




Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

AISI 2507 Süper Dupleks Paslanmaz Çeliğinin Hibrit Soğutma/Yağlama Yöntemleri Altında Tornalanmasında Yüzey Kalitesinin İncelenmesi

 Emre ÇELİK^a,  Şenol ŞİRİN^{b,*},  Turgay KIVAK^c

^aMakina ve İmalat Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

^bMakine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Gümüşova Meslek Yüksekokulu, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

^cMakine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: senolsirin@duzce.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.819984

ÖZET

Son yıllarda ekolojik soğutma/yağlama yöntemleri sürdürülebilir imalat için metal işleme operasyonlarında kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemlerin başında ise birbirine göre üstün özelliklerin bir araya getirildiği hibrit soğutma/yağlama yöntemlerinin kullanıldığı çalışmalar ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada; AISI 2507 dupleks paslanmaz çeliğinin Minimum Miktarla Yağlama (MMY), kriyojenik soğutma (Kry) ve hibrit (Kry+MMY) soğutma/yağlama koşulları altında tornalanmasında, yüzey kalitesi incelenmiştir. İşlenen yüzeylerin kalitesinin belirlenmesinde yüzey pürüzlülük (Ra), iki boyutlu yüzey görüntüleri ve üç boyutlu yüzey topografyaları kullanılmıştır. Deneyler üç farklı soğutma/yağlama koşulunda (MMY, Kry ve Kry+MMY), kesme hızında (80, 120 ve 160 m/dak) ve ilerlemede (0,16-0,20 ve 0,24 mm/dev) gerçekleştirilmiştir. Deney tasarımında ve optimum koşulların belirlenmesinde Taguchi L₂₇ tasarımı kullanılmıştır. Deneysel sonuçlara etki eden faktörler ve faktörlerin etki oranlarını belirlemek için varyans analizi (ANOVA) kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre yüzey kalitesi için optimum koşullar, Kry+MMY hibrit soğutma/yağlama koşulu, 160 m/dak kesme hızı ve 0,16 mm/dev ilerleme olarak belirlenmiştir. En iyi Ra değeri (1,151 µm) A3, B3, C1 koşulunda, en kötü Ra değeri ise (-2,861 µm) A2, B1, C3 koşulunda elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kriyojenik soğutma, AISI 2507 süper dupleks paslanmaz çeliği, Optimizasyon, Tornalama, Hibrit soğutma/yağlama

Investigation of Surface Quality in Turning of AISI 2507 Super Duplex Stainless Steel under Hybrid Cooling/Lubrication Methods

ABSTRACT

In recent years, ecological cooling/lubrication methods were used in metal processing operations for sustainable manufacturing. The hybrid cooling/lubrication method, which combine superior cooling/lubrication methods with each other, were came to the fore. In this study; surface quality was investigated when turning AISI 2507 duplex stainless steel under Minimum Quantity Lubrication (MQL), cryogenic cooling (Cry) and hybrid (Cry+MQL) cooling/lubrication conditions. Surface roughness (Ra), 2D surface images and 3D surface topography were used to investigate the quality of the machined surfaces. The experiments were carried out in three different cooling/lubrication conditions (MQL, Cry and Cry+MQL), cutting speed (80, 120 and 160 m/min) and feed rate (0.16, 0.20 and 0.24 mm/rev). Taguchi L₂₇ design was used in experimental design and

determination of optimum conditions. Analysis of variance (ANOVA) was used to determine the factors affecting the experimental results and the effect rates of the factors. According to the experimental results, optimum conditions for surface quality were determined as Cry+MQL cooling/lubrication condition, 160 m/min cutting speed and 0.16 mm/rev feed rate. The best Ra value (1,151 μm) was obtained under A3, B3, C1 condition and the worst Ra value (-2,861 μm) was obtained under A2, B1, C3 condition.

Keywords: *Cryogenic Cooling, AISI 2507 Super Duplex Stainless Steel, Optimization, Turning, Hybrid Cooling/Lubrication*

I. GİRİŞ

Paslanmaz çelikler göstermiş oldukları, korozyon dayanımları, imalat kolaylığı, ısıl dirençleri ve görünüşleri sebebiyle kimya sektöründen, mutfak gereçleri yapımına kadar birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Paslanmaz çelikleri ferritik, östenitik, martenzitik, dubleks ve çökeltme sertleşmeli olmak üzere beş kategoriye toplayabiliriz [1]. Dubleks paslanmaz çelikler genellikle içerisinde yüksek oranda Cr (%20~30) ve Ni (%5~10) elementlerini barındırırlar. Mikroyapılarında ferrit ve östenit fazlarının fazlalığı nedeniyle dubleks paslanmaz çeliklere aynı zamanda ferritik-östenitik paslanmaz çelikler adı da verilmektedir [2]. Dubleks paslanmaz çelikler içerisinde bulunan ferritik yapı sayesinde mukavemet, östenitik yapı sayesinde ise tokluk ve korozyon direnç özellikleri göstermektedirler. Hem ferritik hem de östenitik paslanmaz çelik özelliği gösteren dubleks paslanmaz çelikler son yıllarda pompa millerinde, gıda sanayisinde, makine komponentlerinde, elektrik üretim tesislerinde, petrol rafinerilerinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ancak tüm bu avantajlarının yanında düşük ısıl iletkenlik, yüksek kırılma tokluğu, kesici takım kenarında BUE oluşumu gibi dezavantajları dubleks paslanmaz çelikleri işlenebilirliği zor malzeme grubuna sokmaktadır. Özellikle talaşlı imalat esnasında kesici takıma sıvanan talaşlar (BUE), bir süre sonra takımın bir parçasıyla ayrılarak aşınma mekanizmalarının hızla gelişmesine neden olabilmektedirler[3]. Talaşla temasın en fazla olduğu imalat yöntemlerinden biri de tornalama yöntemidir. Tornalama prosesinde özellikle iş parçası-takım-talaş arasında sürtünme kaynaklı yüzey kalitesinde bozulmalar olabilmektedir. Yüzey kalitesinin toleranslar içerisinde olması istenen bir durumdur. Talaşlı imalat yöntemlerinde yüzey kalitesi soğutma/yağlama yöntemlerinin kullanımı, kesme parametreleri, iş parçası, tezgâh rijitliği vb. faktörlere bağlıdır.

Son yıllarda sürdürülebilirlik kavramının imalat sürecine dahil olmasıyla, araştırmacılar çevreci, ekolojik soğutma/yağlama yöntemlerini araştırmaya başlamışlardır. Çevreci olarak tabir edilen bu yöntemler arasında Minimum Miktarda Yağlama (MMY) ve kriyojenik soğutma yöntemleri yer almaktadır. MMY çok az miktarda kesme yağının (20 mL/saat) basınçlı havayla karıştırılarak kesme bölgesine nozul aracılığıyla gönderilmesi esasına dayanan ekolojik bir yöntemdir [4]. Aynı zamanda yoğun kesme sıvısının kullanıldığı ıslak kesmenin avantajlarını da içerisinde ihtiva eden bir yöntemdir. Ekolojik yöntemlerin bir diğeri sıvı halde CO₂ (-80 °C) veya N₂'nin (-196 °C) kullanıldığı kriyojenik soğutma (Kry) yöntemidir. Atmosferde serbest halde bulunan ve yoğunlaştırılarak sıvı halde basınçla (15 bar) kesme bölgesine gönderilen bu yöntemde, metallerin plastik deformasyonuna yardımcı sıcaklığı çok fazla düşürdüğünden işlenen yüzey kalitesi istenen toleransların dışında çıkabilmektedir. Bunun iyileştirilmesi adına araştırmacılar MMY ve Kry soğutma yöntemlerini bir araya getiren ve birbirinin üstün özelliklerinin aynı anda uygulandığı hibritsoğutma/yağlama yöntemleri üzerine çalışmalarını geliştirmişlerdir. Bu kapsamda araştırmacılar tarafından yapılan çalışmaların bazılarını aşağıda değinilmiştir.

