 nolu nozul daha iyi sonuçlar vermiştir.
- Faktörlerin etki sıralamasına bakıldığında takım ömrü, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü açısından en etkili faktör debi olmuş bunu sırasıyla yağ tipi, frezeleme yönü, püskürtme mesafesi ve nozul tipi takip etmiştir.
- Optimum MMY sisteminin belirlenmesi için yürütülen deneylerde deney sonucu elde edilen verilerle matematiksel model kullanılarak elde edilen tahmin modellerinde regresyon analizi ile takım ömrü için %99.1 kesme kuvveti için %99.8 yüzey pürüzlülüğü için ise %98.9 oranında başarı sağlanmıştır.

9.2. KARBÜR KESİCİ DENEYLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

- Karbür takımlarla yapılan takım ömrü deneylerinde en düşük takım ömrü kuru işleme altında kaplamasız karbür takımlarla 60 m/dak kesme hızı ve 0.2 mm/dev ilerleme parametreleri ile yürütülen deneylerde çıkmıştır. Bu işleme parametrelerinde işleme süresi 1.96 dakika olarak gerçekleşmiştir. En yüksek takım ömrü ise ıslak işleme altında PVD (TiAlN) kaplamalı karbür takımlar ile yapılan işleme deneylerinde 30 m/dak kesme hızı ve 0.1 mm/dev ilerleme ile gerçekleşmiştir. Bu işleme parametrelerinde işleme süresi 54.8 dakika olarak çıkmıştır. Maksimum ve minimum takım ömrü değerleri arasında %2794 oranında bir fark oluşmuştur.
- 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme, kuru işleme ve sabit 7.9 dakika talaş kaldırma süresinde kaplamasız takımlardaki aşınma miktarı 0.293 mm olurken bu değer PVD (TiAlN) kaplamalı takımlarda 0.147 mm, CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalı takımlarda ise 0.196 mm olarak çıkmıştır. Kaplamasız takımlara göre

aşınma miktarı PVD (TiAlN) kaplamalı takımlarda %49.82 azalma gösterirken CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalı takımlarda ise %33.1 azalma göstermiştir.

- 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme, kaplamasız takım ve sabit 7.9 dakika talaş kaldırma süresinde kuru işlemedeki aşınma miktarı 0.293 mm olurken bu değer ıslak işlemede 0.183 mm, MMY sistemi ile işlemede ise 0.208 mm olarak çıkmıştır. Kuru işlemeye göre aşınma miktarı ıslak işlemede %37.54 MMY sistemi ile işlemede ise %29.01 iyileşme göstermiştir.
- Aynı soğutma yağlama yönteminde kesme hızının artması ile birlikte kesici takım ömründe azalma kesme kuvvetinde ise artma meydana gelirken yüzey pürüzlülüğü açısından en uygun değeri orta seviyedeki kesme hızları vermiştir.
- Takım ömrü açısından faktörlerin etki sıralamasına bakıldığında en etkili faktör kaplama tipi (%54.4) olmuş bunu sırasıyla soğutma-yağlama yöntemi (%19.4), kesme hızı (%14.9) ve ilerleme (%0.4) takip etmiştir.
- Kesici uçların SEM görüntüleriyle yapılan analizler neticesinde başta abrasif aşınma olmak üzere adhesif aşınma ve yorulma aşınmasının etkin aşınma mekanizmaları olduğu görülmüştür. Özellikle kaplamasız takımlarla kuru işleme altında yapılan frezeleme deneylerinde adhesif aşınma mekanizmasıyla karşılaşmıştır. Bu durum normal şartlarda kesici takım malzemesi ile iş parçası malzemesi arasında yapışma eğiliminin olduğunu göstermektedir.
- Frezeleme yöntemindeki talaş kaldırma mekaniği ile doğru orantılı olarak kesme kuvvetlerinin ani olarak yüklenmesi ve kalkması kesici uç üzerinde termal ve mekanik yorulma aşınmasına, çatlaklara ve kırılmalara sebep olmuştur. Karbür takımlarla yürütülen frezeleme deneylerindeki aşınma türü yoğun olarak yan kenar aşınması ve yapışma aşınması şeklinde olmuştur. Ayrıca, kesici uç üzerinde parçacık kopmaları ve kırılmalar da görülen aşınma tiplerindedir.
- Kesme kuvveti deneylerinde en düşük kesme kuvveti değerini ıslak işleme altında PVD (TiAlN) kaplamalı karbür takımlarla 45 m/dak kesme hızı ve 0.1 mm/dev ilerleme parametreleri vermiştir. Bu işleme parametrelerinde kesme kuvveti değeri 524 N olarak ölçülmüştür. En yüksek kesme kuvveti ise kuru işleme altında CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalı karbür takımlar ile yapılan işleme deneylerinde 30 m/dak kesme hızı ve 0.2 mm/dev ilerleme ile gerçekleşmiştir. Bu işleme parametrelerinde kesme kuvveti değeri 887 N olarak çıkmıştır. Maksimum

ve minimum kesme kuvveti değerleri arasında %40.92 oranında bir fark oluşmuştur.

- Kaplama türünün kesme kuvveti üzerindeki etkisi açısından kaplamasız takımlar en yüksek kesme kuvveti değerlerini verirken en düşük kesme kuvveti değerlerini PVD (TiAlN) kaplamalı takımlar vermiştir. Kesici takım kaplamalarının kesme kuvveti üzerindeki etki sıralaması iyiden kötüye doğru PVD (TiAlN), CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) ve kaplamasız karbür şeklinde olmuştur.
- Soğutma-yağlama yönteminin kesme kuvveti üzerindeki etkisi açısından en düşük kesme kuvveti değerini ıslak işleme verirken en yüksek kesme kuvveti değerlerine kuru işleme altında ulaşılmıştır. Soğutma-yağlama türünün kesme kuvveti üzerindeki etki sıralaması iyiden kötüye doğru ıslak işleme, MMY sistemi ile işleme ve kuru işleme şeklinde olmuştur.
- Kesme kuvveti açısından faktörlerin etki sıralaması sırasıyla soğutma-yağlama yöntemi (%53.2), ilerleme (%17.3), kesici takım kaplama türü (%11.3) ve kesme hızı (%3.8) şeklinde sıralanmıştır.
- Yüzey pürüzlülüğü deneylerinde en düşük yüzey pürüzlülüğü değerini ıslak işleme altında PVD (TiAlN) kaplamalı karbür takımlarla 45 m/dak kesme hızı ve 0.1 mm/dev ilerleme parametreleri vermiştir. Bu işleme parametrelerinde yüzey pürüzlülüğü değeri 0.20 µm olarak llmştir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü ise kuru işleme altında kaplamasız karbür takımlar ile yapılan işleme deneylerinde 60 m/dak kesme hızı ve 0.2 mm/dev ilerleme ile gerçekleşmiştir. Bu işleme parametrelerinde yüzey pürüzlülüğü değeri 0.42 µm olarak çıkmıştır. Minimum ve maksimum yüzey pürüzlülüğü değerleri arasında %110 oranında bir fark oluşmuştur.
- 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve kuru işleme altında yapılan yüzey pürüzlülüğü deneylerinde kaplamasız takımlar için pürüzlülüğü değeri 0.38 µm olurken bu değer PVD (TiAlN) kaplamalı takımlarda 0.28 µm, CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalı takımlarda ise 0.32 µm olarak çıkmıştır. Kaplamasız takımlara göre yüzey pürüzlülüğü miktarı PVD (TiAlN) kaplamalı takımlarda %26.31 CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalı takımlarda ise %15.79 iyileşme göstermiştir.
- 30 m/dak kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve kaplamasız takımlarla yürütülen

yüzey pürüzlülüğü deneylerinde kuru işlemedeki yüzey pürüzlülüğü miktarı 0.38 μm olurken bu değer ıslak işlemede 0.25 μm , MMY sistemi ile işlemede ise 0.30 μm olarak çıkmıştır. Kuru işlemeye göre yüzey pürüzlülüğü miktarı ıslak işlemede %34.21 MMY sistemi ile işlemede ise %21.05 iyileşme göstermiştir.

- Farklı kaplama türüne sahip karbür takımlarla yürütülen deneylerde deney sonucu elde edilen verilerle matematiksel model kullanılarak elde edilen tahmin modellerinde regresyon analizi ile takım ömrü için %91.5 kesme kuvveti için %87.8 yüzey pürüzlülüğü için ise %94.8 oranında başarı sağlanmıştır.