Zhang ve diğ. H13 çeliğinin frezelenmesinde, MMY ve Kry+MMY (hibrit) soğutma/yağlama koşulları altında, takım aşınması ve kesme kuvvetindeki değişimleri incelemişlerdir. Araştırmacılar deney sonunda hibrit soğutma/yağlama koşulunun takım aşınmasını azalttığını ve kesme kuvveti değerlerini düşürdüğünü ifade etmişlerdir [5]. Shokrani ve diğ. Ti6Al4V malzemeyi ıslak, Kry, MMY ve hibrit soğutma/yağlama koşulları altında frezelenmesinde, kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülük, takım ömrü ve aşınması üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Hibritsoğutma/yağlama koşulunun yüzey pürüzlülük ve takım ömründe daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir [6].

Sivaiah ve Chakradhar, 17-4 PH çeliğinin kuru, ıslak, MMY ve Krysoğutma/yağlama koşulları altında tormalanmasında, kesme parametrelerinin takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, kesme sıcaklığı ve talaş geometrisi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneysel çalışma sonucunda Krysoğutma/yağlama koşulunun diğer koşullara göre daha iyi performans gösterdiğini iddia etmişlerdir [7]. Sun ve diğ. Ti5553 malzemeyi ıslak, MMY, Krysoğutma/yağlama koşulları altında tormalanmasında, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve kesme kuvveti değerlerini araştırmışlardır. Deneysel çalışma sonunda elde ettikleri bilgilere göre Krysoğutma/yağlama koşulunun diğer soğutma/yağlama koşullarına göre daha iyi performans gösterdiğini belirtmişlerdir[8]. Pereira ve diğ. AISI 304 paslanmaz çeliğinin kuru, MMY, Kry ve hibritsoğutma/yağlama koşulları altında tormalanmasında, takım aşınması, kesme kuvveti, yüzey kalitesi ve takım aşınmasındaki değişimleri incelemişlerdir. Çalışma sonunda hibritsoğutma/yağlama koşullarının diğer koşullara göre daha iyi performans gösterdiği vurgulanmıştır [9].

Çalışmalar incelendiğinde MMY, Kry ve hibritsoğutma/yağlama koşullarının diğer koşullara üstünlük sağladığı görülmüştür. Ancak özellikle AISI 2507 süper dubleks paslanmaz çeliği üzerine yeterli düzeyde çalışmanın yapılmadığı anlaşılmıştır. Yapılacak olan bu çalışma ile literatürde yer alan bu boşluğun doldurulması hedeflenmektedir. Ayrıca son yıllarda üzerinde çalışmaların yoğunlaştığı hibrit soğutma/yağlama koşullarının tormalama prosesinde kullanımıyla farklı bir açıdan değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma ile üzerinde yeterli düzeyde çalışma bulunmayan AISI 2507 süper dubleks paslanmaz çeliğine, ekolojik soğutma/yağlama koşulları (MMY, Kry ve hibrit) altında tormalama prosesi uygulanmıştır. Tormalamada kesme parametresi olarak kesici takım üreticisinin önerdiği ve ön deneyler sonucunda elde edilen üç farklı kesme hızı (80, 120 ve 160 m/dak) ile üç farklı ilerleme değeri (0,16-0,20 ve 0,24 mm/dev) ve sabit 0,8 mm kesme derinliği kullanılmıştır. Tormalanan yüzeylerin Ra değerleri ölçülmüş ve ölçülen yüzeylerden iki boyutlu görüntüleri alınarak yüzey topografyalarıyla birlikte yüzey bütünlüğü değerlendirilmiştir. L₂₇ Taguchi optimizasyonu yapılarak, kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etki oranlarının belirlenmesinde ANOVA kullanılmıştır.

II. MALZEME METOD

Tormalama deneyleri 4500 dev/dak azami devri olan Accuway JT150 CNC torna tezgâhında (Şekil 1-a) gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 50 mm çapında ve 250 mm uzunluğunda AISI 2507 dubleks paslanmaz çeliği kullanılmıştır. AISI 2507 dubleks paslanmaz çeliğine ait kimyasal özellikler Tablo 1, fiziksel ve mekanik özellikler ise Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 1. AISI 2507dubleks paslanmaz çeliği kimyasal özellikleri[10].

| Malzeme | Cr (%) | Ni (%) | Mo (%) | C (%) |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| AISI 2507 | 25 | 7 | 4 | 0,02 |

Tablo 2. AISI 2507 dubleks paslanmaz fiziksel ve mekanik özellikleri[10].

| Yoğunluk (g/cm ³) | Esneklik Modülü (GPa) | Elektrik Direnci (Wmm ² /m) | Özgül Isı (J/kgK) | Çekme Mukavemeti (N/mm ²) | Uzama A5 (min %) |
|----------------------------------|-----------------------------|---|----------------------|---|---------------------|
| 7,8 | 200 | 0,80 | 500 | 730-930 | 25 |

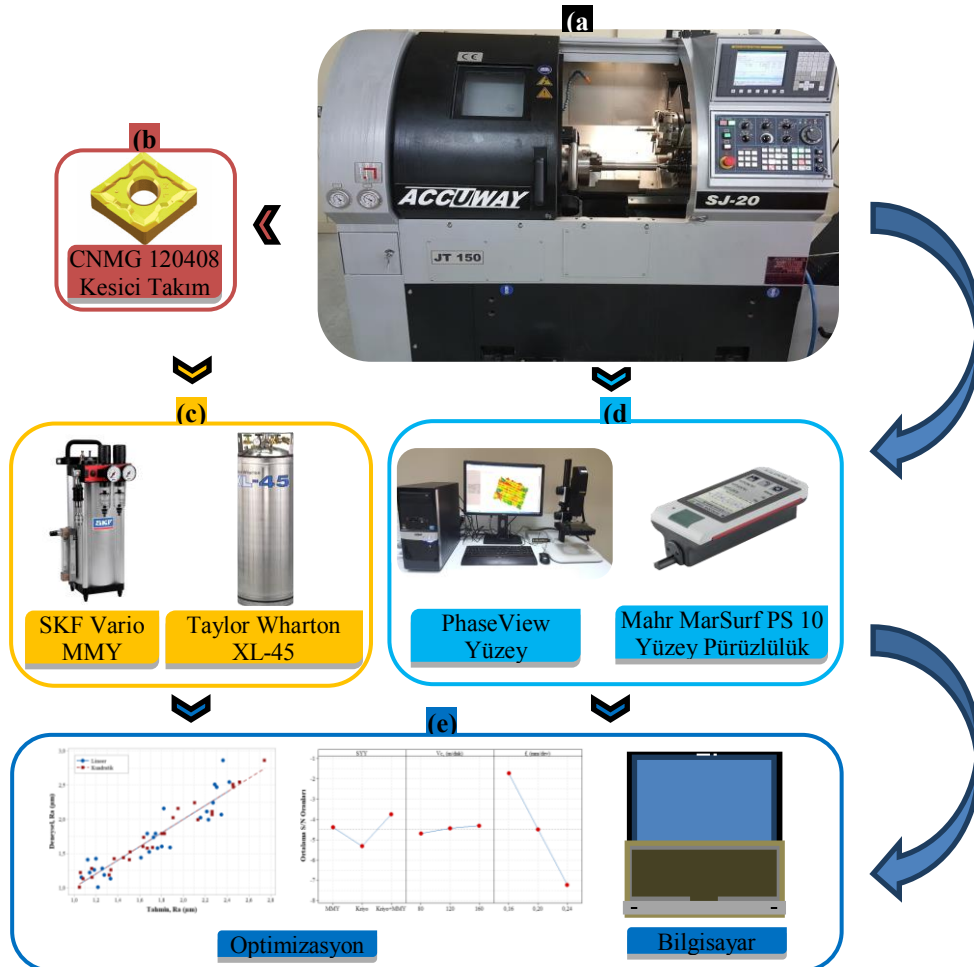
Deneylerde TaeguTec firması tarafından üretilen CNMG 120408 ML numaralı, TT8020 kalite, PVD kaplı takımlar (Şekil 1-b) kullanılmış olup kesme derinliği tüm deneylerde sabit 0,8 mm olarak alınmıştır. Her bir deney parametresinde yeni bir kesici takım kullanılmıştır. MMY deneylerinde SKF firması tarafından üretilen Vario MMY sistemi (Şekil 1-c) kullanılmıştır. MMY sisteminde kesme yağı olarak ağır metal ve klor barındırmayan, biyolojik olarak parçalanabilen bitkisel esaslı yağ

kullanılmıştır. Bitkisel kesme yağına ait ve üretici firmadan alınan teknik özellikler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Bitkisel kesme yağına ait teknik özellikler.

| Bitkisel Yağ | Görünüm | Kinematik Viskozite (40 °C, cSt) | Kırılma İndisi (nD ₂₀) | Parlama Noktası (°C, min) | Bakır Korozyon (3h, 100 °C) |
|--------------|-------------|-------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| | Test Metodu | - | ASTMD445 | ASTMD1218 | ASTMD92 |
| Cuttex SYN 5 | Açık Sarı | 5 ±1 | 1,460 ±0,01 | 170 | 1a |

Bitkisel esaslı kesme yağı, kesme bölgesine sabit 25 mm mesafede ve 30° açıda konumlandırılan 2 mm çapında bir nozul aracılığıyla, 50 mL/saat debi ve 8 bar basınçla tatbik edilmiştir. Kry soğutma deneylerinde ise Taylor Wharton firması tarafından üretilen XL-45 HP 176 lt kapasiteli, sıvı azot tankı (Şekil 1-c) kullanılmıştır. Sıvı azot (LN₂), kesme bölgesine özel olarak üretilen vakum ceketli hortumla, 2 mm çapındaki nozul vasıtasıyla ve sabit 15 bar basınçla tatbik edilmiştir. Kry nozulu, MMY nozulu gibi sabit 25 mm mesafe ve 30° açıyla konumlandırılmıştır. Tornalama deneyleri sonrasında TS 6956 EN ISO 4287 [11] standardına göre ölçülen yüzeylerin ortalama yüzey pürüzlülükleri (Ra), Mahr firması tarafından üretilen PS10 taşınabilir yüzey pürüzlülük ölçüm cihazıyla (Şekil 1-d) tespit edilmiştir. Her ölçüm öncesi cihaz doğrulama bloğu kullanılarak kalibre edilmiştir. İşlenen yüzeylerin 3D yüzey topografya ölçümlerinde ise Phase View marka optik profil analiz cihazı (Şekil 1-d) kullanılmıştır. Deney düzeneğine ait detaylar Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneği, (a) Torna tezgâhı, (b) Kesici takım, (c) Soğutma/yağlama sistemleri, (d) Yüzey analiz cihazları, (e) Optimizasyon.

III. OPTİMİZASYON YÖNTEMİ

Metal kesme proseslerinde zamandan ve maliyetten kaçınmak için optimizasyon yöntemleri kullanılabilir [12]. Yaygın olarak kullanılan optimizasyon yöntemlerinden biri de “Taguchi Optimizasyon” yöntemidir [13]. Bu çalışmada ise optimizasyonlar için Taguchi L_{27} deneysel tasarımı tercih edilmiştir. Metal kesmede işlenen yüzeylerin kalitesi, birbiriyle temas halinde bulunan makine ekipmanlarının ömrüne doğrudan etki etmektedir [4]. Dolayısıyla işlenen yüzeylerin analiz edilerek kalitesinin optimize edilmesi son derece önem arz etmektedir. Yüzey kalitesine etki eden birçok parametre bulunmakla beraber en bilinenlerini kesme parametreleri, soğutma/yağlama yöntemleri, işlenen malzeme cinsi, kesici takım vb. şeklinde sıralayabiliriz. Optimizasyonda, soğutma/yağlama yöntemleri (SY), kesme hızı (Vc) ve ilerleme (f) kontrol faktörleri olarak tercih edilmiştir. Kontrol faktörleri ve seviyelerini gösteren çizelge, Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Kontrol faktörleri ve seviyeleri.

| Kontrol Faktörleri | Sembol | Birim | Seviyeler | | |
|-------------------------|--------|----------|-----------|------|---------|
| | | | 1 | 2 | 3 |
| Soğutma/yağlama Yöntemi | A | (SY) | MMY | Kry | Kry+MMY |
| Kesme Hızı (Vc) | B | (m/dak) | 80 | 120 | 160 |
| İlerleme (f) | C | (mm/dev) | 0,16 | 0,20 | 0,24 |

Taguchi optimizasyon yöntemiyle oluşturulan fonksiyonlar, sinyal/gürültü (signal-to-noise, S/N) oranına dönüştürülerek analizler yapılmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük ortalamalarının (Ra) değerlendirilmesinde S/N oranları kullanılmıştır. S/N oranlarına dönüştürülerek kullanılan fonksiyonlar, nominal iyidir, en büyük iyidir ve en küçük iyidir denklemleriyle analiz edilebilmektedirler. Bu çalışmada Ra değerlerinin düşük olması istendiğinden, en küçük iyidir fonksiyon denklemi (Eşitlik 1) kullanılmıştır.

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

Denklemden yer alan deney sayısını, y ise gözlenen verileri simgelemektedir. Deneyler sonrasında Ra değerlerinin belirlenmesi için üç ölçüm yapılmış ve ölçüm sonuçlarının aritmetik ortalaması alınmıştır. Elde edilen Ra değerleri ve S/N oranları, Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Deneyler sonucunda elde edilen Ra değerleri ve S/N oranları.

| No | A SY | B (Vc, m/dak) | C (f, mm/dev) | (Ra) (μ m) | S/N (dB) |
|----|---------|------------------|------------------|--------------------|-------------|
| 1 | MMY | 80 | 0,16 | 1,130 | -1,06157 |
| 2 | MMY | 80 | 0,20 | 1,585 | -4,00059 |
| 3 | MMY | 80 | 0,24 | 2,547 | -8,12058 |
| 4 | MMY | 120 | 0,16 | 1,278 | -2,13062 |
| 5 | MMY | 120 | 0,20 | 1,603 | -4,09867 |
| 6 | MMY | 120 | 0,24 | 2,067 | -6,30681 |
| 7 | MMY | 160 | 0,16 | 1,256 | -1,97979 |
| 8 | MMY | 160 | 0,20 | 1,737 | -4,79600 |
| 9 | MMY | 160 | 0,24 | 2,241 | -7,00884 |
| 10 | Kry | 80 | 0,16 | 1,182 | -1,45235 |
| 11 | Kry | 80 | 0,20 | 2,158 | -6,68103 |
| 12 | Kry | 80 | 0,24 | 2,861 | -9,13036 |

Tablo 6 (devam). Deneyler sonucunda elde edilen Ra değerleri ve S/N oranları.