9.3. SERAMİK KESİCİ DENEYLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

- Seramik takımlarla yapılan aşınma deneylerinde en yüksek aşınma değeri ıslak işleme altında alümina esaslı seramik takımlarla 500 m/dak kesme hızı ve 0.04 mm/dev ilerleme parametreleri ile yürütülen deneylerde çıkmıştır. Bu işleme parametrelerinde aşınma miktarı 3.17 mm olarak gerçekleşmiştir. En düşük aşınma değeri ise MMY sistemi ile işleme altında sialon esaslı seramik takımlar ile yapılan işleme deneylerinde 700 m/dak kesme hızı ve 0.06 mm/dev ilerleme ile gerçekleşmiştir. Bu işleme parametrelerinde aşınma miktarı 0.12 mm olarak çıkmıştır. Minimum ve maksimum aşınma değerleri arasında %2542 oranında bir fark oluşmuştur.
- 700 m/dak kesme hızı, 0.06 mm/dev ilerleme, kuru işleme ve sabit 1125 mm³ talaş hacminde alümina esaslı seramik takımlardaki aşınma miktarı 0.697 mm olurken bu değer whiskers takviyeli seramik takımlarda 0.575 mm, sialon esaslı seramik takımlarda ise 0.232 mm olarak çıkmıştır. Alümina esaslı seramik takımlara göre aşınma miktarı whiskers takviyeli takımlarda %17.5 sialon esaslı takımlarda ise %66.71 azalma göstermiştir.
- 700 m/dak kesme hızı, 0.06 mm/dev ilerleme, alümina esaslı seramik takım ve sabit 1125 mm³ talaş hacminde kuru işlemedeki aşınma miktarı 0.697 mm olurken bu değer ıslak işlemede 3.17 mm, MMY sistemi ile işlemede ise 0.594 mm olarak çıkmıştır. Kuru işlemeye göre aşınma miktarı ıslak işlemede % 354 artma gösterirken MMY sistemi ile işlemede ise %14.77 azalma göstermiştir.

- Takım aşınması açısından faktörlerin etki sıralamasına bakıldığında en etkili faktör kesici takım takviye türü (%60.9) olmuş bunu sırasıyla soğutma-yağlama yöntemi (%20.9), kesme hızı (%2.3) ve ilerleme (%0.1) takip etmiştir.
- Karbür kesici uçların daha tok ve darbelere karşı dayanıklı olması nedeniyle aşınma daha düzenli bir şekilde olurken seramik kesicilerle yapılan deneylerde aşınma türü daha çok kesici uç kırılması şeklinde olmuştur. Bununla beraber, özellikle sialon esaslı seramik uçlarla yapılan deneylerde yanak aşınması ve çentik aşınması da ortaya çıkmıştır.
- Soğutma-yağlama yöntemi açısından ıslak işleme en kötü sonucu verirken MMY sistemi altında yapılan talaş kaldırma işleminde aşınma değerleri en düşük seviyede çıkmıştır. Seramik kesicilerle yapılan talaş kaldırma işlemlerinde MMY sistemi özellikle tavsiye edilmektedir.
- Kesme kuvveti deneylerinde en düşük kesme kuvveti değerini MMY sistemi altında sialon esaslı seramik takımlarla 600 m/dak kesme hızı ve 0.02 mm/dev ilerleme parametreleri vermiştir. Bu işleme parametrelerinde kesme kuvveti değeri 586.1 N olarak ölçülmüştür. En yüksek kesme kuvveti ise kuru işleme altında whiskers takviyeli seramik takımlar ile yapılan işleme deneylerinde 600 m/dak kesme hızı ve 0.06 mm/dev ilerleme ile gerçekleşmiştir. Bu işleme parametrelerinde kesme kuvveti değeri 948 N olarak çıkmıştır. Maksimum ve minimum kesme kuvveti değerleri arasında %61.75 oranında bir fark oluşmuştur.
- Soğutma-yağlama yönteminin kesme kuvveti üzerindeki etkisi açısından en düşük kesme kuvveti değerini MMY sistemi ile işleme verirken en yüksek kesme kuvveti değerlerine kuru işleme altında ulaşılmıştır. Soğutma-yağlama türünün kesme kuvveti üzerindeki etki sıralaması iyiden kötüye doğru MMY sistemi ile işleme, ıslak işleme ve kuru işleme şeklinde olmuştur.
- Kesme kuvveti açısından faktörlerin etki sıralaması sırasıyla soğutma-yağlama yöntemi (%60.9), ilerleme (%19.1), kesici takım takviye türü (%5.1) ve kesme hızı (%1.3) şeklinde sıralanmıştır.
- Yüzey pürüzlülüğü deneylerinde en düşük yüzey pürüzlülüğü değerini MMY sistemi ile işleme altında sialon esaslı seramik takımlarla 700 m/dak kesme hızı ve 0.02 mm/dev ilerleme parametreleri vermiştir. Bu işleme parametrelerinde yüzey pürüzlülüğü değeri 0.22 μm olarak ölçülmüştür. En yüksek yüzey

pürüzlülüğü ise ıslak işleme altında whiskers takviyeli takımlar ile yapılan işleme deneylerinde 500 m/dak kesme hızı ve 0.06 mm/dev ilerleme ile gerçekleşmiştir. Bu işleme parametrelerinde yüzey pürüzlülüğü değeri 2.18 μm olarak çıkmıştır. Maksimum ve minimum yüzey pürüzlülüğü değerleri arasında %89.91 oranında bir fark oluşmuştur.

- 700 m/dak kesme hızı, 0.06 mm/dev ilerleme ve kuru işleme altında yapılan yüzey pürüzlülüğü deneylerinde alümina esaslı takımlar için pürüzlülük değeri 0.98 μm olurken bu değer whiskers takviyeli takımlarda 1.12 μm , sialon esaslı takımlarda ise 0.68 μm olarak çıkmıştır. Alümina esaslı takımlara göre yüzey pürüzlülüğü miktarı whiskers takviyeli takımlarda %14.29 kötüleşirken sialon esaslı takımlarda ise %30.62 iyileşme göstermiştir.
- 700 m/dak kesme hızı, 0.06 mm/dev ilerleme ve alümina esaslı takımlarla yürütülen yüzey pürüzlülüğü deneylerinde kuru işlemedeki yüzey pürüzlülüğü miktarı 0.98 μm olurken bu değer ıslak işlemede 1.15 μm , MMY sistemi ile işlemede ise 0.49 μm olarak çıkmıştır. Kuru işlemeye göre yüzey pürüzlülüğü miktarı ıslak işlemede %17.34 artış gösterirken MMY sistemi ile işlemede ise %50 iyileşme göstermiştir.
- Farklı takviye türüne sahip seramik takımlarla yürütülen deneylerde deney sonucu elde edilen verilerle matematiksel model kullanılarak elde edilen tahmin modellerinde regresyon analizi ile takım ömrü için %82.9 kesme kuvveti için %90.4 yüzey pürüzlülüğü için ise %87.3 oranında başarı sağlanmıştır.

9.4. ÖNERİLER

- Waspaloy süper alaşımının frezelenmesinde kesme sıvısı kullanımı tavsiye edilmektedir.
- Çevre, işçi sağlığı ve işlenebilirlik açısından daha iyi sonuçların alınması için bitkisel esaslı kesme sıvısı kullanımı tavsiye edilmektedir.
- Karbür takımların işlenebilirliğe etkisi açısından PVD (TiAlN) kaplamanın işleme performansını önemli ölçüde artırdığı göz önünde bulundurularak bu alaşımın frezelenmesinde PVD (TiAlN) kaplamalı karbür kesicilerin kullanılması tavsiye edilmektedir.

- Çevre, çalışan sağlığı ve üretim maliyetleri açısından MMY sistemi kullanımı daha uygun görülmektedir.
- Waspaloy süper alaşımının frezelenmesinde Sialon esaslı seramik takımlar kullanılabilir.
- Seramik takımlarla Waspaloy'un frezelenmesinde takım aşınması, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünde maksimum sonuç alabilmek için MMY sistemi kullanımı tavsiye edilmektedir.

Bu çalışmada ele alınamayan ancak üzerinde çalışılabilecek konular;

- Bu çalışmada karbür kesici olarak kaplamasız, PVD (TiAlN), CVD (TiCN+Al₂O₃+TiN) kaplamalı, seramik kesici olarak da alümina esaslı, whiskers takviyeli ve sialon esaslı takımlar kullanılmıştır. Farklı kaplama ve takviye türüne sahip takımların işleme performansları test edilebilir.
- Bu çalışmada kuru işlemenin yanında ıslak işleme ve MMY sistemi ile işleme soğutma-yağlama yöntemi olarak kullanılmıştır. Kriyojenik işleme, yüksek basınçlı soğutma gibi yöntemlerin talaş kaldırma üzerine etkisi test edilebilir.
- Bu çalışmada MMY sisteminin uygulanmasında yağ tipi, debi, frezeleme yönü, püskürtme mesafesi ve nozul tipi gibi değişkenler kullanılmıştır. Bu parametrelerin seviyeleri değiştirilerek veya bunlara püskürtme açısı gibi yeni eklemeler yaparak işlenebilirliği zor malzemeler için en uygun işleme parametresi bulunabilir.
- Bu çalışmada işlenebilirlik takım ömrü/aşınması, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü gibi parametrelerle ölçülmüştür. Farklı bir çalışma ile kesme bölgesindeki sıcaklık ölçülebilir.
- Literatürde Waspaloy üzerine yapılmış çalışma sayısı yeterli düzeyde değildir. Aynı malzemenin farklı talaş kaldırma işlemleri altındaki davranışları incelenebilir.
- Bu çalışmada tahmin sonuçlarını elde etmek için regresyon analizi ile modelleme yöntemi tercih edilmiştir. Yapay sinir ağları, bulanık mantık vb. gibi farklı matematiksel tahmin modelleri kullanılabilir.