| | | | | | |
|----|---------|-----|------|-------|----------|
| 13 | Kry | 120 | 0,16 | 1,423 | -3,06410 |
| 14 | Kry | 120 | 0,20 | 1,790 | -5,05706 |
| 15 | Kry | 120 | 0,24 | 2,512 | -8,00039 |
| 16 | Kry | 160 | 0,16 | 1,406 | -2,95971 |
| 17 | Kry | 160 | 0,20 | 1,792 | -5,06676 |
| 18 | Kry | 160 | 0,24 | 2,113 | -6,49799 |
| 19 | Kry+MMY | 80 | 0,16 | 1,007 | -0,06059 |
| 20 | Kry+MMY | 80 | 0,20 | 1,575 | -3,94561 |
| 21 | Kry+MMY | 80 | 0,24 | 2,471 | -7,85745 |
| 22 | Kry+MMY | 120 | 0,16 | 1,217 | -1,70581 |
| 23 | Kry+MMY | 120 | 0,20 | 1,523 | -3,65400 |
| 24 | Kry+MMY | 120 | 0,24 | 1,995 | -5,99886 |
| 25 | Kry+MMY | 160 | 0,16 | 1,151 | -1,22151 |
| 26 | Kry+MMY | 160 | 0,20 | 1,439 | -46,0206 |
| 27 | Kry+MMY | 160 | 0,24 | 2,026 | -46,6891 |

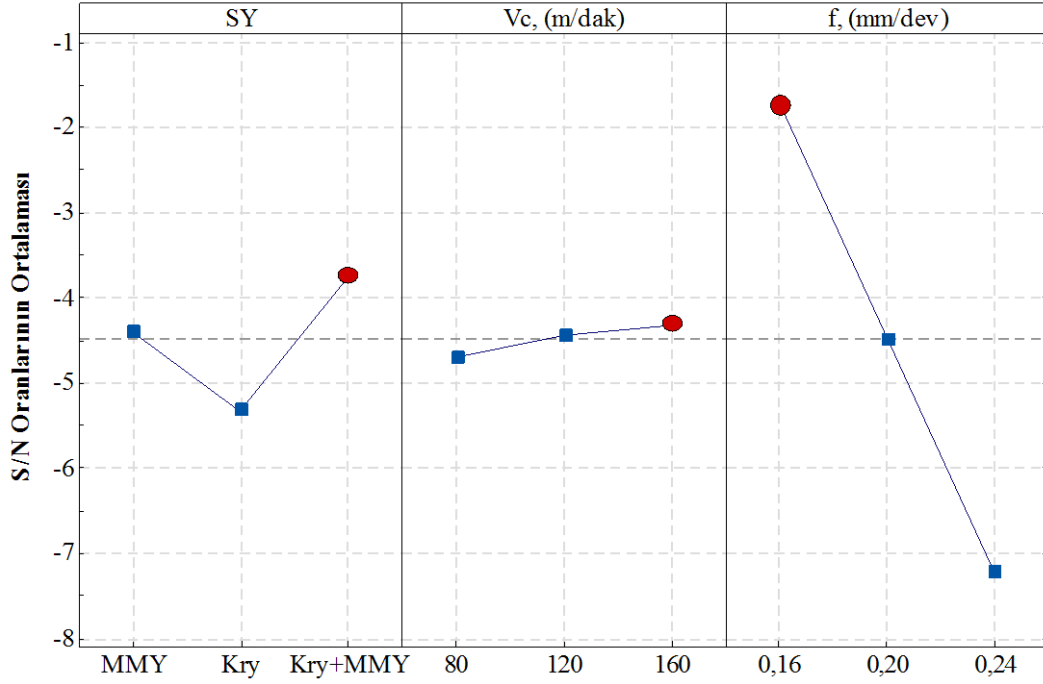
Tablo 5'te yer alan sonuçlara bakıldığında, Ra değerlerinin ve S/N ortalamaları sırasıyla 1,744 μm ve -9,05643 dB olarak hesaplanmıştır. Yapılan analizler sonucunda Ra kalite karakteristiğinin S/N yanıt çizelgesi Tablo 7'da verilmiştir.

Tablo 7. Ra değerleri için S/N yanıt çizelgesi.

| Seviyeler | Kontrol Faktörleri | | |
|-----------|--------------------|---------------|---------------|
| | Soğutma/yağlama | Kesme Hızı | İlerleme |
| | Yöntemi (SY) | (Vc - m/dak) | (f - mm/dev) |
| | A | B | C |
| 1 | -4,389 | -4,701 | -1,737 |
| 2 | -5,323 | -4,446 | -4,496 |
| 3 | -3,749 | -4,314 | -7,228 |
| Delta | 1,575 | 0,387 | 5,491 |

Tablo 7'da koyu ile işaretlenmiş değerler, S/N değerlerinin en yüksek mertebelerini ve kontrol faktörlerine ait optimum koşulları ifade etmektedir. Ra yüzey pürüzlülük değerleri, kontrol faktörleri ve faktörlere ait optimum koşullar Şekil 2'de verilmiştir.

Şekil 2 ve Tablo 7 birlikte değerlendirildiğinde Ra yüzey pürüzlülüğün optimum değerine (1,151 μm) 25 numaralı deneyde A3, B3 ve C1 koşullarında elde edildiği sonucuna varılabilir. Başka bir ifadeyle, AISI 2507 dubleks paslanmaz çeliğinin tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün optimum koşulları Kry+MMY soğutma/yağlama koşulu, Vc 160 m/dak kesme hızı ve f 0,16 mm/dev ilerleme olarak tespit edilmiştir.



Şekil 2. Ra değerleri için S/N oranları etki grafiği.

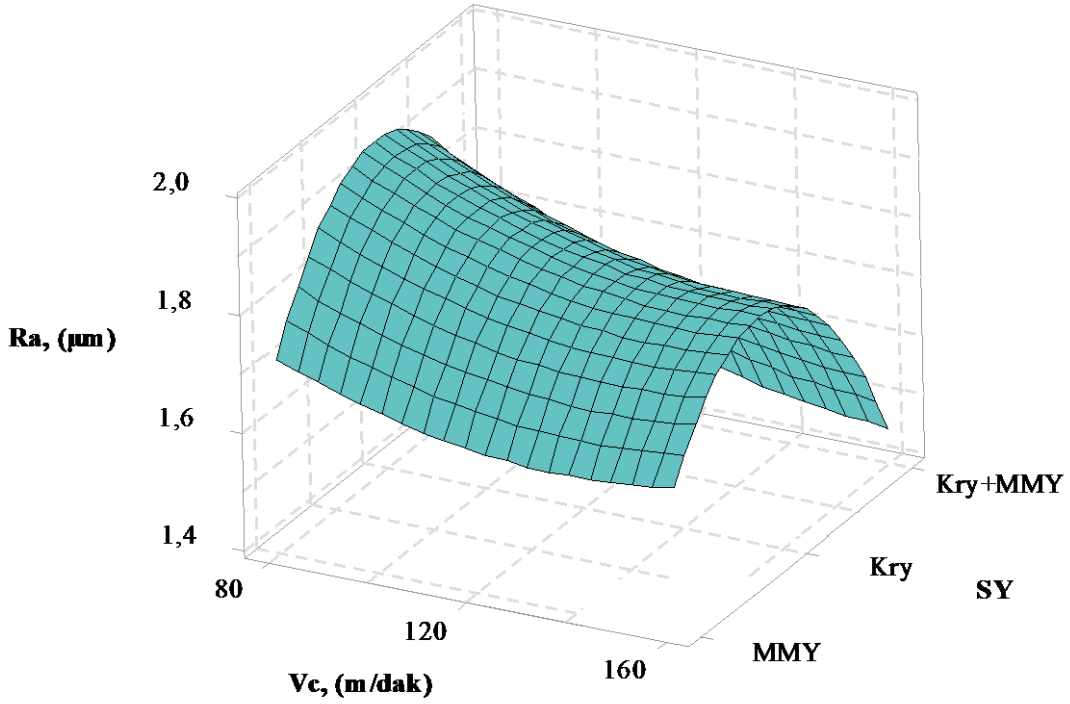
IV. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

A. DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

A. 1. Yüzey Pürüzlülüklerin Değerlendirilmesi

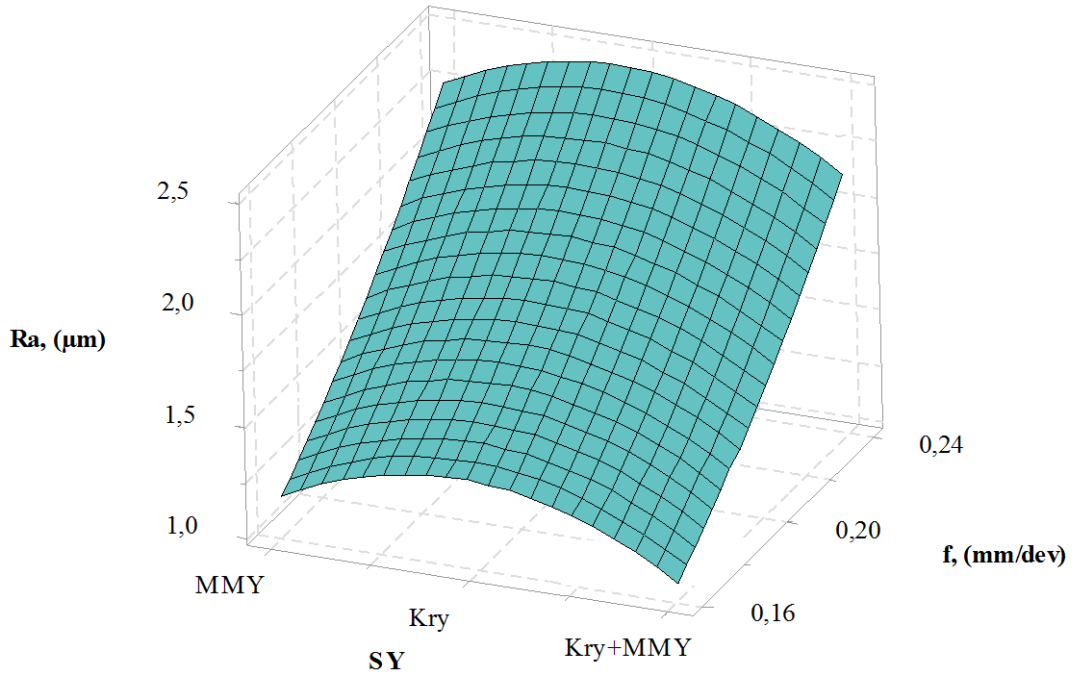
AISI 2507 dubleks paslanmaz çeliğinin farklı soğutma/yağlama koşulları altında tormalanmasında kesme hızına bağlı Ra değişim grafiği Şekil 3. Kesme hızı ve soğutma/yağlama koşullarına bağlı Ra yüzey pürüzlülük değişimleri.Şekil 3'te ve ilerlemeye bağlı Ra değişim grafiği

Şekil 4'te verilmiştir. En iyi yüzey pürüzlülük değerine (Ra-1,151 μm) Kry+MMY soğutma/yağlama koşulunda, 160 m/dak kesme hızında, 0,16 mm/dev ilerlemede ulaşılmıştır. En kötü yüzey pürüzlülük değerine (Ra-2,861 μm) ise Kry soğutma/yağlama koşulunda, 80 m/dak kesme hızında, 0,24 mm/dev ilerlemede ulaşılmıştır. En düşük Ra yüzey pürüzlülük değerleri Kry+MMY soğutma/yağlama koşulunda elde edilmiştir. Bu durum, Kry'nin kesme bölgesinde oluşan sıcaklığı düşürmede ve MMY'nin ise temas halindeki kesici takım-talaş-iş parçası ara yüzeylerinde sürtünmeyi minimize etmede etkin rol oynadığından kaynaklanmıştır şeklinde ifade edilebilir. Zira benzer şekilde Yıldırım yaptığı çalışmada Kry+MMY soğutma/yağlama koşulunun, kuru ve Kry koşullarına göre yüzey pürüzlülüğünde daha iyi performans gösterdiğini ifade etmiştir [14]. Kry koşulunda ise kesici takımın iş parçasından talaş kaldırma işlemindeki plastik deformasyona yardımcı sıcaklığı, düşük mertebelere indirmektedir [15]. Bitkisel esaslı yağın kullanıldığı MMY soğutma/yağlama koşulunda, yağ moleküllerinin basınçlı olarak kesme bölgesine gönderilmesiyle etkin bir tribolojik yağlama performansı sergilenmiştir. Kry koşuluna göre MMY koşulu yüzey pürüzlülüğünde daha iyi performans göstermesi tribolojik yağlama performansına atfedilmiştir [16].



Şekil 3. Kesme hızı ve soğutma/yağlama koşullarına bağlı Ra yüzey pürüzlülük değişimleri.

Şekil 3 incelendiğinde, kesme hızının Ra yüzey pürüzlülük üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır. Bununla beraber kesme hızının artışıyla birlikte Ra değerleri bir miktar düşüş eğilimi göstermiştir. Kesme hızının artışı kesici takım-talaş temas alanındaki sürtünmeyi azaltarak Ra pürüzlülük değerlerinde az da olsa iyileşme sağlamıştır şeklinde ifade edilebilir.



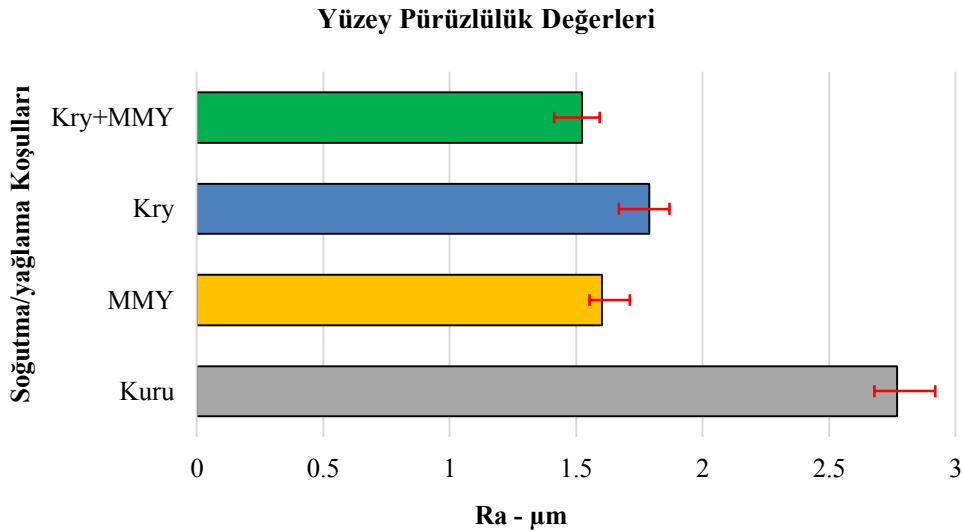
Şekil 4. İlerleme ve soğutma/yağlama koşullarına bağlı Ra yüzey pürüzlülük değişimleri.

Şekil 4 incelendiğinde, ilerlemenin artmasıyla Ra yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı bir başka ifadeyle kötüleştiği görülmektedir. İlerleme değerlerinin artmasıyla Ra değerleri her üç

soğutma/yağlama koşulunda da artış göstermiştir. İlerlemenin artması yüzey pürüzlülük sonuçlarını doğrudan etkilemektedir [17]. Kesici takımın birim zamanda aldığı yolun artması, iş parçası yüzeylerinde daha geniş işleme boşluklarının oluşmasına neden olmaktadır. Bu yüzden ilerleme, yüzey pürüzlülüğünde kesme hızına göre daha etkili bir kesme parametredir şeklinde yorum yapılabilir.