10.KAYNAKLAR

- [1] M. Akkurt, *Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgâhları*, 2. baskı, İstanbul, Türkiye: Birsen Yayınevi, 1992, böl. 3, ss. 161-165.
- [2] N. İpekçioğlu, *Frezecilik*, 1. baskı, Ankara, Türkiye: Devlet Kitapları Basımevi, 1984, böl. 2, ss. 287-290.
- [3] Ö. Kulaksız, Ö. Çakır ve O. Ulusoy, *Metal Meslek Bilgisi*, 2. baskı, Ankara, Türkiye: Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları, 1995, böl. 2, ss. 125-129.
- [4] Y. Alan, “AISI D2 ve AISI D3 Soğuk iş takım çeliklerinin frezede işlenebilirliğinin incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2014.
- [5] Anonim, (31 Temmuz 2015). [Online]. Erişim: <http://www.tungaloyamerica.com/pdf/High%20Temp%20web.pdf>
- [6] E. O. Ezugwu, “Improvements in the machining of aero-engine alloys using self propelled rotary tooling technique”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 185, no. 1, pp. 60–71, 2007.
- [7] E. Bradley, *Superalloys a Technical Guide*, 3th ed., New York, USA: ASM International, 1988, pp. 1-29.
- [8] E. O. Ezugwu, Z. M. Wanga and A.R. Machadop, “The machinability of nickel based alloys: a review”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 86, no. 1, pp. 1-16, 1999.
- [9] I. A. Chouldhury, “Machinability studies of high strength materials and the development of a data base system”, PhD dissertation, Mechanical and Manufacturing Engineering, Dublin City University, Dublin, Ireland, 1995.
- [10] O. Yazıcıoğlu ve M. B. Yazıcıoğlu, *Makine Elemanları*, 5. baskı, Ankara, Türkiye: Nobel Yayınevi, 2016, böl. 3, ss. 142-178.
- [11] E. O. Ezugwu, “Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, no. 12, pp. 1353–1367, 2005.
- [12] E. O. Ezugwu, “An overview of the machinability of aero-engine alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 134, no. 2, pp. 233-253, 2003.
- [13] W. Grzesik, *Advanced Machining Processes of Metallic Materials, Theory, Modelling and Applications*, 1th ed., Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2008, ch. 13, pp. 186-189.
- [14] M. S. Phadke, *Quality Engineering Using Robust Design*, 1th ed., New Jersey, USA: Prentice Hall, 1989, ch. 3, pp. 58-78.
- [15] A. B. Junior, A. E. Diniz and F. T. Filho, “Tool wear and tool life in end milling of 15–5 PH stainless steel under different cooling and lubrication conditions”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 43, no. 7-8, pp.

756–764, 2009.

- [16] A. Mondelin, F. Valiorgue, J. Rech, M. Coret and E. Feulvarch, “Hybrid model for the prediction of residual stresses induced by 15-5PH steel turning”, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 58, no. 1, pp. 69–85, 2012.
- [17] H. Demir ve A. Güllü, “Taşlamada parametrelerin etkisi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 7, s. 2, ss. 189-198, 2001.
- [18] H. Demir, A. Güllü ve U. Şeker, “Düzlem taşlama işleminde taşlama kuvvetlerinin ölçülmesi için bir dinamometre tasarımı ve imalatı”, *Teknoloji-ZKÜ Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Dergisi*, c. 9, s. 2, ss. 111-118, 2006.
- [19] Y. Işık ve M. C. Çakır, “Takım çeliklerinin talaşlı imalatında kesme kuvvetleri ile takım ömrü arasındaki ilişkinin deneysel olarak incelenmesi”, *9. Uluslararası Makine Tasarımı ve Üretimi Kongresi*, Ankara, Türkiye, 2000, ss. 150-161.
- [20] Ç. V. Yıldırım, T. Kıvak ve F. Erzincanlı, “Minimum miktarda yağlama tekniğinin tornalama ve frezeleme işlemlerindeki uygulamaları üzerine bir derleme”, *2. Uluslararası Demir Çelik Sempozyumu*, Karabük, Türkiye, 2015, ss. 361-368.
- [21] J. P. Davim, *Machining: Fundamentals and Recent Advances*, 1th ed., London, England: Springer, 2008, ch. 7, pp. 195-223.
- [22] V. S. Sharma, D. Manu and N. M. Suri, “Cooling techniques for improved productivity in turning”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, no. 6, pp. 435-453, 2009.
- [23] R. Autret and S. Y. Liang, “Minimum quantity lubrication in finish hard turning”, presented at Communication And Control Environment and Management (HNICEM) International Conference, Manila, Philippines, 2003.
- [24] H. Kim, K. Seo, K. H. Kang and A. D. Kim, “Nano-Lubrication: A Review”, *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, vol. 17, no. 6, pp. 829-841, 2016.
- [25] L. Dan and J. Mathew, “Tool wear and failure monitoring techniques for turning”, *Int. J. Machine Tools Manufacturing*, vol. 30, no. 4, pp. 579-598, 1990.
- [26] Y. Altıntaş, *Manufacturing Automation*, 1th ed. Vancouver, England: Cambridge University Pres, 2000, ch. 2, pp. 4-62.
- [27] F. Mendi, *Takım Tezgâhları Teori Ve Hesapları*, 2. baskı, Ankara, Türkiye: Gazi kitapevi, 2006, ss. 112-130.
- [28] F. Taylan, “Sert malzemelerin frezelenmesinde takım aşınma davranışlarının belirlenmesi”, Doktora tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2009.
- [29] Y. Yürekli, “Frezeleme işleminde eş yönlü ve ters yönlü talaş kaldırmanın cvd/pvd kaplanmış sert metal uçların ömrüne etkisi”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2012.
- [30] Y. Şahin, *Talaş Kaldırma Prensipleri I*, 1. baskı, Ankara, Türkiye: Nobel Yayınevi, 2016, böl. 4, ss. 146-163.
- [31] K. Çiftçi, “Mikroalaşımli çeliklerin frezelenmesinde kesme parametrelerinin talaşlı işlenebilirliğe etkisinin incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2005.

- [32] M. Akkurt, *Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgâhlar*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Birsen Yayınevi, 2004, böl. 1, ss. 12-25.
- [33] H. Oktay, “Eğik yüzeylerin frezelenmesinde farklı işleme yönlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi Bölümü, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2011.
- [34] Anonim, (10 Temmuz 2016). [Online]. Erişim: www.sandvik.coramant.com
- [35] M. C. Çakır, *Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Birsen Yayınevi, 2000, ss. 219-262.
- [36] S. Gülmez, “Bor alaşımlı çeliklerin alın frezelenmesinde kesme kuvvetlerinin ve yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi”, Doktora tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2003.
- [37] S. Özkan, “CNC tezgâhlarında kesme şartları ve işleme kalitesi arasındaki ilişkinin analizi”, Doktora tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2000.
- [38] M. C. Çakır, *Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri*, 2. baskı, Bursa, Türkiye: Dora Yayınevi, 2010, böl. 5, ss. 219-346.
- [39] E. Şirin, “AISI D2 Soğuk iş takım çeliğinin frezede işlenebilirliğinin incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2010.
- [40] U. Şeker, A. Kurt and İ. Çiftçi, “Design and construction of a dynamometer for measurement of cutting forces during machining with linear motion”, *Materials and Design*, vol. 23, no. 4, pp. 355-360, 2002.
- [41] E. Ekici, “Alüminyum matrisli B₄C takviyeli ve grafit katkılı kompozitlerin üretilmesi, mekanik özellikleri ve frezede işlenebilirliğinin incelenmesi”, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Makine Eğitimi Bölümü, Ankara, Türkiye, 2012.
- [42] M. Akkurt, *Talaş Kaldırma Bilimi Ve Teknolojisi, CNC Takım Tezgâhları Ve Üretim Otomasyonu*, 2. baskı, İstanbul, Türkiye: Birsen Yayınevi, 2012, ss. 152-204.
- [43] Y. Turgut, “Bağlama kalıplarında bağlama kuvvetlerinin hesaplanmasın için kullanılan emniyet katsayılarının deneysel olarak incelenmesi”, Doktora tezi, Makine Eğitimi Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2007.
- [44] B. Özses, “Bilgisayar sayısal denetimli takım tezgâhlarında değişik işleme koşullarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2002.
- [45] H. Öktem, “Kalıp parçalarının frezelenmesi sonucunda oluşan yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu”, Doktora tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 2009.
- [46] E. S. Gadelmawla, M. M. Koura, T. M. A. Maksoud, I. M. Elewa and H. H. Soliman, “Roughness Parameters”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 123, no. 1, pp. 133-145, 2002.
- [47] B. Bhushan, *Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques*, 2th ed., Ohio, USA: CRC Press LCL, 2001, ch. 2, pp. 10-71.
- [48] S. Neşeli, “Tornalamada takım geometrisi ve tirlama titreşimlerinin yüzey