A. 2. Yüzey Topografya Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çalışmanın bu bölümünde soğutma/yağlama koşullarının kuru kesme koşuluna göre, iki boyutlu yüzey resimleri ve üç boyutlu yüzey topografyaları incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda 120 m/dak kesme hızında ve 0,2 mm/dev ilerleme değerinde bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen Ra değerleri Şekil 5'te verilmiştir.

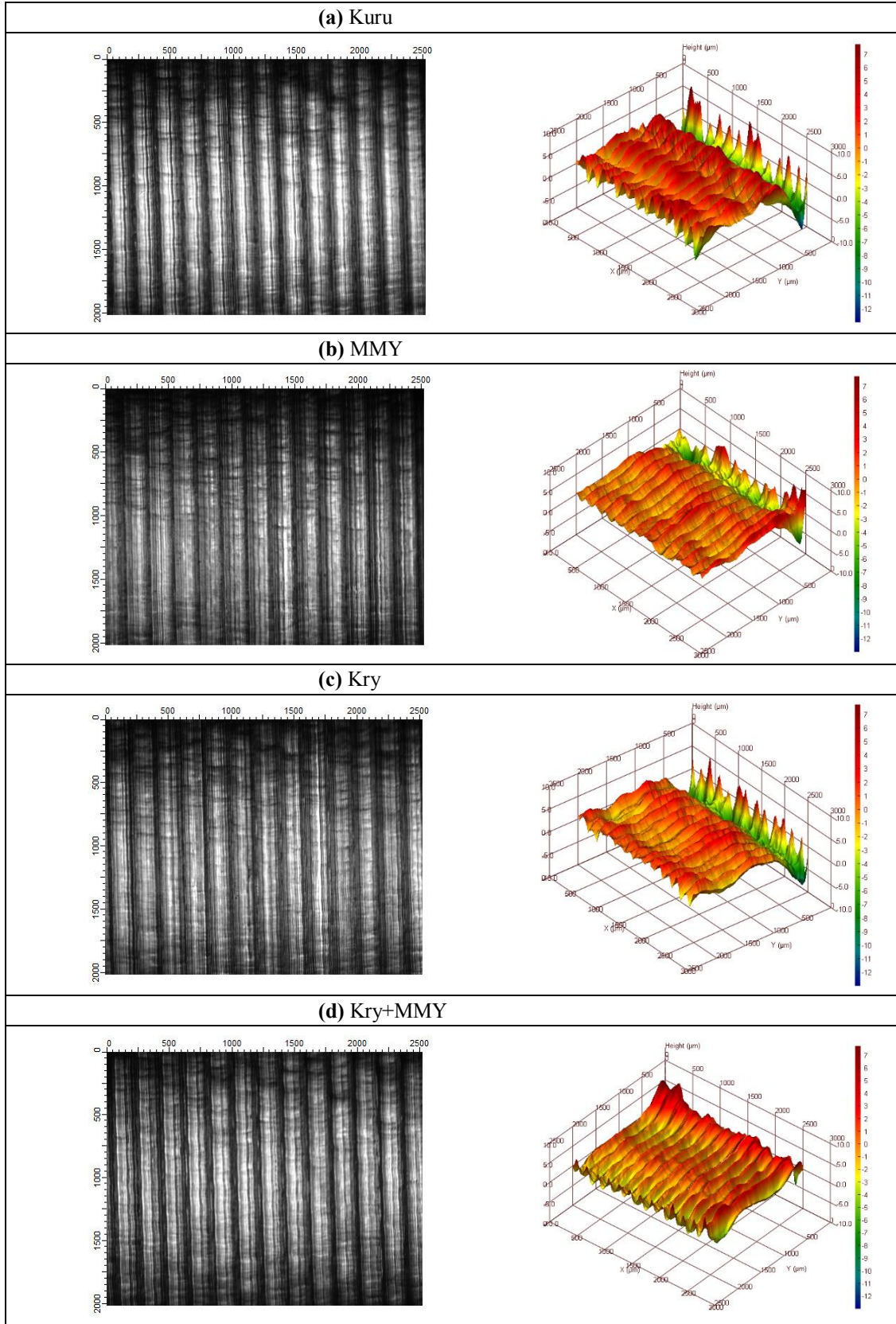


Şekil 5. Soğutma/yağlama koşullarına göre Ra yüzey pürüzlülüğündeki değişim.

Şekil 5 incelendiğinde, kuru kesme koşulunda en kötü yüzey pürüzlülük değerine (2,770 µm) ulaşıırken, Kry+MMY kesme koşulunda ise en iyi yüzey pürüzlülük değerine (1,523 µm) ulaşıldığı görülebilir. Bir başka ifadeyle Kry+MMY kesme koşulunda, kuru kesme koşuluna göre Ra yüzey pürüzlülük değeri %45,02 oranında azalma eğilimi göstermiştir. MMY ve Kry kesme koşulları ise kuru kesme koşuluna göre sırasıyla %42,13 (1,603 µm) ve %38,30 (1,790 µm) oranında azalmıştır. Kry ile kesme bölgesindeki sıcaklığın hızla tahliyesinin ve MMY ile kesici takım-talaş-ış parçası ara yüzeylerinde oluşan üstün yağlayıcılık özelliklerinin kombin edildiği Kry+MMY soğutma/yağlama koşulu yüzey pürüzlülük değerlerini iyileştirmede etkin rol oynadığı düşünülmektedir. MMY kesme koşuluna göre nispeten yüksek Ra mertebesinin olduğu Kry kesme koşulu, yine de kuru kesme koşulundan daha iyi performans sergilemiştir. MMY koşuluna göre daha az yağlayıcılık özelliği gösteren Kry koşulunda, kuru kesme koşuluna göre daha düşük kesme sıcaklığı olduğundan daha iyi bir yüzey pürüzlülük değeri elde edilmiştir şeklinde açıklanabilir. Çelik ve diğ. yaptıkları çalışmada Kry kesme koşulunun kuru kesme koşuluna göre kesme sıcaklıklarını düşürmede daha etkili olduğunu vurgulamıştır [18].

Kuru, MMY, Kry ve Kry+MMY soğutma/yağlama koşullarında, 120 m/dak kesme hızında ve 0,2 mm/dev ilerlemede tormalanan yüzeylerin iki boyutlu yüzey görüntüleri ve üç boyutlu yüzey topografya haritaları Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'daki iki boyutlu yüzey görüntüleri ve üç boyutlu yüzey topografyaları birlikte incelendiğinde, kuru kesme koşulunda daha büyük işleme tepelerinin ve daha derin vadilerin olduğu görülmektedir. Soğutma/yağlama koşullarının kullanımıyla ciddi oranda iyileşmelerin olduğu da gözlenmektedir. MMY kesme koşulunda kesme bölgesine basınçlı bir şekilde aerosol buharı şeklinde gönderilen yağ zerrecikleri etkin bir tribo film yağlayıcı tabaka oluşturarak sürtünmeyi minimize etmiştir. Etkin tribo film tabakası ise yüzey pürüzlülüğün düşürülmesinde etken

rol oynamıştır. Benzer durum literatürde yapılan çalışmalarla da desteklenmiş olup, MMY soğutma/yağlama koşulunun yüzey pürüzlülüğünü ciddi oranda iyileştirdiği belirtilmiştir [19,20].



Şekil 6. Tornalanan yüzeylerin, iki boyutlu yüzey görüntüleri ve üç boyutlu yüzey topografyaları, (a) Kuru, (b) MMY, (c) Kry, (d) Kry+MMY.

Kry soğutma koşulunun, MMY soğutma/yağlama koşuluna göre yağlayıcılık performansının düşük olması nedeniyle yüzey formlarında daha dalgalı bir görüntünün oluştuğu Şekil 6-c'de açıkça görülebilmektedir. Fakat Kry kesme koşulu, kesme bölgesindeki sıcaklığı kuru kesme koşuluna göre daha düşük mertebelerde olmasını sağlamasıyla, nispeten daha iyi bir yüzey topografya haritası meydana getirmiştir. Kesme bölgesinde yüksek sıcaklık oluşumlarının, iş parçası yüzeylerinde termal bozulmalara sebep olduğu bilinmektedir [10]. Şekil 6 incelenmeye devam edildiğinde kesme koşulları içerisinde en iyi görüntü ve yüzey topografyasının Kry+MMY hibrit soğutma/yağlama koşulunda elde edildiği görülmüştür. Burada Kry ve MMY yöntemlerin üstünlüklerinin bir araya getirildiği hibrit soğutma/yağlama yönteminin yüzey formlarında ve kalitesinde ciddi iyileşmeler sağladığı aşikârdır.

A. 3. Ra Değerlerinin ANOVA Analizi

ANOVA analizi, deney tasarımındaki kontrol faktörlerinin birbiriyle olan etkileşimlerini içeren istatistiksel bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır [20]. Bu çalışmada ise ANOVA soğutma/yağlama koşulları, kesme hızı ve ilerlemenin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini analiz etmek için kullanılmıştır. ANOVA %95 güven seviyesinde gerçekleştirilmiş olup, işleme sonrası oluşan yüzey pürüzlülük değerlerine etki eden parametreler ve seviyeleri **Tablo 8**'de verilmiştir.

Tablo 8. Yüzey pürüzlülük sonuçları için ANOVA çizelgesi.

| Kontrol Faktörü | Serbestlik Derecesi (DF) | Kareler Toplamı (SS) | Kareler Ortalaması (MS) | F Oranı | P Değeri | Etki Oranı (%) |
|-----------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|--------------|--------------|----------------|
| SY | 2 | 0,4564 | 0,22819 | 7,12 | 0,005 | 6,95 |
| Vc | 2 | 0,1157 | 0,05786 | 1,81 | 0,190 | 1,76 |
| f | 2 | 5,3576 | 2,67878 | 83,63 | 0,000 | 81,54 |
| Hata | 20 | 0,6406 | 0,03203 | - | - | 9,75 |
| Toplam | 26 | 6,5703 | - | - | - | 100 |

Kontrol faktörlerine ait P değeri < 0,05 ise sonuçlar anlamlıdır [21]. Vc kontrol faktörü için P değeri < 0,05 olmadığından, Vc sonuçlarının anlamlı olmadığı ifade edilebilir. **Tablo 8** ANOVA çizelgesinde yer alan etki oranlarının belirlenmesinde, F oranları dikkate alınmıştır. Tablodan da anlaşılacağı gibi deneyler sonrası elde edilen sonuçlara göre yüzey pürüzlülüğü üzerine etki eden en önemli parametre %81,54 etki oranı ile ilerleme olmuştur. Bunu %6,95 etki oranıyla soğutma/yağlama koşulu ve %1,76 etki oranıyla kesme hızı takip etmiştir. ANOVA çizelgesinde yer alan hata ise %9,75 düzeyinde kalmıştır. Güvenli bir sonuç için ANOVA tablosunda yer alan hata etki oranlarının %20'nin altında olması beklendiğinden [21], bu çalışmada ANOVA sonuçları standartları karşılamıştır şeklinde ifade edilebilir.

A. 4. Ra Değerlerinin Regresyon Analizi

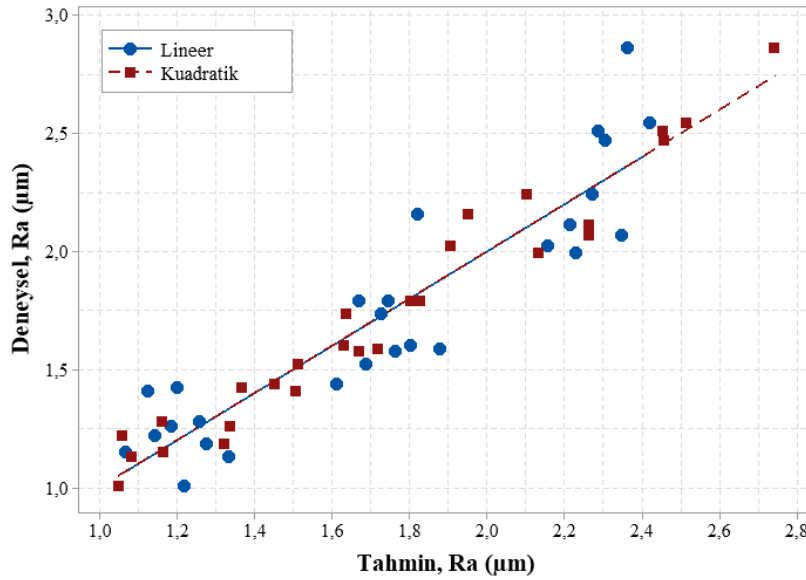
Bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki etkileşimi hesaplama veya analiz etmek için regresyon analizleri kullanılmaktadır [18]. Bu çalışmada ise bağımlı değişken, işleme sonrası elde edilen yüzey pürüzlülük ortalama değeri Ra, bağımsız değişkenler ise soğutma/yağlama koşulu (SY), kesme hızı (Vc) ve ilerleme (f) olarak belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülük ortalama değeri Ra için lineer regresyona ait denklem Eşitlik 2'de verilmiştir.

$$Ra = -0,632 - 0,0578 SY - 0,00188 Vc + 13,59 f \quad (2)$$

Eşitlik 2'de yer alan denklem sonucunda elde edilen R² yüzey pürüzlülük ortalama değeri 0,8339 olarak hesaplanmıştır. Tahmin edilen değerler ile deneyler sonrası elde edilen değerler arasındaki farklar lineer denklem sonuçlarına göre yüksek çıktığından, sonuçların kuadratik denklem kullanılarak hesaplanması gerekmektedir. Yüzey pürüzlülük ortalama değeri Ra için kuadratik regresyon denklemi Eşitlik 3'te yer almaktadır.

$$Ra = -1,85 + 1,103 SY + 0,01341 Vc + 5,8f - 0,2570 SY*SY + 0,000030 Vc*Vc + 51,4 f*f - 0,000852 SY*Vc - 0,154 SY*f - 0,1038 Vc*f \quad (3)$$

Eşitlik 3'te yer alan kuadratik regresyon denkleminde elde edilen R^2 yüzey pürüzlülük ortalama değeri 0,9551 olarak hesaplanmıştır. Eşitlik 2'de yer alan lineer ve Eşitlik 3'te yer alan kuadratik regresyon tahmini denklemleri ile deneyler sonucunda elde edilen Ra değerleri arasındaki mukayese Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Ra için tahmin edilen ve deneysel sonuçların kıyaslanması.

Şekil 7 incelendiğinde, deneyler sonucunda elde edilen gerçek değerlere en yakın tahmin denklemin kuadratik regresyon analizi ile elde edildiği anlaşılmaktadır.

IV. SONUC

Bu çalışma ile AISI 2507 süper dubleks paslanmaz çeliği kuru, MMY, Kry, Kry+MMY soğutma/yağlama koşulları altında tormalanmıştır. Çalışma üç farklı kesme hızında (80, 120 ve 160 m/dak), ilerlemede (0,16-0,20 ve 0,24 mm/dev) ve sabit kesme derinliğinde (0,8 mm) gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda tormalanan yüzeylerin kalitesinin değerlendirilmesi amacıyla, Ra değerleri ölçülmüş, iki boyutlu yüzey resimleri ve üç boyutlu yüzey topografya haritaları incelenmiştir. Ayrıca işleme parametrelerinin optimum koşullarının tespit edilmesinde Taguchi optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Deney faktörlerine ait etki oranlarının belirlenmesinde ise ANOVA kullanılmıştır. Deneysel çalışmayılansonuçlar, aşağıda sıralanmıştır.