- pürüzlülüğüne etkisi”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Selçuk Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2006.
- [49] E. Özcan, “CNC tezgâhlarda kullanılan kesici takımlarda takım aşınmasının kesme performansına dinamik etkileri”, Doktora tezi, Makine Eğitimi Bölümü, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2001.
- [50] U. Şeker ve M. Günay, İM 322-Kesici takım tasarımı, *Ders Notları*, Ankara, 2008.
- [51] M. J. Donachie and S. J. Donachie, *Superalloys source book*, 2th ed, Ohio, USA: American Society for Metal, 2002, ch. 10, pp. 189-194.
- [52] D. Ulutan and T. Ozel, “Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 51, no. 3, pp. 250– 280, 2011.
- [53] L. M. Maiyar, R. Ramanujam, K. Venkatesan and J. Jerald, “Optimization of machining parameters for end milling of Inconel 718 super alloy using Taguchi based grey relational analysis” *Procedia Engineering*, vol. 64, no. 1, pp. 1276-1282, 2013.
- [54] T. Kıvak, “Inconel 718’in delinebilirliğinin araştırılması”, Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2007.
- [55] W. F. Smith ve M. Erdoğan, *Mühendislik Alaşımalarının Yapı Ve Özellikleri: Demir Dışı Alaşımalar-Cilt 2*, 2. baskı, Ankara, Türkiye: Nobel Yayın Dağıtım, 2001, ss. 125-142.
- [56] A. Akdoğan, Malzeme II, *Ders Notları*, İstanbul, 2009.
- [57] S. Jothi, S. V. Merzlikin, T. N. Croft, J. Andersson and S. G. R. Brown, “An investigation of micro-mechanisms in hydrogen induced cracking in nickel-based superalloy 718”, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 664, no. 1, pp. 664-681, 2016.
- [58] P. Zhang, C. Hu, C. G. Ding, Q. Zhu and H. Y. Qin, “Plastic deformation behavior and processing maps of a Ni-based superalloy”, *Materials & Design*, vol. 65, no. 1, pp. 575-584, 2015.
- [59] R. Polvorosa, A. Suarez, L. L. Lacalle, I. Cerrillo, A. Wretland and F. Veiga, “Tool wear on nickel alloys with different coolant pressures: comparison of alloy 718 and Waspaloy”, *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 26, no. 1, pp. 44-56, 2017.
- [60] Ç. V. Yıldırım, T. Kıvak, E. Erzincanlı, I. Uygur and M. Sarıkaya, “Optimization of MQL parameters using the Taguchi method in milling of Waspaloy”, *Gazi University Journal Of Science*, vol. 30, no. 2, pp. 173-186, 2017.
- [61] Y. C. Lin, J. Deng, Y. Q. Jiang, D. X. Wen and G. Liu, “Hot tensile deformation behaviors and fracture characteristics of a typical Ni-based superalloys”, *Materials & Design*, vol. 55, no. 1, pp. 949-957, 2014.
- [62] S. Caruso, S. Imbrogno, S. Rinaldi and D. Umbrello, “Finite element modeling of microstructural changes in waspaloy dry Machining”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 89, no. 1-4, pp. 227-240, 2016.

- [63] R. S. Razavi, “Lazer beam welding of Waspaloy: Charecterization and corrosion behavior evaluation”, *Optics and Laser Technology*, vol. 82, no. 1, pp. 113-120, 2016.
- [64] A. Chamanfar, M. Jahazi, J. Gholipour, P. Wanjara and S. Yue, “Analysis of integrity and microstructure of linear friction welded Waspaloy”, *Materials Characterization*, vol. 104, no. 1, pp. 149-161, 2015.
- [65] D. Kulawinski, S. Henkel, H. Bierman, D. Hollander, M. Thiele and U. Gampe, “Isothermal and thermo-mechanical fatigue beyavior of the nickel base superalloy Waspaloy under unaxial and biaxial-planar loading”, *International Journal of Fatigue*, vol. 81, no. 1, pp. 21-36, 2015.
- [66] Anonim, (07 Temmuz 2016). [Online]. Erişim: <http://www.specialmetals.com>.
- [67] K. Chang and X. Liu, “Effect of γ content on the mechanical behavior of the Waspaloy alloy system”, *Materials Science and Engineering A*, vol. 308, no. 1, pp. 1–8, 2001.
- [68] S. Debnath, M. M. Reddy and Q. S. Yi, “Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 83, no. 1, pp. 33-47, 2014.
- [69] E. Kuram, B. Ozcelik, E. Demirbas and I. N. Tansel, “Evaluation of new vegetable-based cutting fluids on thrust force and surface roughness in drilling of AISI 304 using Taguchi method”, *Materials and Manufacturing Process*, vol. 26, no. 9, pp. 1136-1146, 2011.
- [70] S. A. Lawal, I. A. Choudhury and Y. Nukman, “Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals; A review”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 52, no. 1, pp. 1-12, 2012.
- [71] Y. Yang, C. Zhang, Y. Wang, Y. Dai and J. Luo, “Friction and wear performance of titanium alloy against tungsten carbide lubricated with phosphate ester”, *Tribology International Volume*, vol. 95, no. 1, pp. 27–34, 2016.
- [72] R. Padmini, P. V. Krishna and G. K. M. Rao, “Effectiveness of vegetable oil based nanofluids as potential cutting fluids in turning AISI 1040 steel”, *Tribology International*, vol. 94, no. 1, pp. 490-501, 2016.
- [73] H. Demir, H. B. Ulaş ve M. Zeyveli, “Talaşlı üretimde kullanılan kesme sıvılarında istenen özellikler”, *5. İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Elazığ, Türkiye, 2009, ss. 13-15.
- [74] M. Aydın, M. Gavas, M. Yaşar ve Y. Altunpak, *Üretim yöntemleri ve imalat teknolojileri*, 2. baskı, Ankara, Türkiye: Seçkin Yayınevi, 2012, böl. 7, ss. 296-302.
- [75] B. Özçelik, E. Kuram, E. Demirbaş and E. Sık, “Effects of vegetable-based cutting fluids on the wear in drilling”, *Sadhana*, vol.38, no. 4, ss. 687-706, 2013.
- [76] Ku-hlschmierstoffe-Begriffe, DIN 51385, 1991.
- [77] T. Grosse, M. Winter, S. Baron, H. W. Hoffmeister, C. Herrmann and K. Dro“der, “Honing with polymer based cutting fluids”, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 11, no. 1, pp. 89–98, 2015.
- [78] M. P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing: Metaterials, Processes and Systems*, 2th ed., New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2002, ch. 13, pp. 558-560.

- [79] E. M. Trent and P. K. Wright, *Metal cutting*, 4th ed., Oxford, United Kingdom: Butterworth Heinemann, 2000, ch. 10, pp. 311-337.
- [80] S. Chinchankar, A. V. Salve, P. Netake, A. More, S. Kendre and R. Kumar, “Comparative evaluations of surface roughness during hard turning under dry and with water-based and vegetable oil-based cutting fluids”, *Procedia Materials Science*, vol. 5, no. 1, pp. 1966-1975, 2014.
- [81] M. Winter and C. Herrmann, “Eco-Efficiency of alternative and conventional cutting fluids in external cylindrical grinding”, *Procedia CIRP*, vol. 15, no. 1, pp. 68-73, 2014.
- [82] M. C. Çakır, *Modern Talaşlı İmalat Yöntemleri*, Bursa, Türkiye: Vipaş Yayınları, 2000, ss. 187-213.
- [83] A. A. Vereschaka, A. S. Vereschaka, S. N. Grigoriev, A. K. Kirillov and O. U. Khaustova, “Development and research of environmentally friendly dry technological machining system with compensation of physical function of cutting fluids”, *Procedia CIRP*, vol. 7, no. 1, pp. 311-316, 2013.
- [84] M. P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, Processes and Systems*, 4th ed., New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2010, ch. 10, pp. 486-512.
- [85] M. Winter, N. Madanchi, C. Herrmann, “Comparative thermal analysis of cutting fluids in pendular surface grinding”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 87, no. 5-8, pp. 1751-1763, 2016.
- [86] J. B. Zimmerman, “Formulation evaluation of emulsifier systems for petroleum and bio-based semi-synthetic metalworking fluids”, Ph.D. dissertation, Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, Michigan, USA, 2003.
- [87] E. Kuram, “Bitkisel esaslı kesme sıvılarının delmedeki performanslarının araştırılması”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 2009.
- [88] S. C. Pang, M. A. Kalam, H. H. Masjuki and M. A. Hazrat, “A review on air flow and coolant flow circuit in vehicles’ cooling system”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 55, no. 23, pp. 6295-6306, 2012.
- [89] E. Yücel, M. Günay, M. Ayyıldız, Ö. Erkan ve F. Kara, “Talaşlı imalatta kullanılan kesme sıvılarının insan sağlığına etkileri ve sürdürülebilir kullanımı”, 6. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Elazığ, Türkiye, 2011, ss. 116-121.
- [90] U. Akben, “Minimum miktarda yağlama (MMY) ile kesmenin takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2009.
- [91] O. Çakır, A. Yardımeden, T. Özben and E. Kilickap, E. “Selection of cutting fluids in machining processes”, *Journal of Achievements in materials and Manufacturing engineering*, vol. 25, no. 2, pp. 99-102, 2007.
- [92] R. R. Srikant, M. S. Subrahmanyam and V. P. Krishna, “Applicability of cutting fluids with nanoparticle inclusion as coolants in machining”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 223, no. 2, pp. 221-225, 2009.

- [93] M. Soković and K. Mijanović, “Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 109, no. 1, pp. 181-189, 2001.
- [94] H. M. Gündoğdu, “Kesme sıvılı ve kuru talaşlı işleminin iş parçası ve kesici takım üzerindeki etkileri”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2006.
- [95] M. Akkurt, *Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgâhları*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Birsen Yayınevi, 2000, böl. 8, ss. 147-186.
- [96] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufacturing Engineering and Technology*, 6th ed. California, USA: Prentice Hall, 2010, ch. 11, pp. 286-313.
- [97] A. Alomar, “Occupational skin disease from cutting fluids”, *Dermatologic Clinics*, vol. 12, no. 3, pp. 537-546, 1994.
- [98] A. Shokrani, V. Dhokia and S. T. Newman, “Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 57, no. 1, pp. 83-101, 2012.
- [99] D. A. Stephenson and J. S. Agapiou, *Metal Cutting Theory and Practice*, 3rd ed., New York, USA: Taylor & Francis, New York, 2016, ch. 14, pp. 783-798.
- [100] J. D. Silliman, “Cutting and grinding fluids: selection and application”, presented at 1th Society of Manufacturing Engineers, Michigan, 1992.
- [101] S. Açar, “AA 7075-T6 alüminyum alaşımının minimum miktarda yağlama yöntemi ile talaşlı işlenebilirliğinin araştırılması”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2014.
- [102] R. B. Aronson, “Machine Tool 101: Part 6, Machine Servers”, *Manufacturing Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 47-52, 1994.
- [103] M. Dal, “Bitkisel esaslı kesme sıvılarının frezelemedeki performanslarının araştırılması”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 2009.
- [104] A. Çakır, “AA 7075 Ve AA 2024 alüminyum malzemelerine delik delinmesinde soğutma yöntemlerinin işleme performansına etkilerinin incelenmesi”, Doktora tezi, Makine Eğitimi Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2015.
- [105] Z. Aksoy, Kuru veya minimal miktarda soğutma sıvısı ile talaş kaldırma, *Ders Notları*, Balıkesir, 2001.
- [106] J. A. Schey, *Introduction to Manufacturing Processes*, 3th ed., New York, USA: McGraw-Hill, 2000, ch. 7, pp. 356-392.
- [107] T. Thepsonthi, M. Hamdi and K. Mitsui, “Investigation into minimal-cutting-fluid application in high-speed milling of hardened steel using carbide mills”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol.49, no. 1, pp. 156-162, 2009.
- [108] S. Suda, H. Yokota, I. Inasaki, T. Wakabayashi, “A synthetic ester as an optimal cutting fluid for minimal quantity lubrication machining”, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 51, no. 1, pp. 95-98, 2002.
- [109] N. Anaç ve İ. Ay, “Soğutma sıvılarının insan sağlığına etkileri”, *Metal Makine*, c. 149, ss. 1-8, 2004.

- [110] İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Tüzüğü, *T. C. Resmi Gazete*, Sayı: 14765 11 Ocak 1974.
- [111] A.E. Diniz and R. Micaroni, “Cutting conditions for finish turning process aiming: the use of dry cutting”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, no. 8, pp. 899-904, 2002.
- [112] M. A. Salete and J. F. G. D. Oliveira, “Vegetable based cutting fluid-an environmental alternative to grinding proces”, *In: 15th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, Sydney, N.S.W, 2008, pp. 664-668.
- [113] N. R. Dhar, M. W. Islam, S. Islam and 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*, vol. 171, no. 1, pp. 93-99. 2006.
- [114] L. M. Barczak, A. D. L. Batako and M. N. Morgan, “A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (MQL) conditions”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 50, no. 11, pp. 977-985, 2010.
- [115] F. Klocke and G. Eisenblatter, “Dry cutting”, *CIRP Annals Manufacturing Technology*, vol. 46, no. 2, pp. 519- 526, 1997.
- [116] A. Filipovic and D. A. Stephenson, “Minimum quantity lubrication (MQL) applications in automotive power-train machining”, *Machining Science and Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 3-22, 2006.
- [117] N. Banerjee and A. Sharma, “Identification of a friction model for minimum quantity lubrication machining”, *Journal of cleaner production*, vol. 83, no. 1, pp. 437-443, 2014.
- [118] W. D. Hewson and G. K. Gerow, “High performance metal working oil”, USA. Patent 5958849, September 28, 1999.
- [119] P. Bollig, C. Faltin, R. Schießl, J. Schneider, U. Maas and V. Schulze, “Considering the influence of minimum quantity lubrication for modelling changes in temperature, forces and phase transformations during machining”, *Procedia CIRP*, vol. 31, no. 1, pp. 142 – 147, 2015.
- [120] S. Bhowmick and A. T. Alpas, “The role of diamond-like carbon coated drills on minimum quantity lubrication drilling of magnesium alloys”, *Surface & Coatings Technology*, vol. 205, no. 1, pp. 5302-5311, 2011.
- [121] A. Attanasio, M. Gelfi, C. Giardini and C. Remino, “Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear”, *Wear*, vol. 260, no. 1, pp. 333-338, 2006.
- [122] M. Rahman, S. A. Kumar and M. U. Salam, “Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 42, no. 1, pp. 539-547, 2002.
- [123] Ç. V. Yıldırım, T. Kıvak ve F. Erzincanlı, “Minimum miktarda yağlama tekniğinin delme ve taşlama operasyonlarındaki uygulamaları üzerine bir derleme”, *6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS’15)*, İstanbul, 2015, ss. 247-263.
- [124] D. U. Braga, A. E. Diniz, G. W. A. Miranda and 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*, vol. 122, no. 1, pp. 127-138, 2012.

- [125] K. Weinert, I. Inasaki, J. Sutherland and T. Wakabayashi, “Dry machining and minimum quantity lubrication”, *CIRP Annals Manufacturing Technology*, vol. 53, no. 2, pp. 511-537, 2004.
- [126] U. Heisel, D. Lutz, R. Wassmer and U. Walter, “The minimum quantity lubricant technique and its application in the cutting process”, *Machines and Metals Magazine*, vol. 386, no. 1, pp. 22–38, 1998.
- [127] T. Tawakoli, M. J. Hadad and M. H. Sadeghi, “Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication (MQL) grinding process”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 50, no. 6, 521-531, 2010.
- [128] Anonim, (07 Temmuz 2002). [Online]. Erişim: <http://www.skf.com>.
- [129] S. Suda, “Evaluation of machinability with MQL system and effectiveness in production lines”, *Proceedings of International Tribology Conference*, Nagasaki, Japan, 2001, pp. 203-208.
- [130] E. Canıyılmaz, “Kalite geliştirmede Taguchi metodu ve bir uygulama”, Yüksek lisans tezi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2001.
- [131] B. Gökçe ve S. Taşgetiren, “Kalite için deney tasarımı”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, c. 6, s. 1, ss. 71-83, 2009.
- [132] Y. Kayı, “Plastik enjeksiyon prosesindeki parametrelerin çekme problemine etkilerinin taguchi metodu ile incelenmesi”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2006.
- [133] A. M. Khorasani, I. Gibson, M. Goldberg, E. H. Doeven and G. Littlefair, “Investigation on the effect of cutting fluid pressure on surface quality measurement in high speed thread milling of brass alloy (C3600) and aluminium alloy (5083)”, *Measurement*, vol. 82, no. 1, pp. 55-53, 2016.
- [134] R. N. Kackar and A. S. Shoemaker, “Robust design: a cost-effective method for improving manufacturing processes”, *AT&T Technical Journal*, vol. 65, no. 2, pp. 39-50, 1986.
- [135] R. K. A. Roy, “*A Primer on the Taguchi Method*”, 2th ed., New York, USA: Van Nostrand Reinhold, 1990, ch. 1, pp. 40-155.
- [136] G. Taguchi, S. Chowdhury and Y. Wu, “*Taguchi’s Quality Engineering Handbook*”, 1th ed., New Jersey, USA: John Wiley&Sons, 2007, ch. 4, pp. 221-290.
- [137] N. Peşkırcioğlu, “Toplam kalite güvenilirliği programlarının entegre bir parçası olarak Taguchi yöntemi”, *Verimlilik Dergisi*, c. 4, ss. 66-91, 1990.
- [138] P. J. Ross, *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, 1th ed., New York, USA: McGraw-Hill, 1996, ch. 3, pp. 186-211.
- [139] A. S. Anagün, Kalite Kontrolde İleri Teknikler, *Ders Notları*, Eskişehir, 2000.
- [140] B. M. Gopalsamy, B. Mondal and S. Ghosh, “Taguchi Method and ANOVA: An approach for process parameters optimization of hard machining while machining hardened steel”, *Journal of Scientific and Industrial Research*, vol. 68, no. 1, pp. 686-695, 2009.
- [141] Ç. Özay, “Teğetsel tornalama-frezeleme yönteminde işleme parametrelerinin teorik

ve deneysel olarak araştırılması”, Doktora tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2009.