- Yapılan deneyler sonucunda en düşük ortalama yüzey pürüzlülük Radeğeri(1,151 µm)Kry+MMY hibrit soğutma/yağlama koşulunda, 160 m/dak kesme hızında ve 0,16 mm/dev ilerlemede elde edilmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri (2,861 µm) ise Krysoğutma koşulunda, 80 m/dak kesme hızında ve 0,24 mm/dev ilerlemede elde edilmiştir.
- %95 güven seviyesinde gerçekleştirilen ANOVA analiz sonuçlarına göre, Ra üzerine en etkili parametre %81,54 etki oranıyla ilerleme olarak tespit edilmiştir. Bunu %6,95 etki oranıylasoğutma/yağlama koşulu ve %1,76 kesme hızı takip etmektedir. ANOVA analizi sonucunda meydana gelen toplam hata ise %9,75 mertebelerinde kaldığı görülmüştür.

- AISI 2507 süper dubleks paslanmaz çeliğinin tornalanmasında, yüzey pürüzlülüğü üzerine etkili kesme parametresinin ilerleme olduğu sonucuna varılmıştır.
- Yüzey pürüzlülük ortalama değeri Ra için geliştirilen kuadratik regresyon analiz denklemiyle hesaplanan verilerin, deneysel çalışma sonucunda elde edilen gerçek verilerle %95,51 oranında yakınlık gösterdiği tespit edilmiştir.
- İki boyutlu yüzey görüntülerine ve üç boyutlu yüzey topografyalarına göre en iyi yüzey formu Kry+MMY hibrit soğutma/yağlama koşulunda elde edilmiştir. Kry+MMY hibrit soğutma/yağlama koşulunun hem de yüzey pürüzlülüğü hem de yüzey topografyası üzerine önemli etkileri olduğu görülmüştür.
- AISI 2507 süper dubleks paslanmaz çeliğinin tornalanmasıyla oluşan iş parçası yüzey kalitesi,soğutma/yağlama koşullarına göre iyiden kötüye doğru şu şekilde sıralanabilir; Kry+MMY, MMY, Kry ve kuru.

Gerçekleştirilen bu çalışmayla, süper dubleks AISI 2507 paslanmaz çeliğinin tornalanmasında, farklı soğutma/yağlama koşullarının yüzey kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonunda özellikle Kry'nin soğutma ve MMY'nin yağlama özelliğinin bir araya getirildiği Kry+MMY hibrit soğutma/yağlama koşulunun gelecek çalışmalar adına ümit vadettiği ve yüzey kalitesini iyileştirmede ciddi katkılar sağladığı görülmüştür.

V. KAYNAKLAR

- [1] B. Aydemir, “17-4 pHçökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelik kuvvet dönüştürücü yay elemanlarının iç yapısal özelliklerinin performans üzerine etkilerinin araştırılması,” Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, 2003.
- [2] D. Yıldırım, “2205 dubleks paslanmaz çelik ile S355j2 genel yapı çeliğinin birleştirilebilirliğinin incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2018.
- [3] A. Özer ve E. Bahçeci, “AISI 410 martensitik paslanmaz çeliklerin kesici takım ve kaplamasına bağlı işlenebilirliği,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, c. 24, s. 4, ss. 693-698, 2009.
- [4] Ş. Şirin, “Sürdürülebilir imalat için Inconel X 750 süper alaşımının frezelenmesinde yenilikçi soğutma/yağlama tekniklerinin işleme performansı üzerindeki etkileri,” Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2020.
- [5] C. Zhang, S. Zhang, X. Yan ve Q. Zhang, “Effects of internal cooling channel structures on cutting forces and tool life in side milling of H13 steel under cryogenic minimum quantity lubrication condition,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 83, ss. 975-984, 2016.
- [6] A. Shokrani, I. Al-Samarrai ve S. Newman, “Hybrid cryogenic MQL for improving tool life in machining of Ti-6Al-4V titanium alloy,” *Journal of Manufacturing Processes*, c. 43, ss. 229-243, 2019.
- [7] P. Sivaiah ve D. Chakradhar, “Effect of cryogenic coolant on turning performance characteristics during machining of 17-4 pH Stainless Steel: A comparison with mql, wet, dry machining,” *Journal of Manufacturing Science and Technology*, c. 21, ss. 86-96, 2018.
- [8] Y. Sun, B. Huang, D. Puleo ve I.S. Jawahir, “Enhanced machinability of Ti-5553 alloy from

cryogenic machining: comparison with mql and floodcooled machining and modeling,” *Procedia Cirp*, c. 3, s. 1, ss. 477-482, 2015.

[9] O. Pereira, A. Rodríguez, A. Fernández-Abia, A.I. Barreirove L. L.de Lacalle, “Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of AISI 304,” *Journal of Cleaner Production*, c. 139, ss. 440-449, 2016.

[10] *Geometrical Product Specifications (GPS)-Surface texture: profile method-terms, definitions and surface texture parameters*, International Organisation Standarts ISO 4287:1997, 1997.

[11] E. Şirin, Y. Turgut, İ. Korkut ve Ş. Şirin, “Frezelemede farklı sertlikteki AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin taguchi metoduyla yüzey pürüzlülüğünün optimizasyonu,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 3, ss. 132–144, 2015.

[12] J. Antony, “Multi-response optimization in industrial experiments using taguchi’s quality loss function and principal component analysis,” *Quality and Reliability Engineering International*, c. 16, c. 1, ss. 3-8, 2000.

[13] Ç. V. Yıldırım, “Experimental comparison of the performance of nanofluids, cryogenic and hybrid cooling in turning of Inconel 625,” *Journal of Tribology International*, c. 137, ss. 366–378, 2019.

[14] Ç. V. Yıldırım, T. Kıvak, M. Sarıkaya ve Ş. Şirin, “Evaluation of tool wear, surface roughness/topography and chip morphology when machining of Ni-based alloy 625 under MQL, Cryogenic Cooling and CryoMQL,” *Journal of Materials Research and Technology*, c. 9, s. 2, ss. 2079-2092, 2020.

[15] S. Asadauskas, J.H. Perez ve J.L. Duda, “Lubrication properties of castor oil-potential basestock for biodegradable lubricants,” *Tribology & Lubrication Technology*, c. 53, s. 12, ss. 35.1997.

[16] H. Gürbüz, U. Şekerve F. Kafkas, “Effects of cutting tool forms on the surface integrity in turning of AISI 316L Stainless Steel,” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, c. 35, ss. 225-240, 2020.

[17] E. Çelik, T. Kıvak ve Ş. Şirin, “Dubleks paslanmaz çeliğinin farklı soğutma/yağlama yöntemleri altında tormalanmasında kesme sıcaklığının optimizasyonu,” *VII. Uluslararası Fen, Mühendislik ve Mimarlık Bilimlerinde Akademik Çalışmalar Sempozyumu ISMS*, Ankara, Türkiye, 2019, ss. 512-524.

[18] Ş. Şirin ve T. Kıvak, “Performances of different eco-friendly nanofluid lubricants in the milling of Inconel X-750 Superalloy,” *Journal of Tribology International*, c. 137, ss. 180-192, 2019.

[19] Ç. V. Yıldırım, T. Kıvak, M. Sarıkaya ve F. Erzincanlı, “Determination of MQL parameters contributing to sustainable machining in the milling of Nickel-Base Superalloy Waspaloy,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, c. 42, s. 11, ss. 4667-4681, 2017.

[20] E. Çelik, “AISI 2507 süper dubleks paslanmaz çeliğin tormalanmasında hibrit soğutma/yağlama tekniklerinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı üzerindeki etkisi,” Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2019.

[21] T. Kıvak, “Optimization of surface roughness and flank wear using the taguchi method in milling of hadfield steel with PVD and CVD coated inserts,” *Measurement*, c. 50, s. 1, ss. 19-28, 2014.