- [142] U. Olgun and E. Budak, “Machining of difficult-to-cut-alloys using rotary turning tools”, *Procedia CIRP*, vol. 8, no. 1, pp. 81-87, 2013.
- [143] M. C. Çakır, A. Kuş and Y. Işık, “The Effects of cutting parameters on chip-tool interface temperature and surface roughness in turning of Waspaloy”, *The 16th International Conference on Machine Design and Production*, İzmir, Turkey, 2014, pp. 287-296.
- [144] A. R. Motorcu, A. Kuş and İ. Durgun, “The evaluation of the effects of control factors on surface roughness in the drilling of Waspaloy superalloy”, *Measurement*, vol. 58, no. 1, pp. 394-408, 2014.
- [145] T. Obikawa, Y. Kamata, Y. Asano, K. Nakayama and A. W. Otieno, “Micro-liter lubrication machining of Inconel 718”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 48, no. 15, pp.1605–1612, 2008.
- [146] C. Wang, K. Li, M. Chen and Z. Liu, “Evaluation of minimum quantity lubrication effects by cutting force signals in face milling of Inconel 182 overlays”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 108, no. 1, pp. 145-157, 2015.
- [147] S. Olovsjö and L. Nyborg, “Influence of microstructure on wear behaviour of uncoated WC tools in turning of Alloy 718 and Waspaloy”, *Wear*, vol. 282, no. 1, pp. 12–21, 2012.
- [148] Y. Su, N. He, L. Li and X. L. Li, “An experimental investigation of effects of cooling/lubrication conditions on tool wear in high-speed end milling of Ti-6Al-4V”, *Wear*, vol. 261, no. 1, pp. 760-766, 2006.
- [149] A. Ginting and M. Nouari, “Experimental and numerical studies on the performance of alloyed carbide tool in dry milling of aerospace material”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* vol. 46, no. 7, pp. 758-768, 2006.
- [150] L. N. Lacalle, P. J. Lopez, J. I. Llorente and J. A. Sanchez, “Advanced cutting conditions for the milling of aeronautical alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 100, no. 1, pp. 1-11, 2000.
- [151] L. N. Lacalle, J. A. Sanchez, A. Lamikiz and A. Celaya, “Plasma assisted milling of heat – resistant superalloys”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 126, no. 2, pp. 274-285, 2004.
- [152] M. Benghersallah, L. Boulanouar, G. L. Coz, A. Devillez and D. Dudzinski, “Machinability of Stellite 6 hardfacing”, *International Conference on Experimental Mechanics*, Poitiers, France, 2010, pp. 1-8.
- [153] K. M. Li and S. Y. Chou, “Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.210, no. 15, pp. 2163-2170, 2010.
- [154] Y. S. Liao and H. M. Lin, “Mechanism of minimum quantity lubrication in high-speed milling of hardened steel”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* vol.47, no. 11, pp. 1660–1666, 2007.
- [155] M. Sarikaya, V. Yilmaz and A. Gullu, “Analysis of cutting parameters and cooling/lubrication methods for sustainable machining in turning of Haynes 25 superalloy”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 133, no. 1, pp. 172-181, 2016.

- [156] M. Sarıkaya and A. Güllü, “Multi-response optimization of minimum quantity lubrication parameters using Taguchi- based grey relational analysis in turning of difficult-to-cut alloy Haynes 25”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 91, no. 1, pp. 347-357, 2015.
- [157] I. Ansari and B. Kotiveerachary, “Study of the effect of Minimum Quantity Lubrication on the surface roughness of Incoloy 800 during turning operation”, *International Journal of Current Engineering and Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 17-22, 2014.
- [158] K. M. Li and S. Y. Liang, “Performance profiling of minimum quantity lubrication in Machining”, *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, vol. 35, no. 3, pp. 226-233, 2007.
- [159] Y. Kamata and T. Obikawa, “High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 192, no. 1, pp. 281-286, 2007.
- [160] D. G. Thakur, B. Ramamoorthy and L. Vijayaraghavan, “Optimization of minimum quantity lubrication parameters in high speed turning of superalloy Inconel 718 for sustainable development”, *Signal*, vol. 20, no. 300, pp. 224-226, 2009.
- [161] B. Davis, J. K. Schueller and Y. Huang, “Study of ionic liquid as effective additive for minimum quantity lubrication during titanium Machining”, *Manufacturing Letters*, vol. 5, no. 1, pp. 1-6, 2015.
- [162] H. Lin, C. Wang, Y. Yuan, Z. Chen, Q. Wang and Z. Xiong, “Tool wear in Ti-6Al-4V alloy turning under oils on water cooling comparing with cryogenic air mixed with minimal quantity lubrication”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 81, no. 1-4, pp. 87–101, 2015.
- [163] S. Thamizhmanii and S. Hasan, “A study of minimum quantity lubrication on Inconel 718 steel”, *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 39, no. 1, pp. 38-44, 2009.
- [164] D. Jia, C. Li, Y. Zhang, D. Zhang and X. Zhang, “Experimental research on the influence of the jet parameters of minimum quantity lubrication on the lubricating property of Ni-based alloy grinding”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 82, no. 1-4, pp. 617–630, 2016.
- [165] Z. Q. Liu, X. J. Cai, M. Chen and Q. L. An, “Investigation of cutting force and temperature of end-milling Ti–6Al–4V with different minimum quantity lubrication (MQL) parameters”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 225, no. 8, pp. 1273-1279, 2001.
- [166] B. Chetan, C. Behera, S. Ghosh and P. V. Rao, “Wear behavior of PVD TiN coated carbide inserts during machining of Nimonic 90 and Ti6Al4V super –alloys under dry and MQL conditions”, *Ceramics International*, vol. 42, no.13, pp. 14873-14885, 2016.
- [167] M. Z. A. Yazid, C. H. CheHaron, J. A. Ghani, G. A. Ibrahim and A. Y. M. Said, “Surface integrity of Inconel 718 when finish turning with PVD coated carbide tool under MQL”, *Procedia Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 396-401, 2011.
- [168] N. Tosun and M. Hüseyinoğlu “Effect of MQL on surface roughness in milling of AA7075-T6”, *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 25, no. 8, pp. 793-798,

2010.

- [169] S. Bhowmick, M. J. Lukitsch and Alpas, “Tapping of Al–Si alloys with diamond-like carbon coated tools and minimum quantity lubrication”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 210, no. 5, pp. 2142-2153, 2010.
- [170] N. R. Dhar, M. Kamruzzaman and M. Ahmed, “Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.172, no. 2, pp. 299-304, 2006.
- [171] V. N. Gaitonde, S. R. Karni and J. P. Davim, “Selection of optimal MQL and cutting conditions forenhancing machinability in turning of brass”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 204, no. 1, pp. 459-464, 2008.
- [172] A. Iqbal, H. Ning, I. Khan, L. Liang and N. U. Dar, “Modeling the effects of cutting parameters in MQL-employed finish hard-milling process using D-optimal method”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol.199, no. 1, pp. 379-390, 2008.
- [173] M. C. Kang, K. H. Kim, S. H. Shin, S. H. Jang, J. H. Par and C. Kim, “Effect of the minimum quantity lubrication in high-speed end-milling of AISI D2 cold-worked die steel (62 HRC) by coated carbide tools”, *Surface & Coatings Technology*, vol. 202, no. 22, pp. 5621-5624, 2008.
- [174] P. Krishna, R. R. Srikant and D. Nageswara, “Experimental investigation on the performance of nanoboric acid suspensions in SAE-40 and coconut oil during turning of AISI 1040 steel”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 50, no. 10, pp. 911-916, 2010.
- [175] P. S. Sreejith, “Machining of 6061 aluminium alloy with MQL, dry and flooded lubricant conditions”, *Materials Letters*, vol. 62, no. 2, pp. 276-278, 2007.
- [176] M. M. A. Khan, M. A. H. Mithu and 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*, vol. 209, no. 15, pp. 5573-5583, 2009.
- [177] A. E. Diniz, J. R. Ferreira and F. T. Filho, “Influence of refrigeration /lubrication condition on SAE 52100 hardened steel turning at several cutting speeds”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 43, no. 3, pp. 317-326, 2003.
- [178] Ş. Karabulut, “Vermiküler grafitli dökme demirin frezelemedeki işlenebilirliğinin deneysel olarak araştırılması ve yapay sinir ağlarıyla modellenmesi”, Doktora tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2012.
- [179] M. Shaw, *Metal Cutting Principles*, 2th ed., New York, USA: Oxford University Press, 1989, ch. 11, pp. 170-206.
- [180] X. Xu and H. Hu, “Development of non-contact surface roughness measurement in last decades”, *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, Hunan, China, 2009, pp. 210-213.
- [181] S. Mordo, V. Popravko and A. Barari, “Study of the effect of coating parameters and substrates on 3D surface roughness in diamond-like-carbon coating process”, *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, no. 9, pp. 1861-1866, 2013.
- [182] A. M. Pinar ve A. Güllü, “Determination of optimal levels of piston diameter, feed

- rate, direction and axis parameters in a hydraulic positioning system”, *E-Journal of New World Sciences Academy*, vol. 4, no. 3, pp. 252-262, 2009.
- [183] A. M. Pınar, E. Atik ve U. Çavdar, “AA 7075 alaşımının frezelenmesinde kesme hızı, ilerleme oranı, işleme deseni ve talaş derinliği işlem parametrelerinin yüzey kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi”, 2. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, Balıkesir, Türkiye, 2010, ss. 281-290.
- [184] B. Özçelik, E. Demirbaş, M. Bayramoğlu ve M. Kobya, “Bitkisel yağ esaslı metal işleme sıvısının geliştirilmesi ve talaşlı imalatta uygulaması”, TÜBİTAK, Türkiye, Rap. 107M164, 2010.
- [185] E. Kuram, B. T. Simsek, B. Ozcelik, E. Demirbas and Ş. Askin, “Optimization of the cutting fluids and parameters using taguchi and ANOVA in milling”, *The World Congress on Engineering*, London, United Kingdom, 2010, pp. 1292-1296.
- [186] D. Fratila ve C. Caizar, “Investigation of the influence of process parameters and cooling method on the surface quality of AISI-1045 during turning”, *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 27, no. 10, pp. 1123-1128, 2010.
- [187] X. Tian, J. Zhao, Z. Gong and Y. Dong, “Effect of cutting speed on cutting forces and wear mechanisms in high-speed face milling of Inconel 718 with Sialon ceramic tools”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 69, no. 9-12, pp. 2669-2678, 2013.
- [188] Z. Guimu, Y. Chao, S. R. Chen and A. Libao, “Experimental study on the milling of thin parts of titanium alloy (TC4)”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 138, no. 1, pp. 489-493, 2003.
- [189] H. Z. Li, H. Zeng and X. Q. Chen, “An experimental study of tool wear and cutting force variation in the end milling of Inconel 718 with coated carbide inserts”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 180, no. 1, pp. 296–304, 2006.
- [190] T. Kivak, “Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts”, *Measurement*, vol. 50, no. 1, pp. 19-28, 2014.
- [191] M.H. Cetin, B. Ozcelik, E. Kuram and E. Demirbas, “Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, no. 17, pp. 2049-2056, 2011.
- [192] M. Karabatak ve F. Kara, “AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin sert tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün deneysel optimizasyonu”, *Politeknik Dergisi*, c. 19, s. 3, ss. 349-355, 2016.
- [193] A. Dvivedi and P. Kumar, “Surface quality evaluation in ultrasonic drilling through the Taguchi technique”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 34, no. 1-2, pp. 131-140, 2007.
- [194] S. Ekinovic, H. Prcanovic and E. Begovic, “Investigation of influence of MQL machining parameters on cutting forces during MQL turning of carbon steel St52-3”, *Procedia Engineering*, vol. 132, no. 1, pp. 608-614, 2015.
- [195] H. B. Ulaş, F. Mihmat ve H. Demir, “DIN 1.2344 sıcak iş takım çeliğinin testere freze çakılarıyla işlenebilirliğinin araştırılması”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 26, s. 2, 170-178, 2010.

- [196] H. M. Çetin ve Özçelik, “AISI 304 çeliklerin tornalanmasında EP katkılı karma bitkisel esaslı kesme sıvılarının performansı”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 26, no. 3, ss. 581-589, 2011.
- [197] M. H. Çetin, “Bitkisel esaslı kesme sıvılarının tornalamadaki performansının araştırılması”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, 2010.
- [198] M. Soğukoğlu, *Akışkanlar Mekaniği*, 1. baskı, İstanbul, Türkiye: Birsen Yayınevi, 2000, ss. 251-304.
- [199] E. O. Ezugwu and A. R. Machado, A. R., “Face milling of aerospace material”, *Proceedings of the 1st International Conference on Behaviour of Materials in Machining*, Warwickshire, England, 1988, pp. 1-11.
- [200] D. P. Adler, W. S. Hii, D. J. Michalek and J. W. Sutherland, “Examining the role of cutting fluids in machining and efforts to address associated environmental/health concerns”, *Machining Science and technology*, vol. 10, no. 1, pp. 23-58, 2006.
- [201] M. A. Xavier and M. Adithan, “Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 2, pp. 900-909, 2009.
- [202] E. O. Ezugwu and C. I. Okeke, “Effects of coating materials on the machinability of a nickel based C-263 alloy”, *Tribology Transactions*, vol. 43, no. 3, pp. 549-553, 2000.
- [203] A. R. C. Sharman and J.I. Hughes, “Workpiece surface integrity and tool life issues when turning Inconel 718 nickel based superalloy”, *Machining Science and Technology*, vol. 8, no. 3, pp. 399-414, 2004.
- [204] C. Ducros, V. Benevent and F. Sanchette, “Deposition, characterization and machining performance of multilayer PVD coatings on cemented carbide cutting tools”, *Surface and Coatings Technology*, vol. 163, no. 1, pp. 681-688, 2003.
- [205] S.P. B. Podder, “Effect of machining environment on machinability of Nimonic 263 during end milling with uncoated carbide tool”, *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, vol. 3, no.1, pp. 104-119, 2008.
- [206] G. Fox-Rabinovich, J. M. Dasch, T. Wagg, K. Yamamoto, S. Veldhuis and G. K. Dospaeva, “Cutting performance of different coatings during minimum quantity lubrication drilling of aluminum silicon B319 cast alloy”, *Surface & Coatings Technology*, vol. 205, no. 16, pp. 4107-4116, 2011.
- [207] H. A. Kishawy, M. Dumitrescu, E. N and M. A. Elbestawi, “Effect of cutting fluid strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during highspeed machining of A356 aluminum alloy”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol.45, no. 1, pp. 219-227, 2005.
- [208] V. T. G. Naves, M. B. Da Silva and F. J. Da Silva, “Evaluation of the effect of application of cutting fluid at high pressure on tool wear during turning operation of AISI 316 austenitic stainless steel”, *Wear*, vol. 302, no.1, pp. 1201-1208, 2013.
- [209] Y. Kaynak, H. E. Karaca, R. D. Noebe and I. S. Jawahir, “Tool-wear analysis in cryogenic machining of NiTi shape memory alloys: A comparison of tool-wear performance with dry and MQL Machining”, *Wear*, vol. 306, no. 1, pp. 51-63, 2013.

- [210] A. D. Jayal, A. K. Balaji, R. Sesek, A. Gaul and D. R. Lillquist, "Machining performance and health effects of cutting fluid application in drilling of A390. 0 cast aluminum alloy", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 9, no. 2, pp. 137-146, 2007.
- [211] A. Jawaid, "Cutting performance and wear characteristics of PVD coated and uncoated carbide tools in face milling Inconel 718 aerospace alloy", *Journal of Processing Technology*, vol. 116, no. 1, pp. 2-9, 2001.
- [212] H. R. Krain, A. R. C. Sharman and K. Ridgway, "Optimization of tool life and productivity when end milling Inconel 718TM", *Journal of Processing Technology*, vol. 189, no. 1, pp. 153-161, 2007.
- [213] B. K. Subhas, R. Bhat, K. Ramachandra and H. K. Balakrishna, "Dimensional instability studies in machining of Inconel 718 Nickel based superalloy as applied to aerogas turbine components", *Journal of Engineering for Gas Turbines Power*, vol. 122, no. 1, pp. 55-61, 2000.
- [214] S. Kannan, H. A. Kishawy, I. M. Deiab and M. K. Surappa, "On The Role of Reinforcements on Tool Performance During Cutting of Metal Matrix Composites", *Journal of Manufacturing Processing*, vol. 8, no. 2, pp. 67-75, 2006.
- [215] T. Obikawa, Y. Kamata, Y. Asano and A. Otieno, "Micro-liter lubrication machining on Inconel 718", *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, vol. 48, no. 15, pp. 1605-1612, 2008.
- [216] G. Liu G, M. Chen and Z. Shen, "Experimental Studies on machinability of Six Kinds of Nickel-Based Superalloys", *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, vol. 1, no. 3, pp. 287-300, 2006.
- [217] A. Altın, M. Nalbant and A. Taskesen, "The effects of cutting speed on tool wear and tool life when machining Inconel 718 with ceramic tools, *Materials and Design*, vol. 28, no. 9, pp. 2518-2522, 2007.
- [218] A. Altın, H. Gökkaya ve M. Nalbant, "İşleme Parametrelerinden Kesme Hızının Inconel 718 Süper Alaşımın İşlenebilirliğine Etkisi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 21, s. 3, ss. 581-586, 2006.
- [219] İ. Çiftçi, "Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools", *Tribology International*, vol. 39, no. 6, pp. 565-569, 2006.
- [220] J. G. Lima, R. F. Avila, A. M. Abroa, M. Faustino and J. Davim, "Hard turning AISI 4340 high strength low alloy steel and AISI D2 cold work steel", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 169, no. 3, pp. 388-395, 2005.
- [221] N. Narutaki, Y. Yamane, K. Hayashi, T. Kitagawa and K. Uehara, "High-speed machining of Inconel 718 with ceramic tools", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 42, no. 1, pp. 103-106, 1993.
- [222] İ. Çiftçi, M. Türker and U. Seker, "CBN cutting tool wear during machining of particulate reinforced MMCs", *Wear*, vol. 257, no. 9, pp. 1041-1046, 2004.
- [223] İ. Çiftçi, "Alüminyum esaslı kompozitlerde takviye oranı ve boyutunun mekanik özellikler ve işlenebilirlik üzerine etkisinin araştırılması", Doktora tezi, Makine Eğitimi Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2003.
- [224] M. V. Ribeiro, M. R. V. Moreira and J. R. Ferreira, "Optimization of Titanium alloy (6Al-4V) machining", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 143,

no. 1, pp. 458-463, 2003.

- [225] M. S. Erdem ve İ. S. Akmandor, “Uçak motoru ve elektrojen gruplarındaki gaz türbini teknolojisindeki ilerlemeler, malzeme, yüzey teknolojileri ve imalat süreçlerindeki gelişmeler”, *Mühendis ve Makine*, c. 45, s. 528, ss. 30-37, 2004.
- [226] A. R. Motorcu, A.R, “Nikel esaslı süperalaşımların ve Titanyum alaşımlarının işlenebilirliği 1. bölüm: sinterlenmiş karbür takımların performanslarının değerlendirilmesi”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 25, s. 1, ss. 302-330, 2009.
- [227] T. Obikawa, Y. Kamata and J. Shinozuka, “Highspeed grooving with applying MQL”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, no. 14, pp. 1854-1861, 2006.
- [228] H. Gökkaya, G. Sur ve H. Dilipak, “PVD ve CVD kaplamalı sementit karbür kesici takımların işleme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğüne etkisinin deneysel olarak incelenmesi”, *Karabük Üniversitesi Teknoloji Dergisi*, c. 7, s. 3, ss. 473-478, 2004.
- [229] M. Günay, “Toz metalurjisi yöntemi ile üretilmiş Al-Si/Sicp kompozitlerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması”, Doktora tezi, Makine Eğitimi Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2009.
- [230] E. P. Garmo, J. T. Black and R. A. Kohser, “*Materials and processes in manufacturing*”, 9th ed., New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2003, ch. 20, pp. 173-182.
- [231] Sandvik Coromant (firm), “*Modern metal cutting—A practical handbook*”, 1th ed., Stockholm, Sweden: Sandvik Coromant, 1996, ch. 3, pp. 218-256.
- [232] D. M. Lalwani, “Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 206, no. 1, pp. 167-179, 2008.
- [233] J. Takadom and H.H. Bennani, “Influence of substrate roughness and coating thickness on adhesion, friction and wear of TiN films”, *Surface and Coatings Technology*, vol. 96, no. 2, pp. 272-282, 1997.
- [234] K.L. Rutherford, S.J. Bull, E.D. Doyle and I.M. Hutchings, “Laboratory characterisation of the wear behaviour of PVD-coated tool steels and correlation with cutting tool performance”, *Surface and Coatings Technology*, vol. 80, no. 1, pp. 176-180, 1996.
- [235] G.W. Stachowiak and A.W. Batchelor, “*Engineering Tribology*”, 4th ed., Boston, USA: Butterworth Heinemann, 2001, ch. 2, pp. 11-49.
- [236] R. S. Pawade, S. S. Joshi, P. K. Brahmankar and M. Rahman, “An investigation of cutting forces and surface damage in high-speed turning of Inconel 718”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 192, no. 1, pp. 139-146, 2007.
- [237] L. Li, N. He, M. Wang and Z. G. Wang, “High speed cutting of Inconel 718 with coated carbide and ceramic inserts”, *Journal of Processing Technology*, vol. 129, no. 1, pp. 127-130, 2002.
- [238] A. Taşlıyan, M. Acarer, U. Şeker, H. Gökkaya and B. Demir, “Inconel 718 süper alaşımının dişlenmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvveti üzerindeki etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 22, s. 1, ss. 1-5, 2007.

- [239] E. O. Ezugwu, J. Bonney, D. A. Fadare and W. F. Sales, “Machining of nickel-base, Inconel 718, alloy with ceramic tools under finishing conditions with various coolant supply pressures”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 162, no.1, pp. 609-614, 2005.
- [240] M. A. El-Bestawi, T. I. El-Wardany, D. Yan and M. Tan, “Performance of whisker-reinforced ceramic tools in milling nickel-based superalloy”, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 42, no. 1, pp. 99-102, 1993.
- [241] S. A. Kumar, A. R. Draï and T. Sornakumar, “Wear behaviour of Alümina based ceramic cutting tools on machining steels”, *Tribology International*, vol. 39, no. 3, pp. 191-197, 2006.
- [242] M. A. Elbestawi, L. Chen, C. E. Becze and T. I. El-Wardany, “High speed milling of dies and moulds in their hardened state”, *CIRP Annals-Manuf Technol*, vol. 46, no. 1, pp. 57-62, 1997.
- [243] R.T. Coelho, L. R. Silva, A. Braghini and A. A. Bezerra, “Some effects of cutting edge preparation and geometric modifications when turning Inconel 718TM at high cutting speeds”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 148, no. 1, pp. 147-153, 2004.
- [244] R. Arunachalam and M. A. Mannan, “Machinability of nickel-based high temperature alloys”, *Machining Science and Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 127-168, 2000.
- [245] A. Cicek, T. Kivak, I. Uygur, E. Ekici and Y. Turgut, “Performance of cryogenically treated M35 HSS drills in drilling of austenitic stainless steels”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 60, no. 1, pp. 65-73, 2012.
- [246] Z. Jun, D. Jianxin, Z. Jianhua and A. Xing, “Failure mechanisms of a whisker - reinforced ceramic tool when machining nickel-based alloys”, *Wear*, vol. 208, no. 1, pp. 220-225, 1997.
- [247] L. Li, N. He, M. Wang and Z.G. Wang, “High speed cutting of Inconel 718 with coated carbide and ceramic inserts”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 129, no. 1, pp. 127-130, 2002.
- [248] Y. Chen, J. Milner, C. Bunget, L. Mears and T. Kurfess, “Investigations on performance of various ceramic tooling while milling nickel-based superalloys,” *Proceedings of 2013 ASME International Manufacturing Science and Engineering Conference (MSEC2013)*, Madison, USA, 2013, pp. 10-14.
- [249] A. Taşlıyan, M. Acarer, U. Şeker, H. Gökkaya ve B. Demir, “Inconel 718 süper alaşımının işlenmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvveti üzerindeki etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 22, no. 1, pp. 1-5, 2007.
- [250] A. Çiçek, F. Kara, T. Kivak and E. Ekici, “Evaluation of machinability of hardened and cryo-treated AISI H13 hot work tool steel with ceramic inserts”, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 41, no. 1, pp. 461-469. 2013.
- [251] M. C. Cakir and Y. Isik, “Investigating the machinability of austempered ductile irons having different austempering temperatures and times”, *Materials & Design*, vol. 29, no. 5, pp. 937-942, 2008.
- [252] Y. Özçatalbaş and F. Ercan, “The effects of heat treatment on the machinability of

- mild steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 136, no. 1, pp. 227-238, 2003.
- [253] D. Uluğ, “Kaplmalı ve kaplamasız sementit karbür takımlar için taylor takım ömrü modeli’ndeki “n” üstel değerin deneyssel olarak araştırılması” Yüksek lisans tezi, Makine Eğitimi Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2012.
- [254] I. A. Choudhury and M. A. Baradie, “Surface roughness prediction in the turning of high-strength steel by factorial design of experiments”, *Journals of Processing Technology*, vol. 67, no. 1-3, pp. 55-61, 1997.
- [255] T. Özel T. K. Hsu and E. Zeren, “Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 25, no. 3, pp. 262-269, 2005.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Çağrı Vakkas YILDIRIM
Doğum Tarihi ve Yeri : 11.08.1982 Adıyaman
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : cagriyildirim@ibu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

| Derece | Alan | Okul/Üniversite | Mezuniyet Yılı |
|-----------|-----------------------------|--|----------------|
| Doktora | Makina Mühendisliği | Düzce Üniversitesi | 2017 |
| Y. Lisans | Makina Eğitimi | Gazi Üniversitesi | 2011 |
| Lisans | Makina Mühendisliği | Abant İzzet Baysal Üniversitesi | 2016 |
| Lisans | Talaşlı Üretim Öğretmenliği | Gazi Üniversitesi | 2005 |
| Lise | Torna/Tesviye | Mehmet Akif Ersoy Endüstri Meslek Lisesi | 1999 |